

Die Ermittlung von Licht- und Farbfeldgrößen zur Bestimmung der spektralen Wirkung des Lichtes

Prof. Dr.-Ing. habil. D. Gall
Dr.-Ing. Cornelia Vandahl
Dipl.-Ing. Karin Bieske
Alexander Schmidt
Rene Herrmann
Dipl.-Ing. Carsten Blankenhagen

Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik
PF 100565, D-98684 Ilmenau
cornelia.vandahl@tu-ilmenau.de

Mit der Definition der circadianen Wirkungskurve $c(\lambda)$ ist man in der Lage, eine circadiane Metrik aufzubauen. Dies kann sowohl für die circadiane Bestrahlungsstärke als auch die circadiane Strahldichte erfolgen. Näherungsweise kann auch die circadiane Wirkung mit der Normspektralwertkurve $z(\lambda)$ beschrieben werden.

Über die Erfahrung beim Einsatz von den speziell entwickelten Messgeräten zur Vermessung von Beleuchtungsanlagen soll in dem Beitrag berichtet werden.

1 Definition und Auswahl circadianer Größen

1.1 Allgemeine Beschreibung photobiologischer Größen

Es scheint zunächst 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 Nr.103]**, **[CIE Nr.106]**, **[CIE Nr.125]**, 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. **[Blattner03]**. Es sollen deshalb im weiteren nicht mehr die in früheren Veröffentlichungen vorgeschlagenen circadianen Lichtgrößen **[Gall02]**, sondern die circadianen Strahlungsgrößen **[GallLapuente02]** verwendet werden.

Eine photobiologisch wirksame Größe sollte als bewertete Strahlstärke beschrieben werden.

$$(1.1) \quad I_{\text{bio}} = k \int I_{e\lambda} F_{\text{bio}}(\lambda) d\lambda$$

- 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:

$$(1.2) \quad X_{\text{es}} = k \int X_{e\lambda} s(\lambda) d\lambda$$

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:

$$(1.3) \quad X_{\text{ec}} = k \int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda$$

Der Einfachheit halber wird $k = 1$ gewählt.

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

$$(1.4) \quad X_v = k_m \int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda$$

$$k_m = 683 \text{ lm/W}$$

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:

$$(1.5) \quad \frac{X_{\text{ec}}}{X_v} = \frac{k \int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda}{k_m \int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda}$$

Das Verhältnis der beiden Integrale soll als circadianer Wirkungsfaktor a_{cv} bezeichnet werden [**GallLapuente02**]:

$$(1.6) \quad a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda}$$

Zwischen den circadianen und lichttechnischen Größen besteht dann folgende Beziehung:

$$(1.7) \quad X_{ec} = \frac{a_{cv}}{k_m} X_v$$

Eine circadiane „lichttechnische“ Größe wäre dann nach Gleichung (1.8) definiert. Diese in früheren Veröffentlichungen eingeführten Größen sollen in Zukunft nicht mehr verwendet werden.

$$(1.8) \quad X_c = k_m X_{ec} = a_{cv} X_v$$

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

Von [Brainhard01] und [Thapan01] wurden Werte für die Wirkungsfunktion bei einzelnen Wellenlängen ermittelt (Bild 1.1). In diese Messpunkte wurde eine mittlere Kurve gelegt, die im kurzwelligen Bereich durch die Transmissionskurve des menschlichen Auges ergänzt wurde (s. a. Blaulicht-Gefährdungskurve $B(\lambda)$ [ICNIRP97]). Diese „glatte“ Kurve $c(\lambda)$ soll für alle weiteren Betrachtungen herangezogen werden. Die so gewonnenen Werte für $c(\lambda)$ werden in Tabelle 1.1 in 5 nm-Schritten angegeben, wobei die $c(\lambda)$ -Kurve bei $\lambda=450$ nm mit $c(\lambda=450) = 1$ angenommen wird [Gall02].

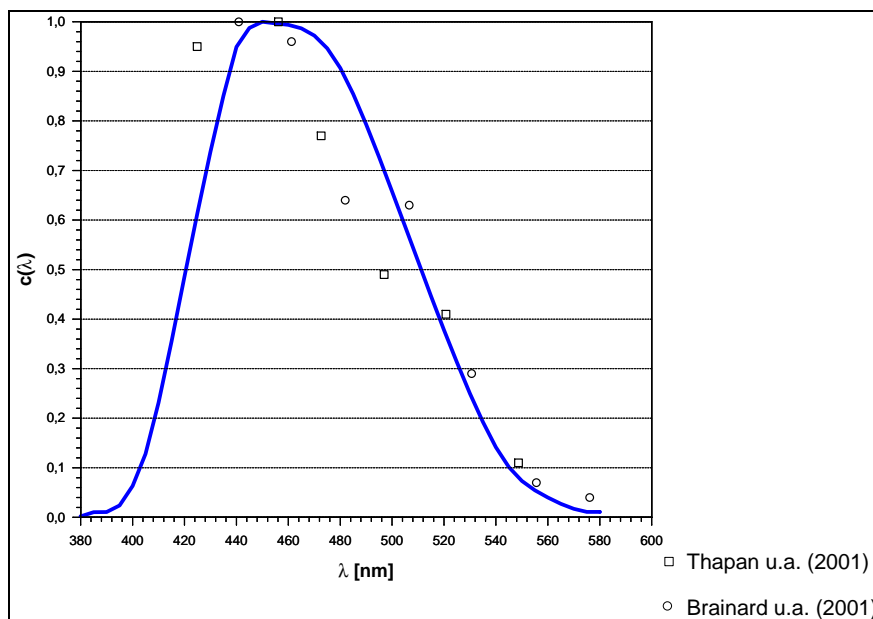


Bild 1.1:
Gemittelte circadiane Wirkungskurve $c(\lambda)$

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

Tabelle 1.1:

Werte für die $c(\lambda)$ -Kurve

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 (1.3) ermöglicht.

Zur Auswahl geeigneter circadianer Strahlungsgrößen wird auf **[Gall04]** 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 (1.3) verwendet werden. Für Beleuchtungsanlagen empfiehlt sich darüber hinaus die Verwendung des circadianen Wirkungsfaktors a_{cv} nach Gleichung (1.6), da damit die Wirkungen unterschiedlicher Lichtfarben gegenüber gestellt werden können.

2 Theoretische Betrachtung zur messtechnischen Erfassung circadianer Größen

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

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

2.1 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 1.1) und bei lichttechnischen Größen mit der $v(\lambda)$ -Kurve gewichtet wird. Mit einem ent-

sprechenden 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.

2.2 Messung mit $c(\lambda)$ -angepassten Empfängern

2.2.1 Allgemeine Betrachtungen

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 Fotoapparat der Firma ROLLEI (LMK mobil) die spektrale Empfindlichkeit des blauen Empfängerkanals $s_{Ka}(\lambda)$ ähnlich der $c(\lambda)$ -Wirkungsfunktion (Bild 2.1). Damit ist schon eine ortsauflösende Bestimmung der circadianen Strahldichteverteilung 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 (LMK color) an die $c(\lambda)$ -Funktion ist inzwischen gelungen (Bild 2.2), [Krüger03]. Die dargestellte Anpassung entspricht einem f1-Kennwert von etwa 10%. 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.

Für tragbare Messgeräte bieten sich 3 Chip-farbangepasste Si-Empfänger an, von denen der Z- und der Y-Empfänger näherungsweise für die $c(\lambda)$ bzw. $v(\lambda)$ -Bewertung verwendet werden können (Bild 2.4). Die Ermittlung von circadianen Bestrahlungen (Dosis), kann über eine elektrische Integration der Signale oder andere speichernde Sensoren erfolgen.

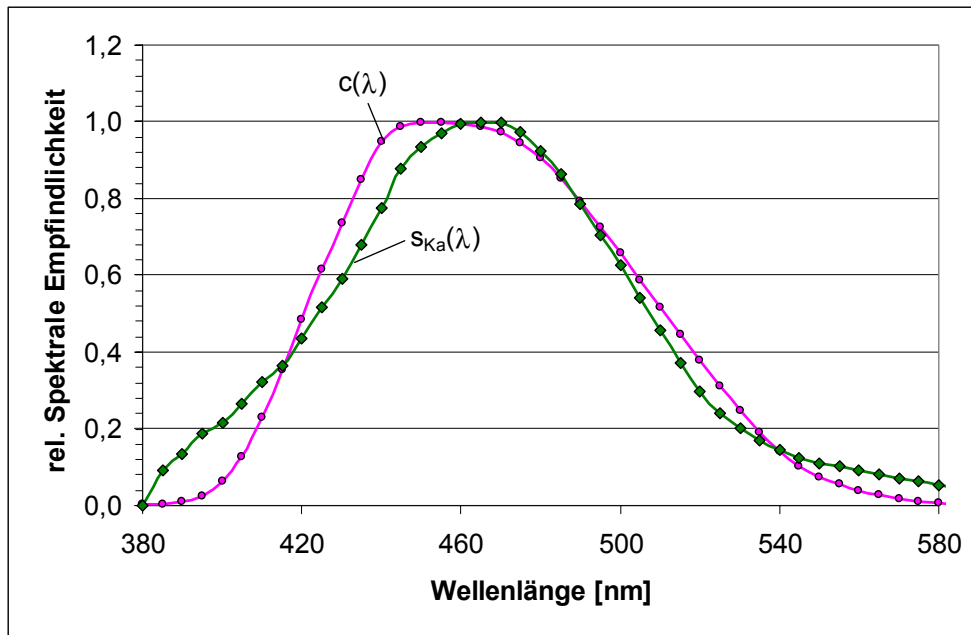


Bild 2.1:
Empfindlichkeitskurve eines blauen Empfängerkanals eines ROLLEI-Photoapparates (LMK mobil)

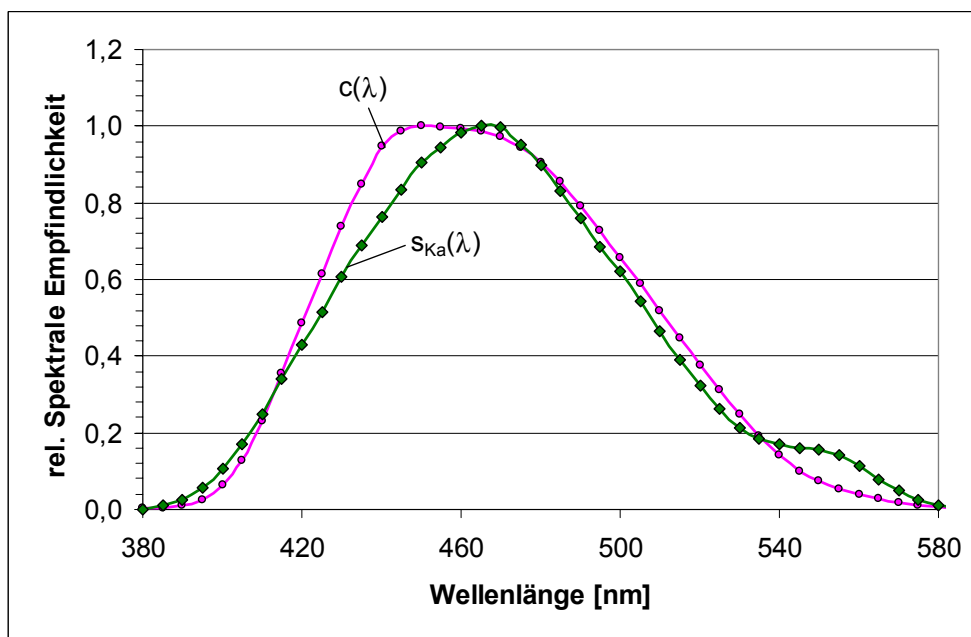


Bild 2.2:
Spektrale Anpassung einer CCD-Kamera (LMK color) an die circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$
 $c(\lambda)$ - circadiane Wirkungsfunktion, entsprechend Bild 1.1 bzw. Tabelle 1.1
 $s_{Ka}(\lambda)$ - Systemempfindlichkeit der Kamera (inklusive CCD, Objektiv, Filter)

2.2.2 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 460 nm verschoben wird $v(\lambda)_{460}$ (Bild 2.3)
- die Normspektralwertfunktion $\bar{z}(\lambda)$ (Bild 2.3b)
- die Blaulichtgefährdungsfunktion $B(\lambda)$ (Bild 2.3) [ICNIRP97]
- Spektrale Empfindlichkeit des Blaukanals der ROLLEI-Kamera $s_{Ka}(\lambda)$ (Bild 2.3)

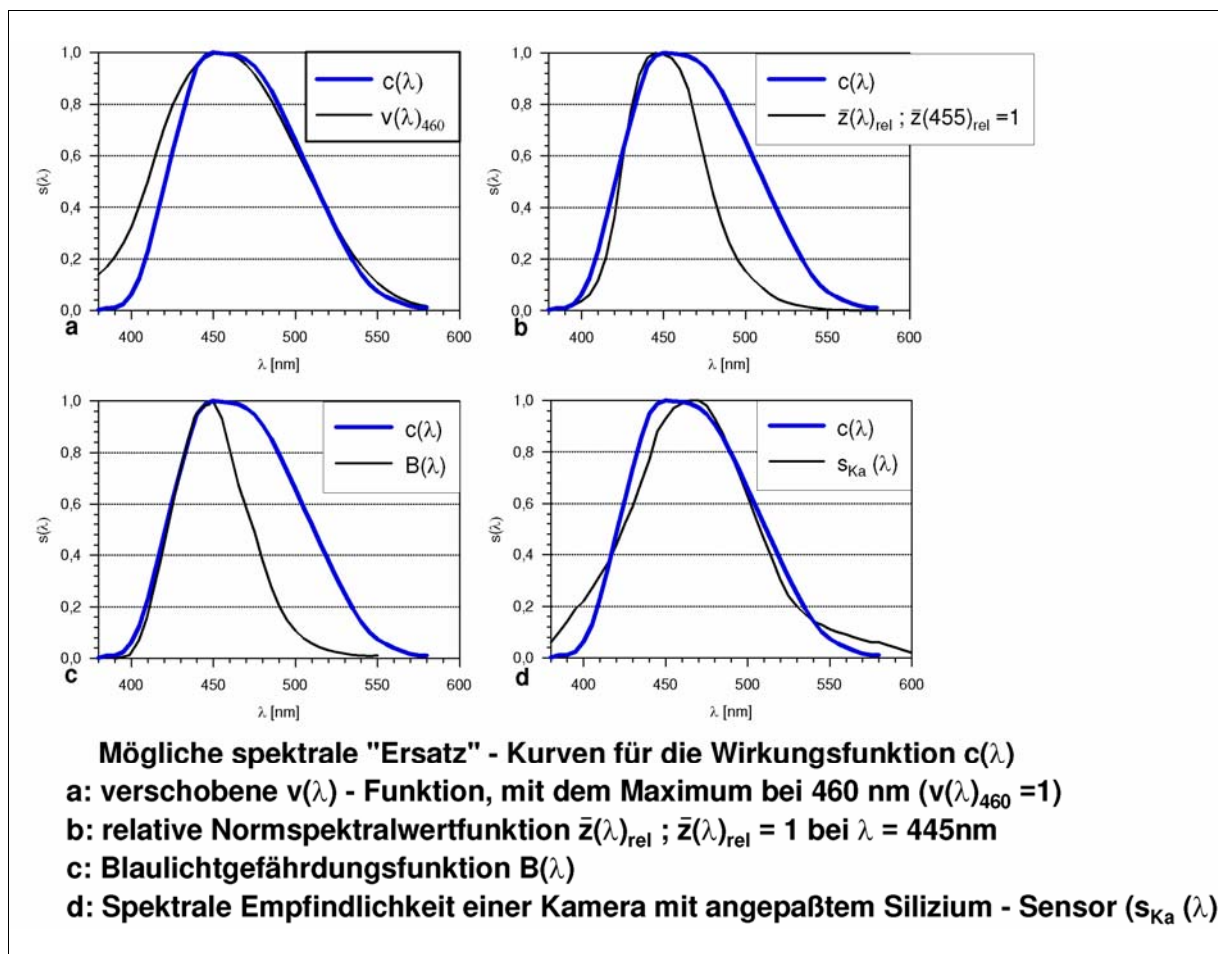


Bild 2.3:
Verschiedene Empfindlichkeitskurven für circadiane Wirkung

Für einige Lampenbeispiele sind in Tabelle 2.1 die mit den Kurven aus Bild 2.3a, b und c ermittelten a_{cv} -Werte angegeben. Es zeigt sich, dass sich die prozentuellen Abweichungen zu der Sollfunktion a_{cv} nach Bild 1.1 bzw. Tabelle 1.1 in vertretbarem Rahmen halten, und somit eine grobe Bestimmung des a_{cv} -Wertes insbesondere mit Dreibeereichsfarbmessgeräten möglich wird.

		$a_{cv} = f(s(\lambda))$				$\Delta a_{cv} [\%]$		
		$a_{cv}(c)$	$a_{cv}(z)$	$a_{cv}(B)$	$a_{cv}(v)$	$\Delta a_{cv}(z)$	$\Delta a_{cv}(B)$	$\Delta a_{cv}(v)$
Lichtquellen								
a	Direkte Sonne 5081 K	0,76	0,84	0,82	0,87	10,5	7,9	14,5
b	Blauer Himmel 19963 K	1,49	1,85	1,87	1,69	24,2	25,5	13,4
c	bewölkter Himmel 5924 K	0,88	1,01	0,99	1,00	14,8	12,5	13,6
d	Glühlampe 2800 K	0,35	0,33	0,31	0,45	-5,7	-11,4	28,6
e	Halogenmetall dampflampe 3640 K neutralweiß, Keramik	0,39	0,43	0,45	0,47	10,3	15,4	20,5
f	Natriumdampf hoch- drucklampe 2770 K	0,28	0,28	0,27	0,32	0,0	-3,6	14,3
Leuchtstofflampen								
a	warmton 2827 K	0,31	0,35	0,34	0,38	12,9	9,7	22,6
b	neutralweiß 3678 K	0,52	0,53	0,52	0,45	1,9	0,0	-13,5
c	„Biolum“ 6125 K	0,88	1,02	0,99	0,98	15,9	12,5	11,4
d	„Daylight“ 5145 K	0,73	0,81	0,78	0,83	11,0	6,8	13,7
e	„Truelite“ 5600 K	0,76	0,71	0,90	0,86	-6,6	18,4	13,2

Tabelle 2.1:

Ermittlung des a_{cv} -Wertes mit „Ersatz“-Kurven

$a_{cv}(c)$ mit $c(\lambda)$ -Kurve (Bild 2.3)

$a_{cv}(z)$ mit z -Kurve (Bild 2.3)

$a_{cv}(B)$ mit $B(\lambda)$ -Kurve (Bild 2.3c)

$a_{cv}(v)$ mit $v(\lambda)_{460}$ -Kurve (Bild 2.3a)

2.3 Darstellung des a_{cv} -Wertes in der Normfarbtabelle

Mit hinreichender Näherung kann man den a_{cv} -Wert auch wie folgt bestimmen **[Gall02]**:

$$(2.1) \quad a_{cv} = \frac{\int X_{e\lambda} c(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda} \approx \frac{\int X_{e\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

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

d. h.

$$(2.2) \quad a_{cv} = \frac{Z}{Y} = \frac{z}{y} = \frac{1-x-y}{y}$$

Über diese farbmimetrische Beziehung kann man den ähnlichsten Farbtemperaturen von Lichtquellen auch näherungsweise a_{cv} -Werte im x-y-Farbdiaagramm zuordnen.

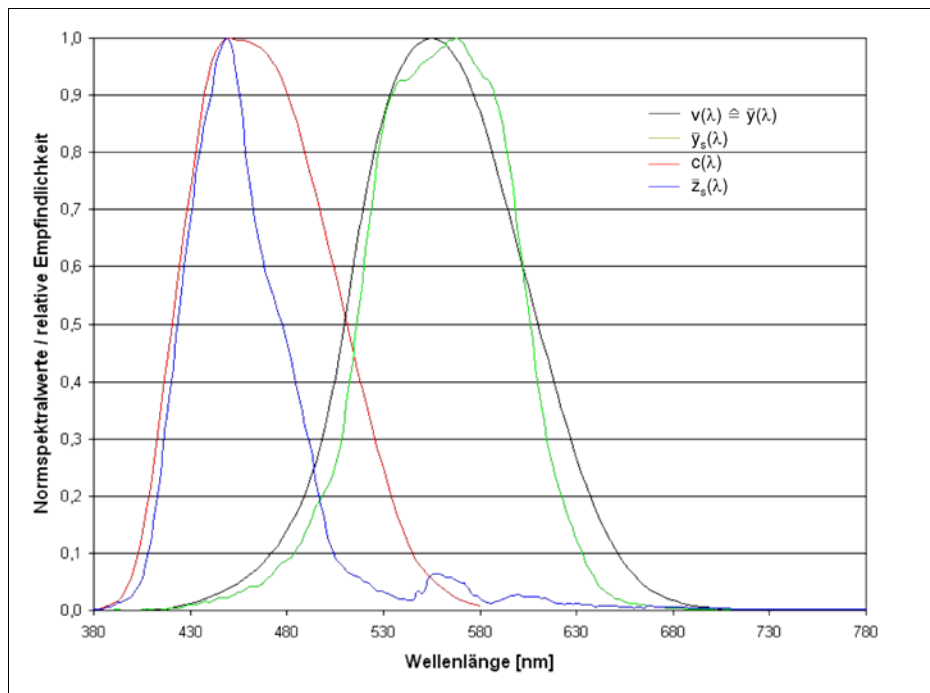


Bild 2.4:
 Spektrale Empfindlichkeiten von 3 Chip-Si-Farbsensoren [MAZET03]
 $\bar{y}_s(\lambda)$; $\bar{z}_s(\lambda)$ – spektrale Empfindlichkeit der farbangepassten Sensoren

Verwendet man anstelle von $c(\lambda)$ in Gleichung (2.1) die Normspektralwertfunktion, ergibt sich:

$$(2.3) \quad a_{cv} \approx \frac{\int X_{e\lambda} \bar{z}(\lambda) d\lambda}{\int X_{e\lambda} v(\lambda) d\lambda} = \frac{Z}{Y}$$

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

Nun ist

$$(2.4) \quad Z = \frac{z}{y} Y$$

und damit wird aus Gleichung (2.3):

$$(2.5) \quad a_{cv} \approx \frac{z}{y} = \frac{1-x-y}{y}$$

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 2.5). 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 2.6.

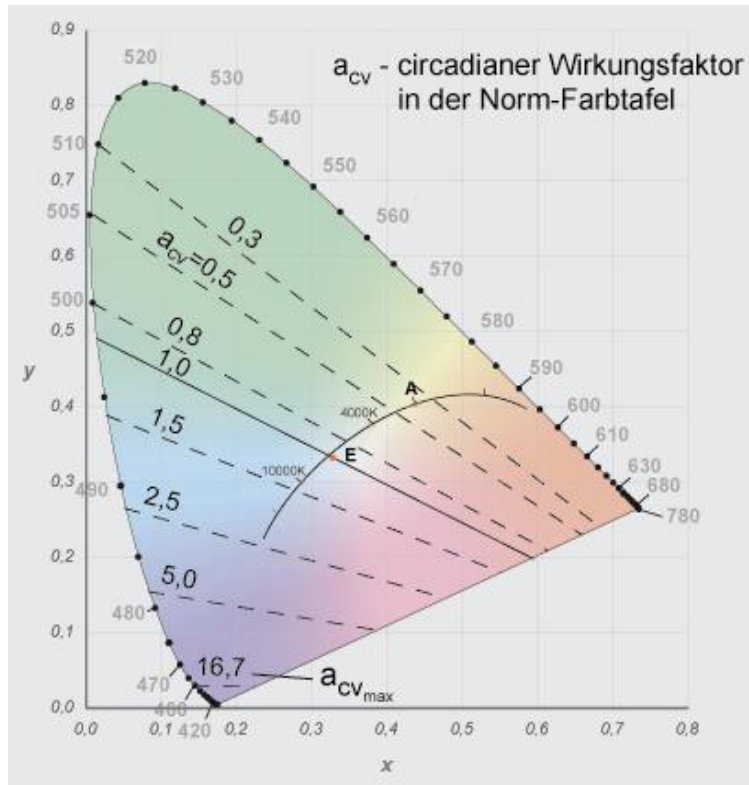


Bild 2.5:
 a_{cv} -Werte in der Normfarbtabelle

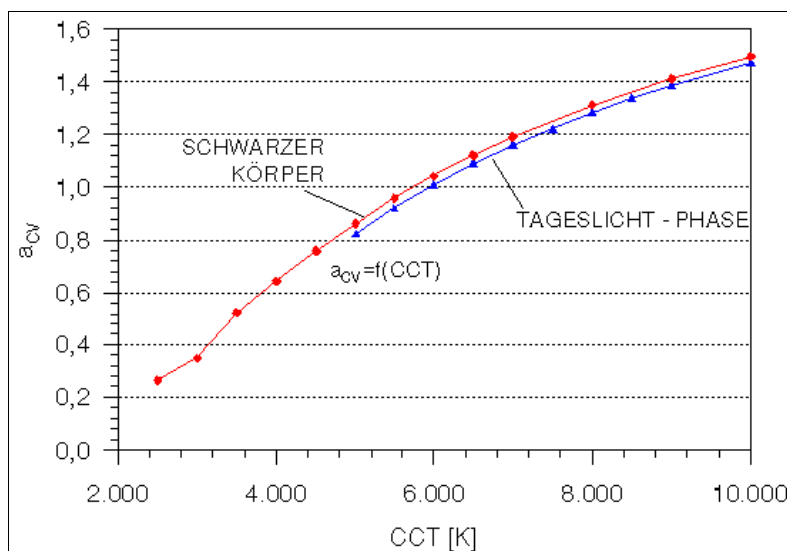


Bild 2.6:
Circadianer Wirkungsfaktor a_{cv} als Funktion der Farbtemperatur (CCT)

3 Evaluierung der vorhandenen Messtechnik

Für die Ableitung eines Konzeptes zur Bestimmung und Vermessung der circadianen und farbmetrischen Parameter wurde in einem ersten Schritt die im Fachgebiet Lichttechnik der TU Ilmenau vorhandene Messtechnik untersucht. Zur Verfügung standen dabei folgende Messgeräte:

1) Spektralmesstechnik

a) Spektralradiometer JETI SPECBOS USB 1100 (SPECBOS-Messgerät)

[Specbos04]

b) Spektralradiometer CS 1000 A MINOLTA (MINOLTA-Messgerät) **[Minolta04]**

2) Integralmesstechnik

a) Leuchtdichtemesskamera LMK 98 (LMK 98) **[LMK9804]**

b) mobile Leuchtdichtemesskamera LMK mobil (ROLLEI-Kamera) **[Rollei04]**

c) Farb- und Beleuchtungsmessgerät HCT-99 GIGAHERTZ-OPTIK (HCT-99)

[HCT-9904]

3.1 Spektralmesstechnik

Mit Hilfe der Spektralmesstechnik ist es möglich, die Verteilung der spektralen Strahldichte $L_{e\lambda}$ oder der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$ einer Strahlung zu bestimmen. Aus den gemessenen Spektraldaten können durch Wichtung mit der $c(\lambda)$ -Kurve circadiane Größen und durch Wichtung mit der $v(\lambda)$ -Kurve lichttechnische Größen berechnet werden. Auf der Basis dieser Größen lässt sich der circadiane Wirkungsfaktor a_{cv} gemäß Gleichung (1.6) bestimmen. Diese Methode erlaubt eine exakte Anpassung an die spektralen Wichtungsfunktionen und ermöglicht auch eine Berücksichtigung zeitlicher Varianzen dieser Bewertungsfunktionen. In Abhängigkeit vom spektralen Auflösungsvermögen des Messgerätes (Bandbreite $\Delta\lambda$ und dem Abtastintervall) kann die spektrale Verteilung einer Strahlung exakt erfasst werden.

Das eingesetzte SPECBOS-Messgerät besitzt in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 780 nm eine spektrale Bandbreite von 9 nm und eine digitale spektrale Auflösung von 4,1 nm **[Specbos04]**. Das Spektralradiometer bestimmt die spektrale Strahldichteverteilung $L_{e\lambda}(\lambda)$ innerhalb eines Bereiches, der mit einem Öffnungswinkel des Messgerätes erfasst wird. Das SPECBOS-Messgerät besitzt einen Öffnungswinkel von $1,5^\circ$. Daraus ergibt sich für eine Messentfernung von 1 m ein Bereich mit einem Durchmesser von 25 mm. Eine Erfassung der örtlichen Verteilung ist auf diese Weise aufwendig und von den spektralen Reflexionseigenschaften des Messortes abhängig. Kommt ein optionaler Kosinusvorsatz zum Einsatz, wird die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$ durch den Halbraum oberhalb der Empfängerebene erfasst. Zusätzlich zu den Spektraldaten werden die Farbwertanteile x , y und die ähnlichste Farbtemperatur angegeben. Mit den Farbwertanteilen ist ebenfalls eine Berechnung des circadianen Wir-

kungsfaktors a_{cv} gemäß Gleichung (2.2) möglich.

Zur Evaluierung des SPECBOS-Messgerätes wurde eine Vergleichsmessung zum zertifizierten Spektralradiometer CS 1000 A MINOLTA am kalibrierten Leuchtdichtennormal der Firma TechnoTeam durchgeführt. Mit einer spektralen Bandbreite von 5 nm und einer digitalen Auflösung von 0,9 nm / Pixel besitzt dieses Gerät im Vergleich zum SPECBOS-Messgerät eine deutlich höhere Messgenauigkeit **[Minolta04]**, **[Specbos04]**. Es zeigte sich eine leichte Überbewertung durch das SPECBOS-Messgerät im langwelligen Bereich. Für die Korrektur der überbewerteten SPECBOS-Messwerte wurde daraus der Korrekturfaktor KFM bestimmt.

Allgemein passt ein Korrekturfaktor KF einen Ist-Wert (X_{ist}) an einen Soll-Wert (X_{soll}) an:

$$(3.1) \quad X_{soll} = X_{ist} \cdot KF$$

$$(3.2) \quad KF = \frac{X_{soll}}{X_{ist}}$$

Damit ergibt sich für die circadiane Größe:

$$(3.3) \quad KFM_C = \frac{L_{c \text{ MINOLTA}}}{L_{c \text{ SPECBOS}}}$$

und für die lichttechnische Größe:

$$(3.4) \quad KFM_V = \frac{L_{v \text{ MINOLTA}}}{L_{v \text{ SPECBOS}}}$$

Für den Wirkungsfaktor a_{cv} ist der Korrekturfaktor $KFM_{a_{cv}}$ damit:

$$(3.5) \quad KFM_{a_{cv}} = \frac{L_{c \text{ MINOLTA}} \cdot L_{v \text{ SPECBOS}}}{L_{c \text{ SPECBOS}} \cdot L_{v \text{ MINOLTA}}} = 0,9961$$

Werte die mit diesen Korrekturfaktoren korrigiert wurden sind im Weiteren mit dem Symbol * gekennzeichnet.

3.2 Integralmesstechnik

Die Güte integrierender Empfänger wird durch die Güte der spektralen Anpassung an die exakte Wichtungsfunktion bestimmt. In Bild 3.1 bis Bild 3.4 sind die spektralen Empfindlichkeiten der eingesetzten Messgeräte dargestellt.

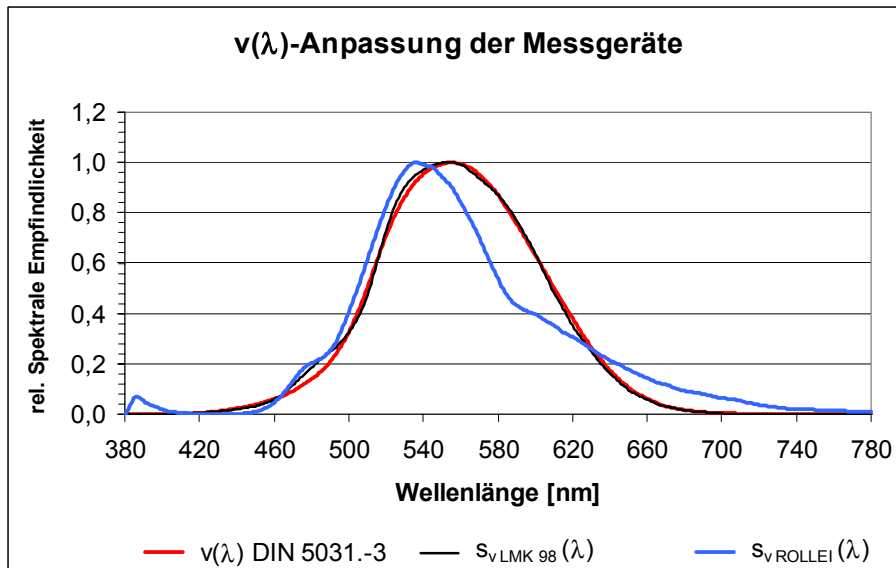


Bild 3.1:
 $v(\lambda)$ -Empfindlichkeit der LMK 98 und der ROLLEI-Kamera

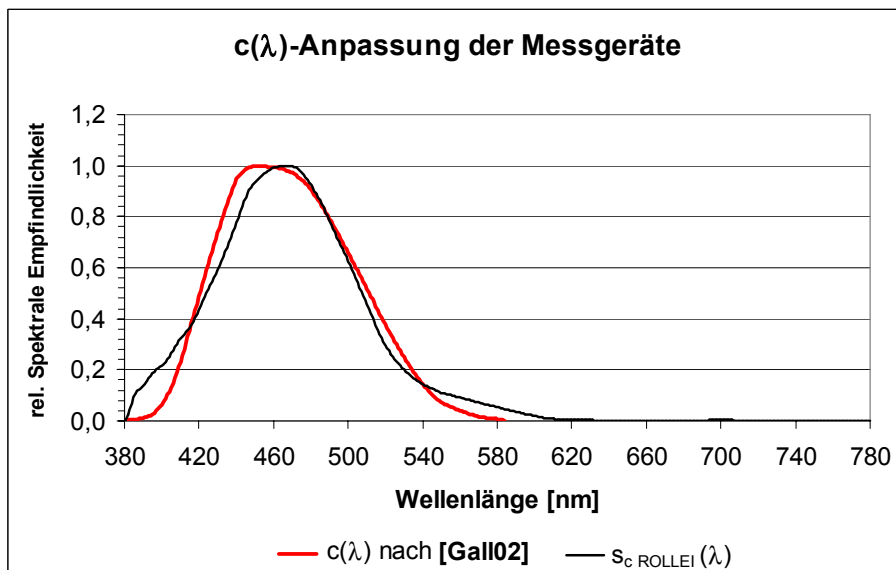


Bild 3.2:
 $c(\lambda)$ -Empfindlichkeit der ROLLEI-Kamera

Bild 3.1 zeigt deutlich, dass die LMK 98, deren CCD-Matrix über Vollfilterung spektral angepasst wurde, über eine sehr gute $v(\lambda)$ -Anpassung verfügt ($f_1 < 3,5\%$). Die spektrale Anpassung der ROLLEI-Kamera erfolgt durch die Berechnung eines gewichteten Mittelwertes aus den Kanälen Rot, Grün und Blau der in der Kamera eingebauten 1-Chip-Farbmatrix. Dazu werden die Pixel aus einer Makrozelle, die aus zwei grünen und je einem roten und blauen Pixel besteht, zu einem Leuchtdichtewert zusammengefasst. Die Anpassung der relativen spektralen Empfindlichkeit des Systems an die $v(\lambda)$ -Funktion erfolgt nicht durch zusätzliche Filter, sondern durch die Bildung des gewichteten Mittelwertes aus den Kanälen {R,G,B} (Matrizierung) [TechnoTeam03a]. Das Bild

3.1 zeigt, dass die Anpassung der ROLLEI-Kamera deutlich von der $v(\lambda)$ -Kurve abweicht. Von der Normlichtart A abweichende spektrale Verteilungen können unter Umständen größere Messfehler verursachen. Aus diesem Grunde kam die ROLLEI-Kamera für die orts aufgelöste Leuchtdichtemessung nicht zum Einsatz.

Da die spektrale Anpassung der ROLLEI-Kamera über die Matrizierung erfolgt, ist es möglich, durch Änderung der Gewichtungen der Einzelkanäle die spektrale Empfindlichkeit der Kamera gezielt zu verändern. Mit der Matrizierung $\{R;G;B\} = \{0;0;1\}$ besitzt die ROLLEI-Kamera eine spektrale Empfindlichkeit, die mit der des blauen Empfängerkanals übereinstimmt. Bild 3.2 zeigt die spektrale Empfindlichkeit des blauen Empfängerkanals der ROLLEI-Kamera, die in guter Näherung der $c(\lambda)$ -Kurve entspricht. Da derzeit keine $c(\lambda)$ -angepassten Empfänger zur Verfügung stehen, wurde die ROLLEI-Kamera mit der Matrizierung $\{R;G;B\} = \{0,0,1\}$ für die Bestimmung der circadianen „Leuchtdichte“ L_c benutzt. Aufgrund der Abweichungen unterhalb 460 nm und im langwelligeren Bereich ist eine Fehlerabschätzung erforderlich

Mit der orts aufgelösten Messtechnik ist es möglich, die örtliche Verteilung der Messwerte einer ganzen Szenerie zu erfassen. Damit ist eine hohe Anzahl von Messpunkten vorhanden, die durch geeignete Kennwerte zu beschreiben sind, um die Datenmenge zu minimieren. Zur Bestimmung der circadianen Wirkungsfaktoren a_{cv} innerhalb einer Szenerie sind eine Messung der lichttechnischen Größe und eine Messung der circadianen Größe Voraussetzung. Da die Messungen mit zwei verschiedenen Messgeräten erfolgen und damit nicht optimal zum gleichen Zeitpunkt stattfinden, ist es nicht möglich, dynamische Szenerien zu untersuchen.

Aus der Verwendung zweier Messgeräte resultiert auch ein örtlicher Versatz zwischen den Aufnahmeorten beider Geräte und damit ein örtlicher Versatz in den erfassten Messregionen. Die LMK 98 besitzt eine CCD-Matrix mit einer Auflösung von 10 bit bei 1280 x 1024 Pixeln. Durch Vollfilterung kann für die lichttechnische Messung die gesamte Auflösung genutzt werden. Bei der ROLLEI-Kamera setzt sich das Leuchtdichtebild aus Makropixeln zusammen, das aus zwei G-angepassten und je einem R- und einem B-angepassten Pixel besteht. Die effektive Leuchtdichtebildauflösung beträgt daher nur 650 x 615 Pixel **[TechnoTeam03a]**. Damit ist der Aufwand für die Anpassung bei der Auswertung erheblich. Diese Nachteile lassen sich vermeiden, wenn ein Messgerät zur Anwendung kommt, das sowohl über eine $c(\lambda)$ -Anpassung als auch über eine $v(\lambda)$ -Anpassung verfügt, wie sie bei der LMK color der Firma TechnoTeam vorhanden ist **[TechnoTeam03b]**.

Zur Überprüfung der Eignung farbmatischer Parameter wurde das Farb- und Beleuchtungsstärkemessgerät HCT-99 der Fa. GIGAHERTZ-OPTIK eingesetzt. Der Farbmesskopf HCT-99 besitzt vier durch Vollfilterung an die spektralen Empfindlichkeiten der von

der CIE genormten Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ angepasste Si-Empfänger. Wegen der zwei Maxima in der $\bar{x}(\lambda)$ -Funktion wurden zwei Empfänger verwendet, wobei einer auf den kurzwelligen Teil $\bar{x}_k(\lambda)$ und der zweite auf den langwelligen Teil $\bar{x}_l(\lambda)$ der Normspektralwertfunktion angepasst ist. Bild 3.3 und Bild 3.4 zeigen die spektralen Empfindlichkeiten des Farbmesskopfes HCT-99 im Vergleich zu den Normspektralwertfunktionen des 2°-Beobachters [Gigahertz-Optik99]. Dabei wird die hohe Güte der spektralen Anpassung für den Farbmesskopf deutlich. Außerdem wurden die über die Spektralmessung mit dem SPECBOS-Messgerät bestimmten Farbwertanteile für die Bewertung genutzt.

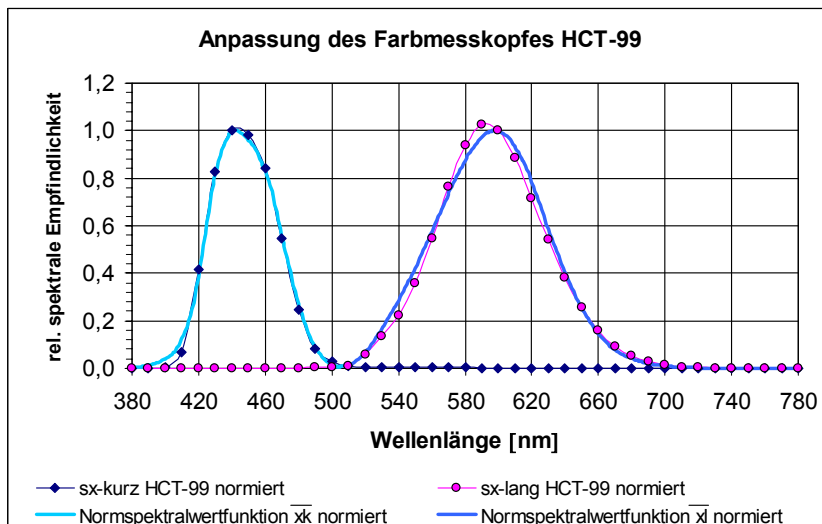


Bild 3.3: Relative spektrale Empfindlichkeit des Farbmessgerätes HCT-99. Güte der spektralen Anpassung bezüglich der Normwertspektralwertkurve $\bar{x}(\lambda)$ [Gigahertz-Optik99].

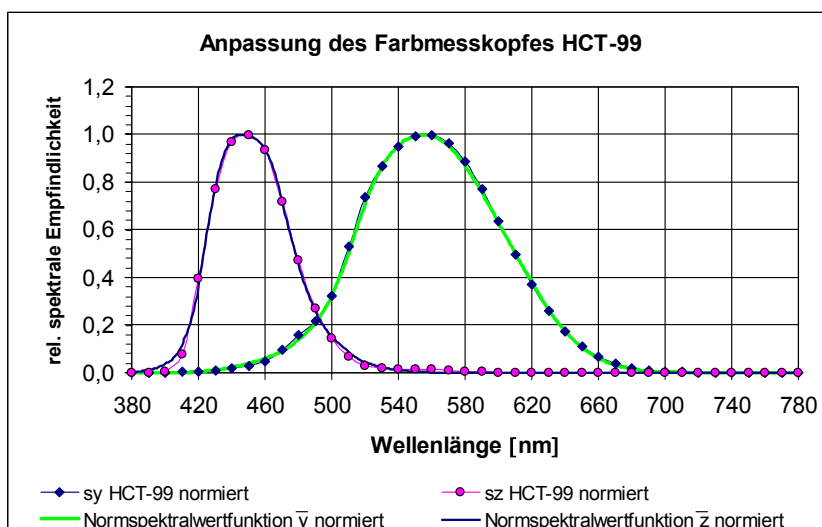


Bild 3.4: Relative spektrale Empfindlichkeit des Farbmessgerätes HCT-99. Güte der spektralen Anpassung bezüglich der Normwertspektralwertkurven $\bar{y}(\lambda)$ und $\bar{z}(\lambda)$ [Gigahertz-Optik99]

3.3 Messprinzip

Bild 3.5 zeigt den grundsätzlichen Messaufbau und einen typischen Messbereich. Für die Vermessung einer Szenerie wurden die Messgeräte (ROLLEI-Kamera und LMK 98) räumlich nah beieinander angeordnet und auf den gleichen Messbereich positioniert. Zu diesem Zeitpunkt stand die LMK color noch nicht zur Verfügung.

Als Referenz diente ein Reflexionsnormal ($\rho = 0,95$; $\varnothing 5,5$ cm), das einen aselektiven Verlauf des spektralen Reflexionsgrades über der Wellenlänge im Bereich von 380 nm bis 780 nm aufweist und diffus reflektiert. Im Vergleich dazu zeigt weißes Büropapier eine Überbewertung im kurzwelligen Bereich. Da die circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ in diesem Wellenlängenbereich ihr Maximum aufweist, wird der circadiane Messwert bezüglich des Papiers überbewertet.

Das Reflexionsnormal wurde im Messbereich angeordnet und das Spektralradiometer SPECBOS als Referenzmessgerät darauf ausgerichtet. An den rechnerisch aus den Spektraldaten ermittelten circadianen Wirkungsfaktor wurden die Messwerte aus der ortsaufgelösten Messung bezüglich des Reflexionsnormals angeschlossen. Das Ergebnis ist eine örtlich aufgelöste Darstellung des Wirkungsfaktors a_{cv} (Bild 3.6).



Bild 3.5:

Grundsätzlicher Messaufbau zur Vermessung der a_{cv} -Wirkungsfaktoren.

Die Messgeräte (von links) ROLLEI-Kamera, LKM 98 und SPECBOS-Messgerät sind auf die selbe Messregion ausgerichtet

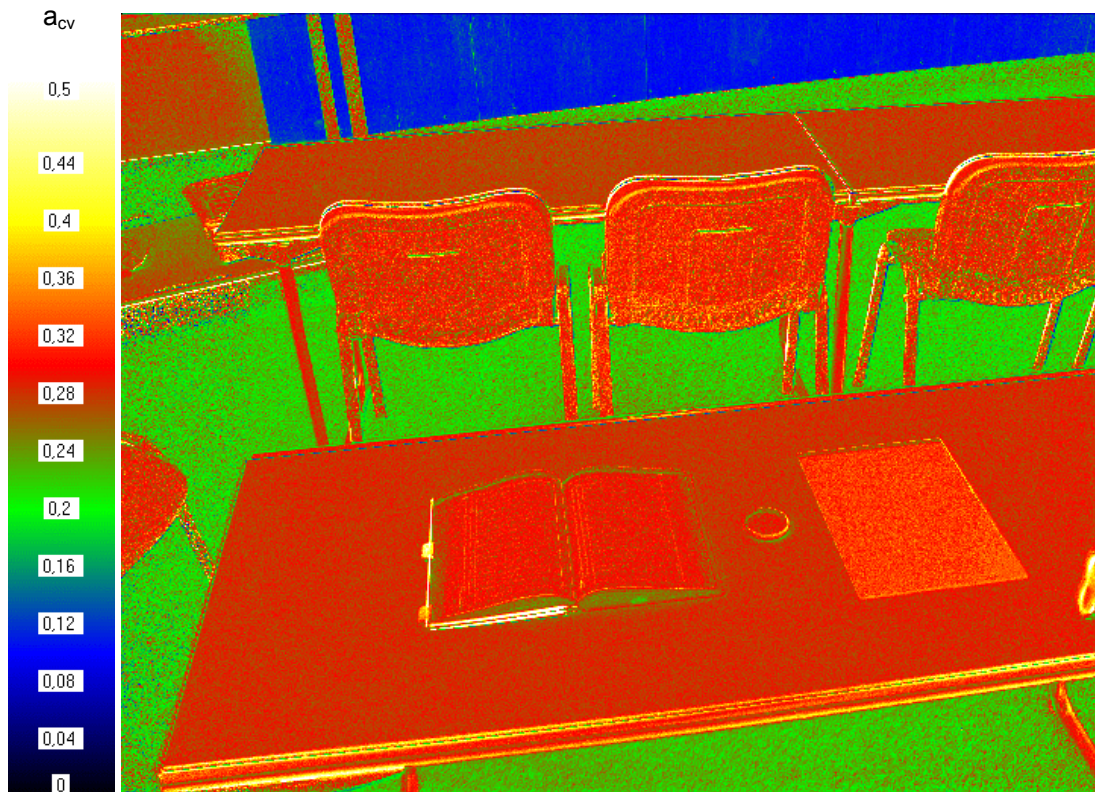


Bild 3.6:
Verteilung des circadianen Wirkungsfaktors a_{cv} innerhalb des Messbereichs

Mit der LMK 98 wurde die Leuchtdichte orts aufgelöst aufgenommen. Für die Auswertung wurde eine projektive Entzerrung vorgenommen. Der Mittelwert der Leuchtdichte über dem Reflexionsnormal wurde für die weitere Auswertung herangezogen. Für die Bestimmung der circadianen Größe wurde für die ROLLEI-Kamera die Matrizierung $\{R;G;B\} = \{0;0;1\}$ gewählt. In Bild 3.7 sind das Leuchtdichtebild und die Messdaten des blauen Empfängerkanals nach projektiver Entzerrung dargestellt. Die Bestimmung der circadianen „Leuchtdichte“ erfolgte auf dem Reflexionsnormal, so wie beim Vorgehen zur Bestimmung der Leuchtdichte mit der LMK 98.

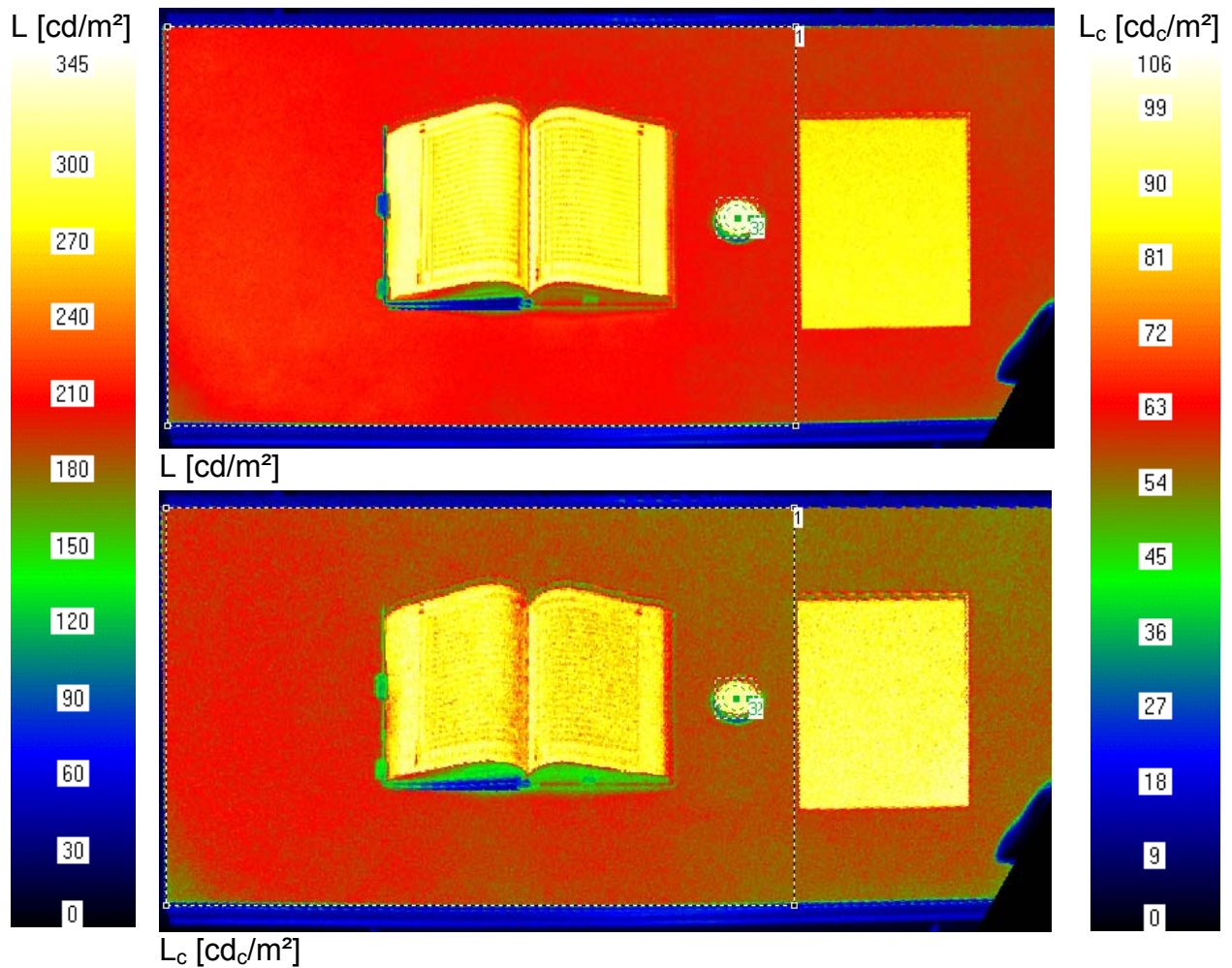


Bild 3.7
Leuchtdichtebild der ROLLEI-Kamera (oben, linke Skalierung) und Messergebnis des blauen Empfängerkanals (unten, rechte Skalierung)

4 Vermessung verschiedener Beleuchtungssituationen

Die Vermessungen und Auswertung realer Beleuchtungssituationen erfolgte auf der Basis des im Kapitel 3.3 vorgestellten Messverfahrens. In Tabelle 4.1 sind die verwendeten Messgeräte und die damit gemessenen Größen zusammengefasst.

Messgerät	Messwerte
SPECBOS-Messgerät	$L_{e\lambda}(\lambda)$, x , y , CCT, L_c , L_v , ccf_{acv}
ROLLEI-Kamera	L_{sc} ROLLEI, L_{sv} ROLLEI
LMK 98	L_{sv} LMK 98
Handleuchtdichtemessgerät LS 110 Minolta	L
HCT-99	E , CCT, x , y

Tabelle 4.1:
Verwendete Messgeräte

4.1 Beleuchtungssituation an Industriearbeitsplätzen [SchmidtHerrmann04]

Die Messungen wurden an verschiedenen Arbeitsplätzen einer Industrieanlage durchgeführt. Es wurden verschiedene Arbeitsfelder bei unterschiedlicher Beleuchtung und für typische Blickrichtungen (horizontal, vertikal) vermessen.

4.1.1 Die Beleuchtungsanlagen

Die Allgemeinbeleuchtung in den Arbeitshallen wurde über Rasterleuchtenbänder an den Decken realisiert. Jede Rasterleuchte war mit je zwei Leuchtstofflampen bestückt. Es kamen die Lampen Osram L 58 W/20 und L 58 W/21-840 zum Einsatz. An einigen Arbeitsplätzen war nur Kunstlicht vorhanden, während in anderen Arbeitsbereichen auch Tageslicht wirkte. Zum Teil waren die Arbeitsplätze mit zusätzlichen Lupen-Arbeitsplatzleuchten (APL) ausgerüstet.



Situation 1



Situation 3



Situation 4



Situation 5

Bild 4.1:
Verschiedene Arbeitsplätze in der Lampenindustrie

4.1.2 Die Messsituationen

Die Tabelle 4.2 gibt einen Überblick über die untersuchten Arbeitsplätze, Beleuchtungssituationen und Blickrichtungen.

Situation	Komponenten der Beleuchtungsanlage
1	Rasterleuchte + Lupenleuchte
2	Rasterleuchte
3	Rasterleuchte + Fenster (Oberlicht)
4	Rasterleuchte
5	Rasterleuchte + Lupenleuchte + Fenster

Tabelle 4.2:
Messsituationen

4.1.3 Die Messung

Tabelle 4.3 und Tabelle 4.4 fassen die Messergebnisse der Einzelmessungen für alle Beleuchtungssituationen zusammen.

essgerät	SPECBOS-Messgerät								
Messwerte	CCT	x	y	$a_{cv\ xy}$	L_c	L_v	$a_{cv\ soll}$	$a^*_{cv\ soll}$	ccf_{acv}
Situation	[K]				[cd/m^2]	[cd/m^2]			
1	3811	0,3958	0,4035	0,50	159,2	378	0,42	0,42	0,967
2	3977	0,3885	0,4021	0,52	76,7	175	0,44	0,44	0,969
3	3966	0,3893	0,4032	0,51	50,1	116	0,43	0,43	0,974
4	3657	0,4041	0,4078	0,46	48,1	118	0,41	0,41	0,958
5	3803	0,3969	0,4058	0,49	210,9	495	0,43	0,42	0,961

Tabelle 4.3:
Messwerte der Spektralmessung

Messgerät	ROLLEI-Kamera			LMK 98		ROLLEI / LMK 98		LS 110	
Messwerte	L_{sc}	L_{sv}	a_{cv}	L_{sv}	E	$a_{cv\ ist}$	$a^*_{cv\ ist}$	L	E_c
Situation	ROLLEI [cd/m^2]	ROLLEI [cd/m^2]	ROLLEI	LMK 98 [cd/m^2]	LMK 98 [lx]			[cd/m^2]	[lx_c]
1	131,4	296,1	0,44	331,0	1094,6	0,40	0,45	384	493
2	65,0	154,1	0,42	176,3	583,0	0,37	0,42	178	245
3	43,2	101,3	0,43	111,1	367,4	0,39	0,44	116	162
4	36,2	102,2	0,35	111,9	370,0	0,32	0,36	113	133
5	181,0	459,5	0,39	496,0	1640,2	0,36	0,41	481	672

Tabelle 4.4:
Messwerte der Integralmessung

4.1.4 Die Ergebnisse

Die a_{cv} -Werte liegen an allen Arbeitsplätzen unabhängig von den Beleuchtungsbedingungen zwischen 0,35 und 0,45. Die zusätzliche Beleuchtung mit Arbeitsplatzleuchten erhöht den a_{cv} -Wert geringfügig. Zwischen vertikaler und horizontaler Blickrichtung gibt es keine deutlichen Unterschiede für den circadianen Wirkungsfaktor.

Zwischen den einzelnen Messmethoden zeigen sich zum Teil große Unterschiede. Betrachtet man die Abweichungen zwischen den gemessenen Leuchtdichten mit dem SPECBOS-Messgerät, der LMK 98 und dem Handleuchtdichtemesser LS 110 fällt auf, dass bei einem Großteil der Messungen die mit dem SPECBOS-Messgerät bestimmten Werte deutlich geringer sind als die mit den anderen Messverfahren gemessenen Leuchtdichten (Tabelle 4.4). Eine Fehlerquelle dafür könnte eine nicht ganz exakte Positionierung auf dem Reflexionsnormal sein. Werden Bereiche außerhalb des Reflexionsnormals bei der Messung mit erfasst, sind geringere gemessene Leuchtdichten wahrscheinlich. Da die Positionierung mit einer aufgesetzten Laserpositioniereinheit erfolgte, konnte während der Messungen der erfasste Messbereich nicht mehr kontrolliert werden. Eine geringe Dejustierung führt dann zu Messabweichungen. Diese Fehler wirken sich dann auf alle auf der Basis dieser Spektraldaten bestimmten Werte aus.

Tabelle 4.5 zeigt eine Zusammenfassung der relativen Abweichungen der einzelnen Messverfahren bezogen auf die aus den Spektraldaten berechneten a_{cv} -Werte.

Messgerät	SPECBOS-Messgerät		ROLLEI-Kamera	ROLLEI / LMK 98
Beleuchtungssituation	a_{cv}^* soll	$a_{cv xy}$	a_{cv} ROLLEI	a_{cv}
1	0 %	+ 18,6 %	+ 5,8 %	+ 6,7 %
2	0 %	+ 19,2 %	- 3,4 %	- 4,6 %
3	0 %	+ 19,6 %	- 0,9 %	+ 2,7 %
4	0 %	+ 13,5 %	- 12,8 %	- 11,1 %
5	0 %	+ 14,4 %	- 7,2 %	- 3,7 %

Tabelle 4.5:

Relative Abweichungen der verschiedenen Messverfahren bezogen auf die aus den Spektraldaten bestimmten a_{cv} -Werte

Aus den mit der LMK 98 auf dem Reflexionsnormal gemessenen Leuchtdichten wurden die Beleuchtungsstärken berechnet. Mit diesen Werten und den mit dem Messverfahren ROLLEI / LMK 98 bestimmten a_{cv} -Werten wurden die circadianen „Beleuchtungsstärken“ für alle untersuchten Arbeitsplätze berechnet.

Durch Zuschaltung der Arbeitsplatzleuchten wurden die a_{cv} -Werte nur unwesentlich erhöht. Zum Tragen kommen jedoch die dabei deutlich höheren Beleuchtungsstärken

(Tabelle 4.4), die einen Anstieg der circadianen „Beleuchtungsstärke“ nach sich ziehen.

Im Minimum wurde an den Industriearbeitsplätzen eine circadiane „Beleuchtungsstärke“ von 110 lx_c gemessen, maximal wurden 670 lx_c bestimmt. Besonders bei vertikaler Blickrichtung treten geringe circadiane „Beleuchtungsstärken“ auf.

4.2 Beleuchtungssituation in einer Altenpflegeeinrichtung [SchmidtHerrmann04]

4.2.1 Der Messort

Die Messungen erfolgten für die Beleuchtungsanlage in einem Aufenthaltsraum eines Altenpflegeheimes (Bild 4.2). Die Messungen wurden in zwei Messpositionen durchgeführt. Die erste Messung erfolgte in der Raummitte auf einen höhenverstellbaren Tisch in einer Höhe von $0,75 \text{ m}$. Die zweite Messung wurde an einer Wandfläche durchgeführt. Die Höhe wurde mit $0,95 \text{ m}$ bis $1,25 \text{ m}$ so gewählt, dass sie der Augenhöhe der Bewohner beim Sitzen entspricht



Bild 4.2:
Aufenthaltsraum der Altenpflegeeinrichtung
in Mühlheim

4.2.2 Die Beleuchtungsanlage

In dem Aufenthaltsraum ist eine Lichtdecke installiert: Basis der Lichtdecke sind zwei verschiedene Leuchtstofflampentypen mit EVG, die sich unter einer elastischen, weißen und diffusen Verspannung befinden. Der Abstand zwischen Leuchtmittel und Bespannung ist hierbei genauso groß, wie der Abstand zwischen zwei gleichen Lampen. Auf diese Weise wurde eine hohe Gleichmäßigkeit erzielt. Beide Lampentypen können getrennt voneinander mittels DALI-Bus-System angesteuert werden, sodass die Beleuchtungsstärke der Lampen in der Messebene von 0% bis 100% in 256 Stufen geregelt

werden kann. Dazu wird die Lampenleistung durch die Änderung der Frequenz des Lampenstroms (ca. 40-100kHz) geregelt. Auf diese Weise ist es möglich, das Licht der verschiedenen Leuchtstofflampentypen miteinander zu mischen (Variation der spektralen Eigenschaften der Lichtquelle) und auch die Beleuchtungsstärke zu variieren. Tabelle 4.6 enthält Angaben zu den Elementen der Lichtdecke.

Element	Beschreibung
Lampentyp 1	Radium NL 18W / 31-830 SpektraLux Plus Warmton CCT: 2963 K
Lampentyp 2	Radium NL 18W / 11-860 SpektraLux Plus Tageslicht CCT: 6172 K
Vorschaltgerät	EVG der Firma Tridonic
Deckenbespannung	Folie der Firma Rentex

Tabelle 4.6:
Elemente der Lichtdecke

4.2.3 Die Messung

Für die Messungen wurden die beide Lampentypen so angesteuert, dass verschiedene Mischungsverhältnisse und Beleuchtungsstärken realisiert wurden. Tabelle 4.7 und Tabelle 4.8 fassen die Messergebnisse der Einzelmessungen für alle Beleuchtungssituationen für eine Messposition (Tisch) zusammen

Messgerät	Specbos						
Messwerte	CCT [K]	x	y	$a_{cv\ xy}$	L_c [cd/m ²]	L_v [cd/m ²]	$a_{cv\ soll}$
Mischungsverhältnis Typ 1 : Typ 2							
1 : 1	3475	0,4119	0,4060	0,45	865,7	2180	0,40
1 : 0,5	3208	0,4296	0,4143	0,38	625,9	1810	0,35
1 : 0,25	3038	0,4414	0,4178	0,34	486,6	1540	0,32
1 : 0	2705	0,4698	0,4282	0,24	274,8	1139	0,24
0,5 : 1	3669	0,4022	0,4043	0,48	747,1	1780	0,42
0,25 : 1	3967	0,3878	0,3988	0,54	662,3	1440	0,46
0 : 1	4805	0,3550	0,3812	0,69	597,9	1050	0,57

Tabelle 4.7:
Messwerte der Spektralmessung

Messgerät	ROLLEI-Kamera			LMK 98		ROLLEI / LMK 98		HCT-99	
Messwerte	L _{sc}	L _{sv}	a _{cv}	L _{sv}	E	a _{cv ist}	a* _{cv ist}	CCT	a _{cv xy}
Situation	ROLLEI [cd/m ²]	ROLLEI [cd/m ²]	ROLLEI	LMK 98 [cd/m ²]	LMK 98 [lx]			[K]	
Mischungsverhältnis Typ 1 : Typ 2									
1 : 1	696,5	1944,0	0,36	2201,0	7278,6	0,32	0,36	3300	0,46
1 : 0,5	490,3	1578,0	0,31	1827,0	6041,8	0,27	0,31	3066	0,38
1 : 0,25	373,5	1377,0	0,27	1550,0	5125,8	0,24	0,28	2877	0,35
1 : 0	202,0	915,3	0,22	1092,0	3611,2	0,18	0,22	2520	0,25
0,5 : 1	600,0	1582,0	0,38	1797,0	5942,6	0,33	0,38	3524	0,48
0,25 : 1	524,5	1282,0	0,41	1455,0	4811,6	0,36	0,40	3808	0,53
0 : 1	481,2	951,9	0,51	1049,0	3369,8	0,46	0,51	4660	0,69

Tabelle 4.8:
Messwerte der Integralmessung

Mischungsverhältnis Typ 1 : Typ 2	E _c (berechnet) [lx _c]
1 : 1	2620
1 : 0,5	6042
1 : 0,25	1435
1 : 0	794
0,5 : 1	2258
0,25 : 1	1925
0 : 1	1719

Tabelle 4.9:
Berechnete circadiane „Beleuchtungsstärken“

4.2.4 Die Ergebnisse

Variiert der Anteil der Lampe vom Typ 2 zwischen 0 % und 100 % bei maximaler Leistung der Lampe vom Typ 1, so steigt der a_{cv}-Wert gemessen auf der Tischfläche von 0,22 auf 0,36, auf der Wandfläche von 0,23 auf 0,33. Durch die Zumischung von Licht des Lampentyps 1 von 0 % bis 100 % zum maximalen Lichtstrom der Lampe des Typs 2, sinkt der a_{cv}-Wert von 0,50 auf 0,36 auf der Tischfläche und von 0,47 auf 0,33 auf der Wandfläche. Bleibt das Mischungsverhältnis beider Lampentypen gleich, und ändert sich nur die absolute Leistung, so ändert sich der a_{cv}-Wert des abgegebenen Lichtes nicht. Der a_{cv}-Wert bleibt auch bei Dimmung der Lampen nahezu konstant. Die gemessenen a_{cv}-Werte auf der Tischfläche sind im Vergleich zu den auf der Wandfläche gemessenen Werten geringfügig höher.

Die a_{cv}-Werte, die aus der Messung mit der ROLLEI-Kamera und der LMK 98 bestimmt

wurden, zeigen nur geringe Abweichungen. Deutlich höhere a_{cv} -Werte wurden mit den Messverfahren bestimmt, denen die Farbwertanteile x und y zugrunde liegen.

Nach der Berechnung der Beleuchtungsstärken aus den auf dem Reflexionsnormal mit der LMK 98 gemessenen Leuchtdichten gemäß wurden mit den a_{cv} -Werten, die mit dem Messverfahren ROLLEI / LMK 98 bestimmt wurden, die circadianen „Beleuchtungsstärken“ E_c für die verschiedenen Beleuchtungssituationen an beiden Messorten berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.9 zusammengefasst.

In [GALL02] ist bereits auf den Zusammenhang zwischen Farbtemperatur und a_{cv} -Wert hingewiesen worden, dieser Zusammenhang wurde mit dieser Untersuchung bestätigt. Der circadianer Wirkungsfaktor steigt linear mit dem Anstieg der Farbtemperatur einer Lichtquelle (Bild 4.3).

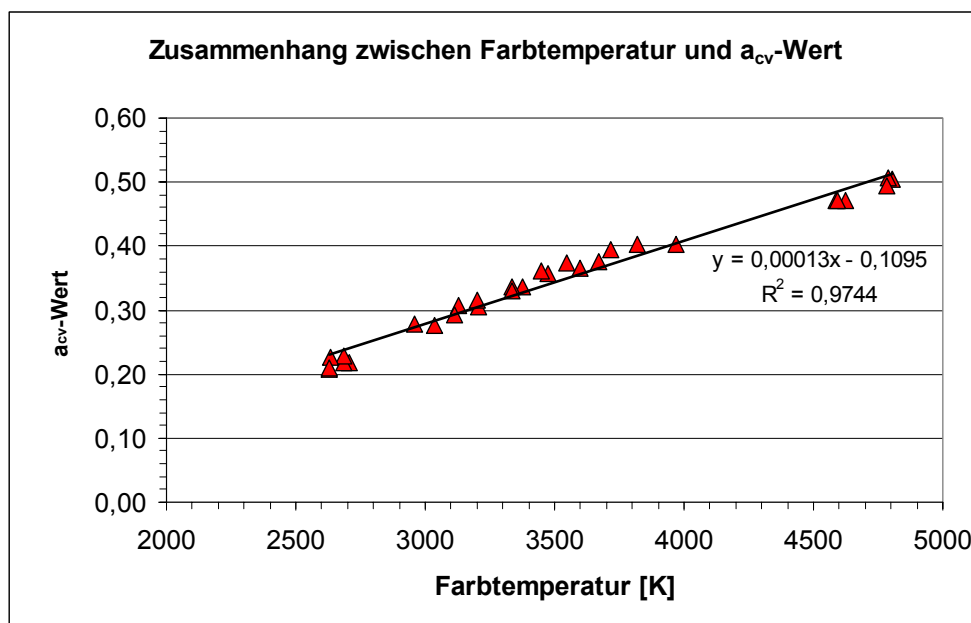


Bild 4.3: Zusammenhang zwischen der Farbtemperatur und dem circadianen Wirkungsfaktor a_{cv}

5 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 aktivierende Wirkung des Lichtes, aber auch mögliche Gefahrenpotentiale (Krebsbildung) in Abhängigkeit von der Tageszeit angeben zu können.

Die mit Spektralverfahren oder $c(\lambda)$ -angepassten Empfängern gewonnenen Messergebnisse für Messbeispiele werden exemplarisch angegeben. Es hat sich gezeigt, dass eine Bestimmung des a_{cv} -Wertes auch mit der $z(\lambda)$ -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.

Zur Zeit 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 unter anderem 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 lässt. Über die 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.

Die Untersuchungen ergaben, dass bei künstlicher Beleuchtung an den Arbeitsplätzen circadiane Wirkungsfaktoren von 0,3 bis 0,45 typisch sind. Beim Einsatz von Lampen mit einer höheren Farbtemperatur oder bei der Wirkung von Tageslicht im Arbeitsbereich werden höhere a_{cv} -Werte erzielt. In Kombination mit den für verschiedene Industriebereiche empfohlenen Beleuchtungsstärken zwischen 200 lx und 1000 lx in der Arbeitsebene, ergeben sich für einen a_{cv} -Wert von 0,4 circadianen „Beleuchtungsstärken“ E_c zwischen 80 lx_c und 400 lx_c. Ob diese Werte ausreichend sind, bleibt zu untersuchen. Die Messungen in einem Altenpflegeheim ergaben circadiane „Beleuchtungsstärken“, die die oben angegebenen Werte bis zu einem Faktor 10 übersteigen. Von Ehrenstein [Ehrenstein02] wurde bei den Bewohnern eine positive Wirkung beobachtet.

Das untersuchte Messverfahren, das den circadianen Wirkungsfaktor aus der Messung mit der ROLLEI-Kamera und der LMK 98 bestimmt, zeigte bei den Messungen im Vergleich zu den aus den Spektraldaten berechneten a_{cv} -Werten eine gute Übereinstimmung. Messverfahren, die die Farbwertanteile x und y zur Bestimmung des circadianen Wirkungsfaktors verwenden, ergeben in der Regel zu hohe Werte.

Die Integration der circadianen und lichttechnischen Messung in einer Messkamera kann das untersuchte Messverfahren optimieren. Die Erfassung der örtlichen Verteilung

des circadianen Wirkungsfaktors innerhalb definierter Messregionen bietet dabei Vorteile. Die Bestimmung relevanter Kenngrößen kann auf diese Weise untersucht werden. Dies ist erforderlich, um fundierte Anforderungen an Beleuchtungsanlagen ableiten zu können. Derzeit sind Grenzen bei der Vermessung dynamischer Beleuchtungssituationen mit Kamerasystemen gesetzt, die durch eine zeitgleiche Bestimmung der circadianen und der lichttechnischen Größen überwunden werden können.

Wesentlich für die Bestimmung von a_{cv} -Werten ist die Vorgabe von Messgeometrien und von Referenzflächen. Nur auf diese Weise ist es möglich, eine Vergleichbarkeit zu erzielen. Die Angaben zu den Lampen sind nicht ausreichend, da die Leuchte und die Raumwirkung die Spektralverteilung beeinflussen und damit den a_{cv} -Wert mitbestimmen.

Seit kurzem steht die Messkamera LMK color zur Verfügung, mit der orts aufgelöste Farbmessungen durchgeführt werden können. Zusätzlich ist eine $c(\lambda)$ -Anpassung integriert. Damit werden sich in Zukunft viele neue Messmöglichkeiten bieten.

6 Danksagung

Wir danken der Firma ORAM GmbH München, insbesondere Herrn Dipl.-Ing. Stéphan Müller und Herrn Dr.-Ing. Reinhard Weitzel für die Unterstützung bei der Durchführung der Messreihen.

7 Literatur

- [Blattner03]** Blattner, P.: Unveröffentlichtes Skript der CCPR "Note on photobiological qualities". 2003
Herr P. BLATTNER (Schweiz) stellte freundlicherweise eine Vorveröffentlichung des CCPR zur Verfügung
- [Brainhard01]** 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
- [Brainhard03]** Brainhard, G. C.; Glickman, G.,: The Biological Potency of Light in Humans: Significance to Health and Behavior. *Proceedings 25th Session of CIE San Diego 2003*, S. I-22 ff.
- [CIE Nr.103]** CIE Nr. 103: Technical Collection. CIE-Publication 1993
- [CIE Nr.106]** CIE Nr. 106: CIE Collection in Photobiology and Photochemistry. CIE-Publication 1997
- [CIE Nr.125]** CIE Nr. 125: Standard Erythema Dose. CIE-Publication 1997
- [Ehrenstein02]** Ehrenstein, W.: Das Auge stellt die biologische Uhr des Menschen. *Tagung Licht und Gesundheit*, Berlin, 2002, Tg.-B. S. 197 - 213
- [GallLapuente02]** Gall, D.; Lapuente, V.: Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums. *Licht 54* (2002) 7/8 S. 860-871

- [Gall02]** Gall, D.: Circadiane Lichtgrößen und deren meßtechnische Ermittlung. Licht 54 (2002) 11/12, S. 1292 - 1297
- [Gall04]** Gall, D.: Die Messung circadianer Strahlungsgrößen. Tagung Licht und Gesundheit 26. bis 27.2..2004
- [Gigahertz-Optik99]** Gigahertz-Optik: Farb- und Beleuchtungsmessgerät HCT-99 Handbuch und Kalibrierprotokolle
- [HCT9904]** <http://www.gigahertz-optik.de> Stand: März 04
- [ICNIRP97]** ICNIRP: Guidelines on limits of exposure to broad-band inkoherent optical radiation (0,38 to 3 µm). Health Physics 73 (1997) 3, pp 539-554
- [Krüger03]** Krüger, U. (Fa. TechnoTeam Ilmenau): Mündliche Mitteilungen, 12/03
- [LMK9804]** <http://www.technoteam.de/> Stand: März 04
- [LMKcolor]** <http://www.technoteam.de/> Stand: März 04
- [MAZET03]** MAZET GmbH Jena: Mündliche Informationen zu 3 Chip-Farbsensoren, 11/03
- [Minolta04]** <http://www.opteema.de> Stand: März 04
- [Rollei04]** <http://www.technoteam.de/> Stand: März 04
- [Schmidt Herrmann04]** Schmidt, A.; Herrmann, R.: Vermessung und Untersuchung von Beleuchtungsanlagen unter Einbeziehung circadianer Größen. Medienprojekt TU Ilmenau 2004
- [Specbos04]** <http://www.opteema.de> Stand: März 04
- [TechnoTeam03]** TechnoTeam: ROLLEI - LMK mobile, Prospekt der Fa. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau 2003
- [TechnoTeam03a]** TechnoTeam: LMK2000 Handbuch Bedienung LMK mobil, Fa. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau 2003
- [TechnoTeam03b]** TechnoTeam: LMK-Color, Fa. TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, Ilmenau 2003
- [Thapan01]** 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