

# **“Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums”**

Teil 2: Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Ermittlung

Gall, Dietrich

## **Kurzfassung:**

Aus den Meßdaten der von THAPAN und BRAINHARD publizierte Werte wird eine spezielle circadiane Wirkungskurve  $c(\lambda)$  vorgeschlagen, mit der circadiane Lichtgrößen und ein circadianer Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  definiert und damit gemessen werden können. Damit wird eine circadiane Photometrie möglich. Die mit Spektralverfahren oder  $c(\lambda)$ -angepaßten Empfängern gewonnenen Meßergebnisse an einigen Lichtquellen werden exemplarisch angegeben.

Es hat sich gezeigt, daß eine Bestimmung des  $a_{cv}$ -Wertes auch mit der  $\bar{z}(\lambda)$  - Normspektralwertkurve mit guter Näherung möglich ist. Damit kann man die  $a_{cv}$ -Werte in der Normfarbtafel beschreiben und aus Normfarbwertanteilen  $x$  und  $y$  der Lichtquellen leicht bestimmen. Erste Messungen ergaben interessante Ergebnisse zu einer Doppel-Dynamik der circadianen und der lichttechnischen Größen während der Dämmungsphase des Tageslichtes.

## **1. Einleitung**

Im Teil 1 der vorliegenden Publikation wurden über die spektrale Wirkungskurve zur Suppression von Melatonin, welche über spezielle lichtempfindlichen Neuronen in der Netzhaut des menschlichen Auges gesteuert wird, ein paar Betrachtungen zur quantitativen Erfassung mittels sog. circadianer Strahlungsgrößen gemacht, die in folgenden noch vertieft werden sollen. Insbesondere interessiert die meßtechnische Erfassung dieser Größen. Ein ähnlicher Ansatz zur Interpretation der circadianen Lichtwirkung ist inzwischen auch von REA u. a. veröffentlicht worden. Dies unterstreicht um so mehr die Aktualität dieses Themas.

## 2. Definition der circadianen Licht- und Strahlungsgrößen

### 2.1 Circadiane Größen

Als circadiane Größe (Index c) soll in Anlehnung der Formel 10 (Teil 1) folgende bewertete Größe  $X_c$  verstanden werden

$$X_c = K \cdot \int_{380}^{780} X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (1)$$

Es bedeutet:

$X_c$  - circadiane Größe

K - Konstante

$X_{e\lambda}$  - spektrale Strahlungsgröße

$c(\lambda)$  - circadiane Wirkungsfunktion

Als circadiane Größe  $X_c$  können entsprechend den geometrischen Verknüpfungen ähnliche Größen wie in der Licht- und Strahlungstechnik gefunden werden. Wählt man die Konstante K gleich dem maximalen photometrischen Strahlungsäquivalent ( $K_m = 683 \text{ lm/W}$ ), so ergeben sich sog. **“circadiane Lichtgrößen”** (Index: c), ist die Konstante  $K = 1$ , ist  $X_c$  eine **“circadiane Strahlungsgröße  $X_{ec}$ ”**. Im weiteren sollen nur die circadianen Lichtgrößen betrachtet werden, da in der Beleuchtungstechnik auch mit Lichtgrößen gearbeitet wird und ein Anschluß an diese Größen aus Praktikabilitäts Gründen sinnvoll erscheint.

Im Detail sind folgende circadiane Lichtgrößen zu definieren:

a. circadianer Lichtstrom  $\varphi_c$  (Einheit:  $\text{lm}_c$ )

$$\varphi_c = K_m \cdot \int \varphi_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

$\varphi_{e\lambda}$  - spektraler Strahlungsfluß

b. circadiane Lichtstärke  $I_c$  (Einheit:  $cd_c$ )

$$I_c = K_m \int I_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (3)$$

$I_{e\lambda}$  - spektrale Strahlstärke

c. circadiane Beleuchtungsstärke  $E_c$  (Einheit:  $lx_c$ )

$$E_c = K_m \cdot \int E_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

$E_{e\lambda}$  - spektrale Bestrahlungsstärke

d. circadiane Leuchtdichte  $L_c$  (Einheit:  $cd_c \cdot m^{-2}$ )

$$L_c = K_m \cdot \int L_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad (5)$$

$L_{e\lambda}$  - spektrale Strahldichte

e. circadiane Belichtung  $H_c$  (Einheit:  $lx_c \cdot h$ )

$$H_c = \int E_c \cdot dt \quad (6)$$

f. circadiane Lichtausbeute  $\eta_c$  (Einheit:  $lm_c \cdot W^{-1}$ )

$$\eta_c = \frac{\Phi_c}{P} \quad (7)$$

P - aufgenommene Leistung

Mit  $\eta_c$  haben auch REA u.a. die Effizienz einiger Lampen beschrieben (circadian luminous efficacy).

g. circadianer Wirkungsfaktor  $a_{cv}$

Der circadiane Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  ist als Verhältnis von circadianer zu visueller Wirkung des Lichtes definiert (s. Teil 1 Gln. 7). Grundsätzlich gilt aber dieser circadiane Wirkungsfaktor zur Umrechnung von allen lichttechnischen Größen in circadiane Größen

$$a_{cv} = \frac{K_m \int_{380}^{780} X_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{K_m \int_{380}^{780} X_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (8)$$

$X_{e\lambda}$  - beliebige spektrale Strahlungsgröße

Damit ergeben sich folgende Umrechnungen aus den lichttechnischen Größen ( $X_v$ )

a.	$\Phi_c = a_{cv} \cdot \Phi_v$	circadianer Lichtstrom	
b.	$I_c = a_{cv} \cdot I_v$	circadiane Lichtstärke	
c.	$E_c = a_{cv} \cdot E_v$	circadiane Beleuchtungsstärke	
d.	$L_c = a_{cv} \cdot L_v$	circadiane Leuchtdichte	(9)
e.	$H_c = a_{cv} \cdot H_v$	circadiane Belichtung	
f.	$\eta_c = a_{cv} \cdot \eta_v$	circadiane Lichtausbeute	

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

Von BRAINHARD 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  $B(\lambda)$  (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.

Wird diese  $c(\lambda)$ -Kurve für alle weiteren Betrachtungen zur circadianen Wirkung einheitlich zugrunde gelegt, kann man analog zur  $v(\lambda)$ -Kurve eine circadiane Metrik aufbauen, die eine quantitative Erfassung der Wirkung der Parameter nach der Gleichung 9 ermöglicht.

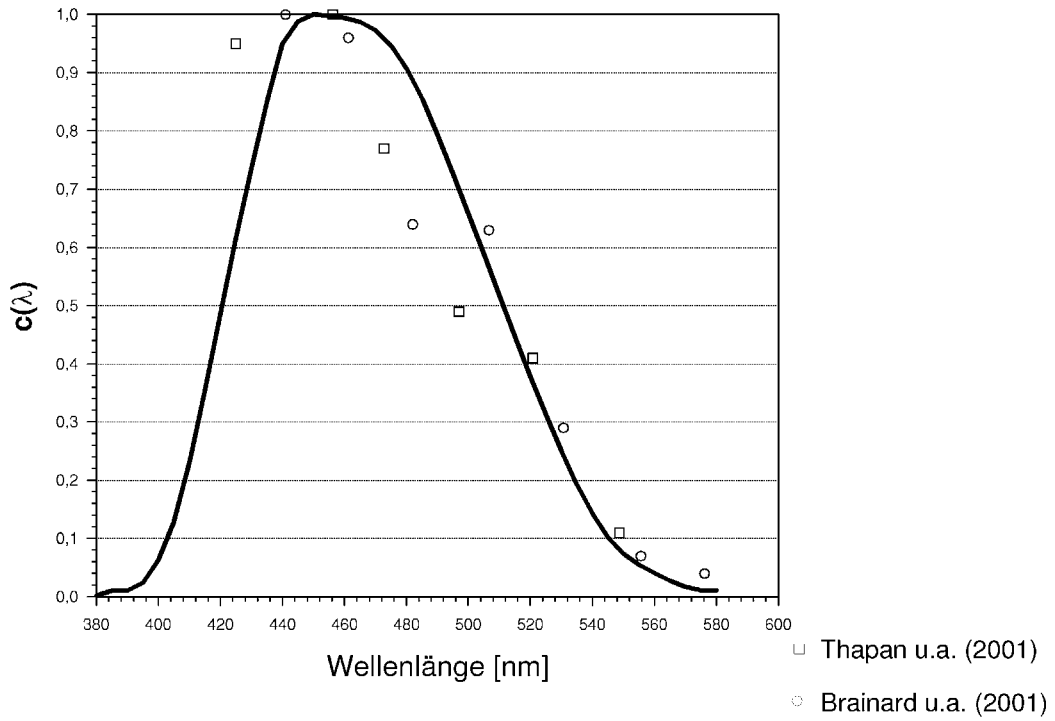


Abbildung 1: Gemittelte circadiane Wirkungskurve  $c(\lambda)$

$\lambda$ [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		

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

### **2.3 Die Auswahl geeigneter circadianer Lichtgrößen**

Zunächst ist die Frage zu klären, welche circadianen Lichtgrößen für die Beschreibung der Lichtwirkung herangezogen werden sollten. SCHIERZ macht dazu einige Ausführungen. Falls die circadianen Sensoren gleichmäßig über die Netzhaut verteilt sind und nichtorts aufgelöste Signale liefern, wäre eine Angabe des circadianen Lichtstroms im Auge sinnvoll. Dieser Lichtstrom könnte mit der circadianen Beleuchtungsstärke am Auge (Gln. 4) angegeben werden. Es gibt aber auch Hinweise darauf, daß die einzelnen Netzhautareale unterschiedlich beteiligt sind. In diesem Fall müßte die circadiane Leuchtdichteverteilung (Gln. 5) ermittelt und entsprechend den örtlichen Empfindlichkeiten gewichtet werden. REA u.a. schlagen vor, die circadiane Wirksamkeit der Lampen mit dem circadianen Lichtstrom (Gln. 2) oder die circadiane Lichtausbeute (Gln. 7) zu beschreiben. Für Dosisangaben bietet sich die circadiane

Belichtung (Gln. 6) an. Über die erforderliche Dosis gibt es bereits einige Vorgaben (SCHIERZ; VAN DEN BELD; EHRENSTEIN).

### **3. Meßtechnische Ermittlung der circadianen Lichtgrößen**

Die meßtechnische Erfassung der circadianen Lichtgrößen nach Gleichung 1 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, die circadianen Größen mit der circadianen Wirkungskurve  $c(\lambda)$  (Tabelle 1) und die lichttechnischen Größen mit der  $v(\lambda)$ -Kurve gewichtet. Mit einem entsprechenden Spektralradiometer wären diese Messungen bereits möglich. Allerdings lassen sich damit zunächst nur die circadianen Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken bestimmen. Der circadiane Lichtstrom und die Lichtstärke müssen daraus abgeleitet werden.

In der Tabelle 2 sind die mit einer spektralen Messung ermittelten  $a_{cv}$ -Werte einiger Lampenbeispiele (s.a. GALL u.a. Tabelle 1 und Bild 7 und 8). Wenn man die circadiane Wirkung von dem Licht des bewölkten Himmels mit dem Licht der Glühlampe vergleicht heißt das, daß die Glühlampe in ihrer Wirkung nur 41% der des Tageslichtes entspricht.

REA u.a. haben die circadianen Wirkungen einiger Lampen mit der circadianen Lichtausbeute (s.a. Gln. 7) beschrieben und die Werte auf einen Wert einer Leuchtstofflampe (CCT: 3000 K) bezogen. Diese Leuchtstofflampe hat nach unseren Betrachtungen einen  $a_{cv}$ -Wert von 0,36. Die mit diesem  $a_{cv}$ -Wert umgerechneten Werte von REA sind in der Tabelle 2 mit aufgeführt. Es ergibt sich eine gute Übereinstimmung, wenn man berücksichtigt, daß die Farbtemperaturen (CCT) der verglichenen Lampen z.T. sehr verschieden sind. Diese Abweichung ist bei der Natriumdampflampe besonders groß. Vermutlich verwendeten REA u.a. eine Standard-Lampe mit einer Farbtemperatur CCT = 2200 k. Die Unterschiede bei den blauen LED-Lampen erklären sich aus der starken Exemplarstreuung, die sich durch unterschiedliche Wellenlängen-

maxima bemerkbar macht. Nach unseren Untersuchungen schwankt der  $a_{cv}$ -Wert unterschiedlich “weißer” LED erheblich (KRANHOLD).

Die spektralen Meßverfahren sind die Verfahren, bei denen man die spektrale Wirkungskurve  $c(\lambda)$  mittels Software variabel und exakt vorgeben kann. Sie sind aber kosten- und zeitaufwendige Verfahren.



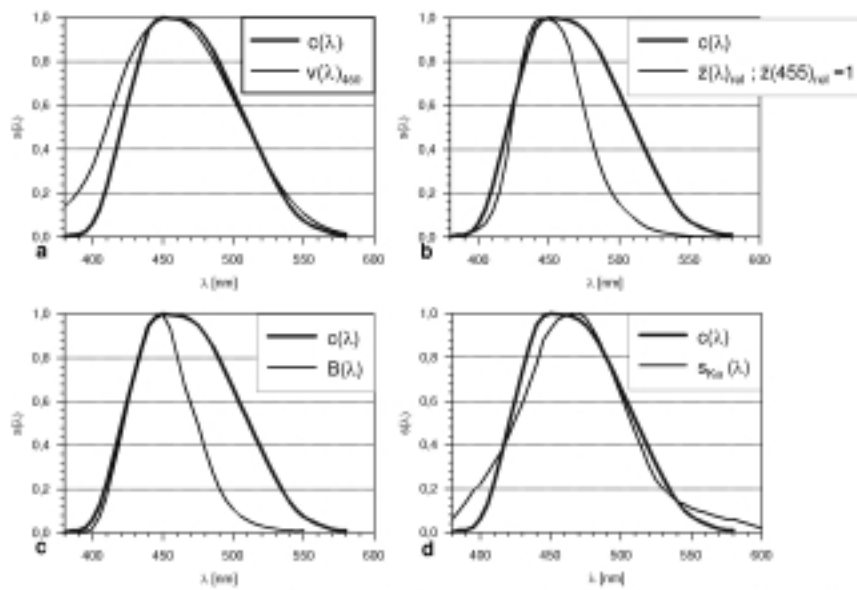
Lampe		circadianer Wirkungsfaktor	
		$a_{cv}$	$a_{cv}$ (nach REA)
a	direkte Sonne (CCT: 5081 K)	0,83	
b	blauer Himmel (CCT: 19963 K)	1,73	
c	bewölkter Himmel (CCT: 5924 K)	1,02	1,00 (CCT : 6500 K)
d	Glühlampe (CCT: 2800 K)	0,41	0,45
e	Halogenglühlampe (neutralweiß - Keramik)(CCT: 3640 K)	0,45	
f	Natriumdampfhochdrucklampe (CCT: 2770 K)	0,32	0,20 (CCT : 2200 K?)
<b>Leuchtstofflampe</b>			
a	warmton (CCT: 2827 K)	0,36	
b	neutralweiß (CCT: 3678 K)	0,60	0,66 (CCT : 4100 K)
c	"Biolux" (CCT: 6125 K)	1,03	
d	"Daylight" (CCT: 5145 K)	0,85	
e	"Truelite" (CCT: 5600 K)	0,89	
	LED (blau $\lambda = 468$ nm)	6,90	13,0 ( $\lambda = 460$ nm)
	LED (weiß)	1,05...2,0	

**Tabelle 2:  $a_{cv}$  - Werte einiger Lampen**

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

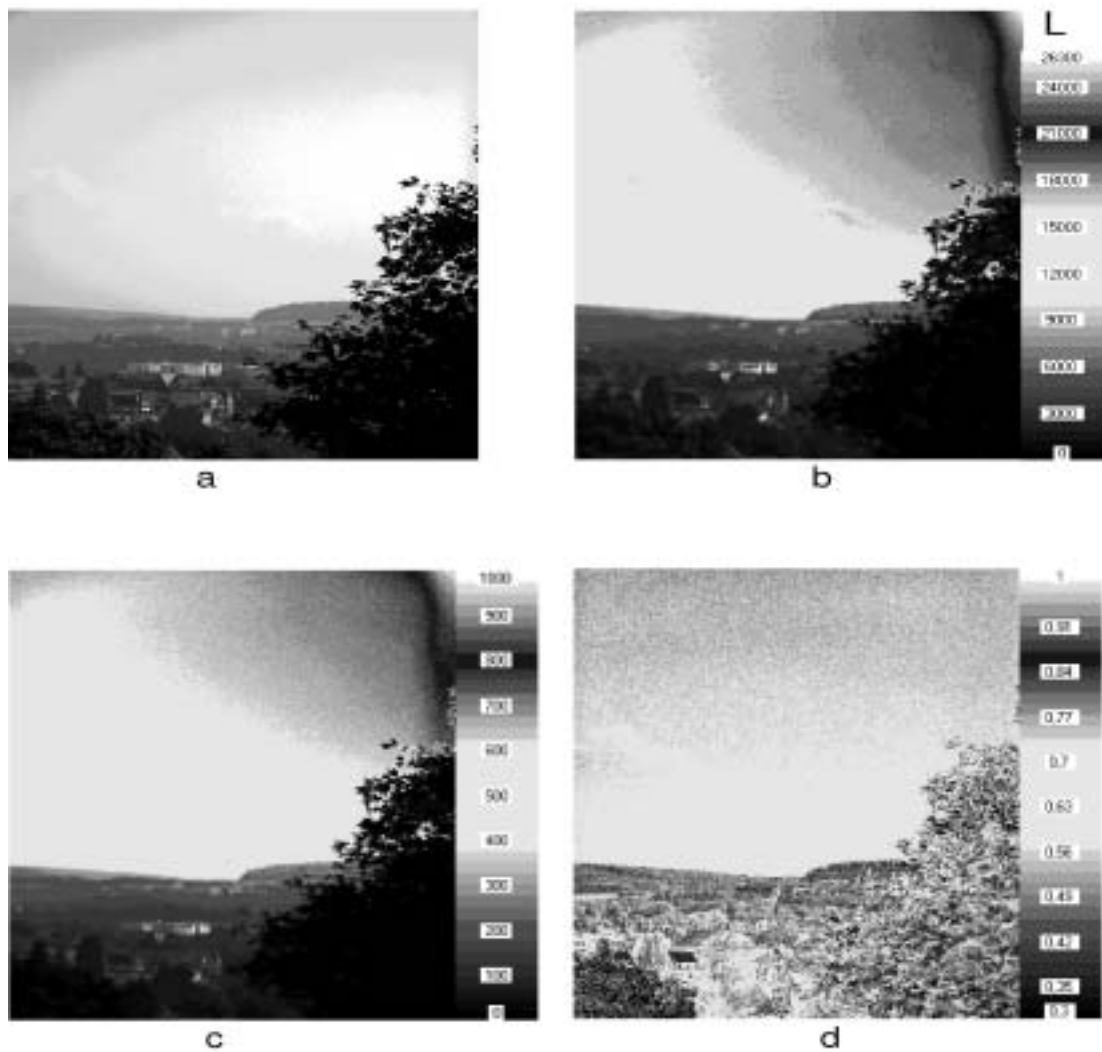
#### **3.2.1 Direkte $c(\lambda)$ -Anpassung**

Die direkte  $c(\lambda)$ -Anpassung könnte mit einer Partial- oder Vollfilterung vorgenommen werden, wie sie z.B. bei der  $v(\lambda)$ -Anpassung üblich ist. Das dies mit Vollfilterung sehr gut möglich ist, zeigt der blauempfindliche Kanal eines CCD-Sensors (LMK) in einer Kamera (s. Bild 2d). Mit dieser Anpassung und die Anpassung an die  $v(\lambda)$ -Kurve ist es sogar möglich, ortaufgelöste Messungen der circadianen Größen vorzunehmen. In Bild 3a ist eine Landschaft dargestellt, von der in Bild 3b die Leuchtdichteverteilung, in Bild 3c die relative circadiane Leuchtdichteverteilung und in Bild 3d die relative circadiane Wirkungsfaktorverteilung ( $a_{cv}$ ) zu sehen ist. Mit einem cos-Vorsatz vor der  $c(\lambda)$ -Kamera könnte man direkt circadiane Beleuchtungsstärken vermessen.



- Mögliche spektrale "Ersatz" - Kurven für die Wirkungsfunktion  $c(\lambda)$
- a: verschobene  $v(\lambda)$  - Funktion, mit dem Maximum bei 460 nm ( $v(\lambda)_{460} = 1$ )
  - b: relative Normspektralwertfunktion  $\bar{z}(\lambda)_{\text{rel}}$ ;  $\bar{z}(\lambda)_{\text{rel}} = 1$  bei  $\lambda = 445\text{nm}$
  - c: Blaulichtgefährdungsfunktion  $B(\lambda)$
  - d: Spektrale Empfindlichkeit einer Kamera mit angepaßtem Silizium - Sensor ( $s_{\text{Ka}}(\lambda)$ )

Abbildung 2: Verschiedene Empfindlichkeitskurven für circadiane Wirkung



**Abbildung 3: Ortsaufgelöste  $a_{cv}$ -Bestimmung**

- a - Landschaftsaufnahme
- b - Leuchtdichteverteilung
- c - circadiane Leuchtdichteverteilung
- d -  $a_{cv}$ -Verteilung

### **3.2.2 Verwendung von ‘Ersatz’-Kurven für die circadiane Wirkungskurve**

Es gibt bereits einige definierte Wirkungskurven für andere Anwendungsfelder, die das Maximum der Empfindlichkeit auch in einem Wellenlängenbereich zwischen 440 und 460 nm haben und deshalb als näherungsweise Anpassung an die  $c(\lambda)$ -Kurve gesehen werden könnten. Dies

hat den Vorteil, daß man das bereits bestehende Meßinventar auch für circadiane Messungen verwenden könnte.

Als Ersatzkurven bieten sich folgende Kurven an:

- eine Kurve, die der  $v(\lambda)$ -Kurve entspricht, aber im Maximum auf 455 bzw. 460 nm verschoben wird (Bild 2a)  $v(\lambda)_{460}$ ,
- die Blaulichtgefährdungsfunktion  $B(\lambda)$  (Bild 2c) (ICNIRP),
- die Normspektralwertfunktion  $\bar{z}(\lambda)$  (Bild 2b).

Für einige Lampenbeispiele sind in Tabelle 3 die mit den Kurven aus Bild 2a und b ermittelten  $a_{cv}$ -Werte angegeben. Es zeigt sich, daß sich die prozentuellen Abweichungen zu der Sollfunktion  $a_{cv}$  nach Bild 1 bzw. Tabelle 1 in vertretbaren Rahmen halten, und somit eine grobe Bestimmung des  $a_{cv}$ -Wertes insbesondere mit Dreibereichsfarbmeßgeräten möglich wird.

Lampe	$a_{cv} = f(s(\lambda))$				$\Delta a_{cv} [\%]$		
	$a_{cv}(c)$	$a_{cv}(z)$	$a_{cv}(B)$	$a_{cv}(v)$	$\Delta a_{cv}(z)$	$\Delta a_{cv}(B)$	$\Delta a_{cv}(v)$
a direkte Sonne (CCT: 5081 K)	0,83	0,84	0,82	0,87	+1,2	-1,2	+4,8
b blauer Himmel (CCT: 19963 K)	1,73	1,85	1,87	1,69	+6,9	+8,1	-2,1
c bewölkter Himmel (CCT: 5924 K)	1,02	1,01	0,99	1,00	-0,9	-2,9	-2,0
d Glühlampe (CCT: 2800 K)	0,41	0,33	0,31	0,45	-19,5	-24,4	+9,8
e Halogenglühlampe (neutralweiß - Keramik)(CCT: 3640 K)	0,45	0,43	0,45	0,47	-4,4	0	+4,4
f Natriumdampfhochdrucklampe (CCT: 2770 K)	0,32	0,28	0,27	0,32	-12,5	-15,6	0
<b>Leuchtstofflampe</b>							
a warmton (CCT: 2827 K)	0,36	0,35	0,34	0,38	-2,8	-5,6	+5,6
b neutralweiß (CCT: 3678 K)	0,60	0,53	0,52	0,45	-11,7	-13,3	-25,0
c "Biolum" (CCT: 6125 K)	1,03	1,02	0,99	0,98	-0,9	-3,9	-4,9
d "Daylight" (CCT: 5145 K)	0,85	0,81	0,78	0,83	-4,7	-8,2	-2,4
e "Truelite" (CCT: 5600 K)	0,89	0,71	0,90	0,86	20,2	+1,1	-3,4

**Tabelle 3: Ermittlung des  $a_{cv}$ -Wertes mit "Ersatz"-Kurven**

- $a_{cv}(C)$  mit  $c(\lambda)$ -Kurve (Bild 2a)
- $a_{cv}(Z)$  mit  $\bar{z}(\lambda)$ -Kurve (Bild 2b)
- $a_{cv}(B)$  mit  $B(\lambda)$ -Kurve (Bild 2c)
- $a_{cv}(V)$  mit  $v(\lambda)_{460}$ -Kurve (Bild 2d)

#### 4. Darstellung des $a_{cv}$ -Wertes in der Normfarbtafel

Verwendet man anstelle von  $c(\lambda)$  in Gleichung 8 die Normspektralwertfunktion  $\bar{z}(\lambda)$ , ergibt sich:

$$a_{cv} \approx \frac{\int X_{e\lambda} \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{Z}{Y} \quad (10)$$

Z und Y sind die Farbwerte der zu bewertenden Licht- oder Körperfarben.

Nun ist

$$Z = \frac{z}{y} \cdot Y \quad (11)$$

und damit wird Gleichung 10

$$a_{cv} \approx \frac{z}{y} = \frac{1 - x - y}{y} \quad (12)$$

Aus den Farbwertanteilen x und y kann man damit den  $a_{cv}$ -Wert leicht bestimmen.

Gibt man sich bestimmte  $a_{cv}$ -Werte vor, so kann man die Linien gleicher  $a_{cv}$ -Werte in die Normfarbtafel eintragen (Bild 4). Dies ist z.B. für die circadiane Bewertung der Lichtfarbe von Lampen eine sehr praktikable Methode, die sich noch dahingehend erweitern läßt, daß man den  $a_{cv}$ -Wert über die ähnlichste Farbtemperatur (CCT) beschreibt (Bild 5).

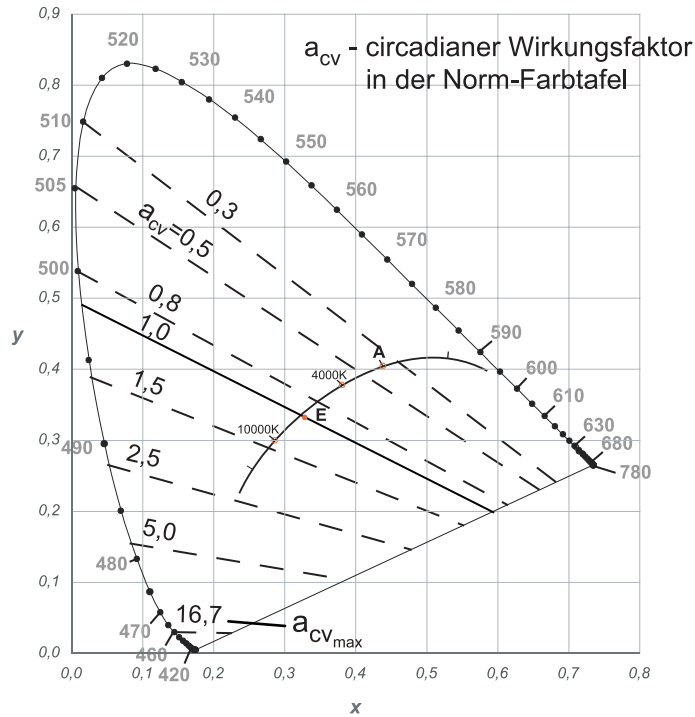


Abbildung 4:  $a_{cv}$ -Werte in der Normfarbtafel

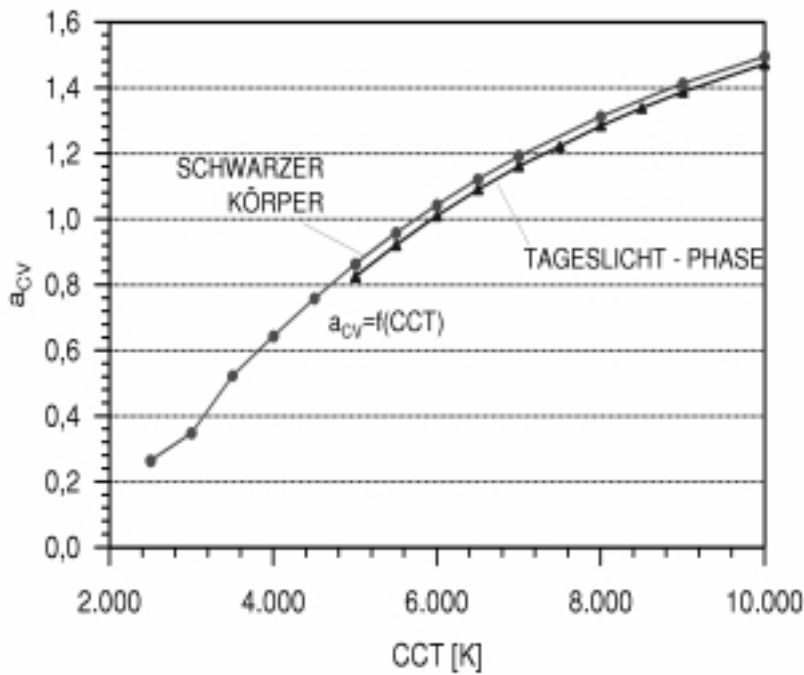


Abbildung 5: Circadianer Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  als Funktion der Farbtemperatur (CCT)

Einige Beispiele in Bild 6 und 7 zeigen die über  $\bar{z}(\lambda)$ -Funktion ermittelten  $a_{cv}$ -Werte von Tageslichtsituationen. Darin werden die  $a_{cv}$ -Werte auf die horizontalen Beleuchtungsstärken bezogen ( $Y = E_v$  s.a. Gln. 11). Aus Bild 6 geht hervor, daß sich der  $a_{cv}$ -Wirkungsfaktor in der

Abenddämmerung um ca. 1% pro Minute erhöht, wobei gleichzeitig das Beleuchtungsniveau um 70 lx pro Minute sinkt. Ein umgekehrtes Verhalten ergibt sich in der Morgendämmerung. Diese Doppel-Dynamik von  $a_{cv}(t)$  und  $E(t)$  wäre demnach für eine Triggerwirkung des Lichtes denkbar. Anders sieht der zeitliche Verlauf des  $a_{cv}$ -Wirkungsfaktors bei Tage aus (Bild 7). Obwohl sich die Beleuchtungsstärke über den Zeitraum entsprechend dem Tageslichtgang der Sonne stark ändert, bleibt der  $a_{cv}$ -Wert nahezu konstant.

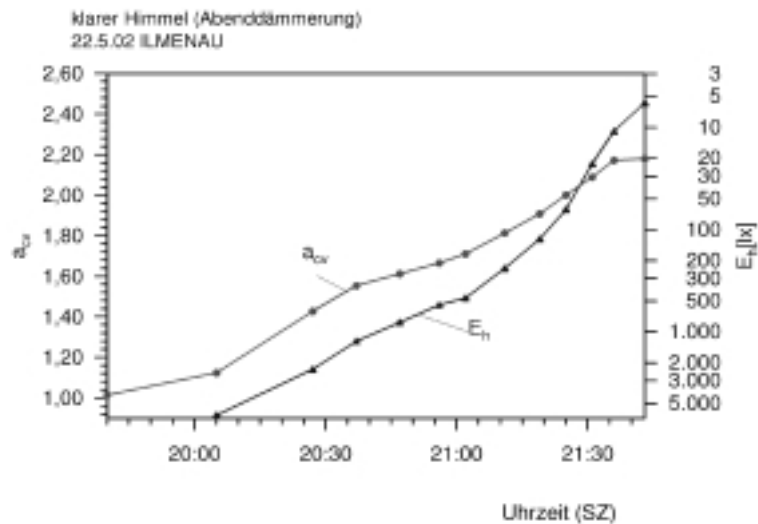


Abbildung 6: Circadianer Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  in der Abenddämmerung

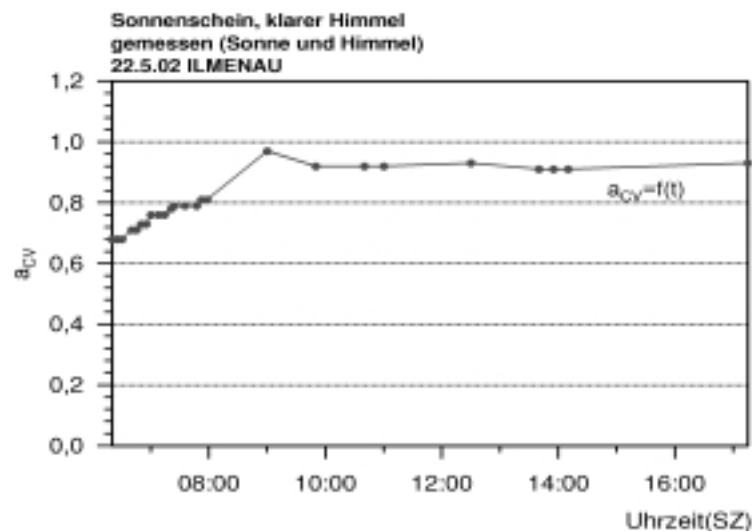


Abbildung 7: Circadianer Wirkungsfaktor als Funktion der Tageszeit

## **5. Schlußbemerkungen**

- Eine besondere Aufmerksamkeit sollte in Zukunft der circadianen Wirkung des Lichtes geschenkt werden. Zur Kennzeichnung der spektralen Wirkung kann der **circadiane Wirkungsfaktor  $a_{cv}$**  dienen, der in der Arbeit definiert und an einigen Beispielen demonstriert wird. Damit kann neben der circadianen Rhythmik, die Ermüdung, Leistungsbereitschaft, Schlafbeeinflussung, depressive Stimmlage u.a. beschrieben werden. Dies ist eine interessante Herausforderung für die Beleuchtungsgestaltung, da die Helligkeits- und spektraldynamische Komponente mit betrachtet werden muß.
- Z.Z. wird im Zusammenhang mit den circadianen Wirkungen neben der spektralen Gestaltung auch die quantitative Auslegung der Beleuchtungsanlagen aktuell. Den Schwellenwert der circadianen Wirkung kennt man, das förderliche Beleuchtungsniveau muß noch definiert werden. Dieses Niveau wird u.a. vom circadianen Wirkungsfaktor  $a_{cv}$  des verwendeten Lampenspektrums abhängen.
- Durch die Vorgabe der circadianen Wirkungskurve  $c(\lambda)$  kann man mittels Spektralverfahren oder mit  $c(\lambda)$ -angepaßten Empfängern die circadianen Lichtgrößen gut erfassen und beschreiben. Insbesondere ist die Angabe eines  $a_{cv}$ -Wirkungsfaktors interessant, da sich damit die circadiane Wirkung der verschiedenen Licht- und Körperfarben gut beschreiben lassen.
- Aus der gefundenen Doppel-Dynamik des Tageslichtes im  $a_{cv}$ - und Beleuchtungsniveauwert während der Dämmerungsphasen sollten Schlußfolgerungen zur weiteren Gestaltung der Beleuchtungsdynamik bei der künstlichen Beleuchtung gezogen werden.
- Über die  $\bar{z}(\lambda)$ -Spektralwertfunktion können in der Normfarbtafel  $a_{cv}$ -Bereiche definiert werden, die bei künstlicher Beleuchtung empfohlen werden.
- Die Einführung der  $c(\lambda)$ -Funktion in die Beleuchtungsvorschriften-, Regeln oder Normen sollte baldmöglichst erfolgen.

## **6. Danksagung**

Hiermit möchten wir allen danken, die die Arbeit wohlwollend begleitet haben.

Es würde uns freuen, wenn mit dieser Arbeit ein weiterer Anstoß zu einem Paradigmenwechsel in der Beleuchtungsgestaltung gegeben und eine fruchtbare Diskussion eingeleitet wird.



## **7. Literatur**

**Adrian, W.; Kokoschka, S.:** *Zur Abhängigkeit der fovealen Sehschärfe von der Wellenlänge des Lichtes*, **Lichttechnik** 17 (1965) 3, S. 32A - 38A

**Bodmann, H.W.; Söllner, G.; Voit, E.:** *Bewertung von Beleuchtungsanlagen bei verschiedenen Lichtarten*, **CIE-Tagung** 1963, Wien Tg.B. S. 502 - 509

**Boyce, P. R.:** *Is Full-Spectrum Lighting Special?*, **IRC Internal Report Nr. 659** S. 30 - 36 (s.a. Veitch)

**Brainhard, G.C. u.a.:** *Action Spectrum for Melatonin Regulation in Humans: Evidence for a Novel Circadian Photoreceptor*, **J. of Neuroscience**, 21 (2001) 16, S. 6405 - 6412

**CIE N° 75:** *Spectral luminous efficiency functions based upon brightness matching for monochromatic point sources 2° and 10° fields*, Publication No. 75, Wien, Central Bureau of the CIE, 1988

**CIE N°(13.2):** *Verfahren zur Messung und Kennzeichnung der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen*, 2 nd ed. 1988

**Davis, R. G.; Ginther, D. N.:** *Correlated color temperature, illuminance level, and the KRUIHOF-curve*, **J. Illum. Eng. Soc.** 19 (1990) 1, S. 27 - 38

**DIN 5031:** *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik*

**Ehrenstein, W.:** *Das Auge stellt die biologische Uhr des Menschen*, **Tagung Licht und Gesundheit**, Berlin, 2002, Tg.B. S. 197 - 213

**Fisch, J.:** *Licht und Gesundheit*, Literaturrecherche, BG Schrift 2000

**Fleischer, S.:** *Die psychologische Wirkung veränderter Kunstlichtsituationen auf den Menschen*, **Dissertation ETH Zürich**, 2001

**Gifford, R.:** *Scientific Evidence for claims about Full-Spectrum Lamps: Past and Future*, **IRC Internal Report Nr. 659**, S. 37 - 46 (s.a. Veitch)

**Hartmann, E.; Müller-Limmroth, W.:** *Stellungnahme zur Frage der Verträglichkeit des Leuchtstofflampenlichtes*, **LiTG-Schrift** 1981

**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

**Kranhold, Th.:** Charakterisierung weißer LED, **Diplomarbeit FG Lichttechnik, TU Ilmenau**, 2002

**Kruithof, A.A.:** *Röhrenlampen mit Leuchtstoffen für allgemeine Beleuchtungszwecke*, **Philips Techn. Rd.** 6 (1941) 3, S. 65 - 96

**Lapiente, V.:** *Untersuchung zur Eignung des Spektralbandverfahrens zur Beschreibung der Farbwiedergabeeigenschaften*, Abschluß-Arbeit **TU Ilmenau**, FG Lichttechnik, 2001

**LiTG:** *Stellungnahme zur Frage der Lichtwirkung von Tageslicht-Leuchtstofflampen*, **Licht** (1989) 6, S. 416 - 417

**Maas, J. B. u.a.:** *Effects of spectral differences in illumination on fatigue*, **J. of Appl. Psychol.** 59 (1974) 4, S. 524 - 526

**Müller, D.:** *SAD-Experimente mit Licht*, mündliche Information, 2002

**Niderhoff, P.; Enders, L.:** *Tageslicht-Vollspektrumlampen*, **Licht** (1990) 3-4, S. 268 - 272

**Pattison, D. B.:** *Full spectrum lighting: A review of the literature*, **Intern. Report** (1985), Victoria; BC Ministry of Health

**Polle, D.; Pickelein, A.:** *Die Steuerung der Lichtverteilung im Raum und die Akzeptanz des modernen Büroarbeitsplatzes*, **Tg. Lux junior 2001**, Dörfeld, Tg. B. S. 179 - 188

**Rea, MS; Figueiro, MG; Bullough, J.D.:** Circadian photobiology: an emerging framework for lighting practice and research, **Lighting Res.& Technol.** 34 (2002) 3, pp177-190

**Rosenthal, N. E.; Kasper, S.:** *Licht-Therapie*, Heyne Verlag, München, 1997

**Sauer, M.:** *Lichthygiene: Die Vorbeugung zivilisationsbedingter Störungen circadianer Rhythmen in der Baupraxis*, **Tagung Licht und Gesundheit 2001**, Berlin, Tg. B. S. 138 - 147

**Schierz, Ch.:** *Wirkung von Linienspektren auf die Akkommodation des Auges*, **Dissertation, ETH Zürich**, 1993

**Schierz, Ch.:** Leben wir in der "biologischen Dunkelheit?", **Tagung Licht 2002**, Maastricht, Tagungsband S. 381-389

**Sutter, E.:** *Schutz vor optischer Strahlung*, **VDE-Verlag**, Berlin-Offenbach, 1999

**Thapan, K.:** *An action Spectrum for melatonin suppression: evidence for a novel non-rod, non-cone photoreceptor system in humans*, **Journ. of Physiology** 535 (2001) 1, S. 261 - 267

**Triander, S. M. u.a.:** *Inhibition of melatonin secretion onset by low levels of illumination*, **J. Sleep Res.** 5 (1996), S. 77 - 82

**Veitch, J. A. u.a.:** *Full-Spectrum Fluorescent Lighting Effects on People: A Critical Review*, in J. A. Veitch (Ed) *Full-spectrum lighting effects on performance, mood, and health*, **IRC Internal Rep. Nr. 659**, S. 53 - 111, Ottawa, ON: National Research Council of Canada, Inst.

For Res. In Construction, 1994

**Van den Beld, G.:** Licht und Gesundheit, Tagung Licht 2002, Maastricht, Tagungsband  
S. 22-33

**Witting, W.:** *Tageslicht oder Kunstlicht*, **8. Symposium “Innovative Lichttechnik in Gebäuden”**, 24.-25.1.2002 Kloster Banz, Tg.B. S. 104 - 109

**Wright, W. D.; Pitt, F. H. D.:** *Hue-discrimination in normal colour vision*, **Proc. Phys. Soc.** 46 (1934), S. 459 - 479

**Zulley, J.:** *Lichttherapie - eine chronobiologische Behandlungsform*, **J. Illum. Eng. Soc.** 19 (1990) 1, S. 27 - 38

---: LMK mobile, Rollei, Prospekt der Fa. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau