

“Beleuchtungsrelevante Aspekte bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums”

Teil 1: Allgemeine Aspekte bei der Lampenauswahl

Gall, Dietrich¹
Lapunte, Virginia

¹ Prof. Dr. Dietrich Gall
Dipl.-Phys. Virginia Lapunte
Technische Universität Ilmenau
Fakultät für Maschinenbau
Fachgebiet Lichttechnik

Kurzfassung:

Spätestens nach dem Bekanntwerden der spektralen Wirkungskurve der optischen Sensoren für die Steuerung der circadianen Sehbahn im Jahr 2001 ist die Frage nach der Gestaltung der Lampenspektren für Beleuchtungszwecke erneut aktuell geworden. Die Berücksichtigung lediglich der spektralen Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ und der Normspektralwerte wird künftig nicht mehr als Bewertungskriterien in der Beleuchtungstechnik ausreichen. Anhand von einigen Lampenspektren und deren Bewertung nach unterschiedlichen Kriterien sollen die relevanten Einflußparameter (Helligkeit, Farbe, circadiane Beeinflussung, Sehfunktion, Behaglichkeit, Augenschädigungen und Farbwiedergabe) gegenübergestellt werden. Dabei beschränken sich die Betrachtungen nur auf den sichtbaren Spektralbereich (380 - 780 nm).

1. Einleitung

Durch die Verwendung von künstlichen Lichtquellen in der Beleuchtungstechnik ist das Problem aufgetaucht, was die gegenüber dem Tageslicht z.T. sehr stark geänderten Spektren der Lampen für eine Wirkung auf den Menschen haben. Insbesondere stellt sich die Frage bei Spektren mit starken diskontinuierlichen Spektren (Spektrallinien, Spektralbanden u.ä.), dabei war die Leuchtstofflampe häufig Gegenstand der Diskussion (HARTMANN; LiTG; NIEDERHOFF, VEITCH; BOYCE; GIFFORD; PATTISON). Leider gibt es zu diesem Problemkomplex bislang nur relativ wenig gesicherte Aussagen, so daß die Diskussion immer wieder neu geführt werden muß. Es ist deshalb das Ziel dieser Veröffentlichung, einen Überblick über den derzeitigen Erkenntnisstand der spektralen Wirkung des Lichtes und die daraus abzuleitenden Konsequenzen zu geben.

Gelegentlich wird die Diskussion unter dem Oberbegriff "Vollspektrum-Lampe" geführt, ohne daß man genau definiert, was darunter zu verstehen ist. Unter einem Vollspektrum kann man zunächst ein kontinuierliches Spektrum ähnlich dem Tageslichtspektrum verstehen, das keine Diskontinuitäten über die sichtbare Strahlung aufweist. Auf der anderen Seite versteht man unter einem Vollspektrum ein Spektrum, das auch diejenigen UV- und IR-Anteile beinhaltet, die das Tageslicht auch liefert.

BOYCE definiert die Vollspektrumlampe als einen Strahler, der in allen Spektralbereichen des sichtbaren Lichtes emittiert (UV-A mit eingeschlossen), eine ähnlichste Farbtemperatur $CCT = 5000\text{ K}$ und einen allgemeinen Farbwiedergabewert von $Ra \geq 90$ hat.

Der Bezug auf das Spektrum des Tageslichtes ist sofern problematisch, da es sich ständig ändert und dadurch ein fester Bezug fehlt. Es ist deshalb sinnvoller von

- Lampen mit kontinuierlichen (**Kontinuumslampen**) und
- Lampen mit diskontinuierlichen Spektren (**Diskontinuumslampen**)

zu sprechen.

Die Kontinuumslampen sind in der Regel thermische Strahler (Glühlampen, Flammen), einige Höchstdrucklampen (Xe-Lampe) und bestimmte Luminophore (Leuchtstoffe). Die in der Beleuchtungstechnik verwendeten Gasentladungslampen sind fast alle Diskontinuumslampen. Damit sind auch die sog. "Bio"-Lampen oder "Vollspektrum"-Lampen diskontinuierliche Lampen. Auch die LED-Lampen erzeugen primär "quasi"-monochromatisches Licht, das bei weißen LED durch Leuchtstoffe aufgeweitet wird. Die Beleuchtung mit künstlichen Lichtquellen ist in der Regel also eine Beleuchtung mit diskontinuierlichem Licht, man kann sich also bei künstlichen Lichtquellen lediglich über den Grad der Diskontinuität und die Lage der Spektralbereiche streiten.

2. Allgemeine Ausführungen zur Wirkung von unterschiedlichen Spektren

a.) Wirkungen in Einzelsensoren

Die Wirkung in einem Einzelsensor ist nur von dem absorbierten Strahlungsfluß im Sensor und damit von der Bestrahlungsstärke abhängig und wird somit **nicht primär** von der spektralen Strahldichtevertelung bestimmt. Ein und dieselbe Reizantwort kann mit unterschiedlichen Spektren erzeugt werden. Die Frage nach der Art des Spektrums stellt sich also nicht. Für die integrale Wirkung über das Spektrum hinweg ist die entsprechende Wirkungsfunktion $s(\lambda)$ mit verantwortlich.

$$R_E^* = k_E \cdot \int_{380}^{780nm} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda = k \cdot E_s \quad (1)$$

R_E^* - Reizantwort

$E_{e\lambda}$ - spektrale Bestrahlungsstärke auf dem Empfänger

$s(\lambda)$ - Wirkungsfunktion (entspricht meist dem spektralen Absorptionsgrad)

E_s - gewichtete Bestrahlungsstärke

k_E - eine zu definierende Konstante

b.) Zusammenwirken mehrerer unterschiedlicher Sensoren

Sind mehrere Sensoren S_v mit unterschiedlichen Wirkungsfunktionen $s(\lambda)$ vorhanden, so kommt eine Reizantwort aus der Summe der einzelnen integralen Reizantworten zustande.

$$R_{ges}^* = \sum_1^n R_v^* = \sum_1^n \int_{380}^{780nm} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s_v(\lambda) \cdot d\lambda \quad (2)$$

So ergibt sich z.B. ein Farbreiz aus den Reizantworten von drei Farbsensoren. Aus welcher spektralen Verteilung sich die einzelnen Reizantworten zusammensetzen, spielt demnach auch hier keine eindeutige Rolle (s. a. Gl. 1).

c.) Photochemische und photothermische Wirkungen

Die Wirkung der Strahlung über ein entsprechendes Beleuchtungsareal hängt neben den o.g. Größen auch von der Einwirkungsdauer T ab. Die Reizantwort ist dann einer Bestrahlung proportional, die nach der Wirkungsfunktion $s(\lambda)$ gewichtet ist.

$$R_H^* = k_H \cdot \int_0^T E_s(t) \cdot dt \quad (3)$$

wobei sich E_s wie folgt aus dem Spektrum ergibt

$$E_s = \int_{380}^{780nm} E_{e\lambda}(\lambda) \cdot s(\lambda) \cdot d\lambda \quad (4)$$

Es bedeutet:

- $E_{e\lambda}(\lambda)$ - spektrale Bestrahlungsstärke
- T - maximale Einwirkungsdauer
- k_H - eine zu definierende Konstante

Aus Gleichung 4 folgt wiederum, daß die Reizantwort vom integralen Wert über das Spektrum und **nicht** von der spektralen Verteilung abhängt.

3. Spezielle Wirkungen von Lampenspektren

3.1 Spektrale Hellempfindlichkeit

Die bekannteste spektrale Wirkungsfunktion ist die Hellempfindlichkeitsfunktion des menschlichen Auges. Da diese Funktion sowohl von individuellen als auch von verfahrenstechnischen Parametern abhängt, hat die Internationale Beleuchtungskommission (CIE) diese Kurve über ein großes Beobachterkollektiv gemittelt und genormt ($v(\lambda)$ -Kurve s. Abb. 1). Die so erhaltenen Reizantworten nach Gleichung 1 entsprechen dem Helligkeitseindruck und werden als lichttechnische Größen definiert. Die optimale Abstimmung des Lampenspektrums auf die $v(\lambda)$ -Kurve bestimmt die Lichtausbeute der Lichtquelle. Da die Beleuchtung auf der Netzhaut von der Strahldichte der Objekte und der Raumwinkelprojektion im Auge, die man näherungsweise konstant annehmen kann, abhängt, ist die Reizantwort des Auges der Leuchtdichte proportional und damit der Helligkeit.

Die Hellempfindungsfunktion ist von dem Adaptationszustand des Auges abhängig. Die $v'(\lambda)$ -Kurve in Abb. 1 gilt für das Nachtsehen ($L < 0,03 \text{ cdm}^{-2}$) und die $v(\lambda)$ -Kurve für das Tagsehen ($> 10 \text{ cdm}^{-2}$). Dazwischen gibt es je nach Leuchtdichte $v_{\text{eq}}(L)$ -Helligkeitsfunktionen (DIN 5031). Abbildung 2 (CIE 75) zeigt die Hellempfindungsfunktion, wenn sie mit einem anderen Verfahren bestimmt wird (Helligkeitsvergleich).

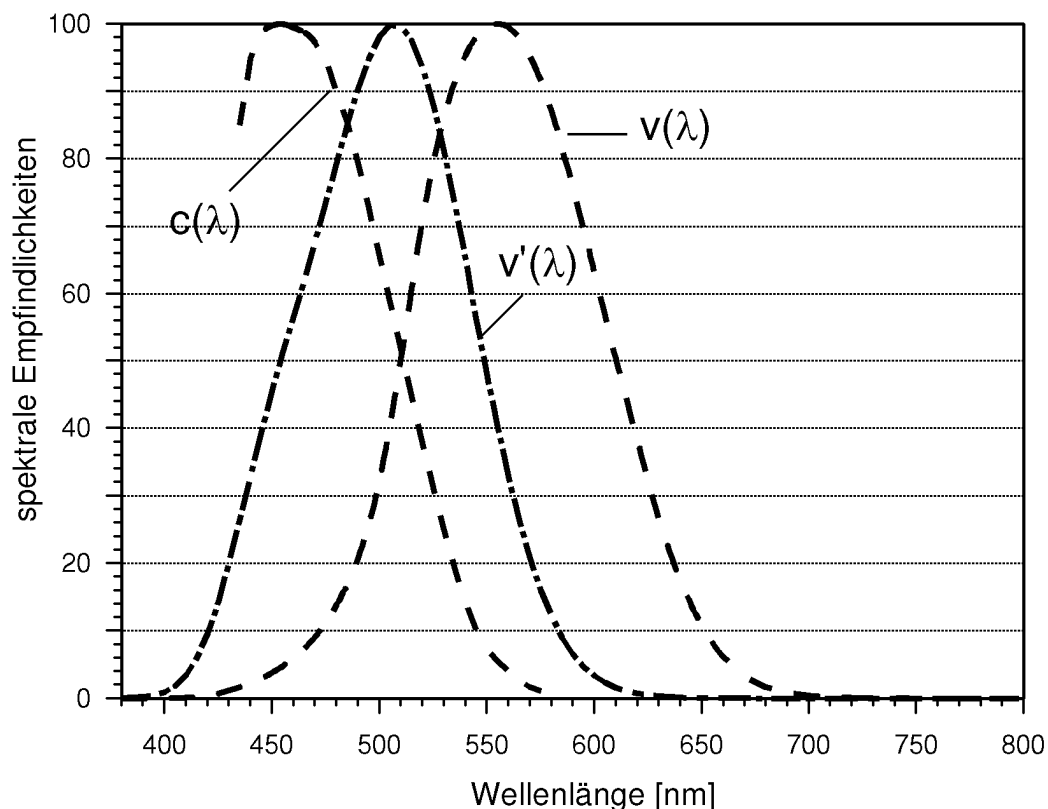


Abb. 1: Genormte Helligkeitsfunktion $v(\lambda)$ und $v'(\lambda)$ und circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$

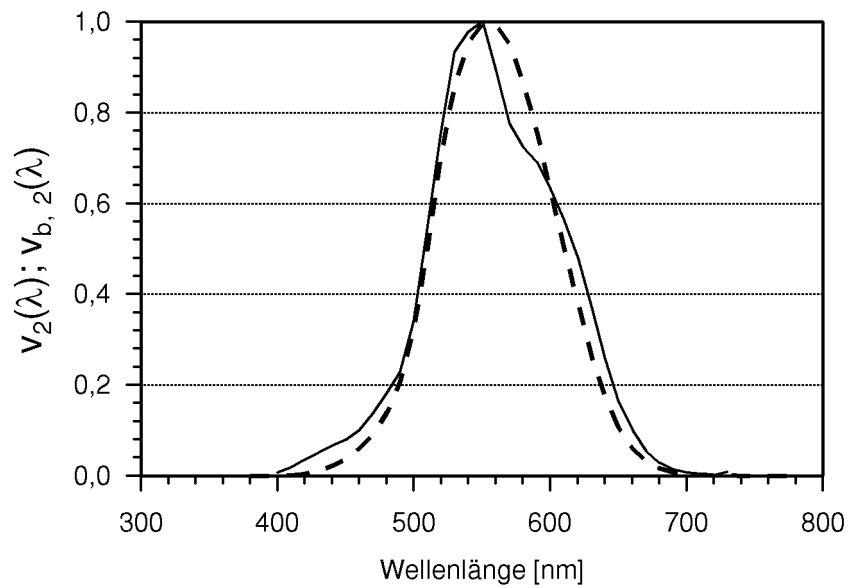


Abb. 2: Spektrale Hellempfindlichkeitsfunktion (CIE 75) nach dem Helligkeitsvergleich

- $v_{b,2}(\lambda)$: Methode: Heterochromer Direktvergleich (Gesichtsfeldwinkel $\alpha = 2^\circ$, photopisches Sehen)
- $v_2(\lambda)$: Methoden: Flimmervergleich, Kleinschritt-Direktvergleich (2° -Normalbeobachter, photopisches Sehen) (gestrichelte Kurve)

Darüber hinaus variiert diese Funktion stark mit der Objektfeldgröße und der Lage der Netzhaut. Für die absolute Bewertung der Helligkeit spielen diese Abweichungen eine untergeordnete Rolle, da das Auge nicht in der Lage ist, den Reiz quantitativ zu bewerten. Sind jedoch im Gesichtsfeld gleichzeitig Objekte mit unterschiedlichen Spektren, kann u.U. eine starke Veränderung der Helligkeitsrelation bei verschiedenen Beleuchtungsniveaus auftreten. Dies wirkt sich aber trotzdem nur wenig aus, da ein Helligkeitsvergleich verschiedener Farben nur schwer möglich ist.

3.2 Einfluß der Spektren auf elementare Sehfunktionen

SCHIERZ hat umfangreiche Untersuchungen und Betrachtungen zu der Wirkung von diskontinuierlichen Spektren gemacht. So zeigt Abb. 3 die von SCHIERZ gefundene spektrale Akkommodationsempfindlichkeit.

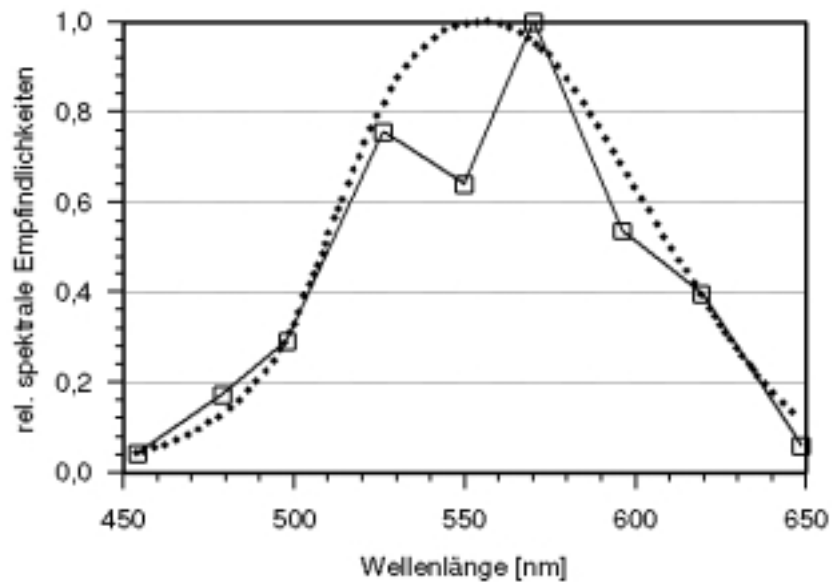


Abb. 3: Spektrale Akkommodationsempfindlichkeit $v_a(\lambda)$ (SCHIERZ) (ausgezogen) und Hellempfindlichkeitsfunktion $v(\lambda)$ (punktiert)

Die chromatische Aberration des Auges zeigt Abb. 4 (SCHIERZ).

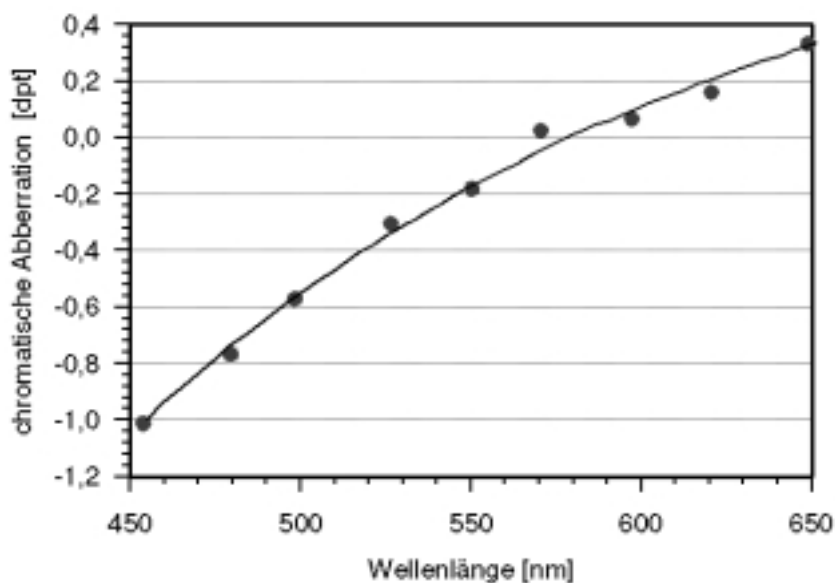


Abb. 4: Chromatische Aberration (SCHIERZ)

Bezieht man als Nullpunkt den Wert bei $\lambda = 578 \text{ nm}$ zeigt sich, daß das Auge im blauen Bereich kurz- und im gelb-roten Bereich langbrennweitiger wird. Schierz konnte aber zeigen, daß diese Werte nur bei monochromatischer Darbietung gelten. Sind mehrere Spektralanteile vorhanden, wirkt sich die Brechkraftveränderung weniger stark aus.

Die chromatische Aberration wirkt sich auch auf die spektrale Sehschärfe (ADRIAN u.a., SCHIERZ) und Wellenlängenunterscheidungsfunktion aus (Abb. 5 (WRIGHT)).

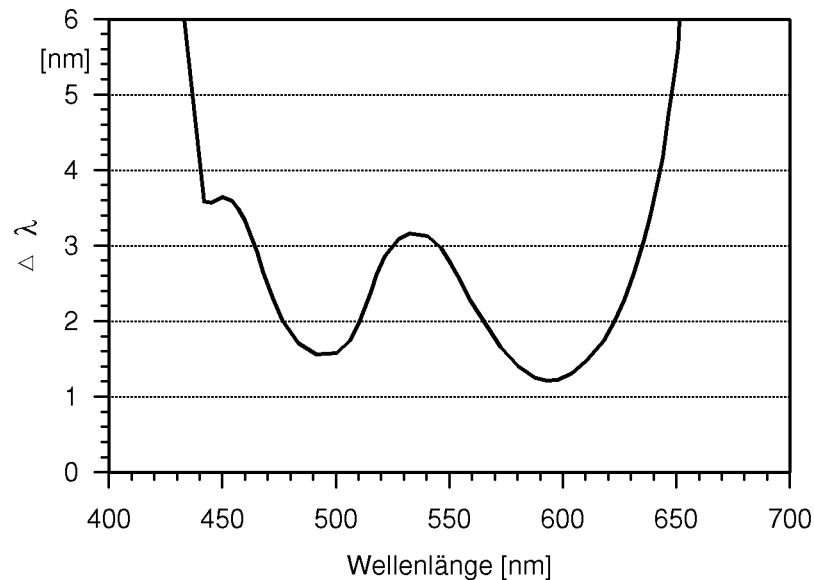


Abb. 5: Kurve der Empfindlichkeit für Wellenlängenunterschiede im Spektrum (WRIGHT-PITT)

$\Delta\lambda$ - unterscheidbare Wellenlängendifferenz

Die integrale Sehschärfe bei polychromatischem Licht hängt relativ wenig von dem verwendeten Lampenspektrum ab (SCHIERZ).

3.3 Spektrale Schädigungspotentiale

Im kurzwelligen Spektralgebiet werden im Auge photochemische Prozesse ausgelöst, die zu Schäden führen können. Nach den Ausführungen im Kapitel 2 c ist die Wirkung von der Reizdauer abhängig. Das Maximum der Gefährdung liegt in einem Bereich von 435 bis 440 nm (Abb. 6).

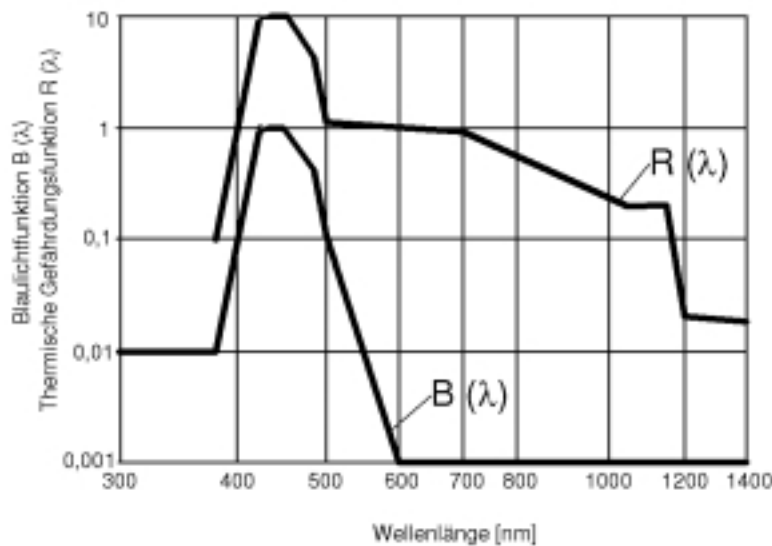


Abb. 6: Wellenlängenabhängigkeit der thermischen Netzhautgefährdung $R(\lambda)$ und der photochemischen Netzhautgefährdung durch blaues Licht $B(\lambda)$ [SUTTER]

Ebenso können thermische Netzhautgefährdungen auftreten, auch dabei liegt das Maximum der Gefährdung zwischen 435 und 440 nm.

Daraus folgt, daß der "Kurz"-Sensor (Blau-Sensor) für das Farbsehen (s.a. Abb. 11) und der circadiane Sensor (s.a. Abb. 1) besonders gefährdet sind. Dies ist bei der Auswahl eines geeigneten Lampenspektrums besonders zu beachten.

3.4 Lichtwirkung über die circadiane Sehbahn (s. a. Teil 2)

Seit 2001 ist die Wirkungskurve der Melatoninsekretion bekannt (BRAINHARD; THAPAN; EHRENSTEIN (s.a. Abb. 1)). Ebenso wurden die Photosensoren, die dafür verantwortlich sind, gefunden. Sie sind über die Netzhaut verteilt, ein Bildmuster kann von diesen Empfängern nicht aufgelöst werden. Als Wirkung wurde die Hemmung der nächtlichen Sekretion von Melatonin durch die Epiphyse (Zirbeldrüse) bestimmt. Die Schwelle für diese Sensoren liegt bei ca. 8 lx (EHRENSTEIN).

Mit der Beschreibung der Suppression der Melatoninsekretion ist man nun in der Lage, circadiane Prozesse zu beschreiben und zu beeinflussen. Man kann aber auch damit die aktivierenden Wirkungen des Lichtes beschreiben.

U.U. sollte man ein circadianes Lichtmanagement, bei dem die Tageszeit, das Belichtungsniveau und die spektrale Verteilung berücksichtigt werden, in die Überlegungen bei der Gestaltung der Beleuchtung einbeziehen.

Die Behandlung von Depressionserkrankungen mittels Licht-Therapie kann durch den gezielten Einsatz von Lampen mit einem hohen Anteil im blauen Spektralbereich u.U. verbessert werden. MÜLLER verwendete neuerdings Tageslicht-Leuchtstofflampen ("Bio"-Lampen) zur Behandlung von Depressionen in Kombination mit Johanniskrautpräparaten. Der Behandlungserfolg mit diesen Lampen war signifikant besser als ohne Licht. Das die Behandlung in den Dämmerungszeiten besonders effektiv ist, ist ein Hinweis darauf, daß auch hier die circadiane Rhythmen eine Rolle spielen (ROSENTHAL u.a.).

Um den Unterschied zwischen circadianer und Helligkeitswirkung der Spektrum zu zeigen, sollen Spektren von einigen typischen Lampen, die mit einem Spektralradiometer vermessen wurden, beispielhaft bewertet werden.

Die verwendeten Lampenspektren werden in den Abb. 7 und 8 gezeigt. Da hier ein Einzelsensor vorliegt, dessen Reizantwort allerdings auch zeitabhängig erfolgt, müßten zur Betrachtung die Gleichungen 3 und 4 herangezogen werden. $E_{e\lambda}$ ist dann die spektrale Bestrahlungsstärke auf der Netzhaut und $c(\lambda)$ die circadiane Wirkungsfunktion nach Abb. 1. Zur Berechnung wurde die Kurvenform $c(\lambda)$ der $v(\lambda)$ -Kurve angepaßt, deren Maximum aber von $\lambda = 555 \text{ nm}$ auf 460 nm verschoben wurde. Zum Vergleich der Wirksamkeiten der unterschiedlichen Spektren soll der visuelle und der circadiane Nutzeffekt sowie der circadiane Wirkungsfaktor verwendet werden. Die Frage der Dosis soll zunächst im Weiteren ausgeklammert werden.

a. Visueller Nutzeffekt (V_{vis}):

Wenn man eine gewichtete Strahlungsgröße auf die energetische Strahlungsgröße bezieht, erhält man den sog. Nutzeffekt der Strahlung.

$$V_{vis} = \frac{\int_{380}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780\text{nm}} L_{e\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{\int_{380}^{780\text{nm}} E_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780\text{nm}} E_{e\lambda} \cdot d\lambda} \quad (5)$$

b. **Circadianer Nutzeffekt (V_{cir}):**

$$V_{cir} = \frac{\int_{380}^{780nm} L_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780nm} L_{e\lambda} \cdot d\lambda} = \frac{\int_{380}^{780nm} E_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_{380}^{780nm} E_{e\lambda} \cdot d\lambda} \quad (6)$$

c. **Circadianer Wirkungsfaktor (a_{cv}):**

Das Verhältnis von circadianer zur visuellen Wirkung des Lichtes soll als circadianer Wirkungsfaktor a_{cv} bezeichnet werden.

$$a_{cv} = \frac{\text{circadiane Lichtwirkung}}{\text{visuelle Helligkeitswirkung}} \quad (7)$$

Damit kann man den lichttechnischen Größen, die die visuelle Helligkeitswirkung beschreiben, eine circadiane Wirkung zuordnen. Zunächst soll dies nur für die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärken erfolgen (Im 2. Teil der Arbeit sind die anderen möglichen Strahlungsgrößen definiert).

Für die Bestrahlungs- bzw. Beleuchtungsstärken kann man in Gleichung 7 folgende Beziehungen einsetzen:

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

Den Nenner von Gleichung 8 kann man noch mit der Beleuchtungsstärke E_v beschreiben

$$E_v = k_m \cdot \int_{380}^{780nm} E_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda \quad [lx] \quad (9)$$

$$d.h. \quad \int_{380}^{780nm} E_{e\lambda} \cdot v(\lambda) \cdot d\lambda = \frac{E_v}{k_m}$$

Als circadiane Bestrahlungsstärke E_{ec} soll folgende Bewertung bezeichnet werden

$$E_{ec} = \int_{380}^{780nm} E_{e\lambda} \cdot c(\lambda) \cdot d\lambda \quad [Wm^{-2}] \quad (10)$$

Aus den Gleichungen 8, 9 und 10 kann man die circadiane Bestrahlungsstärke berechnen, wenn man a_{cv} und die Beleuchtungsstärke E_v , die die eingesetzte Lichtquelle erzeugt, kennt.

$$E_{ec} = \frac{a_{cv}}{k_m} \cdot E_v = a' \cdot E_v \quad (11a)$$

$k_m = 683 \text{ lmW}^{-1}$ (maximales photometrisches Strahlungsäquivalent)
 a' - Umrechnungsgröße [mW/lm]

Will man eine circadiane **“Beleuchtungs”stärke** (Einheit: lx_c) beschreiben, gilt Gleichung 11 b:

$$E_c = k_m \cdot E_{ec} = a_{cv} \cdot E_v \quad (11b)$$

Damit man sich eine Vorstellung von den neuen Größen machen kann, soll an ein paar willkürlich ausgewählten Lampen und Lichtquellen die Zahlenwerte ermittelt werden. Die verwendeten Lampen sind z. T. auch ältere Exemplare, die eine gewisse Nutzungszeit schon hinter sich haben, und sind deshalb nicht repräsentativ für bestimmte Lampenprodukte, sie dienen lediglich einem wertfreien Vergleich.

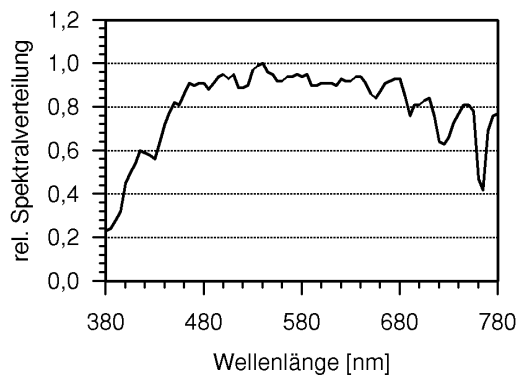
Bei einem bewölkten Himmel (CCT ~ 6000 K) sind die Beleuchtungsstärke und die circadiane Beleuchtungsstärke gleich groß (s. Tabelle 1).

Die Werte für a_{cv} und a' sind für die in Abb. 7 und 8 dargestellten Spektren in Tabelle 1 aufgeführt. Es zeigt sich, daß a_{cv} bei den warm- und neutralweißen Spektren (Glühlampe, Leuchtstofflampe - Warmton und Neutralweiß, Natriumdampf-Hochdrucklampe, Metallhalogenlampen) niedriger ist, als beim Tageslicht und dem tageslichtähnlichen Lichtfarben.

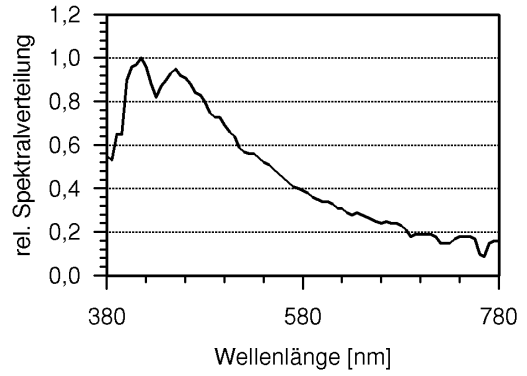
Die Spektren wurden mit einem Spektralradiometer (SpectraScan) aufgenommen.

		Wirkungsgrad / Wirkungsfaktor			
	Lampe	V_{vis}	V_{cir}	a_{cv}	a' [mW/lm]
a	direkte Sonne (CCT: 5081 K)	0,31	0,27	0,87	1,27
b	blauer Himmel (CCT: 19963 K)	0,26	0,44	1,69	2,47
c	bewölkter Himmel (CCT: 5924 K)	0,30	0,30	1,00	1,46
d	Glühlampe (CCT: 2800 K)	0,22	0,10	0,45	0,66
e	Halogenmetaldampf Lampe (neutralweiß - Keramik) (CCT: 3640 K)	0,47	0,22	0,47	0,69
f	Natriumdampfhochdrucklampe (CCT: 2770 K)	0,48	0,16	0,33	0,48
Leuchtstofflampe					
a	warmton (CCT: 2827 K)	0,52	0,20	0,38	0,55
b	neutralweiß (CCT: 3678 K)	0,42	0,19	0,45	0,66
c	“Biolum” (CCT: 6125 K)	0,40	0,39	0,98	1,43
d	Daylight (CCT: 5145 K)	0,42	0,35	0,83	1,21
e	“Truelite” (CCT: 5600 K)	0,37	0,32	0,86	1,25
Maximum (Linienstrahler 460 nm)		0,06	1,00	16,67	24,34

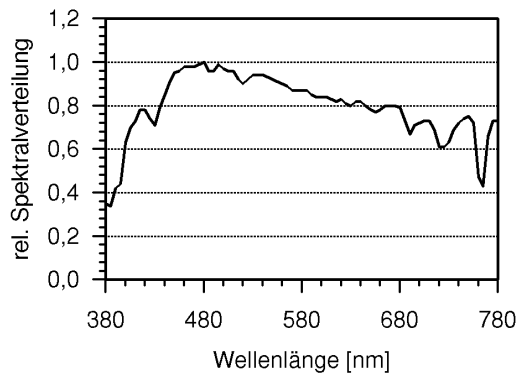
Tabelle 1: Visuelle und circadiane Wirkungsgrade und -faktoren (Beispiele)



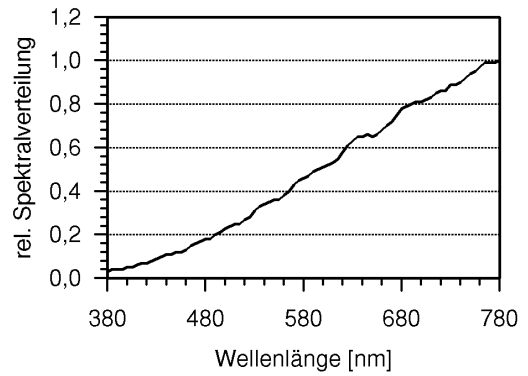
a.) direkte Sonne
CCT: 5080 K



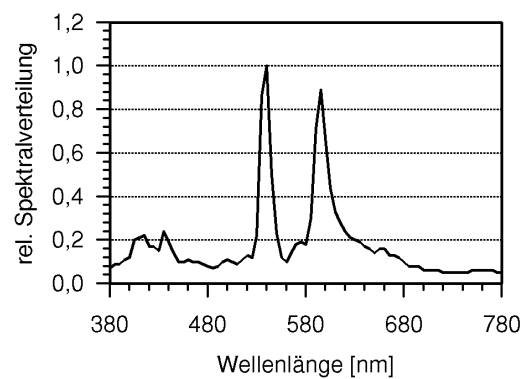
b.) blauer Himmel
CCT: 19950 K



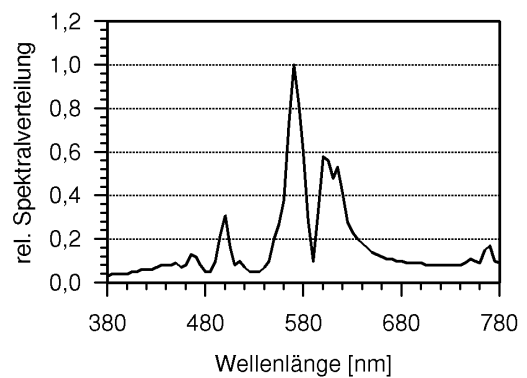
c.) bewölkter Himmel
CCT: 5900 K



d.) Glühlampe
CCT: 2800 K

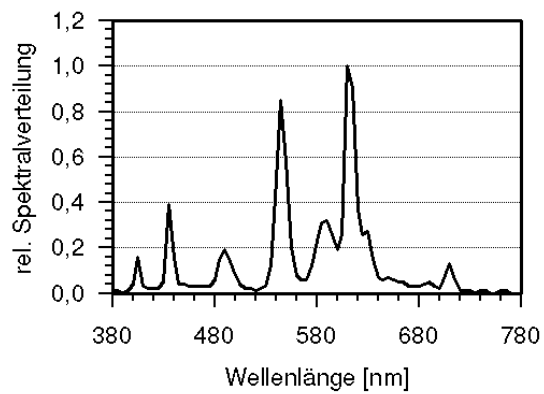


e.) Keramik
CCT: 3630 K

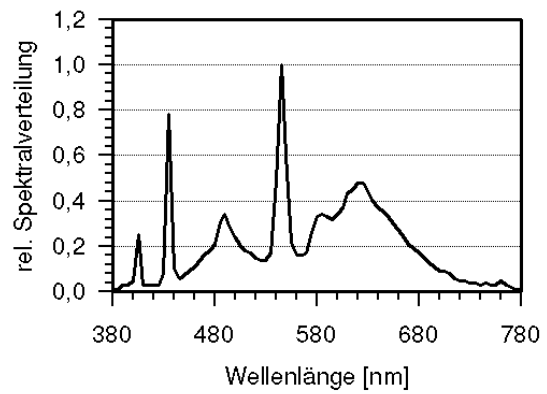


f.) Natriumdampf-Hochdrucklampe
CCT: 2770 K

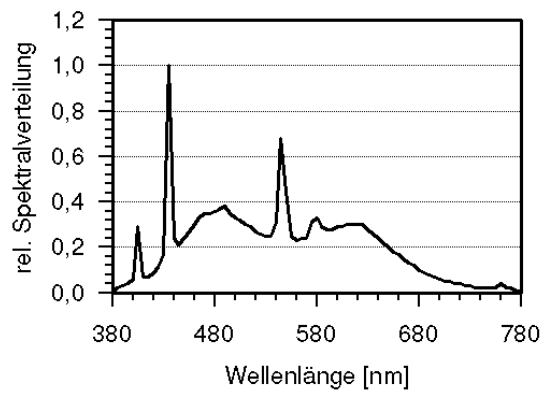
Abb. 7: Spektralverteilung einiger Lichtquellen



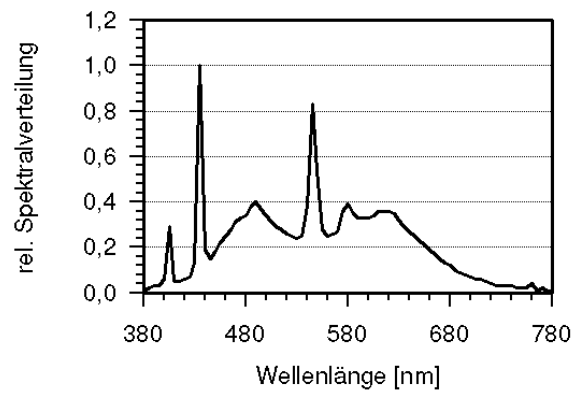
a.) LL (warmton)
CCT: 2827 K



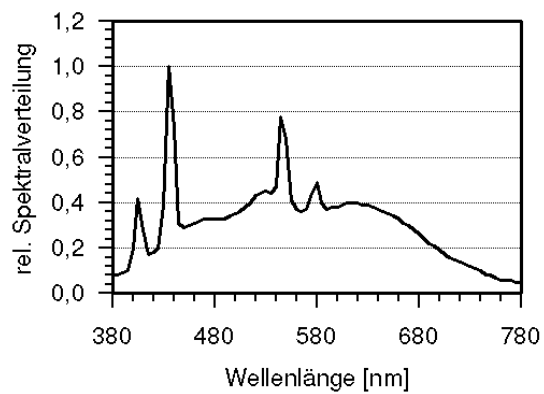
b.) LL (hellweiß 22, neutralweiß)
CCT: 3678 K



c.) LL (Biolux)
CCT: 6125 K



d.) LL (Daylight 12)
CCT: 5145 K



e.) LL (True-Lite)
CCT: 5600 K

Abb. 8: Spektralverteilung einiger Leuchtstofflampen (LL)

Für den circadianen Wirkungsfaktor a_{cv} wäre bei einer Wellenlänge von $\lambda = 460$ nm ein maximaler Wert von 16,7 möglich.

Wie man sieht, haben die unterschiedlichen Lampen bzw. Lichtquellen sehr unterschiedliche circadiane Wirkungsfaktoren, d. h. bei gleicher Lichtleistung eine sehr unterschiedliche circadiane Wirkung.

Die Beachtung der a_{cv} -Werte hat bei der Interpretation der circadian Rhythmik demnach eine große Bedeutung. Neben dem Einfluß auf die körperliche Leistungsfähigkeit, Aufmerksamkeit und Müdigkeit weiß man, daß die Melatoninausschüttung und damit die circadiane Wirkungsfunktion $c(\lambda)$ bzw. a_{cv} und a' auch für die saisonabhängige Depressionslage (SAD) entscheidend ist. Während man bzgl. der Wirksamkeit verschiedener Spektren bislang noch unsicher war (ZULLEY; MÜLLER) ist mit der Entdeckung der $c(\lambda)$ -Funktion belegt, daß die kurzwellige sichtbare Strahlung bei 460 nm dafür verantwortlich ist. Da das Melatonin auch das Immunsystem beeinflusst und eine mögliche zellprotektive Funktion besitzt (ZULLEY), ist mit einer weiteren Beeinflussung der Gesundheit durch das Licht zu rechnen.

Es ist auch davon auszugehen, daß der Schlaf ein integraler Bestandteil der circadian Rhythmik ist, und daß durch das Licht u. U. Schlafstörungen verursacht werden können (SAUER; EHRENSTEIN; ROSENTHAL). Der richtige Zeitpunkt der Licht-Exposition ist danach auch entscheidend. Die Lichtwirkung kann bei normalen Raumbeleuchtungen schon erzielt werden, wenn die Exposition in den Abendstunden erfolgt (TRINADER u.a.). Diese Wirkung kann ebenfalls mit dem circadianen Wirkungsfaktor a_{cv} angegeben werden.

3.5 Spektren, Lichtfarbe, und Wohlbefinden

Zu den Einfluß der Lichtfarbe auf das Wohlbefinden und der Akzeptanz gibt es widersprüchliche Angaben. KRUTHOF gibt einen Zusammenhang zwischen Lichtfarbe und Beleuchtungsniveau an. Allerdings sind seine Daten statistisch nicht abgesichert. Trotzdem wird noch heute die Aussage: "Je heller das Beleuchtungsniveau um so höher soll die Farbtemperatur der Lampe sein" immer wieder zitiert. BODMANN u.a. konnten diese Tendenz zwar bestätigen, aber die Aussage, daß die Lichtfarbe vom Beleuchtungsniveau abhängt, nicht nachweisen. Den Lichtfarben werden nach diesen Untersuchungen Stimmungsattribute zugeordnet (Tabelle 2). Es gibt Aussagen, daß für die Beurteilung der Farbwirkung (DAVIS u.a.) nicht die Lichtfarbe, sondern die Farbwiedergabe bei Objektfarben entscheidend ist.

Bei der Auswahl der Lichtfarben, spielt auch das verwendete Beleuchtungssystem (direkt, indirekt usw.) eine Rolle (FLEISCHER; POLLE u.a.). Allerdings sind die Wirkungen nicht sehr dominant.

	Lichtfarben		
Beleuchtungsstärke	Warmton	Weiß	Tageslicht
über 3000 lx	übertrieben künstlich	freundlich lebendig	freundlich
700 - 3000 lx	freundlich	freundlich	neutral
unter 700 lx	dämmrig	dämmrig trübe	dämmrig kalt

Tabelle 2: Stimmungsattribute für verschiedene Lichtfarben (BODMANN u.a.)

SCHIERZ hat eine kleine Akzeptanz-Studie zur Lichtfarbe durchgeführt. Dafür verwendete er zwei Leuchtstofflampen mit unterschiedlich "vollen" Spektren (Abb. 9).

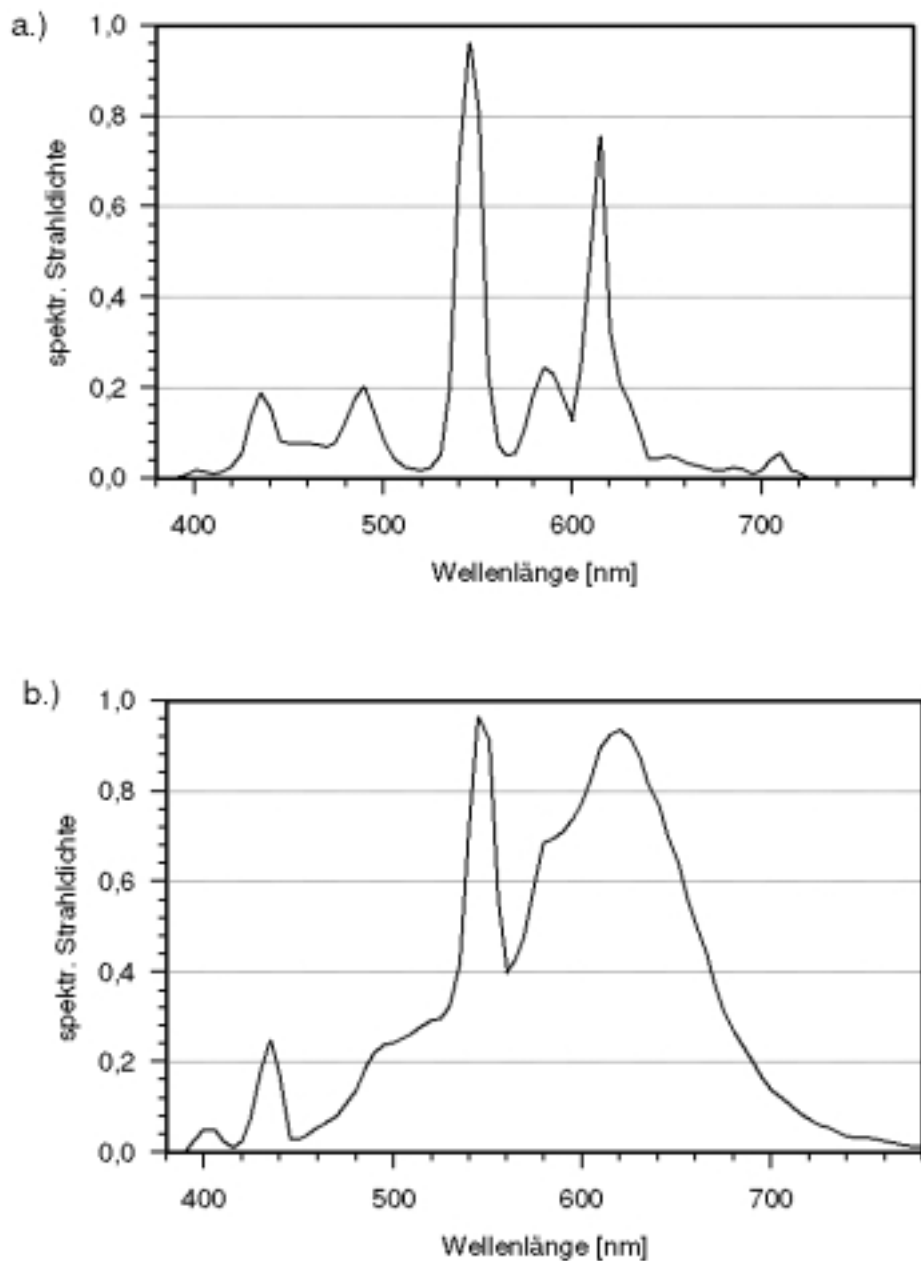


Abb. 9: Mehrbanden-Spektren (SCHIERZ)

Die Kurve a stammt von einer neutralweißen 3 Banden-Leuchtstofflampe und die Kurve b von einer warmweißen 6 Banden-Lampe. Überraschend schnitt die Lampe mit dem “vollen” Spektrum schlechter bei den Befragungen ab als die 3 Banden-Lampe (Abb. 10).

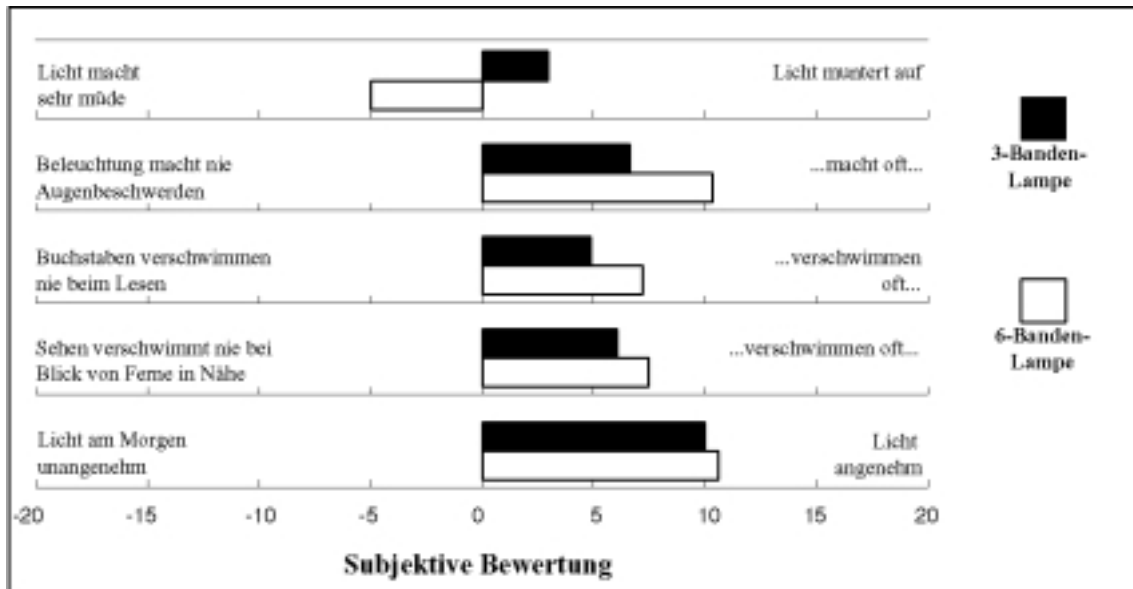


Abb. 10: Einschätzung der 3 bzw. 6-Banden-Leuchtstofflampen (SCHIERZ)

Wenn man beide Lampen bzgl. der circadian Wirkung (a_{cv}) miteinander vergleicht, zeigt sich, daß die 3 Banden-Lampe einen höheren a_{cv} -Wert hat (Tabelle 3). Dies korreliert mit dem Befragungsergebnis zur Müdigkeit. Es ist ein weiterer Hinweis darauf, daß für derartige Lichtwirkungen nicht die Art des Spektrums ("Voll"-Spektrum oder diskontinuierliches Spektrum), sondern der circadiane Wirkungsfaktor a_{cv} (Gln. 7) heranzuziehen ist.

Lampe	circadiane Wirkungsfaktoren	
	a_{cv}	a' (mW/lm)
3-Banden-Leuchtstofflampe	0,46	0,67
6-Banden-Leuchtstofflampe	0,30	0,44

Tabelle 3: Vergleich der circadianen Wirkungsfaktoren a_{cv} und a'

Zu ähnlichen Ergebnissen wie SCHIERZ kommt auch WITTING, der Leistungs- und Ermüdungswerte bei der Verwendung von Lampen mit unterschiedlichen Spektren (Farbtemperaturen) im Vergleich mit dem Tageslicht ermittelte. Bei diesen Versuchen schnitten in der Regel Lampen mit warmen Lichtfarben (d.h. kleine a_{cv} -Werte; Tab. 1) schlechter ab, als die mit weißen Lichtfarben. Auch seine Beobachtung, daß die direkte Sonneneinstrahlung nicht so gut wirkt, wie das Spektrum des bedeckten Himmels stimmt gut mit dem höheren a_{cv} -Wert überein. Da bei den Untersuchungen zur Leistung die Halogen-Glühlampe im Vergleich zu einer Warmton-Leuchtstofflampe viel besser abschnitt, interpretiert WITTING als Auswirkung des

“vollen” Spektrum, was im Widerspruch zu den Ergebnissen von SCHIERZ steht und aus dem in Abschnitt 2a gemachten Aussagen zur spektralen Wirkung nicht begründbar ist.

4. Lampenspektren und Körperfarben

Eine Farbempfindung entsteht, wenn die drei Farbempfänger des Auges (Empfindlichkeiten s_S ; s_M ; s_L Abb. 11), mit entsprechenden spektralen Reizen erregt werden.

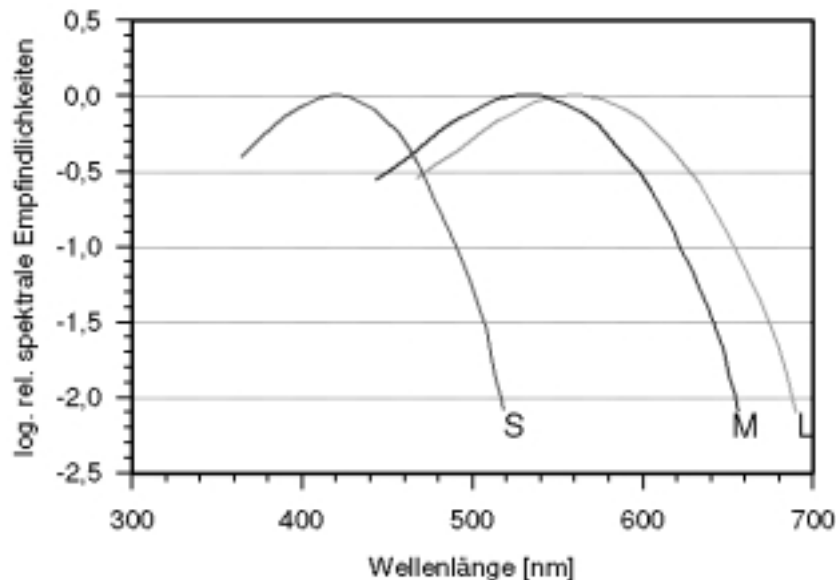


Abb. 11 Relative spektrale Empfindlichkeit (Absorption) der optischen Sensoren im Auge

S - “Kurz”-Sensor ($\lambda_{\max} = 419 \text{ nm}$); $s_S(\lambda)$

M - “Mittel”-Sensor ($\lambda_{\max} = 531 \text{ nm}$); $s_M(\lambda)$

L - “Lang”-Sensor ($\lambda_{\max} = 558 \text{ nm}$); $s_L(\lambda)$

Dabei kann ein und dieselbe Farbempfindung durch unendlich unterschiedliche Spektren erzeugt werden. Die “Fülle“ des Spektrums spielt zunächst bei der Wirkung der **Lichtfarben keine Rolle**.

Die **spektrale Verteilung der Lampen** hat aber bei der Erzeugung von **Körperfarben** eine **große Bedeutung**. Die Farbwiedergabe von Körperfarben hängt sowohl von der spektralen Verteilung des Lichtes mit dem beleuchtet wird ($E_{e\lambda}$), als auch von den spektralen Reflexions- bzw. Transmissionseigenschaften der beleuchteten Objekte ab. Die spektralen Eigenschaften werden gewöhnlich mit dem spektralen Strahldichtefaktor $\beta(\lambda)$ beschrieben. Somit ergibt sich für das Spektrum, das reflektiert oder transmittiert wird, folgende spektrale Strahldichte

$$L_{e\lambda} \approx \beta(\lambda) \cdot E_{e\lambda}(\lambda) \quad (12)$$

$E_{e\lambda}(\lambda)$ - spektrale Bestrahlungsstärke, mit der der Körper beleuchtet wird

$\beta(\lambda)$ - spektraler Strahldichtefaktor

Beleuchtet man einen Körper mit einer Bezugslichtfarbe und bestimmt die Farbverschiebung, die ein beliebiges Spektrum bei der Körperfarbe bewirkt, so kann man daraus ein Maß für die Farbwiedergabe eines Spektrums ableiten.

In Abb. 12 sind die spektralen Strahldichtefaktoren von 8 Testfarben angegeben, an denen repräsentative Farbverschiebungen überprüft werden. Die CIE-Kommission (CIE 13.2) hat neben den 8 Testfarben noch die Bezugslichtfarben festgelegt, auf die die Farbabweichung bezogen werden soll. Leider sind dies keine realen Lichtquellen, sondern die Spektren des Schwarzen Strahlers, die in ihrer Farbtemperatur der Strahlung der zu kennzeichnenden Lichtfarbe nahe kommen. Oberhalb einer Farbtemperatur von 5000 K wird das vergleichbare Spektrum des Tageslichtganges genommen. Aus der Farbverschiebung im uvw-Farbsystem wird unter Berücksichtigung der Farbumstimmung der sog. spezielle **Farbwiedergabe-Index** R_{1-8} und **allgemeine FWG-Index** R_a berechnet.

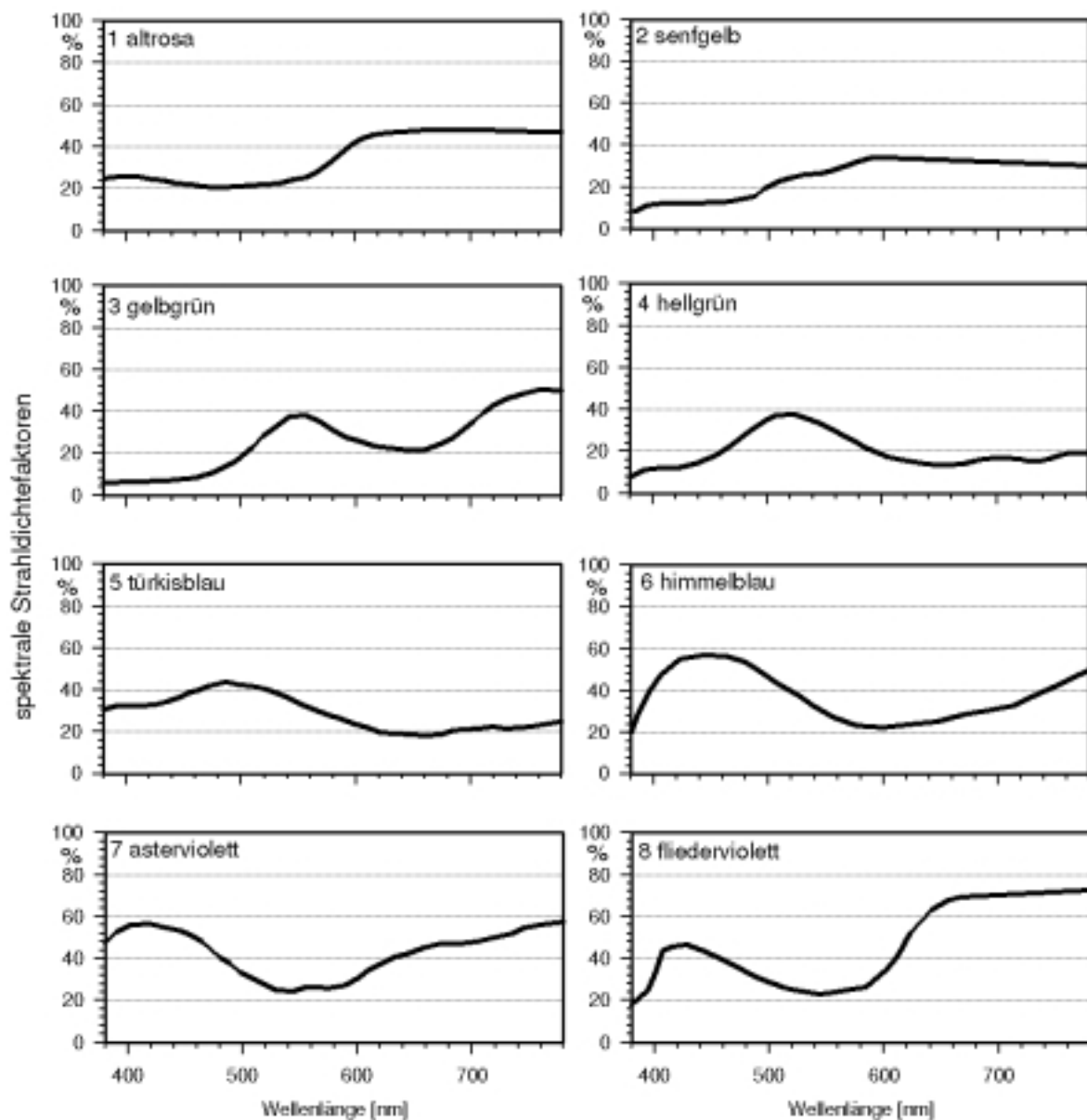


Abb. 12: Spektrale Strahllichteffektoren von 8 Testfarben zur Bestimmung des Farbwiedergabeindex

$R_i = 100$ bedeutet, daß die Körperfarben bei der Bezugslichtfarbe und dem zu kennzeichnenden Strahler übereinstimmen, eine Farbabweichung also nicht vorhanden ist. Aus den Lampenspektren (Abb. 7, 8 und 9) können die FWG-Indizes bestimmt werden (Tabelle 4).

		spezieller FWG-Index (R_i)								allgemeiner FWG-Index (R_a)
Lampe (Abb. 7)		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5	R_6	R_7	R_8	
a.	direkte Sonne	99	99	99	99	100	99	99	99	99
b.	blauer Himmel	96	98	99	96	97	98	99	96	97
c.	bewölkter Himmel	99	99	98	100	99	99	100	99	99
d.	Glühlampe	100	100	100	100	100	100	99	100	100
e.	Halogenmetaldampflampe	79	83	69	83	76	77	79	40	73
f.	Natriumdampfhochdrucklampe	39	72	75	27	39	61	63	9	48
Leuchtstofflampe (Abb. 8)										
a.	warmton	92	93	64	87	84	85	85	57	81
b.	neutralweiß	95	98	80	99	96	91	92	92	93
c.	“Biolum”	96	98	97	94	94	94	94	90	95
d.	Daylight	91	96	96	89	89	90	91	83	91
e.	Truelight	87	76	61	88	89	69	77	89	79
Leuchtstofflampen (Abb.9) (SCHIERZ)										
	3-Bandenlampe	78	78	52	78	67	59	92	68	72
	6-Bandenlampe	86	87	80	90	83	80	96	77	85

Tabelle 4: Spezielle und allgemeine FWG-Indizes der Lampen aus Abb. 7, 8 und 9

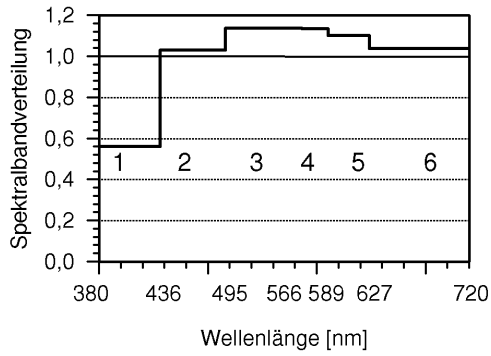
Sieht man von der Natriumdampf-Hochdrucklampe einmal ab, so sind die FWG-Indizes aller dargestellten Lichtquellen gut. Sogar der Glühlampe wird nach der Definition des FWG-Index eine exzellente Farbwiedergabe, auch für die blauen Körperfarben (R_5 und R_6) bescheinigt. Da

der Blauanteil der Glühlampe aber gering ist, ist diese Aussage kaum von Bedeutung. Das System der FWG-Kennzeichnung bedarf in dieser Hinsicht dringend einer Korrektur. Um die "Fülle" eines Spektrums zu verdeutlichen, soll mit einem **Spektralbandverfahren** versucht werden, die entsprechenden Farbanteile im Spektrum zu erfassen. Das Spektrum wird dabei in sechs Bänder unterteilt (Tabelle 5). Die Mittelwerte innerhalb der **Spektralbänder** werden dann auf die Strahldichte in dem Wellenlängenbereich von 380 bis 780 nm bezogen.

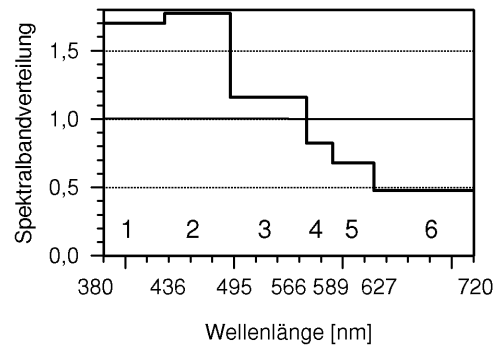
			Intervall [nm]
1	Violett	380 - 436	56
2	Blau	436 - 495	59
3	Grün	495 - 566	71
4	Gelb	566 - 589	23
5	Orange	589 - 627	38
6	Rot	627 - 720	93

Tabelle 5: Einteilung der Spektralbänder

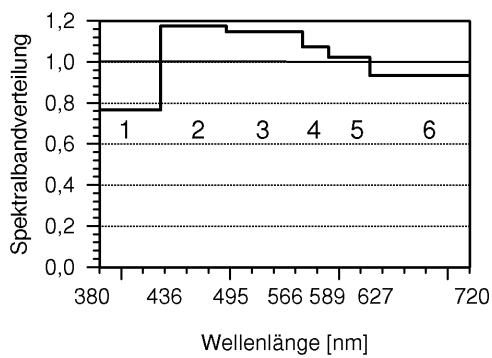
In den Abb. 13 und 14 sind die so erhaltenen Spektralbänder dargestellt. Man sieht, daß die Verteilung bei einigen Lampen sehr ungleichmäßig ist. Bei den Lampen mit ungleichmäßig gefüllten Bändern ist zu erwarten, daß die Farbwiedergabekonstantz nicht besonders hoch ist, und daß die Adaptation (Farbumstimmung) des Auges entsprechend der spektralen Empfindlichkeit der Farbrezeptoren im Auge (Abb. 11) nicht neutral ist.



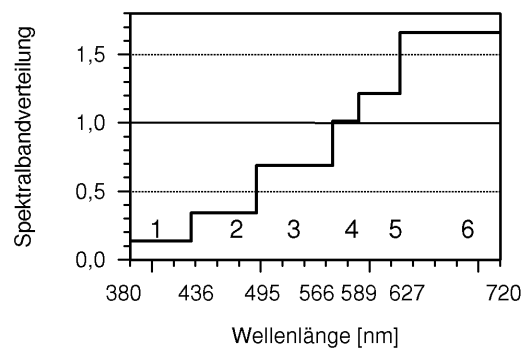
a.) direkte Sonne
CCT: 5080 K



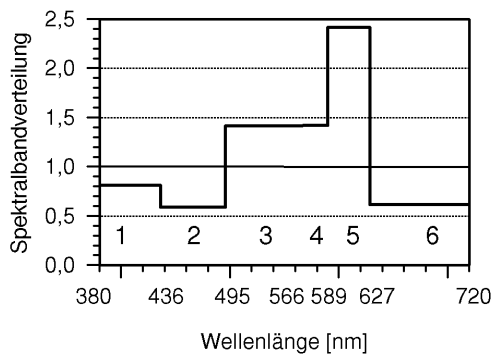
b.) blauer Himmel
CCT: 19950 K



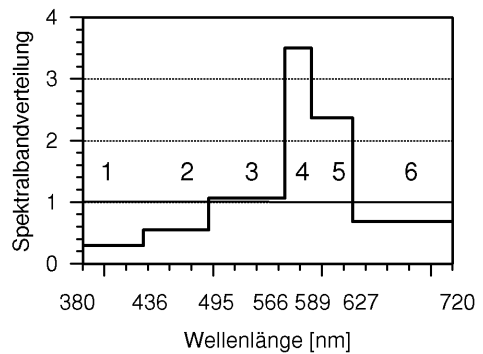
c.) bewölkter Himmel
CCT: 5900 K



d.) Glühlampe
CCT: 2800 K

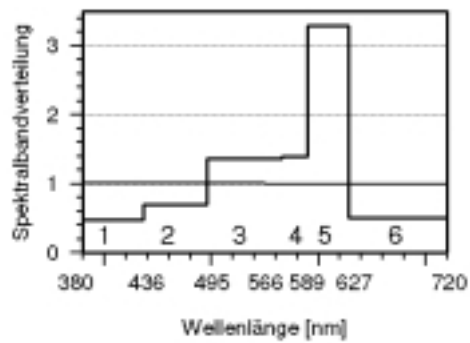


e.) Keramik
CCT: 3630 K

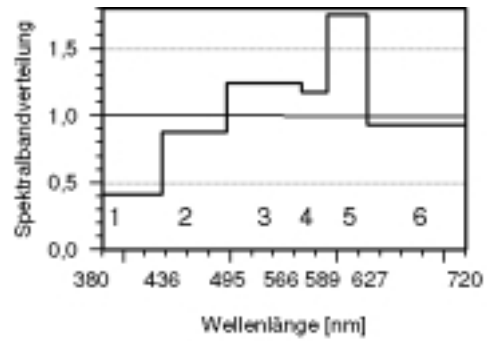


f.) Natriumdampf-Hochdrucklampe
CCT: 2770 K

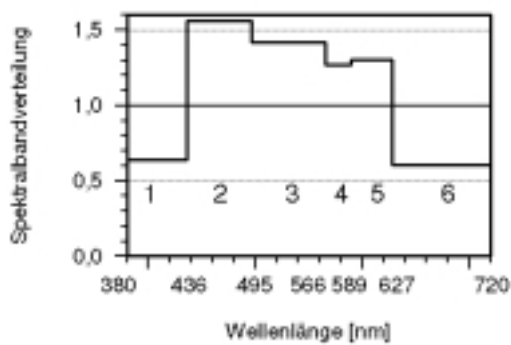
Abb. 13: Spektralbänder einiger Lichtbänder



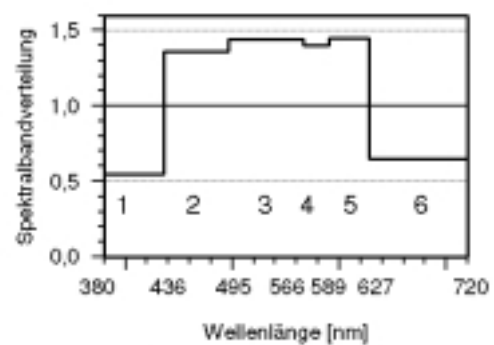
a. LL (warmton)
CCT: 2827 K



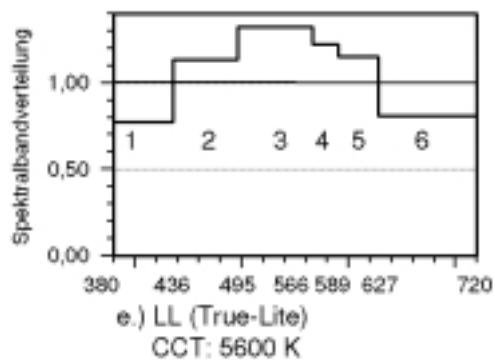
b.) LL (hellweiß 22, neutral)
CCT: 3678 K



c.) LL (Biolux)
CCT: 6125



d.) Daylight 12
CCT: 5145 K



e.) LL (True-Lite)
CCT: 5600 K

Abb. 14: Spektralbänder einiger Leuchtstofflampen

	Lampe (Abb. 7)	rel. Streubereich der Bänder (bzgl. des Mittelwertes)	max. Sprünge benachbarter Bänder (bzgl. des kleineren Wertes)
a	direkte Sonne	$\pm 0,2$	1,9
b	blauer Himmel	$\pm 0,5$	1,5
c	bewölkter Himmel	$\pm 0,2$	1,5
d	Glühlampe	$\pm 0,6$	1,6
e	Halogenmetaldampf Lampe	$\pm 0,5$	3,4
f	Natriumdampfhochdrucklampe	$\pm 1,3$	3,2
Leuchtstofflampe (Abb. 8)			
a	warmton	$\pm 1,0$	6,0
b	neutralweiß	$\pm 0,5$	1,9
c	“Biolum”	$\pm 0,4$	2,4
d	Daylight	$\pm 0,4$	2,5
e	“Truelite”	$\pm 0,2$	1,5

Tabelle 6: Sprünge zwischen den Spektralbändern

In der **Tabelle 6** sind von den untersuchten Spektren der relative Streubereich der Spektralbänder untereinander und der maximale Sprung zwischen benachbarten Bändern angegeben. Bezogen auf das Tageslicht gibt es bei einigen Lampen (Halogenmetaldampflampen, Natriumdampfhochdrucklampen, Leuchtstofflampen (warmton) große Sprünge zwischen den einzelnen Bändern.

5. Spektrale Gesamtwirkung

Die in den Abschnitten 3 und 4 beschriebenen Einzelwirkungen müssen in ihrer Gesamtheit bei der Auswahl eines förderlichen Lampenspektrums berücksichtigt werden. Obwohl die hier aufgelisteten Lichtwirkungen sicher noch durch die eine oder andere Wirkung (z. B. Farbwirkung) ergänzt werden könnte, soll hier der Versuch einer Gesamtbewertung unternommen werden.

In Tabelle 7 sind für einige relevante spektrale Wirkungen, wie

- Lichtausbeute
- Farbwiedergabe
- maximale Sprünge zwischen den Bändern
- circadiane Wirkung (a_{cv})
- Blau-Lichtgefährdung

einheitliche Beurteilungskriterien angegeben, mit denen die spektralen Verteilungen Lichtquellen aus den Abb. 7 und 8 bewertet werden.

Nr.		Wirkung "klein"	Bewertung	Wirkung "mittel"	Bewertung	Wirkung "groß"	Bewertung
1	Lichtausbeute (lm/W)	< 50	3	50 ... 89	2	≥ 90	1
2	Farbwiedergabe (FWG-Index)	< 70	3	70 ... 89	2	≥ 90	1
3	max. Sprünge zwischen den Bändern (Tab. 6)	< 2	1	2 ... 3	2	≥ 3	3
4	circadiane Wirkung (a_{cv} -Gln. 8; Tab. 1)	< 0,5	3	0,5 ... 0,99	2	≥ 1	1
5	Blau-Lichtgefährdung (analog $1/a_{cv}$; Kriterium Nr. 4)		1		2		3

Tabelle 7: Beurteilungskriterien für die spektrale Verteilung

Damit ergeben sich die in Tabelle 8 ausgewiesenen Bewertungen. Das Tageslicht ist bis auf die Blau-Lichtgefährdung allen anderen Lichtquellen überlegen. Die "Warmton"-Gasentladungslampen schneiden am schlechtesten ab. Man muß bei dieser Bewertung aber beachten, daß die interpretierten Lampenspektren nur exemplarisch ausgesucht wurden, eine pauschale Bewertung ist deshalb nicht möglich, dazu wäre das spezielle Spektrum von repräsentativen Lampen heranzuziehen.

		Wirkung				
		Lichtausbeute	Farbwiedergabe	max. Sprünge	circadiane Wirkung	Blau-Lichtgefährdung
Lampe (Abb. 7)		Bewertung				
a	direkte Sonne	1	1	1	2	2
b	blauer Himmel	1	1	1	1	3
c	bewölkter Himmel	1	1	1	1	3
d	Glühlampe	3	1	1	3	1
e	Halogenmetall-dampflampe	2	2	3	3	1
f	Natriumdampfhochdrucklampe	1	3	3	3	1
Leuchtstofflampe (Abb. 8)						
a	warmton	2	2	3	3	1
b	neutralweiß	2	1	1	3	1
c	"Biolum"	2	1	2	2	2
d	Daylight	2	1	2	2	2
e	"Truelite"	2	2	1	2	2

Tabelle 8: Gegenüberstellung der Lichtwirkung einiger ausgewählter Lichtquellen

6. Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

In dem Beitrag wird versucht, mehrere relevante spektrale Wirkungen des Lichtes gegenüberzustellen, um daraus Aussagen zur Gestaltung des Lampenspektrums für Beleuchtungszwecke zu gewinnen. In der Vergangenheit wurden lediglich einzelne Phänomene beschrieben, die aber eine Gesamtbewertung der Lampenspektren nicht gestatten.

Zur Frage der “Kontinuität” im Spektrum (“Voll”-Spektrum oder diskontinuierliches Spektrum) muß man zwei Fälle unterscheiden:

Fall a: “Das Lampenspektrum wirkt direkt auf die Sensoren.”

Hierbei spielt die **Kontinuität** im Spektrum **keine Rolle**, da die Reizantwort aus der Integration der spektralen Strahlungsanteile erfolgt. Will man eine effektive Wirkung erreichen, kann man die Lampenspektren auf die entsprechenden Wirkungskurven optimieren.

Diese Aussagen gelten somit für

- die Lichtausbeute
- die Lichtfarbe
- die elementaren spektralen Sehfunktionen
- die circadiane Wirkungen und
- die spektralen Schädigungspotentiale

Fall b: “Das Lampenspektrum wirkt nicht direkt auf die Sensoren, sondern in Verbindung mit den spektralen Eigenschaften von Sekundärstrahlern (z.B. Körperfarben)”.

In diesem Fall spielt die **Verteilung** innerhalb des Spektrums **eine Rolle**. Besonders wirkt sich die spektrale Verteilung der Lampe auf die Farberscheinungen von Körperfarben aus (Farbwiedergabe). Da die bisher übliche FWG-Kennzeichnung über “fiktive” Vergleichsspektren erfolgt, wird hier versucht, über ein Spektralbandverfahren die “Fülle” und “Kontinuität” der Lampenspektren zu erfassen. Die **Spektralsprünge** und **Streubereiche** im Spektrum könnten ein Güte Merkmal für das Spektrum sein.

Eine besondere Aufmerksamkeit sollte in Zukunft der circadianen Wirkung des Lichtes geschenkt werden.