



Internationale Arbeitsgemeinschaft
der Archiv-, Bibliotheks- und Graphikrestauratoren

9

PROF. DR.-ING. JÜRGEN KROCHMANN

BELEUCHTUNG VON LICHTEMPFINDLICHEN AUSSTELLUNGS-
STÜCKEN UNTER BESONDERER BERUICKSICHTIGUNG DER
OBJEKTSCHÄDIGUNG DURCH OPTISCHE STRAHLUNG

Geneststr. 6
1000 Berlin 62

Bundesrepublik Deutschland

**Beleuchtung von lichtempfindlichen Ausstellungsstücken
unter besonderer Berücksichtigung der Objektschädigung
durch optische Strahlung**

Dr.-Ing. S. Aydinli, PRC Krochmann GmbH, Berlin

Prof. Dr.-Ing. J. Krochmann, Geneststraße 6, D-1000 Berlin 62

Zusammenfassung

Die Farbe von lichtempfindlichen Ausstellungsgegenständen kann durch längere Beleuchtung verändert werden. Die Beleuchtungsanlage (Tageslicht oder künstliches Licht) und die Ausstellungsdauer muß dem angepaßt werden. Maßgebend sind dafür die Materialeigenschaften (relative spektrale Objektempfindlichkeit und Schwellenbestrahlung) und die Beleuchtungsbedingungen (Beleuchtungsstärke, spektrale Verteilung (Art der Lichtquelle), Beleuchtungsdauer).

Für 54 Materialproben wurden die relevanten Eigenschaften bestimmt und daraus Beleuchtungsempfehlungen abgeleitet.

Summary

The colour of light sensitive materials can be changed by longer illumination. The lighting installation (daylight or artificial light) must be adjusted to that. Authoritative for this are the characteristics of the exhibition goods (relative spectral object responsivity and treshold effective radiant exposure) and the lighting conditions (illuminance, spectral power distribution (type of light source), exposition duration). The relevant characteristics of 54 different samples of exhibition goods are measured and recommendations for the lighting in exhibitions are given.

1. Einführung

Ausstellungsgegenstände - auch solche, die lichtempfindlich sind - müssen ausreichend beleuchtet werden, um annehmbare Sehbedingungen und eine begrenzte Annehmlichkeit der Beleuchtung zu schaffen.

Es ist bekannt, daß lichtempfindliche Gegenstände ihre Farbe ändern können, wenn sie bei hohem Beleuchtungsniveau über längere Zeit hinweg beleuchtet werden. Es ist daher nötig, Voraussagemethoden für den Einfluß der Beleuchtung auf Farbänderungen und Vergilbungen von lichtempfindlichen Gegenständen zu entwickeln, um daraus Empfehlungen für die Beleuchtung abzuleiten. Derartige Untersuchungen wurden jetzt mit Unterstützung der Stiftung Preussischer Kulturbesitz ausgeführt. Über diese Forschungsergebnisse wird im folgenden berichtet.

2. Farbänderungen

Die Farbe von Gegenständen (Körperfarbe) kann durch drei Zahlenwerte beschrieben werden. Das ist im einzelnen international¹⁾ und national²⁾ festgelegt. Zur Beschreibung von Farbunterschieden, die sich z. B. zwischen unbestrahlten und länger bestrahlten lichtempfindlichen Gegenständen ergeben, ist ein besonderes Farbsystem entwickelt^{3) 4)}, in dem der Farbunterschied durch den Farbabstand ΔE^*_{ab} beschrieben werden kann. Ein Farbabstand $\Delta E^*_{ab} = 1$ ist gerade wahrnehmbar, größere Zahlenwerte von ΔE^*_{ab} bedeuten stärkere Farbunterschiede. Der Farbunterschied zwischen bestrahltem und unbestrahltem Material ist im folgenden durch diesen Farbabstand beschrieben.

3. Für Farbänderung wirksame optische Strahlung

Alle Lichtquellen - sowohl Tageslicht als auch Lampen - strahlen neben sichtbarer Strahlung (Licht) auch nicht sichtbare Strahlung, besonders UV-Strahlung, ab. Phototechnische und photobiologische Einflüsse optischer Strahlung - und besonders der UV-Strahlung - werden bestimmt durch:

- Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke⁵⁾
- Spektrale Verteilung der Strahlung (Strahlungsfunktion)
- Bestrahlungsdauer
- relative spektrale Objektempfindlichkeit der betrachteten photochemischen oder photobiologischen Wirkung. Im vorliegenden Fall die Wirkung der Strahlung auf die Farbänderung

Diese relative spektrale Objektempfindlichkeit ist damit eine wichtige Materialfunktion, die für unterschiedliche Materialien verschieden ist. Für die Beurteilung der Wirksamkeit der Strahlung einer beliebigen Lichtquelle sind zwei wirksame "Strahlungsgrößen" definiert⁶⁾:

- Die wirksame Bestrahlungsstärke

$$E_{dm} = \int_0^{\infty} E_{ex} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \cdot d\lambda \quad (1)$$

E_{ex} spektrale Bestrahlungsstärke⁵⁾

$s(\lambda)_{dm,rel}$ für die Farbänderung wirksame relative spektrale Objektempfindlichkeit

- Die wirksame Bestrahlung (Dosis)

$$H_{dm} = \int_{(t)} E_{dm} \cdot dt \quad (2)$$

(t) Bestrahlungsdauer

Um Farbänderungen, die bei längerer Bestrahlung bei einem bestimmten Material auftreten, voraussagen zu können, müssen die relative spektrale Objekt-empfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ und die für die Farbänderung wirksame Bestrahlung H_{dm} bekannt sein. Zusätzlich muß von dem betrachteten Material auch die Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ bekannt sein; die Schwellenbestrahlung ist diejenige wirksame Bestrahlung H_{dm} , die eine definierte Farbänderung (z. B. $\Delta E^*_{ab} = 1$) zur Folge hat. Sind diese Daten für ein Material und für die Beleuchtungsanlage bekannt, lassen sich Farbänderungen vorhersagen.

4. Untersuchte Materialien

Die Stiftung Preußischer Kulturbesitz stellte für die Untersuchungen 54 verschiedene Materialproben von museumstypischen Ausstellungsgegenständen zur Verfügung⁷⁾. Dabei handelt es sich um:

- 23 Aquarellproben
- 6 Leinwandproben
- 3 Papierproben
- 6 Proben verschiedener Zeitungspapiere
- 16 Proben von Textilien

Diese Proben wurden einer ausführlichen Untersuchung unterzogen.

5. Versuchsdurchführung

In einer Bestrahlungsanlage wurden die Proben durch die Strahlung einer Xenon-Lampe mit sieben verschiedenen vorgesetzten Kantenfiltern in definierten Zeitintervallen bestrahlt. Bild 1 zeigt die Bestrahlungseinrichtung, Bild 2 die spektrale Verteilung der Xenon-Strahlung mit den vorgesetzten Kantenfiltern.

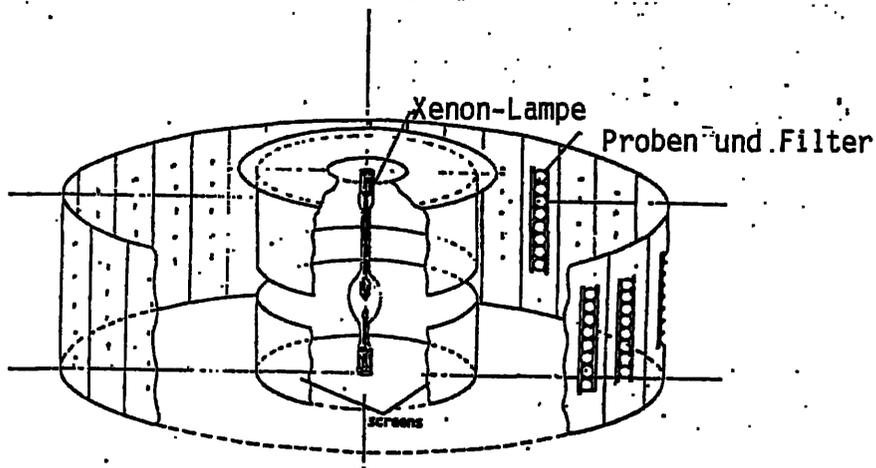


Bild 1 Bestrahlungseinrichtung

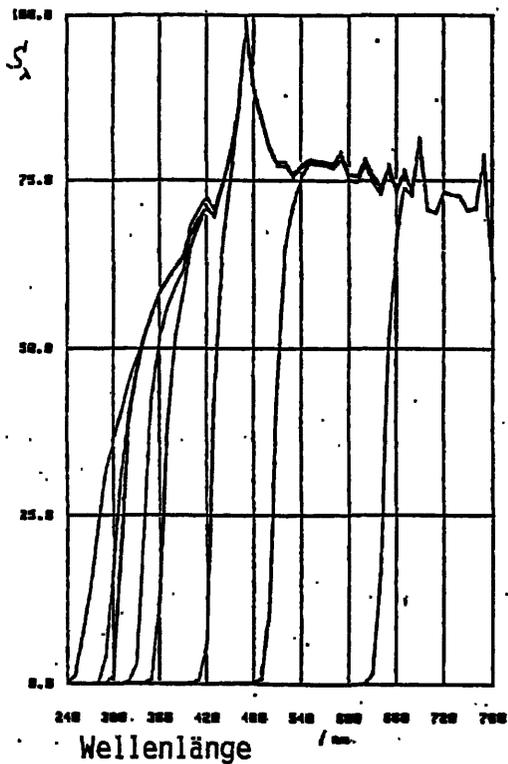


Bild 2 Strahlungsfunktion der Xenon-Strahlung mit verschiedenen Kantenfiltern

Nach jedem Zeitintervall wurde für jede unterschiedlich bestrahlte Teilfläche aller Proben der spektrale Reflexionsgrad gemessen und daraus der Farbabstand ΔE^*_{ab} der bestrahlten Teilfläche gegenüber der unbestrahlten Fläche berechnet.

Auf diese Weise konnte der Zusammenhang zwischen der Bestrahlung H_e als Ursache und der Farbänderung ΔE^*_{ab} als Wirkung bestimmt werden.

$$H_e = \int E_e \cdot dt \quad (3)$$

H_e Bestrahlung⁵⁾
 E_e Bestrahlungsstärke⁵⁾

$$E_e = \int E_{e\lambda} \cdot d\lambda \quad (4)$$

Die Strahlungsgrößen in Gleichung (3) und (4) unterscheiden sich von den wirksamen Strahlungsgrößen in Gleichung (1) und (2) dadurch, daß hier keine "spektrale Bewertung" vorgenommen wird.

Für jedes Material lassen sich dann die Ergebnisse für die Farbänderung ΔE^*_{ab} (Wirkung) unter Bestrahlung H_e nach Bild 3 darstellen.

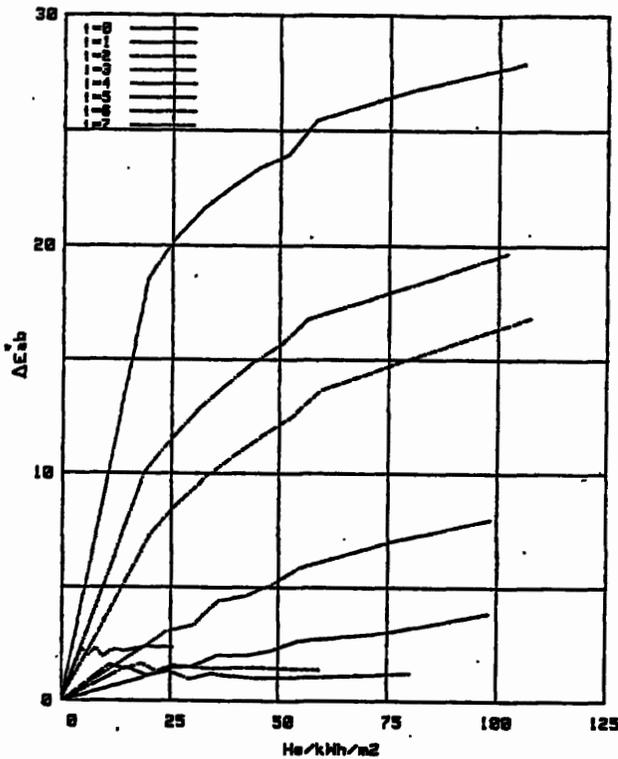


Bild 3 Farbabstand ΔE^*_{ab} für verschiedene Kantenfilter; für eine Textilprobe

Bild 4 gibt einen Eindruck von der Farbänderung, die auf einigen Textilproben durch die Bestrahlung verursacht wurde.

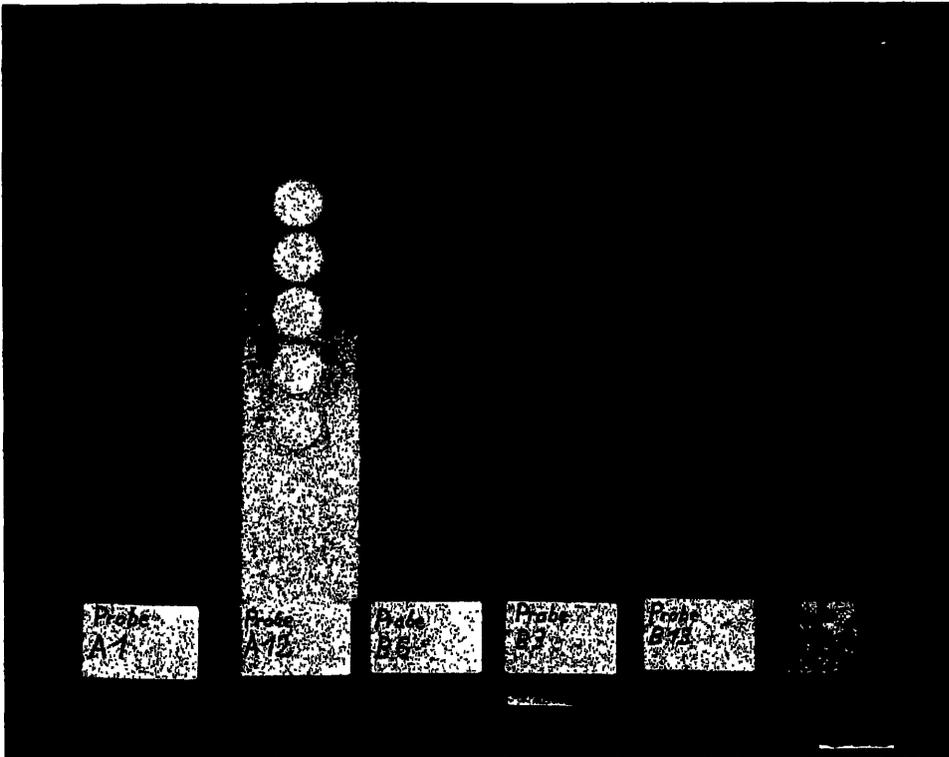


Bild 4 Bestrahlungsergebnisse bei einigen Aquarellfarben

6. Relative spektrale Objektempfindlichkeit

Aus den für jede einzelne Probe ermittelten Zusammenhängen nach Bild 3 wurde nach einer trial and error Methode der Verlauf der relativen spektralen Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ ermittelt. Dabei zeigte sich, daß diese Funktion für die meisten Materialien durch einen mathematischen Ausdruck beschrieben werden kann.

$$s(\lambda)_{dm,rel} = a \exp(-b \cdot \lambda/nm) \quad (5)$$

Durch Annäherung auf einen Wert von 1 bei einer Wellenlänge $\lambda = 300 \text{ nm}$ ergibt sich die Konstante a in Gleichung (5) zu Gleichung (6).

$$a = 1/\exp(-b \cdot 300) \quad (6)$$

Damit wird der Verlauf von $s(\lambda)_{dm,rel}$ für jede Probe nur noch durch die Konstante b in Gleichung (5) bestimmt.

Bild 5 zeigt den Verlauf dieser Funktion für verschiedene Konstante b . Diese Materialien sind daher für kürzer wellige UV-Strahlung wesentlich empfindlicher als für Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich ($380 \text{ nm} < \lambda < 780 \text{ nm}$).

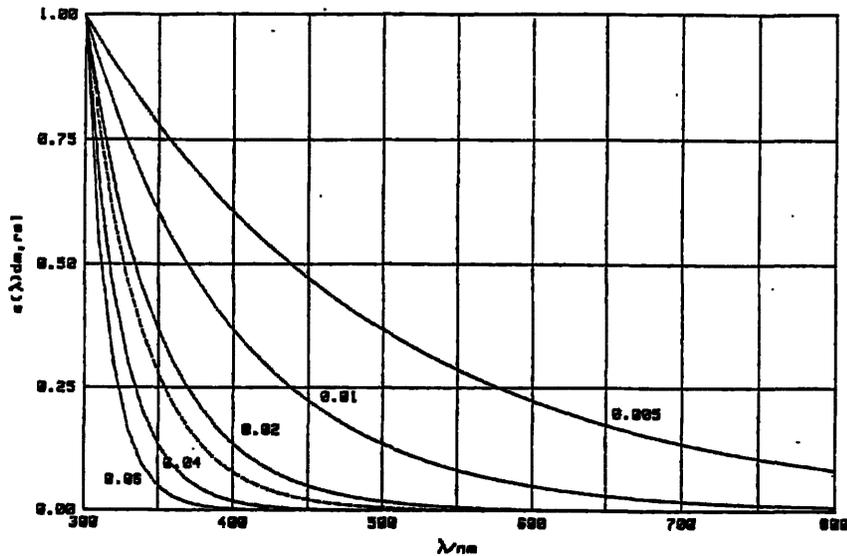


Bild 5 Relative spektrale Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ für verschiedene Konstante b

Nur für wenige Proben wurde eine etwas andere Funktion von $s(\lambda)_{dm,rel}$ als in Gleichung (5) gefunden.

$$s(\lambda)_{dm,rel} = a \exp(-b \cdot \lambda/nm) + c \quad (7)$$

$$a = (1-c)/\exp(-b \cdot 300) \quad (8)$$

In der Gleichung (7) kennzeichnet die zusätzliche Konstante c einen Anteil an $s(\lambda)_{dm,rel}$; der wellenlängenunabhängig ist.

Mit den Daten der Xenon-Lampe und den bei der Messung erhobenen Strahlungsdaten können jetzt über $s(\lambda)_{dm,rel}$ für jedes Material die Daten nach Bild 3 in einer einzigen Funktion zusammengefaßt werden, bei der der Farbabstand ΔE^*_{ab} in Abhängigkeit von der "für die Farbänderung wirksamen Bestrahlung" H_{dm} gezeigt wird.

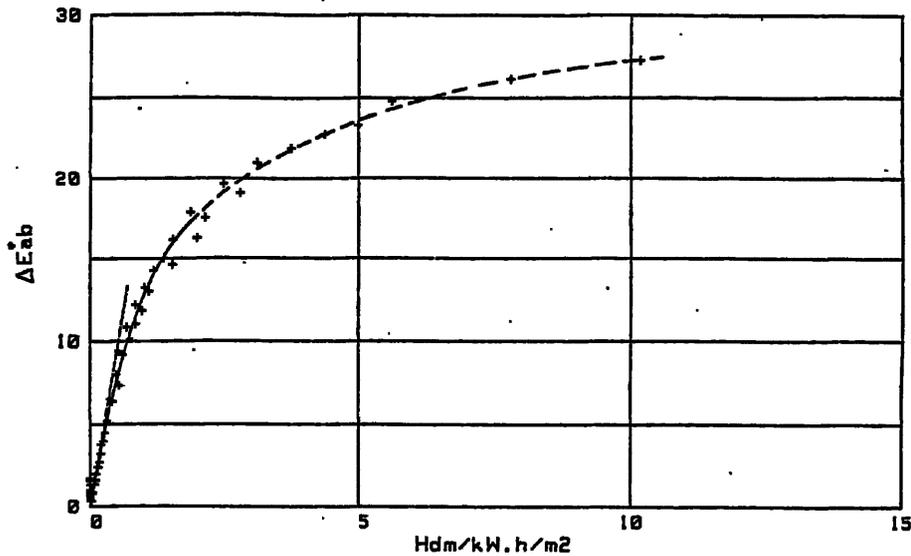


Bild 6 Zusammenhang zwischen Farbabstand ΔE^*_{ab} und wirksamer Bestrahlung H_{dm} für eine untersuchte Probe

7. Schwellenbestrahlung

Aus dieser Darstellung kann für jedes Material die Schwellenbestrahlung $H_{s, dm}$ bestimmt werden. Sie wird aus dem Kurvenverlauf nach Bild 6 als diejenige wirksame Bestrahlung gefunden, bei der der vorgegebene Grenzwert des Farbabstandes $\Delta E^*_{ab} = 1$ erreicht wird. Nähert man die in Bild 6 gezeigte Funktion im unteren Bereich durch eine Gerade an, so kann sehr leicht auch auf Schwellenbestrahlung bei anderen Grenzwerten von ΔE^*_{ab} umgerechnet werden. Das ist jedoch, wie auf Bild 6 zu erkennen ist, nur in einem begrenzten Bereich des Farbabstandes zulässig.

8. Filterung von Lichtquellen

8.1 Grundlage

Aus den Funktionen für $s(\lambda)_{dm, rel}$ (Bild 5) ist zu erkennen, daß die Strahlung einer Lichtquelle desto gefährlicher für die Farbänderung von Materialien ist, je kürzer welliger sie ist. Es ist daher grundsätzlich sinnvoll, die gesamte UV-Strahlung, die nicht sichtbar ist, durch geeignete Kantenfilter abzuschneiden.

Geeignete Filter dafür sind auf dem Markt erhältlich. Diese Filterung sollte sowohl für Tageslicht (Fenster, Oberlichter) als auch für Leuchten für die künstliche Beleuchtung verwendet werden.

Auch der kurzwellige Teil der sichtbaren Strahlung ruft erheblich stärkere Farbänderungen hervor als länger wellige Strahlung. Es fragt sich daher, wie weit auch die kurzwellige sichtbare Strahlung noch weggefiltert werden darf, ohne daß sich die Farbwiedergabeeigenschaften und die Lichtfarbe des beleuchtenden Lichtes wesentlich ändern.

8.2 Farbwiedergabe

Die spektrale Verteilung (Strahlungsfunktion) des beleuchtenden Lichtes bestimmt wie gut Farben von Gegenständen wiedergegeben werden. Zur Kennzeichnung dieser Eigenschaft von Lichtquellen sind 14 spezielle Farbwiedergabeindices R_i und ein allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a (Mittelwert der ersten 8 speziellen Farbwiedergabeindices $R_1 - R_8$) festgelegt^{8) 9)}. Die Farbwiedergabeindices erreichen den Wert 100 für die jeweilige optimale spektrale Verteilung des beleuchtenden Lichtes.

Wird der kurzwellige Teil der sichtbaren Strahlung weggefiltert, so verringert (verschlechtert) sich der Farbwiedergabeindex. Für die wichtigsten Lichtquellen, nämlich Tageslicht mit seinen verschiedenen Phasen, Glühlampenlicht und einige für die Museumsbeleuchtung wichtige Leuchtstofflampen, wurden die Farbwiedergabeindices als Funktion der Kantenwellenlänge berechnet. Für jede Lichtquelle ergibt sich dann eine Darstellung, wie sie für die Normlichtart D 65 (mittleres Tageslicht) in Bild 7 dargestellt ist. Legt man eine Forderung für die Güte der Farbwiedergabeeigenschaften von Lichtquellen fest (z. B. $R_a = 90$)¹⁰⁾, so kann aus diesen Darstellungen entnommen werden, bis zu welcher Wellenlänge die sichtbare Strahlung noch weggefiltert werden darf.

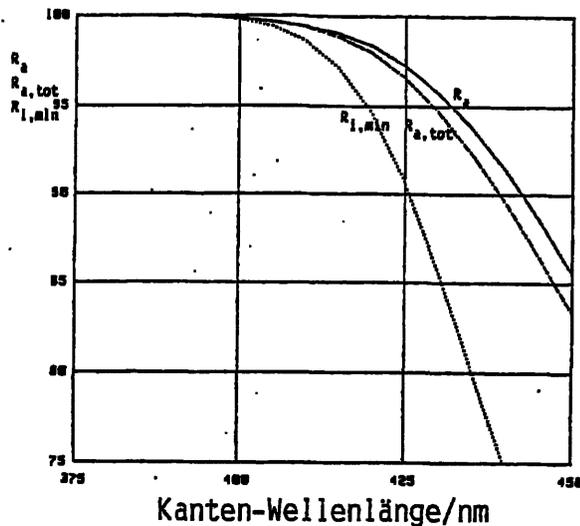


Bild 7 Allgemeiner Farbwiedergabeindex R_a , Mittelwert $R_{a,tot}$ aller 14 speziellen Farbwiedergabeindices und ungünstigster spezieller Farbwiedergabeindex $R_{i,min}$ als Funktion der Kanten-Wellenlänge für die Normlichtart D 65

8. 3 Lichtfarbe

Je mehr kurzwellige Strahlung im sichtbaren Wellenlängenbereich bei der Lichtquelle weggefiltert wird, desto rötlicher erscheint die Lichtfarbe. Die Lichtfarbe wird durch die "ähnlichste Farbtemperatur" beschrieben. Glühlampen weisen eine ähnlichste Farbtemperatur um 3000K auf. Tageslicht hat erheblich höhere ähnlichste Farbtemperaturen.

Für jede Lichtquelle kann die Veränderung der ähnlichsten Farbtemperatur bei zunehmender Kanten-Wellenlänge der Filterung berechnet werden. Ein Beispiel dafür zeigt Bild 8, in dem die Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur als Funktion der Kanten-Wellenlänge für mittleres Tageslicht (D 65) dargestellt ist. Diese Abnahme der ähnlichsten Farbtemperatur mit zunehmender Kanten-Wellenlänge ist im allgemeinen nicht störend, da sich der Betrachter von Ausstellungsgegenständen auf die jeweilige Lichtfarbe einstimmt.

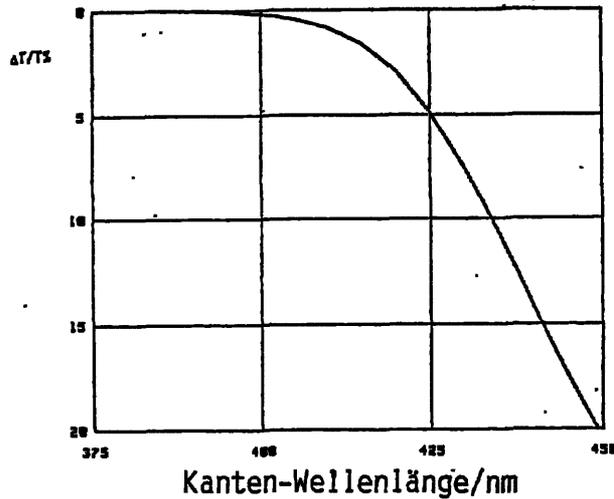


Bild 8 Relative Änderung der ähnlichsten Farbtemperatur als Funktion der Kanten-Wellenlänge für mittleres Tageslicht (D 65)

9. Beleuchtung und Farbänderung

Zwischen der Beleuchtungsstärke E und der wirksamen Bestrahlungsstärke E_{dm} besteht ein direkter Zusammenhang:

$$E_{dm} = E \cdot \frac{\int S_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \cdot d\lambda}{K_m \int S_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda} \quad (9)$$

$\tau(\lambda)$ spektraler Transmissionsgrad des verwendeten Kantenfilters

S_{λ} Strahlungsfunktion der verwendeten Lichtquelle

$V(\lambda)$ spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges

K_m 683 lm/W Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalentes

Berücksichtigt man bei konstanter Beleuchtungsstärke die Dauer der Beleuchtung t , so ergibt sich die wirksame Bestrahlung H_{dm} zu

$$H_{dm} = E_{dm} \cdot t \quad (10)$$

Die Dauer der Beleuchtung muß gleich oder kleiner sein als die Schwellenbestrahlungsdauer (zulässige Expositionsdauer) $t_{s, dm}$, wenn eine merkliche Farbänderung vermieden werden soll. Für diese Beleuchtungsdauer gilt dann

$$t_{s, dm} = \frac{H_{s, dm}}{E_{dm}} = H_{s, dm} \cdot \frac{K_m}{E} \frac{\int_{380}^{780} S_\lambda \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} S_\lambda \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm, rel} \cdot d\lambda} \quad (11)$$

Diese Gleichung läßt sich in drei Faktoren aufteilen:

$$t_{s, dm} = \frac{1}{E} \cdot F_1 \cdot F_2 \quad (12)$$

$$F_1 = K_m \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} S_\lambda \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad (13)$$

$$F_2 = H_{s, dm} / \left(\int_0^{\infty} S_\lambda \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm, rel} \cdot d\lambda \right) \quad (14)$$

Der Faktor F_1 ist nur von der Strahlungsfunktion und damit von der verwendeten Lichtquelle und der Filterung abhängig. Der Faktor F_2 ist von den Materialeigenschaften ($s(\lambda)_{dm, rel}$ und $H_{s, dm}$) und von der Lichtquelle und ihrer Filterung abhängig.

Solange die Beleuchtungsdauer den Wert für $t_{s, dm}$ nach Gleichung (11) nicht überschreitet, ist nicht mit einer wesentlichen Farbänderung zu rechnen. Aus Gleichung (11) folgt aber auch direkt, daß für gegebene Beleuchtungsbedingungen die Beleuchtungsstärke auf den lichtempfindlichen Kunstwerken einen entscheidenden Einfluß auf die Schwellenbestrahlungsdauer hat. Je größer die Beleuchtungsstärke ist, desto kleiner wird die Schwellenbestrahlungsdauer.

10. Zulässige Expositionsdauer

Die zulässige Expositionsdauer ($t_{s, dm}$) läßt sich leicht in Ausstellungszeiten (in Jahre) umrechnen, wenn die üblichen Öffnungszeiten berücksichtigt

werden. Für die wichtigsten Lichtquellen, die für die Museumsbeleuchtung verwendet werden, wurde die zulässige Ausstellungsdauer berechnet. Dabei wurde angenommen:

- Beleuchtungsstärke $E = 50 \text{ lx}$
- Farbänderung $\Delta E^*_{ab} = 1$
- Filterung:
 - a) ohne Filter
 - b) ohne UV-Strahlung
 - c) optimal für $R_a = 90$

Tabelle 1 zeigt die Rechenergebnisse, wobei für jede Materialgruppe die ungünstigste (lichtempfindlichste) Probe berücksichtigt wurde. Die Werte gelten für:

- mittleres Tageslicht (Normlichtart D 65)
- Glühlampenlicht (Normlichtart A)
- Halogenglühlampen (Verteilungstemperatur 3200 K)
- Leuchtstofflampen Osram, Lichtfarbe 22
- Leuchtstofflampen Osram, Lichtfarbe 32

Tabelle 1 Zulässige Expositionsdauer für verschiedene Materialien und Lichtquellen bei $E = 50 \text{ lx}$ und $\Delta E^*_{ab} = 1$

Material	Filterung	Expositionsdauer in Jahren für Lichtquelle				
		D 65	A	3200	L-22	L-32
Aquarellfarben	ohne	2,3	7,3	5,8	6,0	6,7
	UV	3,7	8,5	7,4	6,7	7,9
	optimal	7,1	12,4	11,6	9,1	11,7
Ölfarben auf Leinwand	ohne	15,2	42,5	35,2	36,4	40,4
	UV	23,0	48,0	42,8	39,6	46,8
	optimal	41,2	66,2	63,0	52,6	66,1
Papier	ohne	20,8	63,4	51,3	52,8	58,5
	UV	32,9	73	64	58	69
	optimal	62	106	99	79	101
Zeitungspapier	ohne	1,3	8,3	4,8	7,8	6,3
	UV	5,4	21,8	15,9	14,2	16,0
	optimal	25,5	100	78	34	51
Textilien	ohne	8,2	9,9	10,2	16,7	16,6
	UV	11,8	10,3	11,2	17,8	18,4
	optimal	15,5	11,0	12,3	20,1	20,9
Alle Proben	ohne	1,3	7,3	4,8	6,0	6,7
	UV	3,7	8,5	7,4	6,7	7,9
	optimal	7,1	11,0	11,6	9,1	11,7

Es muß beachtet werden, daß diese Ergebnisse wegen der zum Teil geringen Zahl der untersuchten Proben noch nicht als repräsentativ angesehen werden können. Sie geben aber sicher schon einen guten Überblick über die Belange des Strahlenschutzes von Ausstellungsgegenständen.

11. Empfehlungen für die Beleuchtung

Die hier präsentierten Forschungsergebnisse gestatten, grundlegende Empfehlungen für die Beleuchtung von lichtempfindlichen Gegenständen aufzustellen:

- die Beleuchtungsstärke soll niedrig sein. 50 lx sind ein Minimum, um Gegenstände noch ausreichend betrachten zu können. 100 lx sind zu empfehlen.
- die Beleuchtungsstärke sollte während der Ausstellungszeit konstant bleiben.
- außerhalb der Öffnungszeiten keine Beleuchtung.
- die Ausstellungszeit muß begrenzt werden, wenn eine ausreichende Lebensdauer der lichtempfindlichen Ausstellungsgegenstände erreicht werden soll.
- die verwendete Lichtquelle beeinflusst die zulässige Expositionszeit wesentlich.
- bei wertvollen Ausstellungsstücken sollte die wirksame Bestrahlungsstärke E_{dm} gemessen werden. Besser ist eine Registrierung der wirksamen Bestrahlung H_{dm} . Meßgeräte dazu werden zur Zeit entwickelt.

Literatur

- 1) Colorimetry
Publ. CIE, No 15.2 (1986)
- 2) DIN 5033 Farbmessung
- 3) Recommendation on uniform color spaces
Publ. CIE No 15 Erg. 2 (TC 1.3) 1978
- 4) DIN 6174 (Januar 1979)
Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen
bei Körperfarben nach DIELAB-Formel
- 5) DIN 5031 Teil 1 bis 3 (März 1982)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik.
Strahlungsbewertung durch Empfänger.
- 6) Vornorm DIN 5031 Teil 10 (November 1979)
Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik.
Größen, Formel- und Kurzzeichen für photobiologisch
wirksame Strahlung.

- 7) G. S. Hilbert
J. Krochmann
Über den Einfluß der Museumsbeleuchtung auf die
Farbänderung von Ausstellungsgegenständen
Tagungsbericht Licht 1986
LTAG A-2340 Mödling, 1986
- 8) CIE Publikation 13.2 1974
- 9) DIN 6169 Farbwiedergabe
- 10) Guide on interior lighting
Publ. CIE, No 29.2 (1986)