

DIN V 5031-100

DIN

ICS 17.180.01

Vornorm

**Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik –
Teil 100: Über das Auge vermittelte, nichtvisuelle Wirkung des Lichts
auf den Menschen –
Größen, Formelzeichen und Wirkungsspektren**

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

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

Gesamtumfang 16 Seiten

Normenausschuss Lichttechnik (FNL) im DIN



Inhalt

	Seite
Vorwort	3
Einleitung	3
1 Anwendungsbereich	4
2 Normative Verweisungen	4
3 Begriffe	4
4 Biologische Wirkungen des Lichts	8
4.1 Allgemeines	8
4.2 Suppression von Melatonin in der Nacht	9
4.3 Verschiebung der circadianen Phase	11
4.4 Änderung der circadianen Amplitude	12
4.5 Aktivierung mit Licht	12
4.6 Behandlung saisonal abhängiger Depressionen (SAD)	12
Anhang A (informativ) Spektrale Energieverteilungen moderner Lichtquellen	13
Literaturhinweise	16

Vorwort

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

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

Zur vorliegenden Vornorm wurde kein Entwurf veröffentlicht.

Erfahrungen mit dieser Vornorm sind erbeten

- vorzugsweise als Datei per E-Mail an fnl@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 den NA 058-00-27 AA.

Einleitung

Seit dem Nachweis der melanopsinhaltigen Ganglienzellen beim Menschen und deren spektraler Empfindlichkeit im Blauen ist es nicht mehr ausreichend, optische Strahlung ausschließlich nach der in der DIN 5031-3 beschriebenen photometrischen Wirkungsfunktion zu bewerten.

Schmalbandiges kurzwelliges Licht bewirkt abhängig vom Zeitpunkt der Einwirkung eine akute Unterdrückung der Melatoninausschüttung, einen Anstieg der Herzrate, beeinflusst die Thermoregulation, verstärkt Wachheit, verändert die Frequenz im Elektroenzephalogramm und verschiebt die Phase des circadianen Systems. Darüber hinaus gibt es sehr schnelle Reaktionen (innerhalb einiger Sekunden) auf kurzwelliges Licht wie z. B. den Pupillenreflex oder Veränderungen der Hirnaktivität.

Unter dem Begriff „biologische Wirkungen“, der im Folgenden in dieser Vornorm verwendet wird, werden diese oben genannten nicht visuellen Effekte, die über das Auge vermittelt werden, verstanden.

Da die Datenlage noch nicht gesichert ist, müssen bei neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen die aufgeführten Wirkungsspektren an diese Erkenntnisse angepasst werden.

Die Bedeutung der biologischen Wirkung von Licht auf den Menschen ist so groß, dass es in diesem frühen Stadium der Erkenntnisse sinnvoll ist, eine Vornorm zu erstellen, damit einheitliche Bewertungsverfahren eingesetzt werden.

1 Anwendungsbereich

Diese Vornorm legt die spektrale Bewertung der optischen Strahlung im sichtbaren Bereich zur Beurteilung biologischer Wirkungen fest. Weiterhin werden in dieser Vornorm Begriffe und Wirkungsspektren zur Charakterisierung von Licht hinsichtlich seiner biologischen Wirkungen festgelegt.

Diese Vornorm ermöglicht eine vereinheitlichte Bewertung von Lichtquellen und Beleuchtungssituationen, unabhängig davon, ob die Wirkungsspektren eine exakte Beschreibung der biologischen Wirkung der optischen Strahlung liefern.

2 Normative Verweisungen

Die folgenden zitierten Dokumente sind für die Anwendung dieses Dokuments erforderlich. 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 — Teil 3: Größen, Formelzeichen und Einheiten der Lichttechnik*

DIN 5033-7, *Farbmessung — Teil 7: Messbedingungen für Körperfarben*

CIE Report 15, *Colorimetry*

3 Begriffe

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

3.1

biologische Wirkung von Licht

durch Licht zusätzlich zur visuellen Wahrnehmung über das Auge vermittelten Auswirkungen auf Physiologie und Verhalten

3.2

biologische Bewertung

X_{biol}

im Hinblick auf die biologische Wirkung der Strahlung bewertete Größe nach Gleichung (1)

$$X_{\text{biol}} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{\text{biol}}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

Dabei ist

X_{biol} die biologisch wirksame Strahlungsgröße;

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

$s_{\text{biol}}(\lambda)$ die relative spektrale Strahlungsempfindlichkeit des betrachteten biologischen Vorganges, bezogen auf den Maximalwert $s_{\text{biol,max}}(\lambda) = 1$ (Wirkungsspektrum, spektrale Wirkungsfunktion);

λ_1, λ_2 die Grenzwellenlängen für den Empfindlichkeitsbereich entsprechend Tabelle 3.

ANMERKUNG 1 Gleichung (1) setzt voraus, dass sich die Gesamtwirkung additiv aus den Einzelwirkungen monochromatischer Strahlung zusammensetzt (Gesetz nach Abney). Wissenschaftliche Erkenntnisse deuten darauf hin, dass dies bei biologischen Wirkungen in erster Näherung gilt [1].

ANMERKUNG 2 Gleichung (1) gilt für 25-jährige Personen; Korrekturfaktoren für andere Altersgruppen sind in 3.4 aufgeführt.

ANMERKUNG 3 Die biologische Wirkung hängt im Allgemeinen nicht linear von der biologisch wirksamen Strahlung ab.

3.3 biologischer Wirkungsfaktor

$a_{\text{biol } v}$

Verhältnis der biologisch wirksamen Strahlungsgröße zur mit der Empfindlichkeit für Tagessehen bewerteten photometrisch wirksamen Strahlungsgröße nach Gleichung (2)

$$a_{\text{biol } v} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{\text{biol}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} X_{\lambda}(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (2)$$

Dabei ist

$a_{\text{biol } v}$ der biologische Wirkungsfaktor;

$s_{\text{biol}}(\lambda)$ die relative spektrale Strahlungsempfindlichkeit des betrachteten biologischen Vorganges, bezogen auf den Maximalwert $s_{\text{biol,max}}(\lambda) = 1$ (Wirkungsspektrum, spektrale Wirkungsfunktion);

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

$V(\lambda)$ der spektrale Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagessehen nach DIN 5031-3;

λ_1, λ_2 die Grenzwellenlängen für den Empfindlichkeitsbereich entsprechend Tabelle 3.

ANMERKUNG 1 Der biologische Wirkungsfaktor ist eine dimensionslose Größe.

ANMERKUNG 2 Ist eine photometrische Größe X_v (z. B. Leuchtdichte) für Tagessehen bekannt, lässt sich mit dem biologischen Wirkungsfaktor die entsprechende biologische Bewertung X_{biol} nach Gleichung (3) ermitteln.

$$X_{\text{biol}} = K_m^{-1} \cdot X_v \cdot a_{\text{biol } v} \quad (3)$$

Dabei ist

X_v die photometrische Größe entsprechend DIN 5031-3;

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

ANMERKUNG 3 Für eine bessere Vergleichbarkeit sollten die Wirkungsfaktoren auf drei signifikante Stellen angegeben werden.

3.4**Altersabhängige Korrekturfaktoren****3.4.1****Korrekturfaktor für das Alter bei biologischen Wirkungen von Licht** $k_{\text{biol}}(A)$

Verhältnis der biologischen Wirkung von Licht für Personen mit dem Alter A zu derjenigen von 25-jährigen Personen nach Gleichung (4)

$$k_{\text{biol}}(A) = k_{\text{biol trans}}(A) \cdot k_{\text{Pupille}}(A) \quad (4)$$

Dabei ist

$k_{\text{biol trans}}(A)$ der vom Alter A abhängige Korrekturfaktor für die Trübung der Augenmedien nach 3.4.2;

$k_{\text{Pupille}}(A)$ der vom Alter A abhängige Korrekturfaktor für die Pupillenverkleinerung nach 3.4.3.

Die optische Dichte $D(\lambda)$ und die optische Transmission $\tau(\lambda)$ für die Altersgruppen 25, 50 und 75 Jahre in Abhängigkeit der Wellenlänge λ sind für ausgewählte Wellenlängen in Tabelle 1 aufgeführt.

ANMERKUNG 1 Der Korrekturfaktor für das Alter ist eine dimensionslose Größe.

ANMERKUNG 2 Ist die photometrische Größe X_v für Tagessehen bekannt, lässt sich daraus eine altersabhängige biologische Wirkung von Licht $X_{\text{biol } A}$ nach Gleichung (5) berechnen:

$$X_{\text{biol } A} = K_m^{-1} \cdot X_v \cdot a_{\text{biol } v} \cdot k_{\text{biol}}(A) \quad (5)$$

Dabei ist

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

ANMERKUNG 3 Der Korrekturfaktor berücksichtigt nur die Trübung der Augenmedien und die Verkleinerung der Pupille mit dem Alter, nicht aber mögliche altersbedingte Veränderungen der physiologischen Prozesse, welche den biologischen Wirkungen von Licht zugrunde liegen.

3.4.2**Korrekturfaktor für die altersabhängige Trübung der Augenmedien** $k_{\text{biol trans}}(A)$

Verhältnis des spektral für biologische Lichtwirkungen gewichteten Transmissionsgrads der Augenmedien von Personen mit dem Alter A zu demjenigen von 25-jährigen Personen nach Gleichung (6)

$$k_{\text{biol trans}}(A) = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_\lambda(\lambda) \cdot \frac{\tau(\lambda, A)}{\tau(\lambda, A = 25)} \cdot s_{\text{biol}}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} X_\lambda(\lambda) \cdot s_{\text{biol}}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6)$$

Dabei ist

$\tau(\lambda, A)$ der spektrale Transmissionsgrad der Augenmedien für das Alter A (siehe Anmerkung 2).

ANMERKUNG 1 Gleichung (6) geht davon aus, dass die relative spektrale Strahlungsempfindlichkeit $s_{\text{biol}}(\lambda)$ bei 25-jährigen Personen ermittelt wurde.

ANMERKUNG 2 Der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda, A)$ der Augenmedien für das Alter A kann entsprechend [9] nach den Gleichungen (7a) und (7b) ermittelt werden:

$$\tau(\lambda, A) = 10^{(-D(\lambda, A))} \tag{7a}$$

Mit der optischen Dichte $D(\lambda, A) =$

$$\begin{aligned} &= 0,111 + (0,225 + 0,000\,031 \cdot A^2) \cdot (400/\lambda)^4 + \\ &+ \exp\left(-0,003\,249 \cdot (\lambda - 273)^2\right) \cdot 151,549\,2 + \\ &+ \exp\left(-0,000\,841 \cdot (\lambda - 370)^2\right) \cdot (2,125\,74 - 0,000\,134\,19 \cdot A^2) + \\ &+ \exp\left(-0,000\,441 \cdot (\lambda - 325)^2\right) \cdot (0,705\,05 + 0,002\,222\,70 \cdot A^2) + \\ &+ \exp\left(-0,000\,064 \cdot (\lambda - 325)^2\right) \cdot (0,022\,88 + 0,000\,188\,76 \cdot A^2) \end{aligned} \tag{7b}$$

Tabelle 1 — Optische Dichte $D(\lambda)$ und optische Transmission $\tau(\lambda)$ für die Altersgruppen 25, 50 und 75 Jahre in Abhängigkeit der Wellenlänge λ

Wellenlänge λ nm	Optische Dichte $D(\lambda, 25)$	Optische Transmission $\tau(\lambda, 25)$	Optische Dichte $D(\lambda, 50)$	Optische Transmission $\tau(\lambda, 50)$	Optische Dichte $D(\lambda, 75)$	Optische Transmission $\tau(\lambda, 75)$
400	1,586 794 29	0,025 894 39	2,122 598 31	0,007 540 53	3,015 605 03	0,000 964 71
450	0,326 896 22	0,471 089 89	0,496 468 09	0,318 809 98	0,779 087 88	0,166 307 61
500	0,230 940 84	0,587 569 39	0,304 607 67	0,495 897 97	0,427 385 72	0,373 778 47
550	0,184 883 35	0,653 306 01	0,215 005 61	0,609 529 02	0,265 209 39	0,542 988 47
650	0,146 209 68	0,714 151 45	0,154 955 8	0,699 913 23	0,169 532 67	0,676 810 88
700	0,137 073 19	0,729 334 58	0,143 314 29	0,718 928 52	0,153 716 11	0,701 913 97
750	0,130 773 39	0,739 991 29	0,135 479 58	0,732 015 73	0,143 323 24	0,718 913 71

3.4.3

Korrekturfaktor für die altersabhängige Pupillenverkleinerung

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

Verhältnis der Pupillenfläche von Personen mit dem Alter A zu derjenigen von 25-jährigen Personen nach Gleichung (8)

$$k_{\text{Pupille}}(A) = [1 - c \cdot (A - 25)]^2 \tag{8}$$

Dabei ist

$$c = 0,005\,59 \text{ (siehe Anmerkung).}$$

Grundlage für Gleichung (8) sind die Untersuchungen nach [10].

Tabelle 2 — Korrekturfaktor für die altersabhängige Pupillenverkleinerung nach Gleichung (8)

	$A = 25$	$A = 50$	$A = 75$
$k_{\text{Pupille}}(A)$	1	0,740	0,519

Die nach Gleichung (8) berechneten Korrekturfaktoren für die altersabhängige Pupillenverkleinerung für die Altersgruppen 25, 50 und 75 Jahren sind in Tabelle 2 aufgeführt.

ANMERKUNG Eigentlich ist der Faktor c in Gleichung (8) von der Adaptationsleuchtdichte L abhängig. Da die Adaptationsleuchtdichte im Allgemeinen unbekannt ist, wird jedoch ein fester Faktor für die generelle Anwendung empfohlen. Für $c = 0,005\ 59$ wird $L = 200\ \text{cd/m}^2$ vorausgesetzt. Der dadurch verursachte relative Fehler von $k_{\text{Pupille}}(A)$ für L zwischen 10 und $1\ 000\ \text{cd/m}^2$ bleibt für $A < 75$ unter 10 %. Weicht die Leuchtdichteverteilung nicht stark von der untersuchten Situation in [10] ab, können andere Adaptationsleuchtdichten L näherungsweise mit einem leuchtdichteabhängigen Faktor $c(L)$ nach (9) berücksichtigt werden:

$$c(L) = m_1 + m_2 \cdot \lg L + m_3 \cdot (\lg L)^2 \quad (9)$$

mit $m_1 = 0,006\ 477$; $m_2 = 0,000\ 038$ und $m_3 = -0,000\ 184$

4 Biologische Wirkungen des Lichts

4.1 Allgemeines

Biologische Wirkungen sind in Tabelle 3 aufgeführt und werden nach bisherigen Erkenntnissen nicht über die Haut, sondern über Rezeptoren im Auge vermittelt. Dies sind im Wesentlichen die melanopsinhaltenen retinalen Ganglienzellen. Daneben spielen Zapfen und Stäbchen eine Rolle, deren Bedeutung nach heutigem Wissenstand nicht ausreichend bekannt ist.

Entsprechend den in Tabelle 3 angeführten biologischen Wirkungen wird in Gleichung (1) zur Kennzeichnung der jeweiligen biologischen Strahlungsgröße statt des Index „biol“ der jeweils maßgebende Index gesetzt.

BEISPIEL Der Index „ms“ wird zur Kennzeichnung der Strahlungsgrößen für die Melatoninsuppression verwendet.

Tabelle 3 — Biologische Lichtwirkungen – Index, Bereich der spektralen Empfindlichkeit mit Grenzwellenlängen λ_1 und λ_2 , sowie Wellenlänge der maximalen Empfindlichkeit λ_{max}

Siehe Abschnitt	Biologische Wirkung	Index	λ_1 nm	λ_2 nm	λ_{max} nm
4.2	Suppression von Melatonin in der Nacht	ms	380	580	450
4.3	Verschiebung der circadianen ^a Phase	cp	380 ^b	580 ^b	450 ^b
4.4	Änderung der circadianen Amplitude	ca	380 ^b	580 ^b	450 ^b
4.5	Aktivierung mit Licht	ak	380 ^b	580 ^b	450 ^b
4.6	Behandlung saisonal abhängiger Depressionen (SAD)	sad	380 ^c	780 ^c	555 ^c

^a Übereinstimmend mit der internationalen und der deutschsprachigen Fachliteratur wird „circadian“ mit zwei „c“ geschrieben und nicht – wie im Duden angegeben – mit „z“ und „k“.

^b Da für die Verschiebung der circadianen Phase und für die Aktivierung die Wirkungsspektren und die Grenzwellenlängen noch unbekannt sind, werden vorläufig die Werte für die Suppression von Melatonin übernommen (siehe 4.3 und 4.4).

^c Da für die Behandlung saisonal abhängiger Depressionen (SAD) die Wirkungsspektren und die Grenzwellenlängen noch unbekannt sind, werden vorläufig die Werte des spektralen Hellempfindlichkeitsgrades für Tagessehen nach DIN 5031-3 übernommen (siehe 4.6).

4.2 Suppression von Melatonin in der Nacht

Als Basis für die Beschreibung der spektralen Empfindlichkeit hinsichtlich der Melatoninunterdrückung werden [2], [3] und [4] herangezogen.

Die Kennzeichnung der Strahlungsgrößen für Melatoninsuppression erfolgt nach Gleichung (10):

$$X_{ms} = \int_{\lambda_1=380\text{ nm}}^{\lambda_2=580\text{ nm}} X_{\lambda}(\lambda) \cdot s_{ms}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (10)$$

Dabei ist

- X_{ms} die wirksame Strahlungsgröße bezüglich der Melatoninsuppression;
- $X_{\lambda}(\lambda)$ die spektrale strahlungsphysikalische Größe;
- $s_{ms}(\lambda)$ die relative spektrale Empfindlichkeit für die Melatoninsuppression.

Die Werte der spektralen Wirkungsfunktion für Melatoninsuppression $s_{ms}(\lambda)$ in Abhängigkeit der Wellenlänge sind in Tabelle 4 aufgeführt.

Die Daten aus [2] und [3] wurden bei an Dunkelheit adaptierten Personen zur Zeit des nächtlichen Melatoninmaximums bei medikamentös geweiteten Pupillen gemessen.

Tabelle 4 — Wirkungsspektrum für Unterdrückung von Melatonin in der Nacht $s_{ms}(\lambda)$ in Abhängigkeit von der Wellenlänge λ

λ nm	$s_{ms}(\lambda)$
380	0,002
385	0,004
390	0,011
395	0,024
400	0,063
405	0,128
410	0,231
415	0,355
420	0,486
425	0,615
430	0,737
435	0,850
440	0,949
445	0,987

λ nm	$s_{ms}(\lambda)$
450	1,000
455	0,997
460	0,994
465	0,987
470	0,972
475	0,946
480	0,907
485	0,854
490	0,793
495	0,727
500	0,658
505	0,588
510	0,517
515	0,447

λ nm	$s_{ms}(\lambda)$
520	0,378
525	0,312
530	0,249
535	0,192
540	0,142
545	0,101
550	0,073
555	0,055
560	0,04
565	0,027
570	0,017
575	0,011
580	0,007

ANMERKUNG 1 Das Wirkungsspektrum für Unterdrückung von Melatonin in der Nacht $s_{ms}(\lambda)$ von Tabelle 4 wird in Bild 1 graphisch dargestellt.

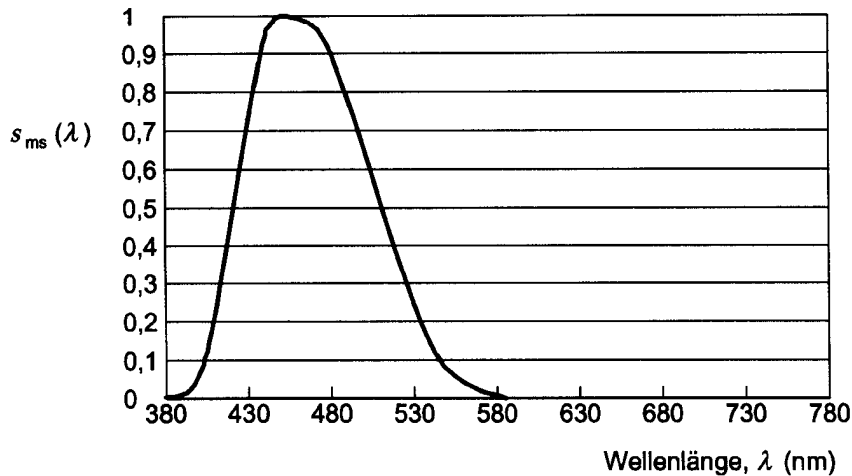


Bild 1 — Wirkungsspektrum für Unterdrückung von Melatonin in der Nacht $s_{ms}(\lambda)$

ANMERKUNG 2 Wirkungsfaktoren und Korrekturfaktoren für das Alter für die Melatoninsuppression mit verschiedenen Lichtarten nach DIN 5033-7 und CIE Report 15 sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5 — Wirkungsfaktoren für Melatoninsuppression und Korrekturfaktoren für die altersabhängige Linsentransmission bei verschiedenen Lichtarten nach DIN 5033-7 und CIE Report 15.2, berechnet nach 3.3 und 3.4 unter Zugrundelegung der Tabelle 3.

Lichtart	$a_{ms\ v}$	$k_{\text{biol trans}}^{(25)}$	$k_{\text{biol trans}}^{(50)}$	$k_{\text{biol trans}}^{(75)}$
Normlichtart A (Glühlampe, $T_f = 2\ 856\ \text{K}$)	0,376	1,000	0,773	0,527
Lichtart B (Sonnenlicht)	0,759	1,000	0,741	0,473
Lichtart G (Vakuum-Glühlicht)	0,267	1,000	0,790	0,554
Lichtart F10 nach CIE (FL , $T_f = 5\ 000\ \text{K}$)	0,654	1,000	0,724	0,446
Lichtart F11 nach CIE (FL , $T_f = 4\ 000\ \text{K}$)	0,522	1,000	0,726	0,451
Lichtart F12 nach CIE (FL , $T_f = 3\ 000\ \text{K}$)	0,342	1,000	0,733	0,468
Lichtart D50 (Tageslicht $T_f = 5\ 000\ \text{K}$)	0,749	1,000	0,745	0,480
Lichtart D55 (Tageslicht $T_f = 5\ 500\ \text{K}$)	0,820	1,000	0,740	0,472
Normlichtart D65 (nat. Tageslicht)	0,941	1,000	0,732	0,461
Lichtart D75 (Tageslicht $T_f = 7\ 500\ \text{K}$)	1,040	1,000	0,727	0,453
Lichtart P (Petroleum/Kerzenlicht)	0,167	1,000	0,811	0,590
Lichtart Xe (Xenonlicht)	0,918	1,000	0,731	0,459

Für die Lichtarten in der Tabelle 6 ist die spektrale Verteilung bereits in anderen Normen festgelegt. Diese entsprechen jedoch neben dem Tageslicht im Wesentlichen nur konventionellen Lichtquellen, während in neueren Anwendungen in zunehmendem Maße Leuchtdioden mit Farbtemperaturen zwischen 2 700 K und 7 000 K und Leuchtstofflampen mit sehr hohen Farbtemperaturen zum Einsatz kommen. Daher sind in der Tabelle 6 typische Wirkungsfaktoren und altersabhängige Korrekturfaktoren für verschiedene dieser Lichtquellen aufgeführt. Für diese Lichtquellen typische spektrale Verteilungen sind in der Tabelle A.1 aufgeführt.

Tabelle 6 — Wirkungsfaktoren für Melatoninsuppression und Korrekturfaktoren für die altersabhängige Linsentransmission bei verschiedenen modernen Lichtquellen berechnet nach 3.3 und 3.4 unter Zugrundelegung der Tabelle 3 und typischen spektralen Verteilungen dieser Lichtquellen (s. Tabelle A.1)

Lichtart	$a_{ms\ v}$	$k_{biol}(25)$	$k_{biol}(50)$	$k_{biol}(75)$
LED, weiß ($T_f = 3\ 000\ K$)	0,341	1,000	0,768	0,511
LED, weiß ($T_f = 4\ 200\ K$)	0,609	1,000	0,773	0,515
LED, weiß ($T_f = 5\ 500\ K$)	0,740	1,000	0,745	0,470
LED, weiß ($T_f = 6\ 500\ K$)	0,807	1,000	0,726	0,444
Leuchtstofflampe, weiß ($T_f = 8\ 000\ K$)	0,981	1,000	0,718	0,434
Leuchtstofflampe, weiß ($T_f = 14\ 000\ K$)	1,23	1,000	0,706	0,414

ANMERKUNG Die oben genannten weißen LEDs erzeugen ihr Licht aus der Mischung einer Blaukomponente, die auf die Elektrolumineszenz im Halbleiter zurückgeht, mit dem Licht, das durch eine teilweise Konvertierung dieses blauen Lichts in einer Leuchtstoffschicht entsteht. Die genannten LEDs unterscheiden sich jeweils durch die Zusammensetzung der verwendeten Leuchtstoffe und durch die spektrale Verteilung der anregenden Lumineszenzstrahlung. Bei den LEDs werden Typen mit anderen Farbtemperaturen z. B. durch Sortieren der Grundtypen (Binning) erreicht. Abhängig von Hersteller und LED-Type können auch LED mit gleichen Farbtemperaturen unterschiedliche spektrale Verteilungen aufweisen. Die Angaben in Tabelle 6 sind daher ebenso wie die spektralen Verteilungen in Tabelle A.1 als typische Werte zu sehen. Entsprechendes gilt für die aufgeführten Leuchtstofflampen. Das abgestrahlte Licht wird bei Leuchtstofflampen im Wesentlichen durch die Leuchtstoffmischung bestimmt. Auch hier können abhängig von Hersteller und Type unterschiedliche spektrale Verteilungen zu gleichen Farbtemperaturen führen. Daher sind die Angaben in den Tabellen 6 und A.1 als typische Werte für aktuelle Leuchtstofflampen mit hohen Farbtemperaturen zu sehen.

4.3 Verschiebung der circadianen Phase

Viele biologische Vorgänge werden beim Menschen durch die Innere Uhr beeinflusst, welche unabhängig vom äußeren Tag-Nacht-Ablauf neuronale und hormonelle Prozesse nach einem so genannten circadianen Rhythmus steuert. Der circadiane Rhythmus beeinflusst die Tageszeitabhängigkeit von Wachheit und Schlaf, die Ausschüttung von Melatonin und anderer Hormone, sowie andere Parameter des Organismus, wie z. B. die Körperkerntemperatur. Licht ist in der Lage, den circadianen Rhythmus in der zeitlichen Phase zu verschieben und auch in der Amplitude zu ändern (siehe 4.4). Man bezeichnet Licht in diesem Zusammenhang als Zeitgeber für die innere Uhr. Von allen Zeitgebern, welche die Innere Uhr beeinflussen, hat Licht die stärkste Wirkung. Die Stärke dieser Wirkung und die zeitliche Richtung einer durch Licht bewirkten Phasenverschiebung ist abhängig von der Phasenlage selbst während der die Lichtexposition auftritt. So kann Licht die circadiane Phase sowohl nach vorne als auch nach hinten verschieben, bzw. eine Stabilisierung des circadianen Rhythmus fördern.

Eine spektrale Wirkungsfunktion für die Verschiebung der circadianen Phase liegt noch nicht vor. Untersuchungen (siehe [5]) deuten darauf hin, dass sie eher dem Wirkungsspektrum für die Unterdrückung von Melatonin entspricht als dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagessehen nach DIN 5031-3. Es wird daher Gleichung (11) festgelegt:

$$s_{cp}(\lambda) = s_{ms}(\lambda) \tag{11}$$

ANMERKUNG Mit Gleichung (11) gelten die Tabellen 3 und 4 sowie Bild 1 hier sinngemäß.

4.4 Änderung der circadianen Amplitude

Analog zu 4.3 beeinflusst Licht die Amplitude des circadianen Systems. So wird z. B. die Melatonin-ausschüttung in der Nacht gesteigert durch Licht am Tage. Obwohl eine in Studien bestimmte spektrale Wirkungsfunktion noch nicht vorliegt, ist davon auszugehen, dass diese Wirkung über die gleichen Photorezeptoren im Auge vermittelt wird, die auch für die nächtliche Melatoninunterdrückung verantwortlich sind. Daher wird die spektrale Wirkungsfunktion für die Änderung der circadianen Amplitude mit Gleichung (12) festgelegt.

$$s_{ca}(\lambda) = s_{ms}(\lambda) \quad (12)$$

ANMERKUNG Mit Gleichung (12) gelten die Tabellen 3 und 4 sowie Bild 1 hier sinngemäß.

4.5 Aktivierung mit Licht

Abbildung von hellem Licht auf die Netzhaut des Auges steigert die subjektive Wachheit. Solche aktivierende Lichtwirkungen konnten auch objektiv an physiologischen Größen nachgewiesen werden.

Eine spektrale Wirkungsfunktion für die Aktivierung mit Licht liegt noch nicht vor. Untersuchungen (siehe [6]) deuten darauf hin, dass sie eher dem Wirkungsspektrum für die Unterdrückung von Melatonin entspricht als dem spektralen Hellempfindlichkeitsgrad $V(\lambda)$ für Tagessehen nach DIN 5031-3. Es wird daher Gleichung (13) festgelegt:

$$s_{ak}(\lambda) = s_{ms}(\lambda) \quad (13)$$

ANMERKUNG Mit Gleichung (13) gelten die Tabellen 3 und 4 sowie Bild 1 hier sinngemäß.

4.6 Behandlung saisonal abhängiger Depressionen (SAD)

Die so genannte Lichttherapie weist gute Erfolge zur Behandlung von Patienten mit saisonal abhängigen Depressionsformen (SAD) auf. Solche Patienten, welche etwa 3 % der Bevölkerung ausmachen, haben im Winter ein erhöhtes Schlafbedürfnis, verspüren eine erhöhte Lust nach Kohlehydraten, fühlen sich traurig und besorgt, sind oft unproduktiv und machen vermehrt Fehler, sie versuchen Kontakte zu vermeiden und sind öfter krank. Von Frühjahr bis Herbst fehlen diese Symptome [8]. Weitere etwa 9 % siehe [12] der Bevölkerung erleben eine nicht behandlungsbedürftige Form (S-SAD). Insgesamt etwa 25 % der Normalbevölkerung verspüren saisonale Veränderungen in der Befindlichkeit und dem Verhalten [11].

Bei der Behandlung von SAD hat eine Behandlung mit hohen Beleuchtungsstärken um 5 000 lx bis 10 000 lx verbunden mit hohen Farbtemperaturen um 5 000 K bis 6 000 K in Studien gute Erfolge erzielt. Vergleiche verschiedener Farbtemperaturen zwischen 4 000 K und 14 000 K haben bei den genannten hohen Beleuchtungsstärken von 10 000 lx keine Unterschiede in der Wirkung gezeigt. Es wird vermutet, dass die biologische Wirkung bei diesen hohen Beleuchtungsstärken im Bereich der Sättigung ist. Da mit den o. g. Parametern eine bewährte Behandlungsmethode für SAD verfügbar ist, bestand bisher keine Notwendigkeit, gezielt nach einem Wirkungsspektrum zu forschen.

Eine spektrale Wirkungsfunktion für die Behandlung saisonal abhängiger Depressionen (SAD) mit Licht liegt daher noch nicht vor. Untersuchungen (siehe [7]) deuten bisher nicht auf eine andere Wirkungsfunktion hin als diejenige des spektralen Hellempfindlichkeitsgrads $V(\lambda)$ für Tagessehen nach DIN 5031-3. Es wird daher auch unter Berücksichtigung der bei der SAD-Therapie gängigen Praxis, Gleichung (14) festgelegt:

$$s_{SAD}(\lambda) = V(\lambda) \quad (14)$$

ANMERKUNG Mit Gleichung (14) beträgt für SAD der Wirkungsfaktor $a_{SAD} = 1$. Korrekturfaktoren für das Alter können nicht ermittelt werden, da die $V(\lambda)$ zugrunde liegende Altersklasse unbestimmt ist.

Anhang A (informativ)

Spektrale Energieverteilungen moderner Lichtquellen

Da die spektralen Energieverteilungen verschiedener moderner Lichtquellen, die in aktuellen Anwendungen eine zunehmende Rolle spielen, in keiner bestehenden Norm aufgeführt sind, werden für solche Lichtquellen typische spektrale Energieverteilungen in der Tabelle A.1 aufgeführt. Es handelt sich dabei um weiße Leuchtdioden mit verschiedenen Farbtemperaturen und um weiße Leuchtstofflampen mit hohen Farbtemperaturen.

Tabelle A.1 — Normierte spektrale Energieverteilungen von modernen Lichtquellen

Wellenlänge λ	LED weiß ($T_f = 3\,000\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 4\,200\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 5\,500\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 6\,500\text{ K}$)	FL ($T_f = 8\,000\text{ K}$)	FL ($T_f = 14\,000\text{ K}$)
385	0,002 79	0,002 23	0,003 06	0,003 89	0,001 62	0,003 22
390	0,002 73	0,002 54	0,004 28	0,005 19	0,001 37	0,002 80
395	0,003 55	0,002 84	0,007 00	0,007 53	0,001 97	0,003 65
400	0,004 31	0,003 95	0,011 98	0,010 62	0,008 81	0,008 32
405	0,005 71	0,006 39	0,019 21	0,014 58	0,158 59	0,238 83
410	0,007 96	0,012 12	0,024 45	0,021 04	0,035 10	0,057 07
415	0,011 51	0,023 33	0,030 40	0,033 86	0,047 22	0,076 20
420	0,019 45	0,034 85	0,045 19	0,060 92	0,074 75	0,119 15
425	0,035 04	0,037 21	0,077 21	0,116 35	0,109 85	0,171 00
430	0,063 63	0,036 82	0,132 73	0,219 61	0,149 75	0,224 89
435	0,110 94	0,047 98	0,219 72	0,389 38	0,628 79	0,790 86
440	0,183 26	0,076 96	0,343 48	0,653 84	0,262 63	0,310 15
445	0,285 33	0,135 56	0,510 17	0,955 82	0,233 08	0,329 14
450	0,413 72	0,249 70	0,727 08	1,000 00	0,240 66	0,330 47
455	0,538 46	0,465 96	0,941 18	0,730 17	0,236 36	0,317 42
460	0,576 21	0,778 66	1,000 00	0,489 96	0,221 46	0,291 63
465	0,493 59	1,000 00	0,843 14	0,362 48	0,200 76	0,258 34
470	0,374 80	0,940 30	0,617 42	0,263 39	0,175 51	0,221 39
475	0,295 04	0,726 41	0,465 75	0,195 00	0,149 49	0,184 41
480	0,243 69	0,570 78	0,367 39	0,165 81	0,140 91	0,169 37
485	0,203 49	0,473 60	0,287 94	0,156 94	0,251 26	0,303 77
490	0,181 40	0,386 42	0,238 78	0,167 24	0,272 73	0,286 20
495	0,177 44	0,324 59	0,222 12	0,197 00	0,183 33	0,197 24
500	0,192 29	0,298 61	0,226 50	0,238 81	0,107 83	0,122 63
505	0,225 04	0,296 04	0,251 38	0,285 33	0,071 21	0,057 56
510	0,278 13	0,308 63	0,296 08	0,331 02	0,074 75	0,037 97
515	0,343 73	0,340 45	0,348 14	0,374 35	0,075 51	0,028 39
520	0,415 45	0,382 89	0,403 15	0,411 25	0,063 38	0,021 98

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Wellenlänge λ	LED weiß ($T_f = 3\,000\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 4\,200\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 5\,500\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 6\,500\text{ K}$)	FL ($T_f = 8\,000\text{ K}$)	FL ($T_f = 14\,000\text{ K}$)
525	0,489 03	0,429 24	0,454 48	0,439 75	0,050 51	0,017 73
530	0,562 74	0,473 58	0,498 55	0,464 37	0,044 70	0,016 87
535	0,629 60	0,516 56	0,536 08	0,481 67	0,070 45	0,066 64
540	0,693 88	0,556 21	0,565 93	0,493 69	0,517 68	0,555 99
545	0,753 48	0,589 45	0,587 95	0,502 79	1,000 00	1,000 00
550	0,803 89	0,615 47	0,602 30	0,504 77	0,313 13	0,431 39
555	0,849 87	0,638 83	0,614 10	0,507 37	0,084 85	0,097 62
560	0,888 12	0,654 52	0,620 72	0,503 84	0,021 89	0,021 26
565	0,921 48	0,665 65	0,622 39	0,497 09	0,013 28	0,012 98
570	0,949 63	0,674 83	0,617 76	0,488 50	0,012 98	0,010 81
575	0,970 34	0,679 45	0,611 73	0,476 73	0,059 34	0,051 56
580	0,986 23	0,678 62	0,602 41	0,463 81	0,159 09	0,143 10
585	0,994 56	0,676 17	0,590 63	0,446 21	0,220 96	0,205 26
590	1,000 00	0,668 81	0,574 31	0,428 04	0,163 89	0,180 86
595	0,998 27	0,659 95	0,555 67	0,408 24	0,077 27	0,089 45
600	0,994 49	0,647 11	0,535 23	0,386 22	0,053 03	0,048 48
605	0,983 97	0,630 67	0,512 17	0,363 41	0,054 55	0,028 71
610	0,969 53	0,615 40	0,487 65	0,339 92	0,547 98	0,413 24
615	0,954 63	0,595 12	0,462 17	0,317 53	0,300 51	0,216 54
620	0,928 84	0,572 15	0,434 71	0,292 55	0,171 97	0,121 95
625	0,906 83	0,550 41	0,408 32	0,270 58	0,108 33	0,116 27
630	0,879 22	0,529 03	0,380 49	0,248 51	0,098 23	0,103 91
635	0,847 40	0,502 59	0,352 34	0,227 21	0,026 01	0,021 35
640	0,814 10	0,478 60	0,326 27	0,207 18	0,015 48	0,018 68
645	0,778 51	0,451 39	0,299 80	0,188 68	0,020 35	0,020 62
650	0,741 22	0,423 96	0,275 57	0,170 69	0,032 83	0,024 69
655	0,703 29	0,399 40	0,252 85	0,154 24	0,016 29	0,015 36
660	0,664 80	0,372 17	0,229 94	0,138 28	0,017 88	0,019 42
665	0,623 93	0,346 42	0,210 38	0,124 23	0,020 13	0,023 06
670	0,583 98	0,322 39	0,191 14	0,112 19	0,016 57	0,012 01
675	0,544 10	0,298 35	0,172 51	0,099 52	0,014 90	0,012 94
680	0,505 75	0,275 76	0,155 55	0,089 22	0,016 26	0,013 61
685	0,467 80	0,254 14	0,140 41	0,079 42	0,016 36	0,014 63
690	0,431 88	0,232 90	0,126 13	0,070 79	0,013 69	0,016 37
695	0,395 24	0,212 78	0,112 93	0,063 16	0,007 93	0,009 25
700	0,363 01	0,194 54	0,101 71	0,056 13	0,005 43	0,003 20
705	0,329 45	0,175 79	0,091 31	0,049 97	0,041 67	0,023 03
710	0,300 08	0,159 37	0,082 12	0,044 35	0,050 51	0,041 07
715	0,272 06	0,145 28	0,073 26	0,038 70	0,010 33	0,011 33

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Wellenlänge λ	LED weiß ($T_f = 3\,000\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 4\,200\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 5\,500\text{ K}$)	LED weiß ($T_f = 6\,500\text{ K}$)	FL ($T_f = 8\,000\text{ K}$)	FL ($T_f = 14\,000\text{ K}$)
720	0,246 13	0,130 68	0,065 72	0,034 57	0,002 05	0,001 78
725	0,221 80	0,117 05	0,058 81	0,030 67	0,001 79	0,001 55
730	0,199 79	0,105 72	0,051 78	0,026 73	0,001 50	0,001 35
735	0,178 36	0,095 59	0,045 99	0,024 15	0,001 08	0,000 94
740	0,160 42	0,084 99	0,041 34	0,021 48	0,001 94	0,001 18
745	0,142 96	0,075 72	0,036 88	0,018 89	0,001 36	0,001 72
750	0,129 26	0,068 32	0,032 66	0,016 70	0,000 80	0,000 74
755	0,115 67	0,060 60	0,029 44	0,014 84	0,002 10	0,000 50
760	0,103 31	0,054 67	0,026 26	0,012 73	0,008 74	0,012 44
765	0,091 71	0,048 88	0,023 18	0,011 16	0,001 11	0,000 48
770	0,082 30	0,043 20	0,020 78	0,009 99	0,001 61	0,002 47
775	0,072 88	0,038 88	0,018 66	0,009 51	0,000 40	0,000 73
780	0,067 90	0,035 50	0,011 81	0,008 33	0,000 21	0,000 26

Literaturhinweise

- [1] Mariana G. Figueiro, John D. Bullough, Robert H. Parsons, Mark S. Rea (2004): Preliminary evidence for spectral opponency in the suppression of melatonin by light in humans. *NeuroReport* 15:313–316
- [2] Brainard, George C., Hanifin, J. P., Greeson, J. M., et al. Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans (2001): Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor. *The Journal of Neuroscience*, 21(16):6405–6412
- [3] Kavita Thapan, Josephine Arendt and Debra J. Skene (2001): An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans. *Journal of Physiology* 535.1: 261–267.
- [4] Gall, Dietrich (2002): Circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung *Licht* 54 (2002) 11/12, S. 1292–1297
- [5] Steven W. Lockley, George C. Brainard, Charles. A. Czeisler (2003): High Sensitivity of the Human Circadian Melatonin Rhythm to Resetting by Short Wavelength Light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 88(9):4502–4505
- [6] Christian Cajochen, Mirjam Münch, Szymon Kobińska, Kurt Kräuchi, Roland Steiner, Peter Oelhafen, Selim Orgül, Anna Wirz-Justice (2006): High Sensitivity of Human Melatonin, Alertness, Thermoregulation, and Heart Rate to Short Wavelength Light. *The Journal of Clinical Endocrinology & Metabolism* 90(3):1311–1316
- [7] G. C. Brainard, D. Sherry, R. G. Skwerer, M. Waxler, K. Kelly, N. E. Rosenthal (1990): Effects of different wavelengths in seasonal affective disorder. *Journal of Affective Disorders*, 20: 209–216.
- [8] Peter Paul A. Mersch, Hermine M. Middendorp, Antoinette L. Bouhuys, Domien G.M. Beersma, Rutger H. van den Hoofdakker: Seasonal affective disorder and latitude: a review of the literature. *Journal of Affective Disorders* V53 (1999) P35–48.
- [9] Van de Kraats J., van Norren D.: Optical density of the aging human ocular media in the visible and the UV. *J. Opt. Soc. Am. A*, V24 N7 (July 2007) P1842–1857.
- [10] Winn B., Whitaker D., Elliott D. B. Phillip N. J.: Factors affecting light-adapted pupil size in normal human subjects. *Invest Ophthalmol Vis Sci*. V35 (1994) P1132–1137.
- [11] Kasper S, Wehr TA, Bartko JJ, Gaist PA, Rosenthal NE.: Epidemiological findings of seasonal changes in mood and behavior. A telephone survey of Montgomery County, Maryland. *Arch Gen Psychiatry* (September 1989); 46(9):823–833.
- [12] Hankins MW, Peirson SN, Foster RG. Melanopsin: an exciting photopigment. *Trends Neurosci* 2008; 31(1):27–36.