

# Die Messung circadianer Strahlungsgrößen

Dietrich Gall

Technische Universität Ilmenau, PF 10 05 65, 98684 Ilmenau

## 1. Einleitung

Seit 2001 ist die Wirkungskurve der Melatoninsekretion bekannt (BRAINARD; THAPAN). Ebenso wurden die Photosensoren, die dafür verantwortlich sind, gefunden. Sie sind über die Netzhaut verteilt, ein Bildmuster kann von diesen Empfängern nicht aufgelöst werden. Als Wirkung wurde die Hemmung der nächtlichen Sekretion von Melatonin durch die Epiphyse (Zirbeldrüse) bestimmt.

Mit der Beschreibung der Suppression der Melatoninsekretion ist man nun in der Lage, circadiane Prozesse zu beschreiben und zu beeinflussen.

Definiert man sich aus den experimentell gefundenen Wirkungskurven eine verbindliche Wirkungsfunktion  $c(\lambda)$ , so kann man damit eine circadiane Metrik aufbauen (GALL/LAPUENTE; GALL). Welche bewertete Strahlungsgröße dann für die Wirkung ausschlaggebend ist, wird durch die örtlich gewichtete Bewertung der zuständigen Sensoren im Auge bestimmt (SCHIERZ).

Bei einer gleichmäßigen Verteilung der Sensoren über die Netzhaut wäre der in den Empfänger absorbierte Strahlungsfluss insgesamt entscheidend. Noch ist aber nicht sicher, ob die Sensorendichte im unteren Netzhautbereich höher ist als im oberen. Solange dies nicht geklärt ist, müssen alle zu bewertenden Strahlungsgrößen definiert werden. Die Definition der circadianen Größen sollte sich zunächst an die photometrischen Größen anlehnen, da diese Größen für die Bewertung und Dimensionierung von Beleuchtungsanlagen schon herangezogen werden. Wenn man in der Zukunft, was aus zwingenden Gründen notwendig erscheint, die circadiane Wirkung mit einbeziehen will, wäre es ratsam, nicht zu viele verschiedene Größen zu verwenden. Deshalb wird ein circadianer Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  definiert, der eine einfache Verbindung zu den photometrischen Größen herstellt.

## 2. Aufbau einer circadianen Metrik

### 2.1 Allgemeine Beschreibung photobiologischer Größen

Wie schon erwähnt, wäre es sinnvoll, für die circadiane Bewertung von Beleuchtungsanlagen Größen analog zu den photometrischen Größen zu bestimmen. Dies würde zu Einheiten führen, die an die photometrischen Größen angelehnt wären (z. B. "circadianes Lumen" o. ä.). Da es nun eine ganze Reihe von anderen biologischen Wirkungen gibt

(CIE-Publikation), die man mit ähnlichen Lichteinheiten beschreiben könnte, hat das CCPR (comité consultative pour la photométrie et radiométrie) empfohlen, solche lichttechnischen Größen nicht zu verwenden, sondern die entsprechenden, bewerteten strahlungsphysikalischen Einheiten zu nehmen.<sup>1</sup> Es sollen deshalb im weiteren nicht mehr die in einer früheren Veröffentlichung vorgeschlagenen circadianen Lichtgrößen (GALL), sondern die circadianen Strahlungsgrößen (GALL/LAPUENTE) verwendet werden. Eine photobiologisch wirksame Größe sollte als bewertete Strahlstärke beschrieben werden.

$$I_{bio} = k \int I_{e,\lambda} \cdot F_{bio}(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

$I_{bio}$  - bewertete Strahlstärke /  $I_{es}$

$I_{e\lambda}$  - spektrale Strahlstärke

$F_{bio}(\lambda)$  - Aktionsspektrum der photobiologischen Wirkung (Wirkungsfunktion, spektrale Empfindlichkeit  $s(\lambda)$ , Wirkungsspektrum)

$k$  - Konstante

Aus der bewerteten Strahlstärke können dann alle weiteren bewerteten Strahlgrößen abgeleitet werden.

Allgemein kann eine bewertete Strahlgröße  $X_{es}$  wie folgt beschrieben werden:

$$X_{es} = k \cdot \int X_{e\lambda} \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

Will man die circadiane photobiologische Wirkung beschreiben, muss für  $s(\lambda)$  die circadiane Wirkungsfunktion  $c(\lambda)$  (s. Punkt 2.2) verwendet werden.

Damit ergibt sich eine circadiane Strahlungsgröße  $X_{ec}$  zu.

$$X_{ec} = k \cdot \int X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

Der Einfachheit halber wird  $k = 1$  gewählt.

Eine photometrische bzw. lichttechnische Größe  $X_v$  wird durch die spektrale Hellempfindlichkeitskurve  $c(\lambda)$  bestimmt.

---

<sup>1</sup>\* Anmerkung: Herr P. BLATTNER (Schweiz) stellte mir freundlicherweise eine Vorveröffentlichung des CCPR zur Verfügung

$$X_v = k_m \int X_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

$$k_m = 683 \text{ lmW}^{-1}$$

Da das maximale photometrische Strahlungsäquivalent ( $k_m$ ) eine neue Einheit (Lumen) einführt, ergibt sich  $X_v$  als lichttechnische Größe.

Eine Verbindung von den circadianen und den lichttechnischen Größen kann man wie folgt schreiben:

$$\frac{X_{ec}}{X_v} = \frac{k}{k_m} \cdot \frac{\int X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (5)$$

Das Verhältnis der beiden Integrale soll als circadianer Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  bezeichnet werden (GALL/LAPUENTE).

$$a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (6)$$

(Anmerkung: Für ein energiegeliches Spektrum ist  $a_{cv} = 0,8623$ )

Zwischen den circadianen und lichttechnischen Größen besteht dann folgende Beziehung:

$$X_{ec} = \frac{a_{cv}}{k_m} \cdot X_v \quad (7)$$

Eine circadiane „lichttechnische“ Größe wäre dann

$$X_c = k_m \cdot X_{ec} = a_{cv} \cdot X_v \quad (8)$$

Laut Empfehlung des CCPR sollten diese circadianen „lichttechnischen“ Größen nicht verwendet werden. Deshalb soll in den weiteren Betrachtungen bevorzugt die dimensionslose Größe  $a_{cv}$  (circadianer Wirkungsfaktor) oder die circadianen Strahlungsgrößen herangezogen werden.

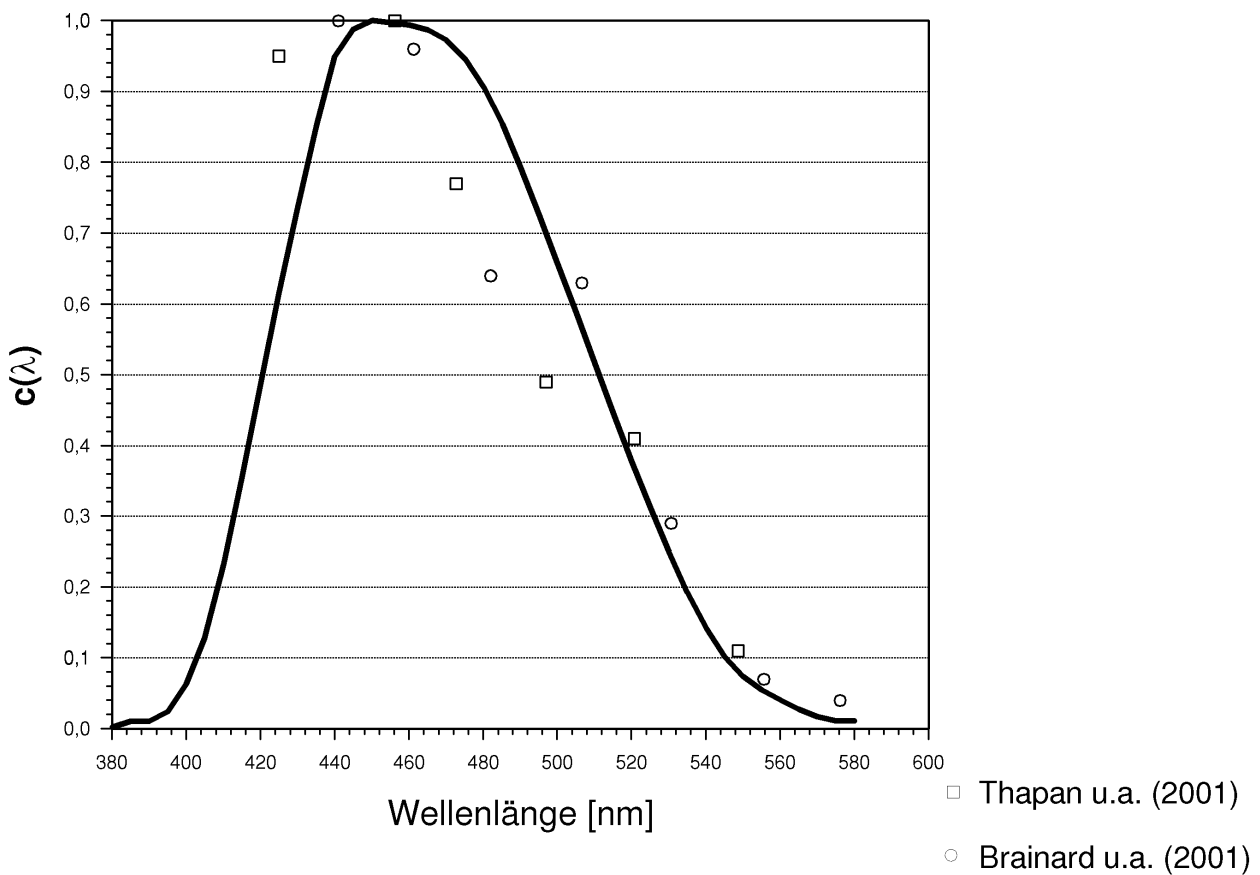
## 2.2 Circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ für die Melatoninunterdrückung

Von BRAINARD u.a. und THAPAN u.a. wurden Werte für die Wirkungsfunktion bei einzelnen Wellenlängen ermittelt (Bild 1). In diese Meßpunkte wurde eine mittlere Kurve gelegt, die im kurzwelligen Bereich durch die Transmissionskurve des menschlichen Auges ergänzt wurde (s.a. Blaulichtgefährdungskurve B(8) (ICNIRP)). Diese „glatte“ Kurve  $c(\lambda)$  soll für alle weiteren Betrachtungen herangezogen werden. Die so gewonnenen Werte für

$c(\lambda)$  werden in Tabelle 1 in 5 nm-Schritten angegeben, wobei die  $c(\lambda)$ -Kurve bei  $\lambda = 450$  nm mit  $c(450) = 1$  angenommen wird (GALL).

Wird diese  $c(\lambda)$ -Kurve für alle weiteren Betrachtungen zur circadianen Wirkung einheitlich zu Grunde gelegt, kann man analog zur  $v(\lambda)$ -Kurve eine circadiane Metrik aufbauen, die eine quantitative Erfassung der Wirkung der Parameter nach der Gleichung 3 ermöglicht. Interpoliert man die Werte in Tabelle 1 auf 1 nm-Schritte, ergibt sich eine Summe von

$$\int c(\lambda) = 96,161 \text{ (bei der } v(\lambda)\text{-Kurve ergibt sich } \int v(\lambda) = 106,856).$$



**Abb. 1:** Gemittelte circadiane Wirkungskurve  $c(\lambda)$

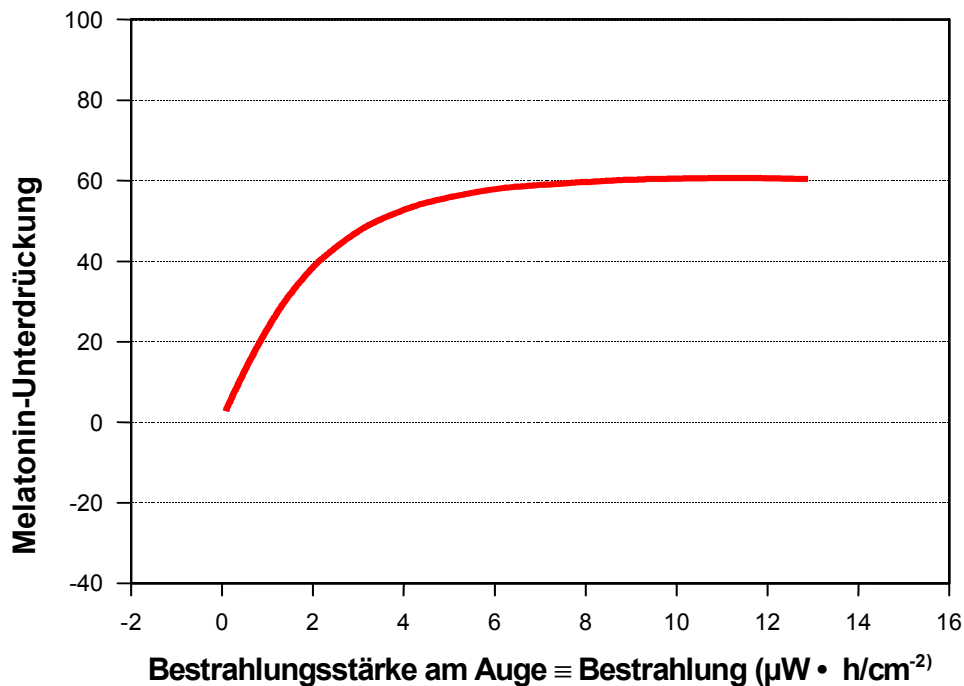
$\lambda$ [nm]	$c(\lambda)$	$\lambda$ [nm]	$c(\lambda)$
380	0.002	485	0.854
385	0.004	490	0.793
390	0.011	495	0.727
395	0.024	500	0.658
400	0.063	505	0.588
405	0.128	510	0.517
410	0.231	515	0.447
415	0.355	520	0.378
420	0.486	525	0.312
425	0.615	530	0.249
430	0.737	535	0.192
435	0.850	540	0.142
440	0.949	545	0.101
445	0.987	550	0.073
450	1.000	555	0.055
455	0.997	560	0.040
460	0.994	565	0.027
465	0.987	570	0.017
470	0.972	575	0.011
475	0.946	580	0.007
480	0.907		

**Tab. 1:** Werte für die  $c(\lambda)$ -Kurve

### 2.3 Die Auswahl geeigneter circadianer Strahlungsgrößen

Zunächst ist die Frage zu klären, welche circadianen Strahlungsgrößen für die Beschreibung der Lichtwirkung herangezogen werden sollten. SCHIERZ macht dazu einige Ausführungen. Falls die circadianen Sensoren gleichmäßig über die Netzhaut verteilt sind und nichtortsaufgelöste Signale liefern, wäre eine Angabe des circadianen Strahlungsfluss im Auge sinnvoll. Dieser Strahlungsfluss könnte mit der circadianen Beleuchtungsstärke am Auge angegeben werden. Es gibt aber auch Hinweise darauf, daß die einzelnen Netzhautareale unterschiedlich beteiligt sind. In diesem Fall müßte die circadiane Strahldichte-

verteilung ermittelt und entsprechend den örtlichen Verteilungen gewichtet werden. Für Dosisangaben bietet sich die circadiane Bestrahlung an. Über die erforderliche Dosis gibt es bereits einige Vorgaben (s. a. SCHIERZ; TRAINDER). Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse von BRAINARD u. a. zur Dosiswirkung nach Mitternacht.



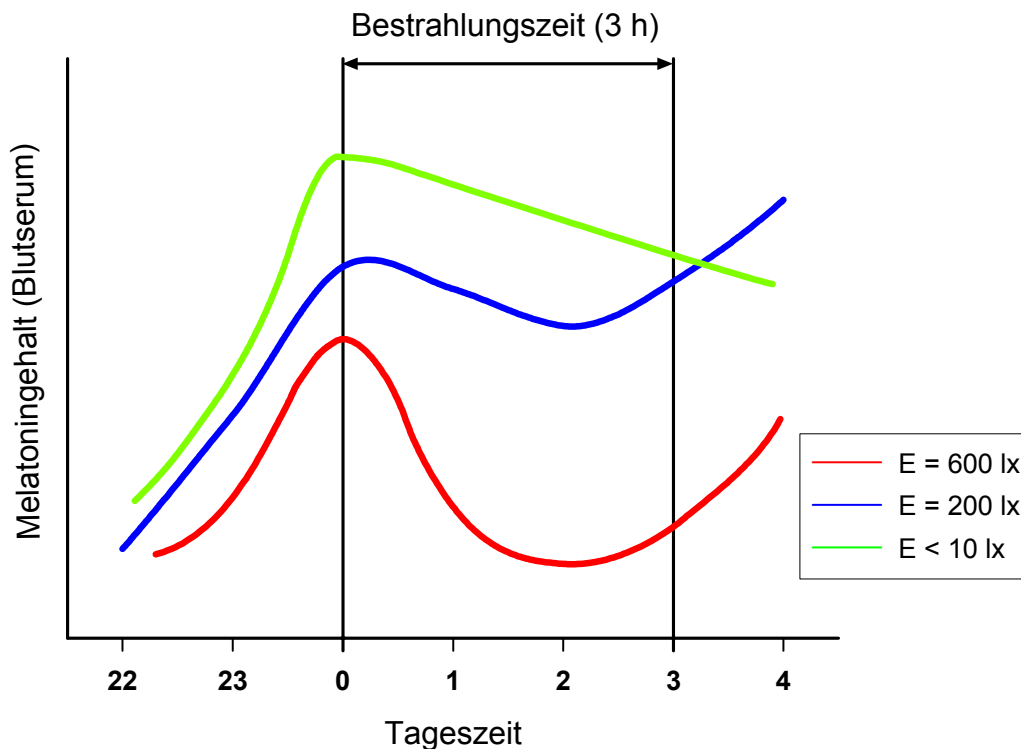
**Abb. 2:** Melatonin-Unterdrückung als Funktion der Bestrahlungsstärke

Parameter: Monochromatische Beleuchtung ( $\lambda = 509 \text{ nm}$  /  $\Delta\lambda = 10 \text{ nm}$ )

$10 \mu\text{W}/\text{cm}^{-2}$  ;  $F_v = 35 \text{ lx}$ ;  $a_{cv} = 1$

Bestrahlungsdauer: 1 Stunde (2.00 - 3.00 Uhr)

Die Melatoninausschüttung hat nach Mitternacht ihr Maximum. Wird in dieser Zeit belichtet, ist eine entsprechend hohe Melatoninunterdrückung zu erwarten (Abb. 3).



**Abb. 3:** Melatoningehalt im Blutserum bei verschiedenen Belichtungen  
(nach Mc INTYRE u.a.)

Die wirksame Dosis ist demnach auch tageszeitabhängig. Das bedeutet, dass die circadiane Strahlungsgröße je nach Tageszeit ( $t_D$ ) unterschiedlich wirksam ist. In Gleichung 3 könnte das mit der Einführung eines tageszeitabhängigen Wertes  $k(t_D)$  erfolgen. Die zu einer bestimmten Tageszeit wirksame circadiane Größe würde sich dann wie folgt ergeben.

$$X_{ec}(t_D) = k(t_D) \cdot \int X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (9)$$

$t_D$  - Tageszeit

Da in Gleichung 3  $k = 1$  genommen wurde, ergibt sich aus Gleichung 9

$$X_{ec}(t_D) = k(t_D) \cdot X_{ec} \quad (10)$$

$k(t_D)$  ist ein tageszeitabhängiger Korrekturfaktor, der im Maximum der Melatoninunterdrückung den Wert "1" hat.

Damit könnte das zeitliche Melatoninmanagement beschrieben und gesteuert werden. Bei der Ermittlung von circadianen Bestrahlungen ( $H_{ec}$ ) muss die Bestrahlungsdauer  $T$  berücksichtigt werden.

$$H_{ec} = \int_0^T E_{ec} \cdot dt \quad (11)$$

$E_{ec}$  - circadiane Bestrahlungsstärke

$H_{ec}$  - circadiane Bestrahlung

Für die tageszeitabhängige Korrektur kann näherungsweise der zeitliche Mittelwert von  $k(t_D)$  über die Bestrahlungsdauer  $T=t_{D2} - t_{D1}$  genommen werden.

$$k_m(t_{Dm}) = \frac{\int_{t_{D1}}^{t_{D2}} k(t_D) \cdot dt}{T} \quad (12)$$

$$t_{Dm} = \frac{t_{D1} + t_{D2}}{2}$$

Damit wird aus Gleichung 11

$$H_{ec}(t_{Dm}) \approx k_m(t_{Dm}) \cdot \int_0^T E_{ec} \cdot dt \quad (14)$$

Eine komplexe mathematische Beschreibung der circadianen Rhythmik als ein System aus zwei wechselseitig wirkenden Oszillatoren gibt KRONAUER u.a. an.

Aus o.g. Ausführungen sieht man, dass die Bestimmung der wirksamen circadianen Strahlungsgrößen von sehr vielen Parametern abhängig ist. Zur Vereinfachung sollten deshalb zunächst nur die maximalen und die statischen Größen nach Gln. 3 verwendet werden.

Für Beleuchtungsanlagen empfiehlt sich darüber hinaus die Verwendung des circadianen Wirkungsfaktors ( $a_{cv}$ ), da damit die Wirkungen unterschiedlicher Lichtfarben gegenüber gestellt werden können.

### 3. Messtechnische Ermittlung der circadianen Strahlungsgrößen

Die messtechnische Erfassung der circadianen Strahlungsgrößen nach Gleichung 3 kann nach zwei Methoden erfolgen:

- a. Spektrale Messung
- b. Integrale Messung mittels  $c(\lambda)$ -angepassten Empfängern



### 3.1 Spektrale Messung

Bei der spektralen Messung wird das Licht in seiner spektralen Verteilung gemessen, welche dann bei circadianen Größen mit der circadianen Wirkungskurve  $c(\lambda)$  (Tabelle 1) und bei lichttechnischen Größen mit der  $v(\lambda)$ -Kurve gewichtet wird. Mit einem entsprechenden Spektralradiometer sind diese Messungen leicht möglich. Allerdings lassen sich damit zunächst nur die circadianen Strahldichten und Bestrahlungsstärken bestimmen. Der circadiane Strahlungsfluss und die circadiane Strahlstärke müssen daraus abgeleitet werden.

Lichtquelle	circadianer Wirkungsfaktor $a_{cv}$
direkte Sonne	0,83
bewölkter Himmel	1,73
blauer Himmel	1,02
Mond	0,62
Haushaltskerze	0,20
Glühlampe	0,40
Na-Hochdrucklampe	0,21
Leuchtstofflampe	
- warmton	0,36
- neutralweiß	0,60
- Tageslicht (7100 K) TLD 965	1,18
- Biolux	1,00 - 1,15
- Bio-Licht	0,98
- True-Light	0,93 - 0,98
- Narva-Vital	0,99
LED (Blau $\lambda_{max} = 468$ nm)	6,90
LED (weiß)	1,0 ... 2,0

**Tab. 2:**  $a_{cv}$ -Werte einiger Lichtquellen

In der Tabelle 2 sind die aus einer spektralen Messung ermittelten  $a_{cv}$ -Werte einiger Lampenbeispiele aufgeführt. Wenn man z.B. die circadiane Wirkung von dem Licht des bewölkten Himmels mit dem Licht der Glühlampe vergleicht heißt das, dass die Glühlampe in ihrer Wirkung nur 40 % der des Tageslichtes entspricht. Man erkennt die geringe circadiane Wirkung bei warmen Lichtfarben und die große Wirkung bei kalten. Die Unterschiede bei den blauen LED-Lampen erklären sich aus der starken Exemplarstreuung, die sich durch unterschiedliche Wellenlängenmaxima bemerkbar macht. Nach

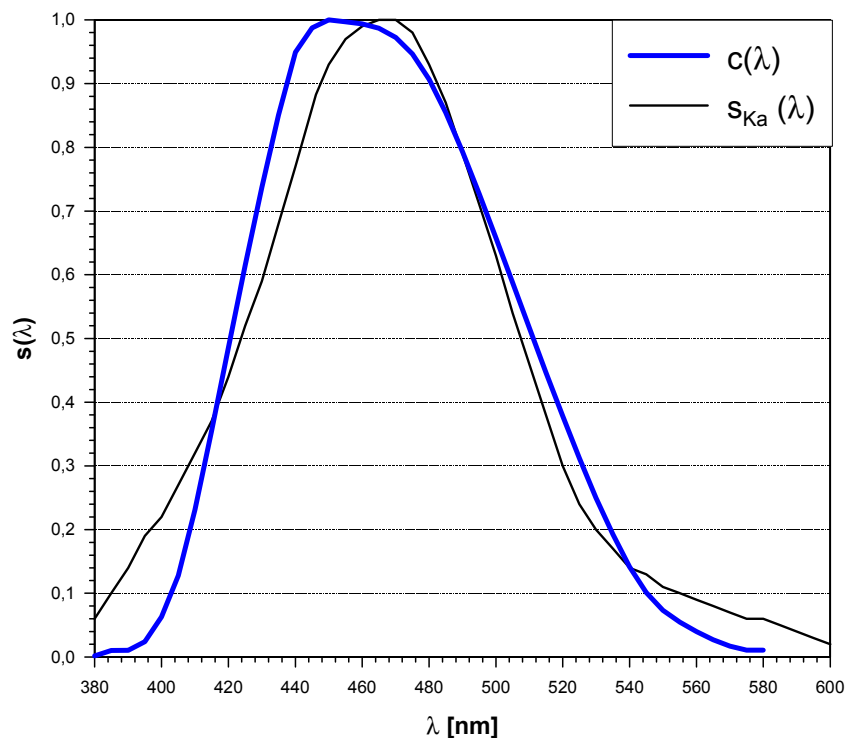
Untersuchungen von KRANOLD schwankt der  $a_{cv}$ -Wert unterschiedlich "weißer" LED erheblich.

### 3.2 Messung mit $c(\lambda)$ -angepassten Empfängern

Die direkte  $c(\lambda)$ -Anpassung könnte mit einer Partial- oder Vollfilterung vorgenommen werden, wie sie z.B. bei der  $v(\lambda)$ -Anpassung üblich ist. Bestrahlungsstärkemessgeräte die mit einer Partialfilterung ausgerüstet sind, sind bisher nicht bekannt. Der Aufwand, den eine Partialfilterung gegenüber einer Vollfilterung verlangt, scheint wegen der groben Festlegung der  $c(\lambda)$ -Kurve auch kaum gerechtfertigt.

Mit Silizium-Detektoren wäre jedoch sowohl eine Partial- als auch eine Vollfilterung mit guter Anpassungsgüte möglich.

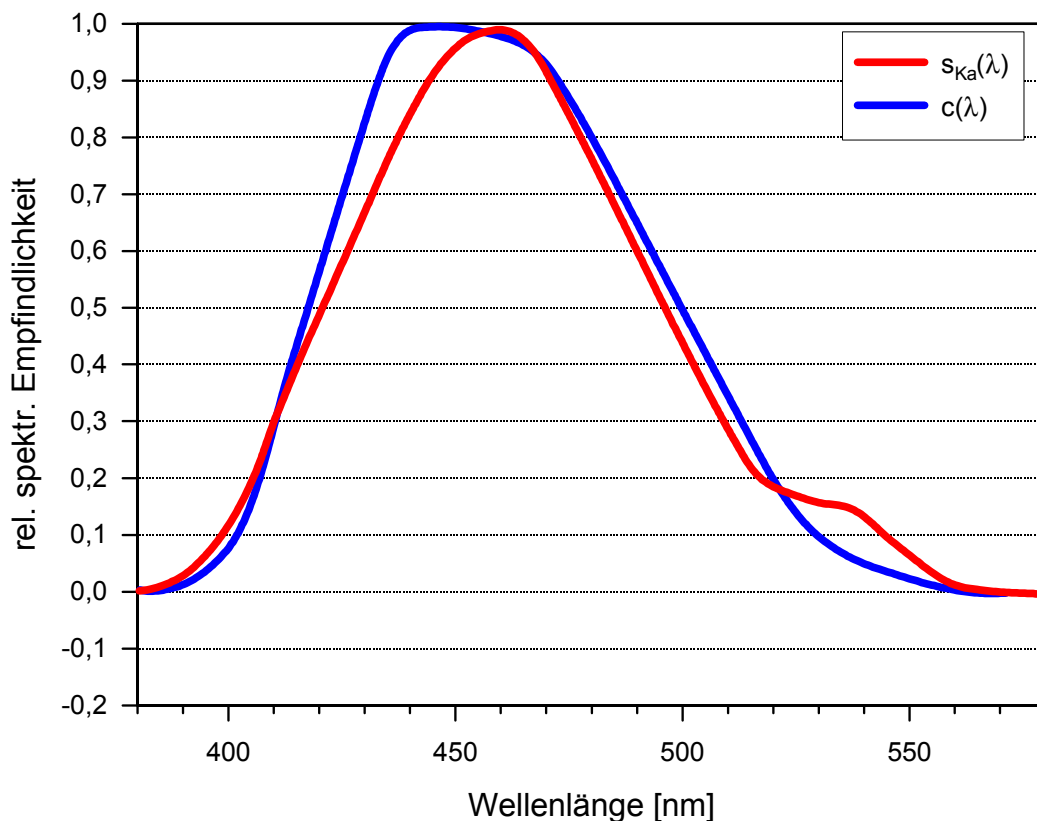
So ist z.B. in einem Digitalen-Photoapparat der Fa. ROLLEI (LMK-mobil) der blaue Empfangskanal ( $s_{Ka}(\lambda)$ ) ähnlich der  $c(\lambda)$ -Wirkungsfunktion (Abbildung 4).



**Abb.4:** Empfindlichkeitskurve eines blauen Empfängerkanals eines ROLLEY-Photoapparates (LMK-mobil)

Damit ist schon eine ortsauflösende Bestimmung der circadianen Strahldichtverteilung möglich. Wenn man dazu ein ortsauflösendes Leuchtdichtebild hat, kann man die  $a_{cv}$ -Verteilung über das gemessene Bild bestimmen.

Eine ausreichend genaue Anpassung einer Mess-Kamera ist inzwischen auch gelungen (Abbildung 5) (KRÜGER, U.).



**Abb. 5:** Spektrale Anpassung einer CCD-Kamera an die circadiane Wirkfunktion  $c(\lambda)$

$c(\lambda)$  - circadiane Wirkfunktion, entsprechend Abb. 1

$s_{Ka}(\lambda)$  - Systemempfindlichkeit der Kamera (inklusive CCD, Objektiv, Filter)

Die Abweichungen von einer idealen Anpassung resultieren aus zwei Problemen:

- Die  $c(\lambda)$ -Funktion ist nicht so "gauß"förmig wie die anderen spektralen Empfindlichkeiten, d.h. die kurzwellige Kante erfordert steilere Filter als die langwellige Kante.
- Die vorhandenen und vermessenen Gläser, die zur Anpassung an die Normspektralwertkurven verwendet werden, weisen besonders bei der langwelligen Kante Probleme auf, da hier entsprechende Filter sonst nicht benötigt werden.

Die dargestellte Anpassung entspricht einem f1-Kennwert von etwa 10% (KRÜGER, U.) (Gln.).

Für tragbare Messgeräte bieten sich 3 Chip-farbangepasste Si-Empfänger an, von denen der Z- und Y-Empfänger näherungsweise für die  $c(\lambda)$  bzw.  $v(\lambda)$ -Bewertung verwendet werden kann (Abb. 6).

Mit hinreichender Näherung kann man den  $a_{cv}$ -Wert auch wie folgt bestimmen (GALL):

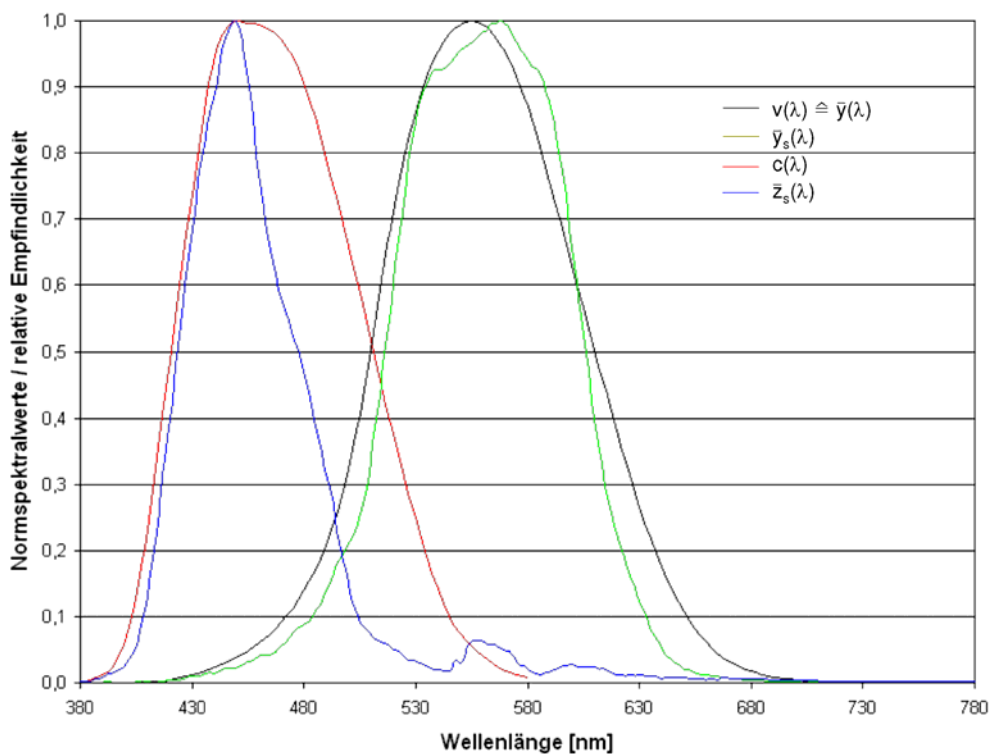
$$a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda} \approx \frac{\int X_{e\lambda} \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_{e\lambda} \cdot \bar{y}(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (14)$$

$\bar{z}(\lambda); \bar{y}(\lambda)$  – Normspektralwertkurven

d.h.

$$a_{cv} = \frac{Z}{Y} = \frac{z}{y} = \frac{1-x-y}{y} \quad (15)$$

Über diese farbmetrische Beziehung kann man den ähnlichsten Farbtemperaturen von Lichtquellen auch näherungsweise  $a_{cv}$ -Werte im x-y-Farbdiagramm zuordnen (s.a. GALL).



**Abb. 6:** Spektrale Empfindlichkeiten von 3 Chip-Si-Farbsensoren (MAZET)

$\bar{y}_s(\lambda); \bar{z}_s(\lambda)$  – spektrale Empfindlichkeit der farbangepassten Sensoren

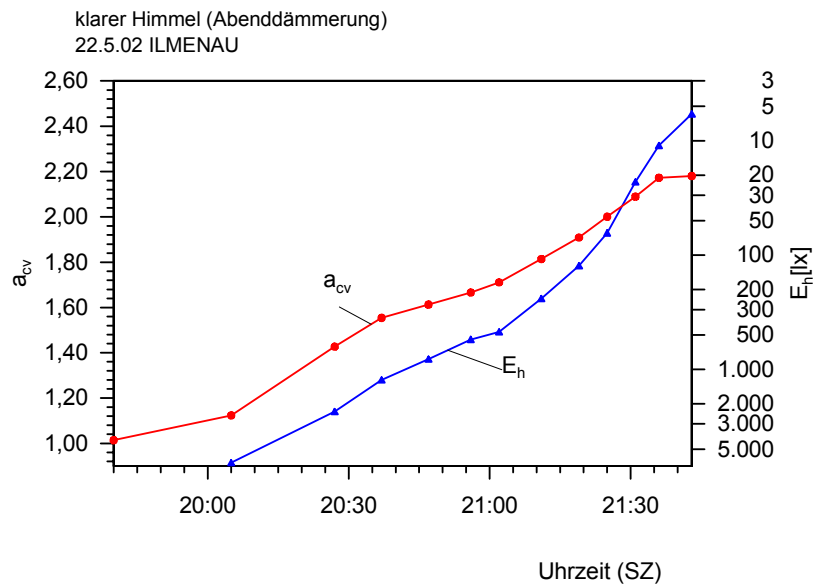
$\bar{y}(\lambda) \hat{=} v(\lambda)$  – Funktion

$c(\lambda)$  – spektrale Wirkungsfunktion

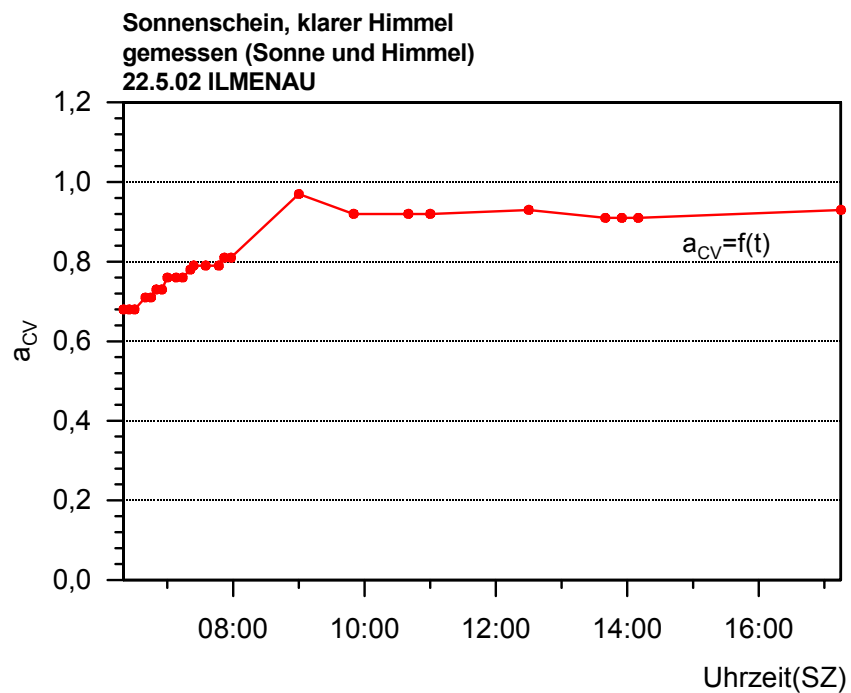
Die Ermittlung von circadianen Bestrahlungen (Dosis), kann über eine elektrische Integration der Signale oder andere speichernde Sensoren erfolgen.

Messbeispiele:

Eine zeitabhängige  $a_{cv}$ -Messung des Tageslichtes während der Abenddämmerung (Abb. 7) und im Verlauf des Tages (Abb. 8) zeigen die folgenden Diagramme. Als Bewertungsgröße  $X_{e\lambda}$  in Gleichung 6 wurde die spektrale Bestrahlungsstärke  $E_{e\lambda}$  genommen.



**Abb. 7:** Circadianer Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  in der Abenddämmerung



**Abb. 8:** Circadianer Wirkungsfaktor als Funktion der Tageszeit

In Tabelle 3 sind ein paar circadiane Wirkungen von PC- und TV-Monitoren angegeben (PORSCH).

<b>a. PC-Monitor</b>			
<b>Farbe</b>	<b><math>a_{cv}</math></b>	<b><math>L_m</math> (cd/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>E_m</math> (lx) in 0,5 m</b>
Blau	6,6	10	5,3
Weiß	0,9	100	29
<b>b. TV-Monitor</b>			
<b>Farbe</b>	<b><math>a_{cv}</math></b>	<b><math>L_m</math> (cd/m<sup>2</sup>)</b>	<b><math>E_m</math> (lx) in 1,2 m</b>
Blau	7,2	20	1,2
Weiß	1,0	162	12,5

**Tab. 3:** Circadiane und lichttechnische Parameter von PC- und TV-Monitoren

Es bedeuten:  $L_m$  - mittlere Leuchtdichte

$E_m$  - Beleuchtungsstärke am Beobachterauge

Man erkennt, dass insbesondere der blaue Kanal eine hohe circadiane Wirkung aufweist.

### 3.3 Kalibrierung der Messgeräte

#### 3.3.1 $a_{cv}$ -Kalibrierung

Eine  $a_{cv}$ -Kalibrierung kann entsprechend Gln. 6 entweder mit einer Lampe mit breitbandigem Spektrum oder mit quasi-monochromatischem Licht (z.B. Lampe mit Interferenzfilter) erfolgen.

Zur Bestimmung von  $a_{cv}$  mit einem breitbandigen Spektrum benötigt man nach Gln. 6 nur die relativen spektralen Strahlungsgrößen  $X_{e\lambda, rel}$  und die Gewichtung dieser spektralen Größe mit der  $c(\lambda)$ - und  $v(\lambda)$ -Funktion. Damit erhält man die exakten Werte von  $a_{cv}$ .

Verwendet man eine quasi-monochromatische Beleuchtung bei der Wellenlänge  $\lambda_0$  und einer spektralen Bandbreite  $\Delta\lambda = 10 \dots 20$  nm, ergibt sich aus der Gln. 6

$$a_{cv}(\lambda_0) = \frac{c(\lambda_0)}{v(\lambda_0)} \quad (16)$$

Man benötigt demnach nur das Verhältnis  $(c(\lambda_0)/v(\lambda_0))$ , das sich aus den Tabellen für  $c(\lambda)$  und  $v(\lambda)$  ergibt.

### 3.3.2 Kalibrierung der circadianen Strahlungsgrößen

Die circadiane Strahlungsgröße lässt sich leicht aus dem  $a_{cv}$ -Wert einer Lampe mit breitbandigem Spektrum bestimmen, wenn man die dazugehörigen lichttechnischen Größen  $X_v$  bestimmt (Gleichung 7).

$$X_{ec} = \frac{a_{cv}}{k_m} \cdot X_v$$

Für Sensoren bietet sich die Beleuchtungsstärke  $E_v$  als Ausgangswert für die circadiane Bestrahlungsstärke ( $E_{ec}$ ) an:

$$E_{ec} = \frac{a_{cv}}{k_m} \cdot E_v \quad (17)$$

Da eine fehlerhafte  $v(\lambda)$ -Anpassung des Beleuchtungsstärkemessgerätes in die Kalibrierung von  $E_{ec}$  mit eingeht, empfiehlt es sich, die spektralen Bestrahlungsstärken  $E_{e\lambda}$ , die eine Lampe auf einer definierten Flächen erzeugt, direkt mit einem Spektralradiometer zu bestimmen und daraus die circadiane Bestrahlungsstärke zu berechnen (Gln. 18).

$$E_{ec} = \int E_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (18)$$

Wenn man mit einer quasi-monochromatischen Lichtquelle arbeitet, benötigt man nur die Bestrahlungsstärke  $E_e(\lambda_0)$  bei einer Wellenlänge  $\lambda_0$

$$E_{ec}(\lambda_0) = c(\lambda_0) \cdot E_e(\lambda_0) \quad (19)$$

oder die Beleuchtungsstärke  $E_v(\lambda_0)$

$$E_{ec}(\lambda_0) = \frac{c(\lambda_0)}{v(\lambda_0)} \cdot \frac{1}{k_m} \cdot E_v(\lambda_0)$$

$$E_{ec}(\lambda_0) = \frac{a_{cv}(\lambda_0)}{k_m} \cdot E_v(\lambda_0) \quad (20)$$

### 3.3.3 Berücksichtigung der fehlerhaften $c(\lambda)$ - und $v(\lambda)$ -Anpassung

Die Güte einer Anpassung kann man entsprechend DIN 5032-6 auch für andere Wirkungsfunktionen übertragen (GROTHMANN). Für die  $c(\lambda)$ - und  $v(\lambda)$ -Anpassung sind das folgende  $f_1$ -Fehlerkennungsgrößen:

$$f_{1v} = \frac{\int |s_v(\lambda) - v(\lambda)| d\lambda}{\int v(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (21)$$

$$f_{1c} = \frac{\int |s_c(\lambda) - c(\lambda)| d\lambda}{\int c(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (22)$$

Es bedeutet:

$s_v(\lambda); s_c(\lambda)$  – die spektralen Empfindlichkeiten der Sensoren

$v(\lambda); c(\lambda)$  – die Sollfunktion der Anpassung

Wird ein fehlerhaft angepasstes Messgerät bei einer Lichtquelle mit einem vorgegebenen Spektrum kalibriert, kann über die Aktivitätskorrektur bei einem anderen Spektrum der Messwert korrigiert werden.

#### 4. Zusammenfassung

Es konnte gezeigt werden, dass mit einer definierten circadianen Wirkungsfunktion  $c(\lambda)$  eine Vermessung der circadianen Strahlgrößen möglich wird. Die Wirkung unterschiedlicher Lichtquellen kann durch den circadianen Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  angegeben werden. Mit den circadianen Strahlungsgrößen müssen jetzt je nach Wirkung die förderlichen Dosisangaben abgeleitet werden. Dies ist wichtig, um die aktivierte Wirkung des Lichtes, aber auch mögliche Gefahrenpotentiale (Krebsbildung) in Abhängigkeit von der Tageszeit angeben zu können.

#### Literatur:

- [1] P. Blattner, unveröffentlichtes Skript der CCPR "Note on photobiological qualities", 2003
- [2] G.C. Brainard u.a., Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor, J. of Neuroscience **21** (2001) 16, S. 6405 - 6412
- [3] CIE Publikation - **106** (93), **103** (93), **125** (1997)
- [4] **DIN 5031**: Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik
- [5] K. Grothmann, Messung und Bewertung optischer Strahlung in der Phototherapie, Dissertation am FG Lichttechnik der TU Berlin



- [6] **ICNIRP**: Guidelines on limits of exposure to broad-band incoherent optical radiation (0,38 to 3  $\mu\text{m}$ ), Health Physics **73** (1997) 3, pp 539 - 554
- [7] Th. Kranhold, Charakterisierung weißer LED, Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Ilmenau, 2002
- [8] R.E. Kronauer u.a., Mathematical model of the human circadian system with two interacting oscillators, Am. Journal of Physiology **242** (1982) R3 - R17
- [9] U. Krüger (Fa. TechnoTeam Ilmenau), mündliche Mitteilungen, 12/03
- [10] MAZET GmbH Jena, mündliche Informationen zu 3 Chip-Farbsensoren, 11/03
- [11] I.M. Mc Intyre u.a., Quantal melatonin suppression by exposure to low intensity light in man, Life Sciences **44** (1989), 4, 327 - 332
- [12] T. Porsch, Experimentelle Bestimmung der circadianen Lichtwirkung von Monitoren und TV-Bildschirmen, Diplomarbeit, FG Lichttechnik, TU Ilmenau, 2003
- [13] Ch. Schierz, Leben wir in der "biologischen Dunkelheit"?, Tagung Licht 2002, Maastricht, Tagungsband S. 381 - 389
- [14] K. Thapan, An action spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans, Journal of Physiology **535** (2001) 1, S. 261 - 267
- [15] S.M. Triander u.a., Inhibition of melatonin secretion onset by low levels of illumination, Journal Sleep Res. **5** (1996), S. 77 - 82
- [16] ---: LMK mobile, Rollei, Prospekt der Fa. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau