

Ortsaufgelöste Messung von circadianen Strahlungsgrößen an Arbeitsplätzen

Dietrich Gall, Cornelia Vandahl, Karin Bieske

Moderner Messtechnik ermöglicht die ortsaufgelöste Messung von bewerteten Strahlungsgrößen an realen Arbeitsplätzen. Daraus lassen sich daraus Angaben zur spektralen Wirkung des Lichtes auf den Menschen ableiten. Diese beziehen sich nicht nur auf das visuelle System sondern auch auf die circadianen Wirkungen und Farbwirkungen.

Mit der Definition der circadianen Wirkungskurve ist man in der Lage, eine circadiane Metrik aufzubauen. Diese wird im Vortrag vorgestellt.

Seit neuestem ist die circadiane Empfindlichkeit in ein ortsaufgelöstes Messgerät implementiert, so dass die circadianen Größen im Gesichtsfeld vermessen werden können. Es liegen erste Erfahrungen mit dieser Messtechnik vor über die berichtet werden soll.

1. Definition und Auswahl circadianer Größen

1.1 Allgemeine Beschreibung photobiologischer Größen

Eine photobiologisch wirksame Größe sollte als bewertete Strahlstärke beschrieben werden.

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

I_{bio} - bewertete Strahlstärke $\equiv I_{\text{es}}$

$I_{e\lambda}$ - spektrale Strahlstärke

$F_{\text{bio}}(\lambda)$ - Aktionsspektrum der photobiologischen Wirkung (Wirkungsfunktion, 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:

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

Will man die circadiane photobiologische Wirkung beschreiben, muss für $s(\lambda)$ die circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ (siehe Kapitel 1.2) verwendet werden. Damit ergibt sich eine circadiane Strahlungsgröße X_{ec} zu:

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

Der Einfachheit halber wird $k = 1$ gewählt.

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

$$(4) \quad X_v = k_m \int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda \quad k_m = 683 \text{ lm/W}$$

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:

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

Das Verhältnis der beiden Integrale soll als circadianer Wirkungsfaktor a_{cv} bezeichnet werden /2/:

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

Zwischen den circadianen und lichttechnischen Größen besteht dann folgende Beziehung:

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

Im weiteren sollen circadiane Strahldichten bestimmt werden. Aus Gleichung (3) folgt für die circadiane Strahldichte L_{ec} :

$$(8) \quad L_{ec} = k \int L_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda$$

Dabei ist L_{ec} die spektrale Strahldichte. Mit der Strahldichte L_{ec} kann bei bekanntem Reflexionsgrad einer aselectiv diffus reflektierenden Fläche auch die circadiane Bestrahlungsstärke E_{ec} bestimmt werden:

$$(9) \quad E_v = \frac{\pi \cdot \Omega_0 \cdot L_v}{\rho_v} \quad \text{bzw.} \quad E_{ec} = \frac{\pi \cdot \Omega_0 \cdot L_{ec}}{\rho_{ec}} \quad (\rho_v \equiv \rho_{ec})$$

1.2 Circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ für die Melatoninunterdrückung

Von /1/ und /9/ wurden Werte für die Wirkungsfunktion bei einzelnen Wellenlängen ermittelt (Abb. 1). In diese Messpunkte wurde eine mittlere Kurve gelegt, die im kurzwelligen Bereich durch die Transmissionskurve des menschlichen Auges ergänzt. Diese „glatte“ Kurve $c(\lambda)$ mit $c(\lambda=450) = 1$ soll für alle weiteren Betrachtungen herangezogen werden /3/.

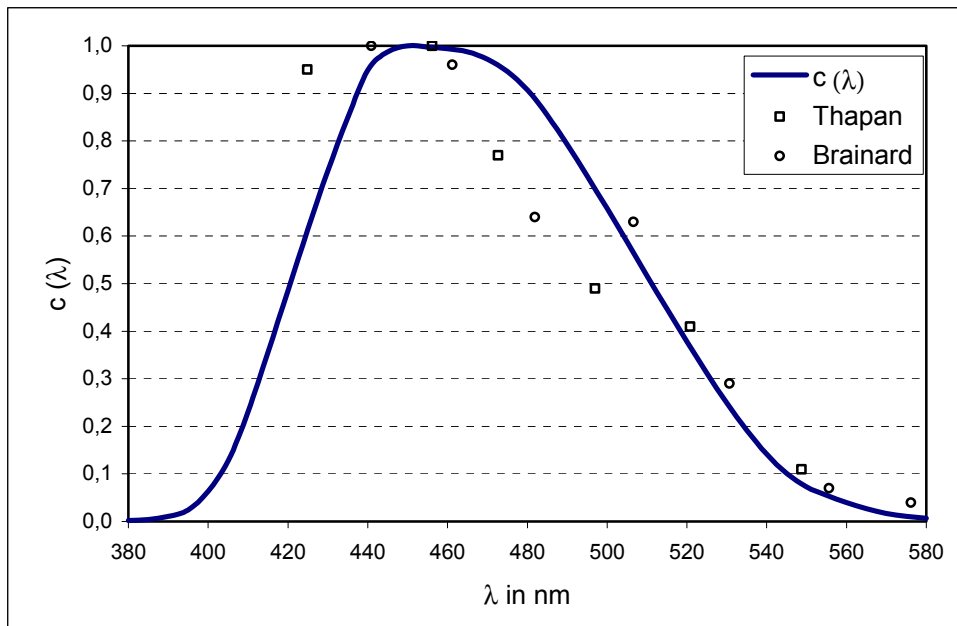


Abb 1: Gemittelte circadiane Wirkungskurve $c(\lambda)$

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.

Zur Auswahl geeigneter circadianer Strahlungsgrößen wird auf /4/ verwiesen. Daraus ist zu entnehmen, 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 Gleichung (3) verwendet werden. Für Beleuchtungsanlagen empfiehlt sich darüber hinaus die Verwendung des circadianen Wirkungsfaktors a_{cv} nach Gleichung (6), da damit die Wirkungen unterschiedlicher Lichtfarben gegenüber gestellt werden können.

2. Möglichkeiten der messtechnischen Erfassung circadianer Größen

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

- spektrale Messung
- integrale Messung mittels $c(\lambda)$ -angepassten Empfängern

In /5/ wurden umfangreiche theoretische Betrachtung zur Messung circadianer Größen veröffentlicht, auf die an dieser Stelle verwiesen wird.

Für die Untersuchungen wurden sowohl spektrale als auch integrale Messungen durchgeführt.

2.1 Spektralgeräte

Spektralgeräte sind nicht ortsauflösend, aber unabhängig von der Genauigkeit der Anpassung. Deshalb werden die Geräte zur Kalibrierung der ortsauflösenden Kameras verwendet.

Die spektralen Messungen erfolgten mit dem Spektralradiometer JETI SPECBOS USB 1100 (SPECBOS-Messgerät **17**). Aus die Verteilung der spektralen Strahldichte $L_{e\lambda}$ oder der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$ können durch Wichtung mit der $c(\lambda)$ -Kurve circadiane Größen (Gleichung **(3)**) und durch Wichtung mit der $v(\lambda)$ -Kurve lichttechnische Größen berechnet werden.

2.2 Ortsaufgelöste Messgeräte mit $v(\lambda)$ - und $c(\lambda)$ -Angepassung

Seit längerem ist die ortsaufgelösten Leuchtdichte-Messung mit $v(\lambda)$ -angepassten CCD-Kameras möglich. Die neue Messkamera LMK color **18** der Firma TechnoTeam enthält jetzt zusätzlich eine ausreichend genaue Anpassung an die $c(\lambda)$ -Funktion. Somit ist es möglich, zeitlich nacheinander lichttechnische und circadiane Größen zu vermessen. Die Auswertesoftware bietet zudem die Möglichkeit, daraus weitere Größen, wie den acv-Wert nach **(6)** zu berechnen.

Abb. 2 zeigt die spektrale Anpassung der Kamera LMK color. 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% **16**.

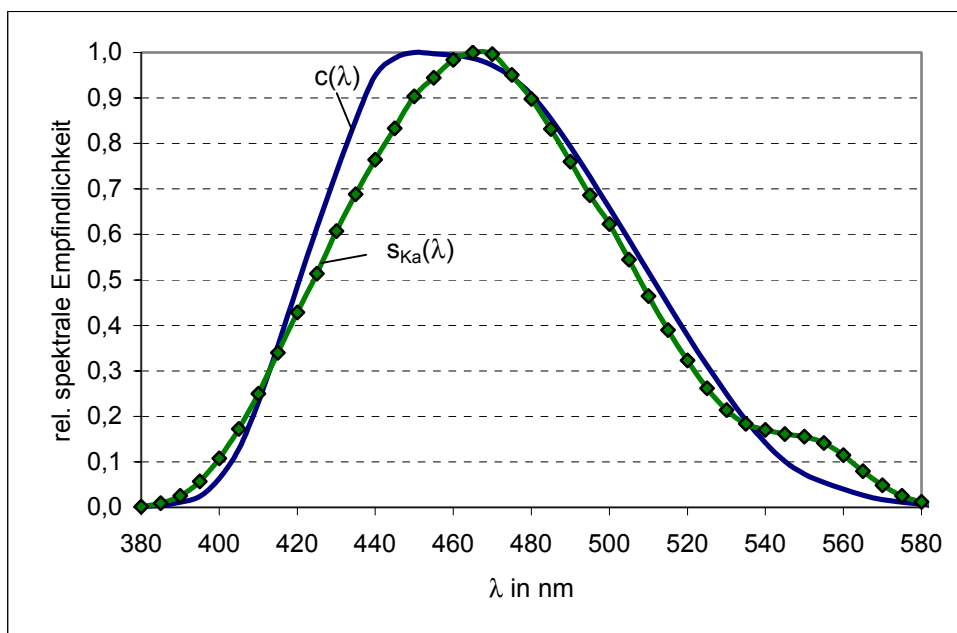


Abb: 2:

Spektrale Anpassung einer CCD-Kamera (LMK color) an die circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$

$c(\lambda)$ - circadiane Wirkungsfunktion

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

3. Praxismessungen

3.1 Messungen der circadianen Strahldichte und Bestrahlungsstärke auf einer Referenzfläche

In mehreren Büroräumen wurden sowohl spektrale als auch integrale Messungen durchgeführt. Tab. 1 zeigt die wesentlichen Parameter der Beleuchtungsanlage.

Messort	Lampen
Büro 1	Rasterleuchte 2x 58 W 8000K
Büro 2	Rasterleuchte 2x 58 W 740
Büro 3	Rasterleuchte 3x 18 W 840

Tab. 1: Lampen in den untersuchten Büroräumen

Mit der Kamera LMK color wurden Leuchtdichten und circadiane Strahldichten ortsaufgelöst vermessen. Zusätzlich wurden spektrale Strahldichten mit dem Spektralmessgerät JETI SPEC-BOS USB 1100 bestimmt

Die Beleuchtungsstärke in der Arbeitsebene Leuchtdichte nach Gleichung (9) bestimmt werden. Als Referenzfläche wurde ein Papier (190 x 225) verwendet, dessen Reflexionseigenschaften wellenlängenunabhängig und diffus sind und das einen Reflexionsgrad von $\rho_v = \rho_{ec} = 0,84$ besitzt.

Die integralen Messungen mit der LMK color ergaben die in Tab. 2 aufgeführten Messwerte für Leuchtdichte L, circadiane Strahldichte L_{ec} , circadianer Wirkungsfaktor a_{cv} und Beleuchtungsstärke E. In Tab. 3 sind die Messergebnisse der Spektralmessungen zusammengefasst. Zwischen den Ergebnissen der beiden Messmethoden besteht eine gute Übereinstimmung.

Messort	L	L_{ec} ($c(\lambda)$ -bewertet)	a_{cv}	E	E_{ec} ($c(\lambda)$ -bewertet)
Büro 1	97,7 cd/m ²	0,118 W/sr m ²	0,822	366,1 lx	0,441 W/m ²
Büro 2	184,4 cd/m ²	0,122 W/sr m ²	0,452	689,7 lx	0,456 W/m ²
Büro 3	223,8 cd/m ²	0,135 W/sr m ²	0,412	837,0 lx	0,505 W/m ²

Tab. 2: Messung mit der LMK color auf der Referenzfläche 2 (Abb. 3 und 5)

Messort	L	L_{ec} ($c(\lambda)$ -bewertet)	a_{cv}	E	E_{ec} ($c(\lambda)$ -bewertet)	CCT
Büro 1	89,8 cd/m ²	0,110 W/sr m ²	0,842	335,7 lx	0,414 W/m ²	6358 K
Büro 2	196,4 cd/m ²	0,126 W/sr m ²	0,440	734,4 lx	0,473 W/m ²	4001 K
Büro 3	226,3 cd/m ²	0,129 W/sr m ²	0,390	846,5 lx	0,483 W/m ²	3592 K

Tab. 3: Messergebnisse der Spektralmessung auf der Referenzfläche 2

3.2 Ortsaufgelöste Messung der circadianen Bestrahlungsstärke

Die räumliche Verteilung der Leuchtdichte und des circadianen Wirkungsfaktors im Büroraum 1 zeigen die Abb. 3 und 4. Zusätzlich sind 3 Auswerteregionen eingezeichnet. Region 2 ist die Referenzfläche für die Messungen in Kapitel 4. Die mittleren, minimalen und maximalen Messwerte für die jeweilige Region sind in den Tab. 4 und 5 zusammengefasst. Man sieht eine sehr große Streuung der Einzelwerte, was die Bedeutung ortsaufgelöster Messungen unterstreicht. Abb. 4 und 6 zeigen eine Schnittdarstellung entlang der Linie 3 in den Bildern 3 und 5.

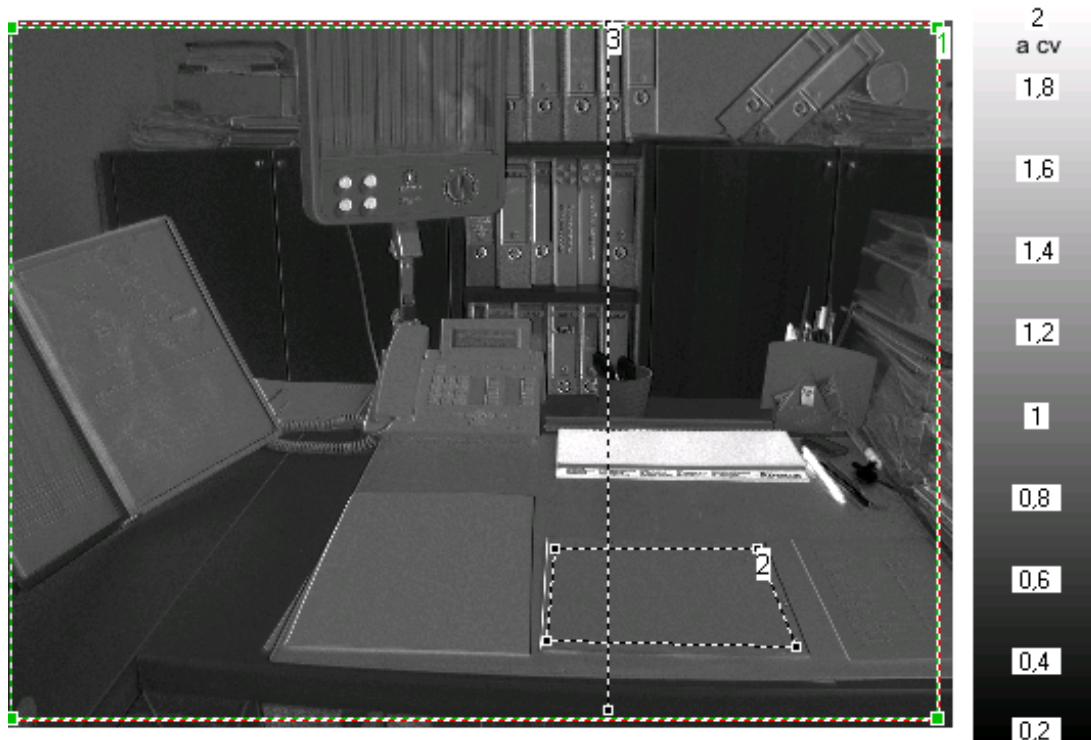


Abb. 3: Verteilung des a_{cv} -Wertes im Arbeitsbereich (Büro 1)

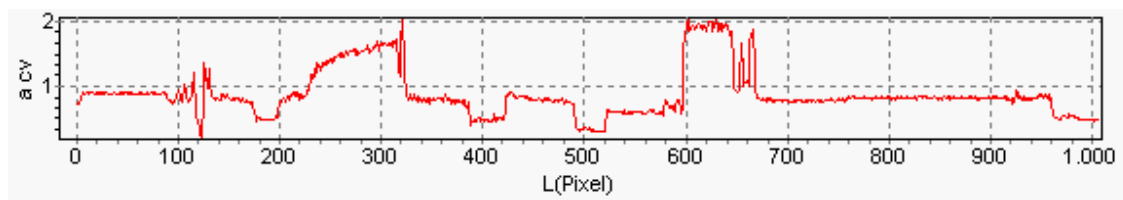


Abb. 4: Schnitt entlang Linie 3 in Abb. 2

Nr.	Region	Mittelwert a_{cv}	Minimum a_{cv}	Maximum a_{cv}
1	ganze Szene	0,72	0,06	4,24
2	Referenzfläche	0,82	0,68	1,04
3	Linie	0,88	0,19	2,05

Tab. 4: a_{cv} -Werte in den Regionen nach Abb. 3



Abb. 5: Verteilung der Leuchtdichte im Arbeitsbereich (Büro 1)

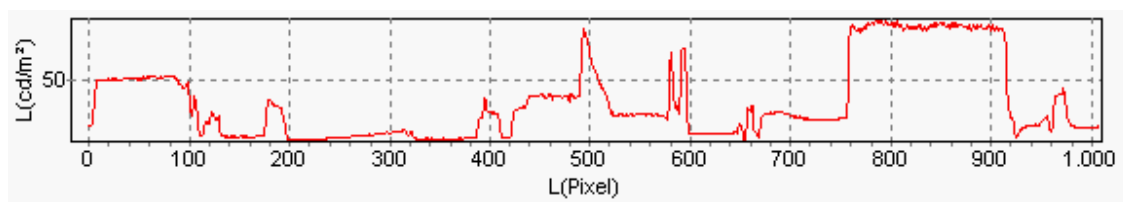


Abb. 6: Schnitt entlang Linie 3 in Abb. 5

Nr.	Region	Mittelwert L	Minimum L	Maximum L
1	ganze Szene	34,9	0,87	203,5
2	Referenzfläche	97,8	75,6	115,9
3	Linie	32,2	1,69	97,4

Tab. 5: Leuchtdichte-Werte in den Regionen nach Abb. 5

4. Zusammenfassung

Es zeigt sich, dass mit der orts aufgelösten Messtechnik circadiane Größen sehr bequem und ausreichend genau vermessen werden können. Besonders günstig erwies sich die Messung der lichttechnischen und circadianen Größen durch ein und das selbe Messgerät. Probleme früherer Messungen hinsichtlich Messregion und Geräteposition sind damit gelöst und die orts aufgelöste Bestimmung berechneter Größen, wie dem a_{cv} -Wert ist möglich.

Die Messung der lichttechnischen und circadianen Größen erfolgt zeitlich nacheinander, was zeitlich stabile Lichtverhältnisse erfordert. Tageslichtmessungen und die Messung dynamischer Beleuchtungssituationen sind somit nicht fehlerfrei möglich.

Mit den circadianen Strahlungsgrößen können jetzt je nach Wirkung die förderlichen bzw. zulässigen Dosisangaben abgeleitet werden.

5. Literatur

- /1/** 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
- /2/** Gall, D.; Lapuente, V.: Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums. Licht 54 (2002) 7/8 S. 860-871
- /3/** Gall, D.: Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Ermittlung. Licht 54 (2002) 11/12, S. 1292 - 1297
- /4/** Gall, D.: Die Messung circadianer Strahlungsgrößen. Tagung Licht und Gesundheit 26. bis 27.2..2004
- /5/** Gall, D.; Vandahl, C.; Bieske, K. u. a.: Die Ermittlung von Licht- und Farbfeldgrößen zur Bestimmung der spektralen Wirkung des Lichtes
- /6/** Krüger, U. (Fa. TechnoTeam Ilmenau): Mündliche Mitteilungen, 12/03
- /7/** <http://www.opteema.de> Stand: März 04
- /8/** TechnoTeam: LMK-Color,
Fa. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau 2003
<http://www.technoteam.de/>
- /9/** 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

Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Gall
Dr.-Ing. Cornelia Vandahl
Dipl.-Ing. Karin Bieske

Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik
Unterer Berggraben 10
D-98693 Ilmenau