

# Experimentelle Bestimmung der circadianen Lichtwirkung von Monitoren und TV-Bildschirmen

**Porsch, Tobias**

**TechnoTeam Bildverarbeitung GmbH, W.-v.-Siemens-Str. 10, D-98693 Ilmenau**

[Tobias.Porsch@technoteam.de](mailto:Tobias.Porsch@technoteam.de)

**Blankenhagen, Carsten; Gall, Dietrich**

**Technische Universität Ilmenau, Fakultät Maschinenbau, FG Lichttechnik, Unterer Berggraben 10, D-98693 Ilmenau**

[Carsten.Blankenhagen@MB.TU-Ilmenau.de](mailto:Carsten.Blankenhagen@MB.TU-Ilmenau.de); [Dietrich.Gall@MB.TU-Ilmenau.de](mailto:Dietrich.Gall@MB.TU-Ilmenau.de)

*Am Anfang dieses Beitrages werden Methoden zur messtechnischen Erfassung der circadianen Lichtwirkungen recherchiert. Dafür müssen die bisherigen Verfahren zur Messung von Licht exemplarisch auf ihre Anwendbarkeit überprüft und unter Umständen an die Aufgabenstellung angepasst beziehungsweise erweitert werden. Darauf basierend werden Messreihen entwickelt und Untersuchungen durchgeführt, um circadiane Lichtwirkungen an ausgewählten Anwendungsbeispielen für Monitore und TV-Bildschirme zu bestimmen.*

*Auf der Auswertung der Versuche aufbauend, erfolgt zusammenfassend eine Bewertung der Messergebnisse. Die ermittelten Größen werden dabei vorrangig in Beziehung zur klassischen Photometrie gesetzt. Zum Abschluss wird ein Ausblick auf die Anwendbarkeit der ermittelten Erkenntnisse dieser Arbeit auf andere Aufgabenfelder und zukünftige Entwicklungen gegeben.*

## Einführung

Was ist unter dem Begriff der circadianen Lichtwirkung zu verstehen? In den vergangenen Jahren gewannen immer umfangreichere Erfahrungen aus der Behandlung von depressiv erkrankten Menschen mit Licht einen zunehmenden Einfluss auf das Fachgebiet der Licht- und Beleuchtungstechnik. Aktuelle Forschungsarbeiten belegen, dass das Licht einen direkten Einfluss auf den Verlauf unserer inneren biologischen Rhythmen hat. Als externer Zeitgeber synchronisiert es unsere biologische Uhr, indem es die Konzentration unterschiedlicher Hormone im Körper steuert. Ein Beispiel dafür ist die Suppression der Melatoninausschüttung aufgrund blauer Spektralanteile im Licht. Somit übt Licht einen Einfluss auf Phänomene wie saisonal abhängige Depressionen (SAD), die Qualität des Schlafes, das subjektive Wachempfinden und dadurch auf unsere Gesundheit und Leistungsfähigkeit aus.

Aufgrund der nicht visuellen Reizaufnahme des Lichts und der Auswirkungen der aufgenommenen Lichtdosis auf sich täglich wiederholende biologische Rhythmen wird im Verlauf dieser Arbeit der Begriff der "circadianen Lichtwirkung" verwendet. An anderen Stellen wird diese Lichtwirkung auch als „unspezifisch“ oder „NIF-Effekt“ (non image forming effect) bezeichnet.

Das circadiane Wirkungspotential von diversen Bildwiedergabesystemen ist aufgrund der spektralen Energieverteilung der blauen Primärvalenz beträchtlich. Dieser Beitrag beschäftigt sich vorrangig mit der Untersuchung von CRT-Monitoren um deren häufigen Auftreten im Alltag, wie zum Beispiel an Bildschirmarbeitsplätzen, gerecht zu werden. Die dabei erfolgten Überlegungen und gewonnenen Ergebnisse sind jedoch auf andere Bildwiedergabesysteme übertragbar.

Zur Klassifizierung der circadianen Lichtwirkung dient nach GALL ein Bewertungsfaktor, der  $a_{CV}$ -Wert<sup>1</sup>. Zur Ermittlung dieses Faktors können vorhandene Spektralphotometer sowie an die spektrale Wirkungsfunktion  $c(\lambda)$  angepasste, integrativ arbeitende Messsysteme verwendet werden.

Als gute Näherung kann der  $a_{ZV}$ -Wert herangezogen werden. Er wird mit der Normspektralwertkurve  $\bar{z}(\lambda)$  gebildet. Um die Frage nach dem effektiv wirkenden Lichtstrom zu beantworten, ist eine Bewertung der ermittelten Lichtgrößen mit diesem Faktor möglich (circadiane Strahlungsgröße<sup>2</sup>).

## Messtechnische Ideen

Für die messtechnische Erfassung circadianer Lichtdosen und deren Formulierung in aussagekräftigen Größen schlägt GALL die Abwandlung zweier bekannter Messverfahren vor. Mit diesen Verfahren ist es möglich, zunächst den circadianen Wirkungsfaktor  $a_{CV}$  einer Lichtquelle zu ermitteln, um mit ihm im Anschluss die photometrischen Größen in circadiane Größen umzurechnen. Zunächst ist zu überprüfen, inwieweit sich diese Verfahren anwenden lassen.

Bei der spektralen Vermessung einer Lichtquelle wird die spektrale Energieverteilung (SPD, spectral power distribution) des Lichts bestimmt. Dabei werden die Energiedichte und somit die physikalische Strahlungsleistung des Lichts über das sichtbare Spektrum mit einem Spektralradiometer ermittelt. In der darauf folgenden mathematischen Auswertung können die Daten mit der exakten Funktion für die spektralen Empfindlichkeiten gewichtet werden. Die circadianen Größen entstehen durch die Wichtung mit der  $c(\lambda)$ -Wirkungsfunktion, die Lichtgrößen werden mit der  $V(\lambda)$ -Hellempfindungsfunktion bestimmt. Mit dieser Methode lassen sich exakt die circadianen Strahlungsgrößen bestimmen.

Über die bekannten strahlungsphysikalischen Zusammenhänge können damit für eine Lichtquelle die circadiane Strahldichte  $L_C$  und mit einem entsprechenden  $\cos$ -Filter die circadiane Bestrahlungsstärke  $E_C$  an definierten Punkten bestimmt werden.

Des Weiteren kann eine integrative Erfassung circadianer Strahlungsgrößen mit Hilfe einer direkten  $c(\lambda)$ -Anpassung des Empfängers mit unterschiedlichen Methoden erreicht werden (z.B.: Partial- oder Vollfilterung). In Verbindung mit der Verwendung von bereits realisierten Ersatzkurven für die circadiane Wirkungsfunktion ist dies schon mit dem blauempfindlichen Kanal eines Farb-Sensors möglich, welcher in seiner spektralen Empfindlichkeit näherungsweise als Realisierung der  $\bar{z}(\lambda)$ -Normspektralwertkurve angesehen werden kann. Diese Funktion lässt durch ihren spektralen Verlauf näherungsweise eine Aussage über den circadianen Wirkungsfaktor nach Gleichung 1 zu [1].

$$a_{CV} \approx \frac{\int X_S \cdot \bar{z}(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_S \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{Z}{Y} = a_{ZV} \quad \text{Gleichung 1}$$

---

<sup>1</sup> Wirkungsfaktor  $a_{CV}$ :  $a_{CV} = \frac{c(\lambda)}{V(\lambda)}$

<sup>2</sup> Circadiane Strahlungsgröße:  $X_C = a_{CV} \cdot X_V$

Eine weitere Methode zur Anpassung des lichtempfindlichen Empfängers an die circadiane Wirkungsfunktion eröffnet sich mit der XYZ-Filterradkamera zur integrativen Farbmessung und besteht in der Rekalibrierung der Auswertungssoftware mittels einer Farbraumtransformation<sup>3</sup>.

Dabei werden die mit dem integrativ arbeitenden Zielmessgerät ermittelten Farbdaten auf die Referenzdaten eines Spektralradiometers rekalibriert.

Nach der Wichtung der spektral ermittelten Messdaten mit der  $c(\lambda)$ -Wirkungsfunktion und den Normspektralwertkurven  $\bar{x}(\lambda)$  und  $\bar{y}(\lambda)$  entstehen die Normfarbwerte  $X$  und  $Y$ , sowie die Fläche  $C$ . Diese Fläche  $C$  wird definiert als das Integral der circadianen Wirkungsfunktion  $c(\lambda)$  multipliziert mit den Strahlungsgrößen  $X_s$ .

$$C = \int_{380}^{780} X_s(\lambda) \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad \text{Gleichung 2}$$

Wird die Fläche  $C$  mit ihrer Definition aus Gleichung 2 anstelle des Normfarbwertes  $Z$  in die Aussage aus Gleichung 1 eingesetzt, ergibt sich für den  $a_{CV}$ -Wert folgende Beziehung:

$$a_{CV} = \frac{\int X_s(\lambda) \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int X_s(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} = \frac{C}{Y} \quad \text{Gleichung 3}$$

Die Größe  $C$  besitzt keine Aussagekraft im Sinne der Farbmeterik. Sie dient als Hilfsmittel, um die mathematischen Abläufe bei der Erfassung der unspezifischen Lichtwirkungen einfacher erläutern zu können.

So kann auch mit dieser Methode die circadiane Strahldichte  $L_C$  gemessen werden. In Verbindung mit dem Einsatz von CCD-Matrizen als lichtempfindliche Empfänger ist es möglich, nach den hier beschriebenen Verfahren auch ortsaufgelöste Messungen der circadianen Strahlungsgrößen vorzunehmen.

Aktueller Stand der Technik sind derzeit über Vollfilter an die  $c(\lambda)$ -Wirkungskurve angepasste ortsaufgelöste Videofotometer der FA. TECHNOTEAM [4].

Somit lassen spektral oder integrativ arbeitende Messverfahren zunächst Aussagen über circadiane Lichtdosen bei einem zeitlich unveränderlichen Spektrum (konstanter Bildinhalt) zu.

Zur Dosisangabe einer bestimmten Größe, in diesem Fall von circadianen Strahlungsgrößen, sind jedoch immer Mengenangaben für eine gewisse Zeitspanne notwendig. Als Dosisangabe<sup>4</sup> bietet sich für Lichtquellen die Lichtstärke oder die Leuchtdichte multipliziert mit dem circadianen Wirkungsfaktor  $a_{CV}$  an. Auf der Empfängerseite ermöglicht die Angabe der Beleuchtungsstärke auf dem bestrahlten

<sup>3</sup> bspw. Four Color Method nach OHNO [2], [3]

<sup>4</sup>  $\int X \cdot dt$

Objekt multipliziert mit dem  $a_{CV}$ -Wert eine Dosisangabe. Zum aktuellen Zeitpunkt existieren jedoch über das Adaptionsverhalten des Photorezeptors noch keine gesicherten Erkenntnisse. Diese Tatsache diente für diese Arbeit als Motivation, ein weiteres Messverfahren zu etablieren, welches in der Lage ist, ein relativ breites Spektrum an zeitlicher Integration der Lichtmengen zu ermöglichen. Es sollte die Aufzeichnung der "Lichtmengen" über einen längeren Zeitraum ermöglichen, aber auch kurzzeitige Lichtimpulse zeitlich mit hoher Auflösung erfassen können.

Aus diesem Grund ist es notwendig, eine sich zeitlich verändernde Größe zu finden, welche die spektrale Zusammensetzung des ausgestrahlten Lichts erfasst und sich ohne längere zeitliche Erfassung ermitteln lässt. Um eine sinnvolle Aussage über den zeitlichen Verlauf der spektralen Verteilung des Lichts machen zu können, ist es wichtig die Abtastfrequenz höher als die Bildfrequenz des Bildschirms zu wählen, damit genügend Messwerte während eines Bildaufbaus erfasst werden können.

Die Primärvalenzen von CRT-Bildschirmen besitzen durch die Bildschirmphosphore eindeutig definierte Farborte, beschrieben durch die Farbwertanteile  $x$  und  $y$ .

Durch das anliegende elektrische Farbwertsignal wird über den Katodenstrom die Helligkeit der entsprechenden Primärvalenz gesteuert, dies ist zunächst die einzige, sich über die Zeit, verändernde Größe. Es ist möglich dieses elektrische Signal zu erfassen, um im Anschluss eine Aussage über die auf dem Bildschirm erzeugten Leuchtdichten der einzelnen Grundfarben machen zu können.

Der Zusammenhang zwischen der Leuchtdichte  $L$  und dem Farbwertsignal  $U$  wird durch die Displaykennlinie nach Gleichung 4 beschrieben.

$$\frac{L}{L_w} = \left[ \frac{U}{U_w} \right]^\gamma \quad \text{Gleichung 4}$$

Diese Beziehung ist mit dem darin enthaltenen Displaygamma  $\gamma$  vor allem durch die der Bildröhre vorgeschaltete analoge Verstärkerschaltung zur Ansteuerung der einzelnen Katoden abhängig. Um eine explizite Aussage über eine Katodenstrahlröhre als Lichtquelle machen zu können, ist es daher notwendig diesen Teil aus dem Messaufbau auszuschliessen und das zu messende Signal direkt an den einzelnen Katoden abzugreifen. Der Zusammenhang zwischen dem elektrischen Strom  $I_S$  und der Helligkeit der Phosphore auf dem Bildschirm ist an dieser Stelle der Schaltung linear.

$$L = k \cdot I_S \quad \text{Gleichung 5}$$

Eine Aufzeichnung des Katodenstroms oder Signalstroms  $I_S$  mit einer entsprechenden Abtastrate ist mit einem Oszilloskop in Form einer Spannungsanalyse über einen bekannten Widerstand möglich.

Es wird eine elektrische Erfassung des Katodenstroms verbunden mit der zeitgleichen spektralen Vermessung des Bildschirms zu definierten elektrischen Eingangssignalpegeln durchgeführt. Mit den ermittelten Messdaten kann eine mathematische Beziehung zwischen den Leuchtdichten  $L_V$  und dem ansteuernden Signal  $I_S$  bei zeitlich konstanten Bildinhalten, mit Hilfe einer Regression hergestellt werden. Zunächst werden so die Primärfarben Rot, Blau und Grün analysiert.

Wie in Abbildung 1 dargestellt, überlagern sich die einzelnen Spektren der Primärvalenzen  $R$ ,  $G$  und  $B$  eines CRT-Monitors in ihrer Mischung additiv. Somit kann auch eine Aussage über die Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  und auch über die Leuchtdichten der resultierenden Farbmischungen gemacht werden.

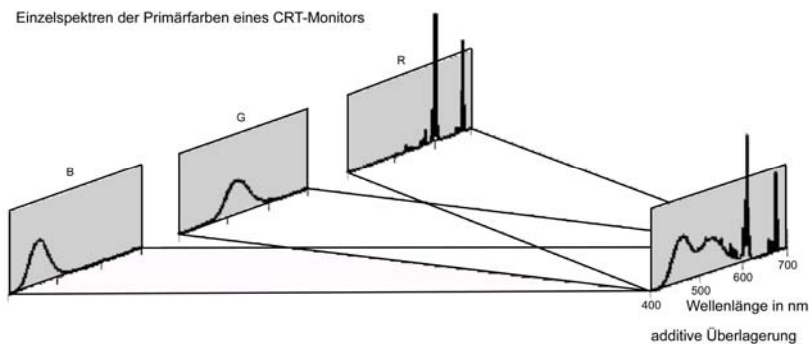


Abbildung 1: Prinzip der additiven Überlagerung der Einzelspektren zu einem Gesamtspektrum

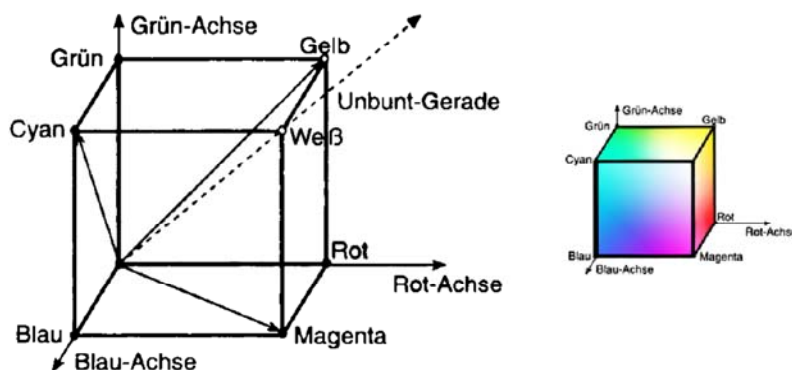


Abbildung 2: Prinzip der additiven Farbmischung (links), Farbwürfel (rechts)

So sind die Primärvalenzen in ihren Farborten  $(x,y)$  im  $XYZ$ -Normvalenzsystems eindeutig definiert und spannen einen Farbraum auf (s. Abbildung 2), innerhalb dessen alle mit diesen Primärvalenzen mischbaren Farben liegen.

Durch eine Bestimmung der SPD der Primärfarben können ihre Normfarbwerte  $X$ ,  $Y$  und  $Z$  angegeben werden. Für die Berechnung einer Farbmischung aus den Normfarbwerten dieser drei Grundfarben gelten die Gesetze der linearen Algebra. Wie aus Abbildung 2 ersichtlich, bilden die Vektoren der Primärfarben die Koordinatenachsen, des durch sie darstellbaren Farbraums, woraus sich für die mischbaren Farben eine Linearkombination aus diesen ergibt:

$$\vec{F} = (X_R \cdot \vec{X} + X_G \cdot \vec{X} + X_B \cdot \vec{X}) + (Y_R \cdot \vec{Y} + Y_G \cdot \vec{Y} + Y_B \cdot \vec{Y}) + (Z_R \cdot \vec{Z} + Z_G \cdot \vec{Z} + Z_B \cdot \vec{Z}) \quad \text{Gleichung 6}$$

vereinfacht ergibt sich daraus

$$\vec{F} = (X_R + X_G + X_B) \cdot \vec{X} + (Y_R + Y_G + Y_B) \cdot \vec{Y} + (Z_R + Z_G + Z_B) \cdot \vec{Z} \quad \text{Gleichung 7}$$

Für die Definition der mischbaren Farbvalenzen aus den Primärfarben  $R$ ,  $G$  und  $B$  im  $XYZ$ -Normfarbraum über die Normfarbwerte ergibt sich daraus vereinfacht folgende Beziehung:

$$X_F = X_R + X_G + X_B \quad \text{Gleichung 8}$$

$$Y_F = Y_R + Y_G + Y_B \quad \text{Gleichung 9}$$

$$Z_F = Z_R + Z_G + Z_B \quad \text{Gleichung 10}$$

Damit besitzt die Aussage aus den Gleichungen 8, 9, 10 einen direkten Bezug zur spektralen Energieverteilung der Farbmischung. Unter der Bedingung, dass dieser lineare Zusammenhang auch für die Fläche  $C_F$  gilt, ergibt sich daraus auch für  $C_F$  folgende Beziehung:

$$C_F = C_R + C_G + C_B \quad \text{Gleichung 11}$$

Damit ist es möglich für die Primärfarben, ebenso wie für die aus ihnen erzeugbaren Farben, den circadianen Wirkungsfaktor nach Gleichung 3 anzugeben.

In Gleichung 5 wird beschrieben, dass der Zusammenhang zwischen elektrisch zugeführter Energie und der von den Phosphoren emittierten Strahlungsleistung linear ist. Daraus folgt, dass ebenso der Zusammenhang zwischen den aus der SPD abgeleiteten Größen, wie den Normfarbwerten, und dem elektrischen Strom  $I_S$ , linear ist. Dies gilt jedoch nur für die Grundfarben  $R$ ,  $G$  und  $B$ , da jede ein eigenes Katodenstrahlensystem zu ihrer Erzeugung auf dem Bildschirm besitzt.

Mit den Aussagen aus den Gleichungen 8, 9, 10 ist es jedoch möglich, aus den Normfarbwerten der Primärvalenzen auf die der Mischfarben zu schließen. Damit ist eine Aussage über die dahinterstehende SPD der jeweiligen Farbmischung möglich.

Die Primärfarben können durch eine Regression ihrer Farbwerte gegenüber dem elektrisch messbaren Signal gut beschrieben und aufgezeichnet werden. Da sich diese Messdaten nahezu ohne zeitliche Verzögerung aufzeichnen lassen, ist es möglich die Messdatenerfassung auf den Zeitbereich des Einzelbildaufbaus eines CRT-Monitors zu minimieren. Somit ist es möglich auch bei einem sich zeitlich verändernden Spektrum des Bildinhaltes genügend Messdaten zu sammeln, um eine Aussage über den zeitlichen Verlauf des circadianen Wirkungsfaktors tätigen zu können.

## Analyse der Primärfarben

Die circadiane Lichtwirkung von CRT-Monitoren, ausgedrückt durch den circadianen Wirkungsfaktor  $a_{CV}$ , erstreckt sich über einen weiten Bereich. Dies ist mit den unterschiedlichen spektralen Energieverteilungen der Primärvalenzen zu erklären, welche an der additiven Zusammensetzung der spektralen Verteilung der erzeugten Lichtfarben beteiligt sind.

Die abgestrahlte circadiane Lichtdosis dagegen ist gering. Sie kann für die Lichtquelle in Form der Leuchtdichte  $L$  in Verbindung mit dem circadianen Bewertungsfaktor angegeben werden. Eine weitere Möglichkeit ist die Angabe der auf der Hornhaut des Auges auftretenden Beleuchtungsstärke  $E$  in Verbindung mit dem Wirkungsfaktor. Inwieweit die Berechnung der circadianen Strahlungsgrößen  $L_C$  und  $E_C$  sich als eindeutige Maßangabe einsetzen lässt, muss noch geklärt werden. Sie besitzt jedoch

den Vorteil, dass zusätzliche Angaben, wie zum Beispiel die Angabe der Farbtemperatur, um die Lichtfarbe zu charakterisieren, entfallen können.

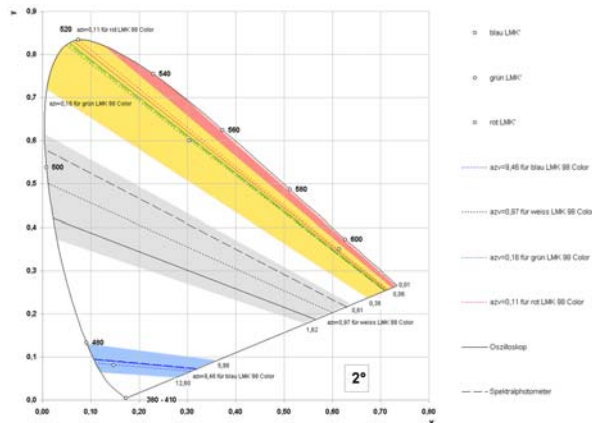


Abbildung 3: Gegenüberstellung der  $a_{ZV}$ -Werte für RGB, ermittelt mit verschiedenen Messverfahren im XYZ-Normfarbraum (TV-Monitor)

TV-Monitor								
	$a_{CV}$	$a_{ZV}$	$L_M$	$\bar{E}_M$ in [lx]	$\bar{E}_M$ in [lx]	$L_C$	$E_C$	$E_C$
			[cd/m <sup>2</sup> ]	$D = 0,5\text{ m}$	$D = 1,24\text{ m}$		$D = 0,5\text{ m}$	$D = 1,24\text{ m}$
rot	0,13	0,12	38,24	13,28	2,761	4,97	1,73	0,36
grün	0,36	0,15	46,67	37,3	8,053	34,8	13,43	2,00
blau	7,24	8,75	20,13	5,366	1,223	146,1	42,47	8,85
weiss	0,98	1,08	161,9	58,67	12,481	158,66	57,50	12,23
PC-Monitor								
	$a_{CV}$	$a_{ZV}$	$L_M$	$\bar{E}_M$ in [lx]	$\bar{E}_M$ in [lx]	$L_C$	$E_C$	$E_C$
			[cd/m <sup>2</sup> ]	$D = 0,5\text{ m}$	$D = 1,08\text{ cm}$		$D = 0,5\text{ cm}$	$D = 1,08\text{ cm}$
rot	0,13	0,13	31,68	8,21	2,08	4,11	1,07	0,27
grün	0,37	0,20	75	28,5	7,22	27,75	10,54	2,67
blau	6,6	8,11	9,73	5,26	1,43	64,22	34,72	9,44
weiss	0,9	1,04	99,73	28,8	7,28	89,75	25,92	6,55

Abbildung 4: Ermittelte circadiane Kennwerte und Lichtdosen von CRT-Monitoren für RGB

In Abbildung 3 und 4 sind die circadianen Eckwerte für den untersuchten 19" PC-Monitor und einem TV-Bildschirm mit 51cm Bilddiagonale dargestellt. Die in der Tabelle aufgeführten Lichtgrößen stellen die Messergebnisse bei maximalen Signalpegel dar. Bei der Untersuchung der beiden Monitore konnte festgestellt werden, dass deren circadiane Wirkungsbereiche nahezu deckungsgleich sind. Dies kann mit der ähnlichen spektralen SPD der Primärvalenzen der beiden Monitore begründet werden. Die ausgestrahlte circadiane Lichtdosis der beiden Monitore unterscheidet sich dagegen beträchtlich. Dies ist auf den höheren Lichtstrom der blauen Primärfarbe des TV-Monitors gegenüber der des PC-Monitors zurückzuführen. Das Verhältnis beträgt ungefähr 2 : 1. Diese Tatsache ist in Abbildung 4 an den Leuchtdichtewerten für Blau sehr gut zu erkennen.

## Auswertung anwendungsspezifischer Bildinhalte

Um eine Aussage über die circadiane Lichtwirkung der beiden verwendeten CRT-Bildschirme in anwendungsbezogenen Situationen, wie zum Beispiel an Arbeitsplätzen oder einem Fernsehabend zu ermitteln, wurden zunächst weitere Bildinhalte analysiert. Aus den Untersuchungen der Standbilder für den 19" PC-Monitor können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden. Für die meisten Office-Anwendungen (z. B.: MS Word, MS Outlook) wurde ein mittlerer  $a_{CV}$ -Wert von 0,78 bestimmt. Dieser Wert in Zusammenhang mit einer mittleren Leuchtdichte  $L_M$  von ungefähr 95 cd/m<sup>2</sup> stellt eine relativ geringe Lichtdosis dar. Die Hintergrundfarbe der Anwendungen war auf Weiss eingestellt. Für die Beleuchtungsstärke  $E_{R50}$  auf der Hornhaut des Beobachters ergibt sich daraus ein Wert von ungefähr 32 lx. Der Abstand zur Bildschirmoberfläche beträgt dabei 50 cm. Setzt man dazu die Beleuchtungsstärke von 500 lx auf der Arbeitsfläche von Bildschirmarbeitsplätzen in Relation, ist die tatsächliche Lichtdosis des Monitors sehr gering.

Für die Anwendung mit einem grauen Bildschirmhintergrund veränderte sich der  $a_{CV}$ -Wert nicht; die abgestrahlte Lichtdosis ging aber auf 33 cd/m<sup>2</sup> beziehungsweise 12 lx zurück. Die höchsten  $a_{CV}$ -Werte wurden mit dem blauen Windows 2000/XP-Standarddesktop erzielt. Sie variierten zwischen 1,24 und 1,86. Die abgestrahlte Leuchtdichte ging für diese Bildinhalte allerdings beträchtlich zurück. Sie erreichte Werte zwischen 20 - 40 cd/m<sup>2</sup>, was einer Beleuchtungsstärke  $E_{R50}$  von 7 - 13 lx

entspricht. Wählt man für die Angabe der Lichtdosen die circadianen Strahlungsgrößen  $L_C$  und  $E_{C50}$ , so ergibt sich ein Bereich, welcher für die Strahldichte bei 33,8 - 76,1 und für die Bestrahlungsstärke zwischen 11,7 - 26,30 liegt. Diese Ergebnisse wurden mit der orts aufgelösten Messmethode erzielt. Der absolute Fehler der elektrischen Messung zu diesen Ergebnissen bewegt sich zwischen 11% - 22% vom Minimal- bis zum Maximalwert der ermittelten circadianen Lichtgrößen (siehe auch Abbildung 5).

PC-Monitor						
	$a_{CV}$	$a_{ZV}$	$L_M$ in $[cd/m^2]$	$L_C$	$E_{R50}$ in $[lx]$	$E_{C50}$
Mittelwert	0.78	0.87	95.2	74.3	32	25
Maximum	1.86	2.44	41	76.1	13	14.1
TV-Monitor						
	$a_{CV}$	$a_{ZV}$	$L_M$ in $[cd/m^2]$	$L_C$	$E_{R50}$ in $[lx]$	$E_{C50}$
Mittelwert	0.66	0.69	65.3	43.1	27.1	17.9
					$E_{R124}$ in $[lx]$	$E_{C124}$
					4.9	3.23
	$a_{CV}$	$a_{ZV}$	$L_M$ in $[cd/m^2]$	$L_C$	$E_{R50}$ in $[lx]$	$E_{C50}$
Maximum	1.73	2.38	62.5	108	30	52
					$E_{R124}$ in $[lx]$	$E_{C124}$
					4.7	8.1

Abbildung 5: Darstellung der anwendungsspezifischen circadianen Kennwerte von CRT-Monitoren

Aufgrund dieser Ergebnisse kann davon ausgegangen werden, dass die ausgestrahlte circadiane Lichtdosis von PC-Monitoren an typischen Bildschirmarbeitsplätzen einen geringen Einfluss auf die Melatoninunterdrückung ausübt. Dieser Einfluss ist allerdings stark abhängig von der Umgebungsbeleuchtung und der Tageszeit des Konsums dieser Lichtwirkung [5].

Des weiteren wurden auch bewegte Bildinhalte, wiedergegeben durch CRT-Monitore, untersucht. Dieser Ansatz im Kontext zu einer anwendungsspezifischen Untersuchung der Bildinhalte wurde für einen TV-Monitor (Bild diagonale = 51cm) realisiert. Mit der angewandten elektrischen Messmethode ist es möglich, die spektrale Zusammensetzung der Bildinhalte mit Hilfe elektrischer Signale zu beschreiben. Die absolute Abweichung dieses Verfahrens für die Angabe der Lichtdosis gegenüber der orts aufgelösten Untersuchungsmethode wurde für das TV-Gerät anhand eines Vergleiches von 10 Standbildern ermittelt. Sie beträgt maximal 24 %.

Aufgrund der durchgeführten Untersuchungen können über die ermittelten Ergebnisse folgende Aussagen getroffen werden. Der circadiane Wirkungsfaktor variiert für die untersuchten Inhalte erheblich; so konnte für die untersuchten Standbilder ein Minimum für den  $a_{CV}$ -Wert von 0,29 und ein Maximum von 4,47 gefunden werden.

Das Maximum der circadianen Wirkung wurde bei der Untersuchung von Bildern mit einem hohen Blauanteil erzielt. Diese Bilder sind jedoch nicht repräsentativ für die abgestrahlte Dosis über eine längeren Zeitraum (z.B.: Fernsehabend). Um eine repräsentative Aussage zu ermitteln, wurden kurze Clips untersucht, welche eine möglichst große Anzahl von darstellbaren Bildzuständen in einer kurzen Zeitspanne vereinen. Der über diese Sequenzen gemittelte  $a_{CV}$ -Wert variiert zwischen 0,51 - 0,73. Die dabei abgestrahlten Lichtdosen unterscheiden sich dabei erheblich voneinander. Sie betragen für die mittlere Leuchtdichte  $L_M$  23,7 - 105,7  $cd/m^2$  und die dabei erreichte Beleuchtungsstärke für einen Abstand von 0,5m  $E_{R50}$  beträgt 9,8 - 43,8 lx. Auf einen Abstand von 1,24m bezogen beträgt die



Beleuchtungsstärke  $E_{R124}$  1,8 - 7,9 lx. Die erzielten Werte können aufgrund der Charakteristik der analysierten Bildinhalte als Eckwerte für die abgestrahlte Lichtdosis gewertet werden. Ausgedrückt in ihren circadianen Äquivalenten entspricht dies einer Strahldichte  $L_C$  von 15,9 - 70,8 und einer Bestrahlungsstärke  $E_{C50}$  von 6,6 - 29,4 für einen Abstand von 0,5m und einer Bestrahlungsstärke  $E_{C124}$  von 1,2 - 5,3 für einen Abstand von 1,24m.

Eine deutliche Abweichung von diesen Werten wurde in der Analyse zweier Nachrichtenmagazine erzielt. Die oft blauen Bildschirmhintergründe dieser Sendungen wirken sich verstärkend auf die circadiane Lichtwirkung aus. So erzielen diese Bildsequenzen einen durchschnittlichen  $a_{CV}$ -Wert von 1,73 bei einer mittleren Leuchtdichte von  $62,5 \text{ cd/m}^2$  und einer Beleuchtungsstärke  $E_{R50} = 30 \text{ lx}$  und  $E_{R124} = 4,7 \text{ lx}$ . Ausgedrückt in den circadianen Strahlungsgrößen entspricht dies  $L_C = 108$ ,  $E_{C50} = 52$  und  $E_{C124} = 8,1$ . Damit unterscheidet sich die dabei abgestrahlte Lichtdosis deutlich von den durchschnittlich erreichten Werten. Allerdings ist sie nicht repräsentativ für die Dauer eines Fernsehabends (siehe Abbildung 5).

Interessant sind an dieser Stelle die tatsächlichen Auswirkungen kurzer circadianer Lichtimpulse [5]. Das angewandte elektrische Messverfahren ist sehr gut dazu geeignet, einen solchen Anstieg der Dosis innerhalb einer Messreihe aufzuzeichnen und in die zeitliche Mittelung einfließen zu lassen. Aufgrund hoher Abtastraten ist die Aufzeichnung kurzzeitiger circadianer Lichtimpulse realisierbar. Dies ist ein Vorteil dieses Verfahrens, gegenüber den anderen Messmethoden (siehe Abbildung 6). So ist es zum Beispiel möglich, bei eventuellen zeitlichen Adaptionseffekten im Auge, in der Messwerterfassung so flexibel zu sein, dass dies in der Auswertung mit berücksichtigt werden kann.

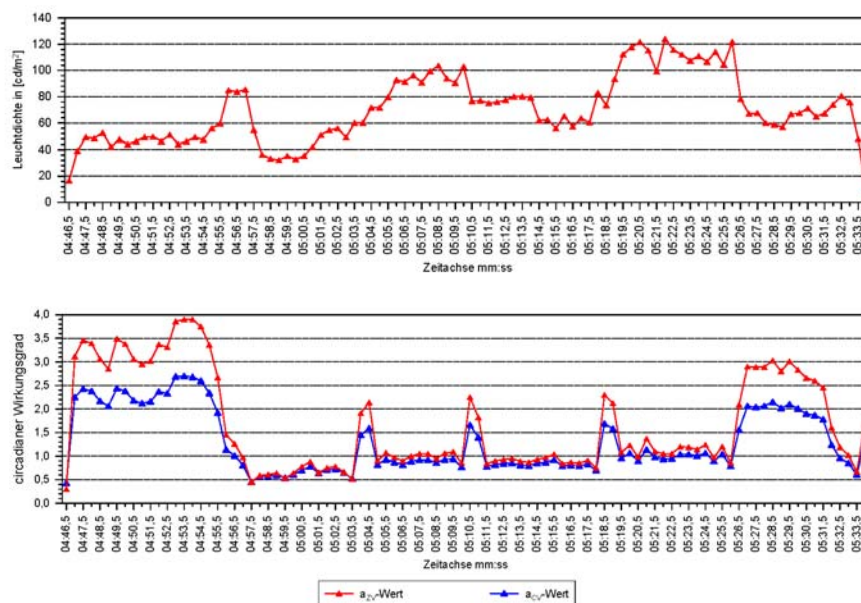
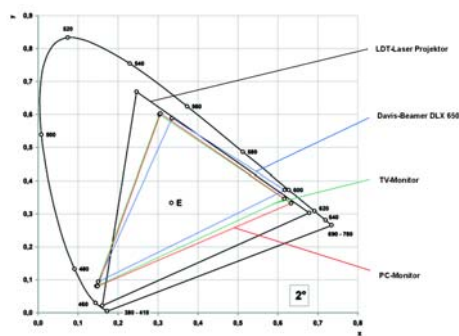


Abbildung 6: Darstellung des Verlaufs der Leuchtdichte (oben) und der circadianen Bewertungsfaktoren (unten), über die Zeitspanne einer Bildsequenz

Zusammenfassend können auch die für den TV-Monitor gemessenen circadianen Lichtdosen als gering eingestuft werden. Die Auswirkungen dieser Lichtdosen auf den Menschen sind jedoch in Abhängigkeit von der Tageszeit der Lichtexposition sehr unterschiedlich [5],[6].

Von großem Interesse ist das circadiane Wirkungspotential, welches sich aufgrund der spektralen Verteilung der blauen Primärvalenz ergibt, in Verbindung mit dem erzeugten Lichtstrom<sup>5</sup> des Bildwiedergabesystems. Erst die gemeinsame Betrachtung dieser beiden Größen kann zu einer genauen Einschätzung der Lichtdosis führen. So steigt das circadiane Wirkungspotential eines Laser-Projektors gegenüber einem Videoprojektor oder CRT-Monitor beträchtlich (siehe Abbildung 7). Dies liegt zum einen an den Farbkoordinaten der blauen Primärvalenz und zum anderen an der deutlich höheren Lichtleistung dieses Systems [7]. Wie relevant die Einflüsse letztendlich sind, muss noch geklärt werden.

Des weiteren ist es sehr gut möglich, die circadianen Lichtwirkungen mit einer  $\bar{z}(\lambda)$ -Anpassung und somit dem  $a_{ZV}$ -Wert zu beschreiben. Wie die Ergebnisse zeigen, ist hier mit einem zunehmenden Fehler bei höheren Faktoren zu rechnen. Die Methode erweist sich jedoch als nützlich, um die circadiane Wirkung im XYZ-Normfarbraum mit der entsprechenden Licht- oder Körperfarbe auszudrücken.



	Farbe	x	y	acv	azv	Wellenlänge [nm]
LDT-Laser Projektor	rot	0.6784	0.3032	0.06	0.06	632
	grün	0.2462	0.6686	0.25	0.13	532
	blau	0.1607	0.0214	31.73	38.22	446
	weiss	0.3071	0.3465	0.77	1.00	
Davis-Beamer DLX 650	rot	0.6173	0.3722		0.03	600
	grün	0.3351	0.5889		0.13	540
	blau	0.1506	0.0937		8.07	440
	weiss	0.3257	0.3828		0.76	

Abbildung 7: Darstellung der Farbräume verschiedener Bildwiedergabesysteme im XYZ-Normfarbraum (links) und Farborte und circadiane Kennwerte eines Laserprojektors und eines Videoprojektors (rechts)

## Literaturverzeichnis

- [1] Gall, D.: *circadiane Lichtgrößen und deren messtechnische Ermittlung*. unbekannt, 2002.
- [2] Ohno, Yoshi und Jonathan E. Hardis: *Four-Color Matrix Method for Correction of Tristimulus Colorimeters*. IS & T Fifth Color Imaging Conference, 1997.  
URL: <http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/IST97.pdf>.
- [3] Ohno, Yoshi und Steven W. Brown: *Four-Color Matrix Method for Correction of Tristimulus Colorimeters - Part 2*. IS & T Sixth Color Imaging Conference, 1998.  
URL: [http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/IST98\\_2.pdf](http://physics.nist.gov/Divisions/Div844/facilities/photo/Publications/IST98_2.pdf).
- [4] Porsch, Tobias: *Diplomarbeit: Experimentelle Bestimmung der circadianen Lichtwirkung von Monitoren und TV-Bildschirmen*. FG Lichttechnik, TU-Ilmenau, 2003
- [5] Schierz, Ch.: *Unspezifische biologische Lichtwirkungen am Arbeitsplatz*. Herbstkonferenz 2002 der GfA e. V. technische Universität Ilmenau, 26.-27.09.2002.
- [6] Zulley, J., E. Haen und R. Lund: *Biological Rhythms - Biologische Rhythmen*. Bd.II: *Schlafen und Wachen als biologischer Rhythmus*. Zulley. S. Roderer Verlag, Regensburg, 1993.
- [7] Jordanow, W. und D. Gall: *Folgen, Verträglichkeit und Akzeptanz von Laserdisplays*. Technische Universität Ilmenau, Fachgebiet Lichttechnik, August 2000

<sup>5</sup>  $\Phi = [lm]$