



Fördergemeinschaft Gutes Licht

Museumsbeleuchtung

Strahlung und ihr Schädigungspotenzial Konservatorische Maßnahmen

Grundlagen zur Berechnung

Inhalt

1. Farbänderung durch photochemische Wirkung der optischen Strahlung	4
1.1 Grundlagen	4
1.2 Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung	4
1.3 Wirksame Strahlungsgrößen	5
1.4 Relative spektrale Objektempfindlichkeit	6
1.5 Wirksame Schwellenbestrahlung	6
1.5.1 Schwellenbestrahlungsdauer	6
1.6 Farbe und Farbabstand	7
1.6.1 Körperfarbe	7
1.6.2 Farbabstand	7
1.6.3 Farbechtheit	7
1.7 Vergilbung	7
1.8 Bestimmung der Objektschädigung	7
2. Anhang	8
2.1 Schädigung durch thermische Belastung	8
2.2 Schädigung durch ultraviolette und sichtbare Strahlung	9
2.2.1 Schädigende Bestrahlung	9
2.2.2 Objektschädigende Bestrahlungsstärke	9
2.2.3 Schädigungspotenzial	11
2.2.4 Kritische Bestrahlungszeit oder Schwellenbestrahlungsdauer	11
2.3 Experimentelle Grundlagen für die Ermittlung von Schädigungspotenzialen	11
2.3.1 Relative spektrale Objektempfindlichkeit	11
2.3.2 Wirksame Schwellenbestrahlung	12
2.3.3 Schädigungspotenzial	13
2.3.4 Schwellenbestrahlungsdauer, kritische Bestrahlungszeit	14
2.4 Konservatorische Maßnahmen	15
2.4.1 Glasfilter	15
2.4.2 Ermittlung konservatorischer Daten	15
2.4.3 Rechnerische Untersuchung von konservatorischen Fragen	16
2.4.3.1 Bedeutung der Schwellenbestrahlungsdauer	16
2.4.3.2 Berechnung der Schwellenbestrahlungsdauer	16
2.4.3.3 Verringerung der Beleuchtungsstärke	17
2.4.3.4 Verwendung einer weniger schädigenden Lichtquelle	18
2.4.3.5 Verwendung von Filtern	18
2.4.3.6 Kombination mehrerer konservatorischer Maßnahmen	19
2.4.3.7 Dimmen von Glühlampen	19
2.4.3.8 Verwendung von Bildverglasungen	20

2.4.3.9 Gleichzeitige Beleuchtung durch mehrere Lichtquellen	21
2.4.3.10 Konservatorische Maßnahmen bei Papieren geringer Qualität	23
2.4.3.11 Aufeinander folgende Beleuchtungssituationen	24
3. Normen- und Literaturverzeichnis	25

Diese Sonderveröffentlichung basiert auf Arbeiten der Deutschen Lichttechnischen Gesellschaft (LiTG) e.V., Berlin (www.litg.de).

1. Farbänderung durch photochemische Wirkung der optischen Strahlung

1.1 Grundlagen

Die beleuchtungsbedingte farbliche Veränderung bei museumstypischem Material ist ein sichtbares Endprodukt der photochemischen Wirkung der optischen Strahlung. Dieses kann durch die wirksamen Strahlungsgrößen beschrieben werden.

1.2 Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung

Die Farbänderung als Endprodukt der photochemischen Wirkung durch optische Strahlung kann qualitativ (zahlenmäßig) durch den Farbabstand ΔE^*_{ab} zwischen unbestrahlten und bestrahlten Proben beschrieben werden. Dieser wird in der Regel durch einfache Farbmessungen nach dem Dreibereichsverfahren bestimmt. Viel genauer ist jedoch die Bestimmung des Farbabstandes für eine vorgegebene Lichtart aus den gemessenen spektralen Reflexionsgraden.

Die Ursache ist die wirksame Bestrahlung H_{dm} . Bei einem Großteil von photochemischen und auch photobiologischen Wirkungen besteht ein nichtlinearer Zusammenhang zwischen der Ursache (wirksame Bestrahlung H_{dm}) und der Wirkung (Farbänderung). Im allgemeinen ist damit zu rechnen, dass mit zunehmender Bestrahlung die Farbänderung zunächst relativ rasch verläuft, wobei begrenzt ein linearer Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung angesetzt werden kann. Bei größeren Bestrahlungen verlangsamt sich die Zunahme der Farbänderung und kann bei einer Reihe von Proben in einen Endzustand auslaufen. In diesem Bereich ist die Farbe so weit verändert, dass bei weiterer Bestrahlung nahezu keine Farbänderung mehr vorkommt. Diese Erscheinung ist im Prinzip in Bild 1 dargestellt. In diesem Bild ist zusätzlich der Einfluss der Vorbelichtung dargestellt. Hier ist zu sehen, dass für die gleiche Farbänderung (hier gegeben durch $\Delta E^*_{ab} = 1$) die wirksame Bestrahlung $H_{s, dm}$ für die vorbehandelte Probe viel größer ist, d.h. die vorbelichtete Probe gegen Strahlung unempfindlicher ist als die noch nicht vorbehandelte Probe (jungfräuliche Probe). Bei anderen Proben können von gewissen Farbänderungen an rückläufige Prozesse beobachtet werden, bei denen jedoch nie der ursprüngliche Zustand (die ursprüngliche Farbe) wieder erreicht wird.

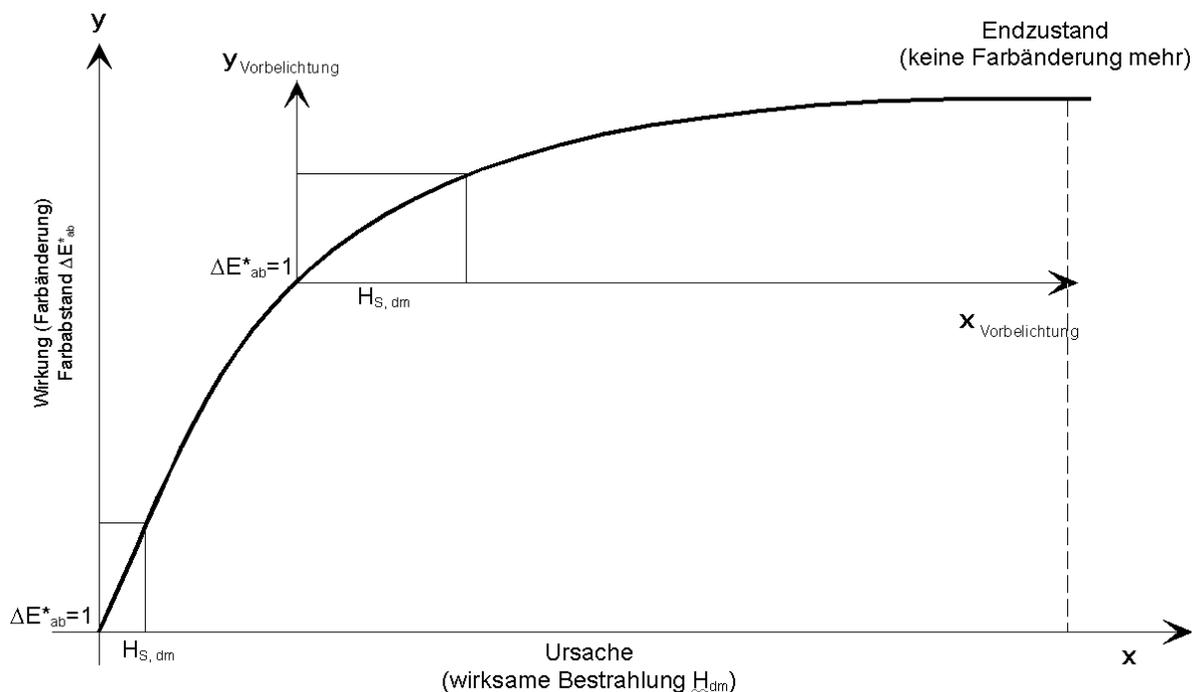


Bild 1: Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung

1.3 Wirksame Strahlungsgrößen

Die photochemisch - hier in Bezug auf eine Farbänderung - wirksame Strahlung kann durch „wirksame Strahlungsgrößen“ beschrieben werden. Diese wirksamen Strahlungsgrößen lassen sich entsprechend den photobiologisch wirksamen Strahlungsgrößen definieren, wie es in der Norm bereits erfolgt ist. Von den für die Farbänderung von Ausstellungsgegenständen wirksamen Strahlungsgrößen sind besonders die wirksame Bestrahlungsstärke E_{dm} , und die entsprechende wirksame Bestrahlung H_{dm} , wichtig. Damit sind folgende Größen definiert:

- $E_{e\lambda}$spektrale Bestrahlungsstärke am Objekt [W/(m²nm)]
- S_λStrahlungsfunktion (relative spektrale Zusammensetzung) der Lichtquelle, der spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ des Filters wird berücksichtigt
- $V(\lambda)$...relativer spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges für Tagessehen
- $s(\lambda)_{dm,rel}$ relative, spektrale Objektempfindlichkeit (spektrale Wirkungsfunktion)
- E_eBestrahlungsstärke [W/m²]
- EBeleuchtungsstärke [lx]
- E_{dm} ... wirksame Bestrahlungsstärke [W/m²]
- tBestrahlungs- bzw. Beleuchtungsdauer
- H_eBestrahlung [W h/m²]
- HBelichtung [lx h]
- H_{dm} ... wirksame Bestrahlung [W h/m²]
- $H_{s,dm}$...Schwellenwert der wirksamen Bestrahlung [W h/m²]
- K_mMaximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents (683 lm/W)

Die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$ kann wie folgt berechnet werden, wenn die Bestrahlungsstärke E_e bzw. die Beleuchtungsstärke E am Objekt gemessen werden kann.

$$E_{e\lambda} = C \cdot S_\lambda \quad (1)$$

$$C = \frac{E_e}{\int_\lambda S_\lambda d\lambda} = \frac{E}{K_m \int_{380nm}^{780nm} S_\lambda \cdot V(\lambda) d\lambda} \quad (2)$$

Darüber hinaus besteht zwischen diesen Größen folgende Beziehung:

$$E_e = \int_\lambda E_{e\lambda} d\lambda \quad (3)$$

$$E = K_m \int_{380nm}^{780nm} E_{e\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad (4)$$

$$E_{dm} = \int_\lambda E_{e\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} d\lambda \quad (5)$$

$$H_e = \int_t E_e dt = E_e \cdot t \quad (6)$$

$$H = \int_t E dt = E \cdot t \quad (7)$$

$$H_{dm} = \int E_{dm} dt = E_{dm} \cdot t \quad (8)$$

1.4 Relative spektrale Objektempfindlichkeit

Die relative spektrale Objektempfindlichkeit $S(\lambda)_{dm,rel}$, die für die Färbung des Ausstellungsgegenstandes maßgebend ist, lässt sich durch Exponentialfunktionen erfassen.

$$S(\lambda)_{dm,rel} = e^{-b(\lambda-300)} \quad (9)$$

b.....materialistische Konstante

Diese Funktion ist auf den Wert 1 bei der Wellenlänge von 300 nm zu normieren, da Strahlung unterhalb dieser Grenzwellenlänge bei der Museumsbeleuchtung mit Tageslicht oder Kunstlicht äußerst selten vorkommt. Die erhaltene Funktion ist dann für ein Material typisch, andere Materialien werden zwangsläufig - bedingt durch deren spezifische, spektrale Absorptionsgrade - andere spektrale Objektempfindlichkeiten aufweisen.

1.5 Wirksame Schwellenbestrahlung

Für die Strahlenschäden (Farbänderungen) wird unter Annahme der Gültigkeit des Bunsen-Roscoeschen Gesetzes angesetzt, dass sie durch das Produkt von wirksamer Bestrahlungsstärke und Bestrahlungsdauer - die Bestrahlung H_{dm} - verursacht wird.

Das Bunsen-Roscoesche Gesetz besagt, dass für die photochemische Wirkung das Produkt aus wirksamer Bestrahlungsstärke E_{dm} und Bestrahlungsdauer t , d. h. die wirksame Bestrahlung H_{dm} maßgebend ist. Andere Wissenschaftler weisen jedoch in der Fachliteratur öfter darauf hin, dass unter bestimmten Bedingungen mit zum Teil erheblichen Abweichungen von diesem Gesetz zu rechnen ist. Zur Überprüfung der Gültigkeit dieses Gesetzes wurden daher gesonderte Untersuchungen durchgeführt und im Gegensatz zu anderweitigen Erfahrungen dessen Anwendbarkeit für den vorliegenden Fall nachgewiesen.

Für die Kennzeichnung und spätere Auswertung des Zusammenhanges zwischen der wirksamen Bestrahlung und der durch sie verursachten Wirkung (Farbänderung) wird zweckmäßigerweise die „Schwellenreaktion“ verwendet, bei der gerade definiert merkliche Farbänderungen von Objekten zu beobachten sind. Diejenige wirksame Bestrahlung H_{dm} , die eine definiert merkliche Farbänderung erzeugt, wird als Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ bezeichnet. Prognosen für die Wirkung optischer Strahlung auf die Farbänderung und Forderungen für die Beleuchtung von Gegenständen nach Niveau und Dauer lassen sich nur aufstellen, wenn neben der relativen spektralen Objektempfindlichkeit auch die Schwellenbestrahlung für die Farbänderung bekannt ist.

1.5.1 Schwellenbestrahlungsdauer

Ist die Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$, für die ausgestellten Gegenstände bekannt, so lässt sich daraus die Schwellenbestrahlungsdauer $t_{s,dm}$ berechnen, während der die Ausstellungsgegenstände bei definierten Beleuchtungsbedingungen (schädigende Bestrahlungsstärke E_{dm}) beleuchtet werden dürfen, bevor eine definierte Farbänderung erreicht wird. Diese Schwellenbestrahlungsdauer lässt sich ermitteln zu:

$$t_{s,dm} = \frac{H_{s,dm}}{E_{dm}} \quad (10)$$

Während die Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ nur durch das Material bestimmt wird, hängt die Schwellenbestrahlungsdauer ab von:

- der Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$ und damit den Materialeigenschaften
- dem Beleuchtungsstärkeniveau, gekennzeichnet durch die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$
- der spektralen Zusammensetzung des beleuchtenden Lichtes, beschrieben durch die spektrale Bestrahlungsstärke E , bzw. die Strahlungsfunktion S_λ .

1.6 Farbe und Farbabstand

1.6.1 Körperfarbe

Um Aussagen über Körperfarben für die beleuchtende (vorgegebene) Lichtart machen zu können, müssen diese durch technische Maßzahlen - Farbmaßzahlen - beschrieben werden. Zur Kennzeichnung der Farbe (Farbvalenz) dienen besonders die Farbmaßzahlen im Normvalenzsystem [1], die sowohl für den 2° Beobachter, wie auch den 10° -Beobachter definiert sind. Bei den Untersuchungen wurde das 10° - (Großfeld-) Normvalenzsystem verwendet.

1.6.2 Farbabstand

Zur Änderung der Farbe durch Bestrahlung ist eine Farbabstandsbewertung zwischen unbestrahltem und bestrahltem Gegenstand nötig. Dazu wird als angenähert empfindungsgemäß gleichabständiger Farbraum der $L^*a^*b^*$ -Farbraum CIE 1976 verwendet. Die Farbänderung wird dann durch den Farbabstand ΔE^*_{ab} beschrieben [2]. Für bestimmte Anwendungszwecke kann eine Aufspaltung von ΔE^*_{ab} in einen *Helligkeits-Beitrag* ΔL^* , einen *Buntheits-Beitrag* ΔC^*_{ab} und einen *Bunton-Beitrag* ΔH^*_{ab} zweckmäßig sein.

1.6.3 Farbechtheit

Für die Prüfung der Farbechtheit von Textilien werden Farbänderungen durch Echtheitszahlen beschrieben [3, 4], die sich mit Werten für ΔE^*_{ab} vergleichen lassen. Dabei versteht man unter Farbechtheit die Widerstandsfähigkeit der Farbe von Färbungen und Drucken auf Textilien gegen verschiedenartige Einwirkungen, denen sie üblicherweise ausgesetzt sind. Bei diesem genormten Verfahren wird der Farbunterschied visuell bestimmt. Dieses Verfahren ist für genauere Angaben unzureichend.

1.7 Vergilbung

Die Einflüsse optischer Strahlung auf nahezu weiße Materialien können auch durch die Vergilbung beschrieben werden. Dazu werden der Gelbwert G und die Vergilbungszahl V verwendet [5].

1.8 Bestimmung der Objektschädigung

Um die Objektschädigung durch die optische Strahlung und die sich daraus ergebenden, für die Anwendung in der musealen Praxis notwendigen Größen, wie z.B. die Schwellenbestrahlungsdauer für eine bestimmte Beleuchtungssituation, bestimmen zu können, müssen folgende Angaben und das jeweilige Material bekannt sein:

- Zusammenhang zwischen Ursache und Wirkung $\Delta E^*_{ab} = f(H_{dm})$, bzw. Schwellenwert der wirksamen Bestrahlung $H_{s,dm}$
- relative spektrale Wirkungsfunktion $s(\lambda)_{dm,rel}$
- spektrale Bestrahlungsstärke am Objekt $E_{e\lambda}$.

Während die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$ beleuchtungsbedingt ist, sind die Zusammenhänge zwischen Ursache und Wirkung sowie die relative spektrale Objekttempfindlichkeit vom jeweiligen Material abhängig.

2. Anhang

2.1 Schädigung durch thermische Belastung

Durch das Objekt absorbierte Strahlung $E_{e\alpha}$ (W/m²):

$$E_{e\alpha} = \int_0^{\infty} E_{e\lambda} \cdot \alpha(\lambda) \, d\lambda \quad (11)$$

Je höher die absorbierte Strahlung, desto größer ist die thermische Belastung des Objekts.

$\alpha(\lambda)$...spektraler Absorptionsgrad des Objekts
 $E_{e\lambda}$spektrale Bestrahlungsstärke am Objekt

Eigenschaften, die die thermische Empfindlichkeit eines Objektes ausmachen [6]:

- das Objekt ist aus mehreren Komponenten mit unterschiedlichem thermischen Ausdehnungskoeffizienten zusammengesetzt
- das Verhältnis von Oberfläche zu Volumen ist klein, die konvektive Wärmeabgabe daher gering
- die Oberfläche hat ein hohes Absorptionsgrad, insbesondere im Bereich langwelliger Strahlung
- die Wärmeleitzahl ist klein, kritische Temperatursteigerung in der oberflächennahen Schicht

Je mehr dieser Eigenschaften in einem Objekt vereinigt sind, desto größer ist seine thermische Empfindlichkeit.

Die Bewertung der Beleuchtung im Hinblick auf die direkte thermische Wirkungen an Objekten wird durch das Photometrische Strahlungsäquivalent der Gesamtstrahlung K (lm/W) gegeben:

$$K = \frac{E}{E_e} = \frac{K_m \int_{380nm}^{780nm} S_\lambda \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \, d\lambda}{\int_0^{\infty} S_\lambda \cdot \tau(\lambda) \, d\lambda} \quad (12)$$

Je höher K , desto geringer ist die thermische Belastung der Objekte.

EBeleuchtungsstärke am Objekt (lx)
 E_eBestrahlungsstärke derselben (W/m²)
 K_mMaximalwert des Photometrischen Strahlungsäquivalentes (683 lm/W)
 $V(\lambda)$...spektraler Hellempfindlichkeitsgrad
 S_λStrahlungsfunktion der Lichtquelle
 $\tau(\lambda)$spektraler Transmissionsgrad der verwendeten Filter

Die thermische Belastung des Ausstellungsraumes durch künstliche Beleuchtung:

$$\eta \cdot \eta_B = \eta \cdot \eta_{LB} \cdot \eta_R \quad (13)$$

η_{LB}Betriebswirkungsgrad der verwendeten Leuchten
 η_BBeleuchtungswirkungsgrad
 η_{LB}Betriebswirkungsgrad der verwendeten Leuchten
 η_RRaumwirkungsgrad der Beleuchtungsanlage

Je größer der Wert dieses Produktes, desto geringer ist die thermische Belastung des Ausstellungsraumes.

2.2 Schädigung durch ultraviolette und sichtbare Strahlung

Wellenlängenbereiche der verschiedenen Arten der ultravioletten Strahlung und des sichtbaren Lichts:

<u>Art der Strahlung</u>	<u>Wellenlängenbereich</u>
UV – C	100 – 280 nm
UV – B	280 – 315 nm
UV – A	315 – 380 nm
Sichtbare Strahlung (Licht)	380 – 780 nm

2.2.1 Schädigende Bestrahlung

Der Zusammenhang zwischen Bestrahlungsstärke und Bestrahlungsdauer folgt dem Bunsen-Roscoeschen Gesetz, das in seiner einfachsten Form für eine konstante oder eine mittlere objektschädigende Bestrahlungsstärke E_{dm} während der Bestrahlungsdauer t für die Bestrahlung H_{dm} in Wh/m^2 lautet:

$$H_{dm} = E_{dm} \cdot t \quad (14)$$

Der Index „dm“ bedeutet „damage“, d.h. Schädigung.

Die schädigende Bestrahlung kann also durch niedrige schädigende Bestrahlungsstärken E_{dm} und/oder durch kurze Bestrahlungszeiten t gering gehalten werden. Diese einfache Formel ist heute selbstverständlicher Bestandteil praktischer konservatorischer Arbeit.

Die ein Objekt nacheinander belastenden Bestrahlungen durch verschiedene Beleuchtungssituationen oder auch gleichzeitig vorhandene unterschiedliche Lichtkomponenten wie z.B. Tageslicht und künstliches Licht addieren sich zu einer Gesamtwirkung. Die gesamte resultierende Bestrahlung ergibt sich auch mathematisch als Summe der einzelnen schädigenden Bestrahlungen „i“ unter den verschiedenen Bedingungen:

$$H_{dm} = \sum_i H_{dm,i} = \sum_i E_{dm,i} \cdot t_i \quad (15)$$

Die Ausstellungsbedingungen „i“ sind durch die während der Bestrahlungsdauer konstanten oder die mittleren Bestrahlungsstärken $E_{dm,i}$ und die zugehörigen Bestrahlungsdauern t_i gekennzeichnet.

Die allgemein gültige Integraldarstellung für die Bestrahlung vom Beginn t_1 bis zum Ende t_2 der Strahlungseinwirkung auch bei zeitlich wechselnder Bestrahlungsstärke $E_{dm}(t)$ ist aus der Literatur ersichtlich [7][8][9].

Wenn die Bestrahlungen $H_{dm,i}$ eine vom Exponat oder Material abhängigen Schwellenwert erreichen, werden Schädigungen wahrnehmbar. Dieser Schwellenwert wird wirksame Schwellenbestrahlung genannt.

2.2.2 Objektschädigende Bestrahlungsstärke

Die objektschädigende Bestrahlungsstärke E_{dm} wird durch zwei spektrale Größen bestimmt:

- Verursachende Größe ist die spektrale Bestrahlungsstärke $E_{e\lambda}$, welche durch die spektrale Strahlungsverteilung S_λ der Lichtquelle gegeben ist. Bei der Verwendung von Filtern oder Gläsern müssen als zusätzlicher Faktor der zugehörige spektrale Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ und bei indirekter Beleuchtung, d.h. bei Reflexion des Lichtes an Flächen, der spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ berücksichtigt werden.
- Auf Seiten der beleuchteten und gefährdeten Objekte wird die von der Wellenlänge der Strahlung abhängige Schädigung durch die relative spektrale Objektanfälligkeit $s(\lambda)_{dm, rel}$ angegeben

Wegen der komplizierten Abhängigkeiten von der Wellenlänge können diese Zusammenhänge nicht mehr in einfacher Form dargestellt werden. Zur Ermittlung der objektschädigenden Bestrahlungsstärke E_{dm} muss vielmehr das Produkt aus spektraler Bestrahlungsstärke und spektraler Objektempfindlichkeit Wellenlänge für Wellenlänge oder in geeigneten Wellenlängenschritten aufsummiert werden:

$$E_{dm} = \sum_{\lambda} E_{e\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \Delta\lambda \quad (16)$$

$E_{e\lambda}$Spektrale Bestrahlungsstärke in $W/m^2 \cdot nm$
 $s(\lambda)_{dm,rel}$...Relative spektrale Objektempfindlichkeit
 $\Delta\lambda$Wellenlängenschritt in nm für die Aufsummierung

Der Wellenlängenbereich λ , über den das Produkt aufsummiert wird, muss soweit wie erforderlich ausgedehnt werden, also z.B. über den Wellenlängenbereich, in dem es Anteile der spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquelle gibt.

Anmerkung: In allgemeiner mathematischer Form wird die objektschädigende Bestrahlungsstärke als Integral dargestellt:

$$E_{dm} = \int_{\lambda} E_{e\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} d\lambda$$

Es kann bei mathematisch geschlossener Form der enthaltenen spektralen Abhängigkeiten auch berechnet werden. Bei praktischen konservatorischen Berechnungen werden die Größen jedoch in Wellenlängenschritten aufsummiert, was durch die Summendarstellung richtig beschrieben wird. In den nachfolgenden Abschnitten wird daher auf die Integraldarstellung verzichtet und nur die praktisch brauchbare Summendarstellung angegeben.

Unter Berücksichtigung der spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquelle und beispielsweise des spektralen Transmissionsgrades eines Filters oder einer Verglasung sowie der beleuchteten Fläche ergibt sich für die Summendarstellung nach Formel (3)

$$E_{dm} = \frac{\sum_{\lambda} \phi_{e\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \Delta\lambda}{A} \quad (17)$$

$\phi_{e\lambda}$spektraler Strahlungsfluss der Lichtquelle in $W/m^2 \cdot nm$
 $\tau(\lambda)$...spektraler Transmissionsgrad
 Abeleuchtete Fläche in m^2

Bei an Flächen reflektiertem Licht, z.B. bei Indirektbeleuchtung, ist der spektrale Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ zu berücksichtigen.

Die spektralen Strahlungsverteilungen der Lichtquellen und die spektralen Abhängigkeiten der Transmission bzw. Reflexion sind bekannt oder können gemessen werden. Sie sind von den Herstellern der jeweiligen Produkte zu erfragen.

Die spektralen Objektempfindlichkeiten der verschiedenen Museumsobjekte oder museumstypischen Materialien sind jedoch weitgehend unbekannt und können nur experimentell ermittelt werden. Für den vorliegenden Leitfaden werden die experimentell ermittelten Objektempfindlichkeiten für Zeitungspapier und andere Papiere geringer Qualität und für Aquarellfarben, Ölfarben, textile Materialien und Hadernpapiere zugrundegelegt.

2.2.3 Schädigungspotenzial

Das für eine Beleuchtungssituation und ein Objekt oder Material feste Verhältnis von objektschädigender Bestrahlungsstärke E_{dm} zur gleichzeitigen Beleuchtungsstärke E ist das Schädigungspotenzial

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E} \quad (18)$$

mit der Einheit W/m^2 . $lx = W/lm$. Der mathematische Ausdruck, mit dem das Schädigungspotenzial berechnet werden kann, ist in Abschnitt 2.3.3 angegeben.

Auf die allgemein gültige Integraldarstellung ist hier verzichtet worden. Sie kann der Literatur entnommen werden [7][10][11].

2.2.4 Kritische Bestrahlungszeit oder Schwellenbestrahlungsdauer

Wenn die Schwellenbestrahlung $H_{S, dm}$ eines Ausstellungsobjekts oder Materials erreicht ist, also nach Verlauf der Schwellenbestrahlungsdauer t_s , besteht die Gefahr sichtbarer Schädigungen. Für diesen Zeitpunkt lautet das Bunsen-Roscoesche Gesetz (1) (vgl. 2.2.1):

$$H_{S, dm} = E_{dm} \cdot t_s \quad (19)$$

Mit dem in Abschnitt 2.2.3 definierten Schädigungspotenzial (18) $P_{dm} = E_{dm}/E$ lässt sich für die Schwellenbestrahlungsdauer schreiben:

$$t_s = \frac{H_{S, dm}}{E_{dm}} = \frac{H_{S, dm}}{P_{dm} \cdot E} \quad (20)$$

Für ein Exponat mit der Schwellenbestrahlung $H_{S, dm}$ kann man also bei einer Beleuchtung, die durch die Beleuchtungsstärke beschrieben ist, die zugehörige Schwellenbestrahlungsdauer berechnen, wenn das Schädigungspotenzial für die Beleuchtungssituation bekannt ist.

2.3 Experimentelle Grundlagen für die Ermittlung von Schädigungspotenzialen

2.3.1 Relative spektrale Objektempfindlichkeit

Die in Bild 1 (Abschnitt 1.2) dargestellten relativen spektralen Objektempfindlichkeiten sind eine Annäherung an die experimentell ermittelten Werte in der mathematischen Form

$$s(\lambda)_{dm, rel} = a \cdot e^{\left(\frac{-b \cdot \lambda}{nm}\right)} \quad (21)$$

$$\text{mit } a = e^{b \cdot 300} \quad (22)$$

zur Normierung auf $s(\lambda)_{dm, rel} = 1$ bei $\lambda = 300 \text{ nm}$ [7], in vereinfachter Schreibung [12]

$$s(\lambda)_{dm, rel} = e^{b \left(\frac{300 - \lambda}{nm}\right)} \quad (23)$$

Die materialabhängige Konstante b hat hierbei die Werte:

$b = 0,012$für Aquarell auf Papier, Textilien, Ölfarben auf Leinwand, Hadernpapiere
 $b = 0,038$für Zeitungspapier und Papiere geringer Qualität

In (23) kann die relative spektrale Objektempfindlichkeit zur Berechnung der schädigenden Bestrahlungsstärke in die Beziehungen (3) oder (4) in Abschnitt 1.3. eingefügt werden:

$$E_{dm} = \sum_{\lambda} E_{e\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \quad \Delta\lambda = \sum_{\lambda} E_{e\lambda} \cdot e^{\frac{b \cdot (300-\lambda)}{nm}} \quad \Delta\lambda \quad (24)$$

bzw. bei Berücksichtigung der Strahlungsfunktion S_{λ} der Lichtquelle und eines Filters mit dem Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$

$$E_{dm} = \sum_{\lambda} S_{\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \quad \Delta\lambda = \sum_{\lambda} S_{\lambda}(\lambda) \cdot \tau(\lambda) \cdot e^{\frac{b \cdot (300-\lambda)}{nm}} \quad \Delta\lambda \quad (25)$$

Grundsätzlich ist anzumerken, dass die experimentell gewonnenen Ergebnisse streng genommen nur für die untersuchten Proben gelten und nur unter Vorbehalt auf andere Proben innerhalb der Materialgruppe übertragen werden dürfen [13]. Es ist nicht auszuschließen, dass sich andere, nicht untersuchte Proben der Gruppe anders verhalten, sich also z.B. schneller verfärben als experimentell festgestellt.

Eine Übertragung der Ergebnisse einer Materialgruppe auf eine andere Gruppe mit einer angenommenen ähnlichen Empfindlichkeit, z.B. von Aquarell auf Druckgraphik oder Handzeichnungen, ist dann entsprechend unsicher. Es wäre also zu wünschen, dass auch noch andere museumsrelevante Objekte und Materialien wie Leder, Druckgraphik oder Fotoarbeiten in gleicher Weise untersucht werden.

2.3.2 Wirksame Schwellenbestrahlung

Die sich in ihrer Wirkung auf ein Material oder Ausstellungsobjekt aufsummierenden schädigenden Bestrahlungen H_{dm} haben den Grenzwert der Schwellenbestrahlung $H_{S, dm}$ erreicht, wenn sichtbare Schädigungen auftreten:

$$H_{S, dm} = \sum_i H_{dm} \quad (26)$$

Die bis dahin insgesamt vergangene Bestrahlungszeit bei einer schädigenden Bestrahlungsstärke E_{dm} wird als Schwellenbestrahlungsdauer t_s bezeichnet:

$$H_{S, dm} = E_{dm} \cdot t_s \quad \text{in Wh/m}^2 \quad (27)$$

Wenn unterschiedliche Beleuchtungssituationen mit den Bestrahlungsstärken $E_{dm,i}$ und jeweils unterschiedlicher Zeitdauer t_i auf ein Objekt einwirken, so addieren sich die Schädigungswirkungen:

$$H_{dm,i} = \sum_i E_{dm,i} \cdot t_i \quad (28)$$

Eine Schädigung kann z.B. als Farbveränderung oder Ausbleichung am Exponat sichtbar werden, wenn diese Summe gemäß Formel (26) die Schwellenbestrahlung erreicht hat:

$$H_{dm,i} = H_{S, dm} \quad (29)$$

Die für die verschiedenen Materialgruppen experimentell ermittelten Schwellenbestrahlungen $H_{S, dm}$ [10][12][14] sind zusammen mit den Materialkonstanten der Formeln (21) bis (23) für die relative spektrale Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ in Tabelle 2.1 angegeben:

Material	Schwellenbestrahlung $H_{S, dm}$ in Wh/m ²	Material- konstante b
Zeitungspapier	5	0,038
Aquarellfarben auf Papier	175	0,012
Textile Materialien	290	0,012
Ölfarben auf Leinwand	850	0,012
Hadernpapiere	1.200	0,012

Tabelle 2.1: Wirksame Schwellenbestrahlung für gerade wahrnehmbare Farbenveränderung an museumstypischen Materialien sowie Materialkonstante b in der Formel für die relative spektrale Objektempfindlichkeit.

Bei den angegebenen Werten sind jeweils die empfindlichsten Proben innerhalb einer Materialgruppe zugrundegelegt worden.

Die Ergebnisse entsprechen der praktischen Erfahrung:

- Einfache Zeitungspapiere sind insbesondere gegen kurzwellige Strahlung sehr lichtempfindlich und zeigen bekanntlich schon nach Stunden oder wenigen Tagen unter stärkerem Lichteinfluss Vergilbungserscheinungen.
- Von den anderen Materialien sind Aquarellfarben und Textilproben sehr empfindlich und bedürfen in Museen und Ausstellungen besonderer Maßnahmen des Lichtschutzes.
- Als weniger empfindlich erweisen sich Ölfarben auf Leinwand und Hadernpapiere, so dass diesen Materialien auch etwas höhere Beleuchtungsstärken zugemutet werden können.

2.3.3 Schädigungspotenzial

Die Definition des Schädigungspotenzials P_{dm} als Verhältnis der objektschädigenden Bestrahlungsstärke zur Beleuchtungsstärke

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E} \quad \text{in} \quad \frac{\text{mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{k}} \quad (\text{vgl. (18)})$$

muss für eine Berechnung durch die wellenlängenabhängigen Anteile beschrieben werden:

Objektschädigende Bestrahlungsstärke (vgl. 2.2.2):

$$E_{dm} = \sum_{\lambda} \frac{\phi_{e\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \Delta \lambda}{A} \quad (30)$$

Definition der Beleuchtungsstärke:

$$E = K_m \sum_{\lambda} \frac{\phi_{e\lambda} \cdot V(\lambda) \Delta \lambda}{A} \quad (31)$$

mit

K_m683 lm/W, Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents
 $V(\lambda)$...Spektraler Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges

Damit lautet der in (31) genannte Quotient für das Schädigungspotenzial:

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E} = \frac{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \Delta \lambda}{K_m \sum_{\lambda} S_{\lambda} \cdot V(\lambda) \Delta \lambda} \quad (32)$$

mit $\phi_{e\lambda} = C \cdot S_{\lambda}$

S_{λ}Strahlungsfunktion der beleuchtenden Lichtart

In beiden Zusammenhängen wird dieselbe Fläche A bestrahlt bzw. beleuchtet, so dass diese aus der Gleichung herausfällt.

Nach der Gleichung (32) können Schädigungspotenziale von verschiedenen Beleuchtungssituationen für betroffene museumstypische Materialien oder Exponate berechnet werden, wobei gegebenenfalls bei der Bestrahlungsstärke und bei der Beleuchtungsstärke ein spektraler Transmissionsgrad $\tau(\lambda)$ eines Filters oder ein spektraler Reflexionsgrad $\rho(\lambda)$ einer reflektierenden Fläche z.B. bei Indirektbeleuchtung einzufügen ist:

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E} = \frac{\sum_{\lambda} S_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot s(\lambda)_{dm,rel} \Delta \lambda}{K_m \sum_{\lambda} S_{\lambda} \cdot \tau(\lambda) \cdot V(\lambda) \Delta \lambda} \quad (33)$$

Der Ausdruck im Nenner nimmt für jede Beleuchtungssituation mit einer Lichtquelle der Strahlungsfunktion S_{λ} und z.B. mit einem Filter des Transmissionsgrades $\tau(\lambda)$ einen bestimmten Wert an (Lichtstrom in lm). Auf demselben Wege wird durch Aufsummierung der Ausdruck im Zähler mit zusätzlicher Berücksichtigung der relativen spektralen Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ des Materials oder Objekts berechnet (Strahlungsleistung in W).

Das Ergebnis ist das Schädigungspotenzial P_{dm} in W/lm oder in $(W/m^2)/lx$, das für ein gegebenes Material oder Objekt bei einer bestimmten Beleuchtungssituation eine feste Größe ist.

2.3.4 Schwellenbestrahlungsdauer, kritische Bestrahlungszeit

Eine schädigende Bestrahlung wirkt solange auf ein Objekt oder Material ein, bis die zugehörige wirksame Schwellenbestrahlung erreicht ist und sichtbare Schädigungen erkennbar werden. Die zugehörige Bestrahlungsdauer ist die Schwellenbestrahlungsdauer. Sie kann aus den jetzt bekannten Größen ermittelt werden (vgl. Formel (20) in Abschnitt 2.2.4):

$$t_s = \frac{H_{S, dm}}{E_{dm}} = \frac{H_{S, dm}}{P_{dm} \cdot E} \quad (34)$$

mit

$H_{S, dm}$..Schwellenbestrahlung, vgl. Tabelle 2.1 in Abschnitt 2.3.1

P_{dm} ...Schädigungspotenzial in $(W/m^2)/lx$ aus Tabellen

EBeleuchtungsstärke in Lux am Ausstellungsobjekt

Die Gleichung (34) beschreibt prinzipiell die folgenden Zusammenhänge:

- Empfindliche Materialien gleicher relativer spektraler Objektempfindlichkeit mit niedriger Schwellenbestrahlung, z.B. Aquarellfarben auf Papier (vgl. Tab. 2.1, Abschnitt 2.3.2) führen zu kurzen Schwellenbestrahlungszeiten, d.h. sie zeigen bald merkliche Schädigungen, z.B.

- Farbveränderungen. Wenig empfindliche Materialien wie Ölfarben auf Leinwand haben dagegen eine lange Schwellenbestrahlungsdauer.
- Beleuchtungssituationen mit hohem Schädigungspotenzial führen zu kurzen Schwellenbestrahlungsdauern. Diese kritischen Bestrahlungszeiten können durch Wahl einer Beleuchtung und zusätzlichen Schutzeinrichtungen mit geringerem Schädigungspotenzial verlängert werden.
 - Je höher die Beleuchtungsstärke am Ausstellungsobjekt ist, desto geringer wird die Schwellenbestrahlungsdauer. Zur Vermeidung von Schädigungen werden daher bei empfindlichen Materialien, z.B. Aquarellen oder Graphik die Ausstellungsräume mit niedriger Beleuchtungsstärke, z.B. 50 lx, ausgeleuchtet.

2.4 Konservatorische Maßnahmen

2.4.1 Glasfilter

Bei UV-Filtern mit sehr niedrigen Transmissionsgraden bzw. einem Transmissionsgrad Null bei kurzen Wellenlängen (Sperrbereich) und einem hohen Transmissionsgrad im Bereich der sichtbaren Strahlung und darüber (Durchlassbereich) kann man den UV-Schutz auch durch die Lage der Filterkante beschreiben, d.h. durch die Wellenlänge, bei welcher der Transmissionsgrad die Hälfte des Maximalwertes im Durchlassbereich angenommen hat [14]:

$$\tau_c = \frac{\tau_{max}}{2}$$

Kantenwellenlänge:

$$\lambda_c = \lambda(\tau_c) = \lambda\left(\frac{\tau_{max}}{2}\right) \quad (35)$$

Bei einem Maximalwert der Transmission im Durchlassbereich nahe 100% macht man keinen großen Fehler, wenn die Lage der Filterkante einfach für einen Transmissionsgrad $\tau = 50\%$ angegeben wird. Je geringer der Transmissionsgrad im Durchlassbereich ist, z.B. bei lichtschwächenden Graufiltern oder bei dunklen Verglasungen, desto größer wird die Abweichung gegenüber der richtigen Definition der Kantenwellenlänge λ_c . Es werden dann Kantenlagen bei zu niedrigen Wellenlängen angegeben.

2.4.2 Ermittlung konservatorischer Daten

Die Fertigungstoleranzen von Lampen und Filtern zeigen sich bei ihren spektralen Strahlungsverteilungen bzw. Transmissionsgraden. Sie sind bei Lampen recht gering und betragen etwa $\pm 1\%$ bei Leuchtstofflampen, bei Glühlampen noch darunter. Bei Hochdrucklampen ist von etwas höheren Abweichungen auszugehen. Bei den verschiedenen Filtermaterialien sind auch unterschiedliche Toleranzen zu erwarten, die bei dichroitischen Filtern nahe der Nachweisgrenze liegen, bei Absorptionsfiltern jedoch höhere Werte $< 5\%$ annehmen können. Insgesamt kann man wohl von Gesamtabweichungen $< 5\%$ für die Schädigungspotenziale ausgehen. Sie können also als recht genau gelten.

Vor allem angesichts der großen Ungenauigkeiten bei den experimentell ermittelten Schwellenbestrahlungen und insbesondere bei den relativen spektralen Objektempfindlichkeiten sowie der Unsicherheit bei ihrer Anwendung auf konkrete Exponate oder museumstypische Materialien sind die Toleranzen bei Lampen und Filtern vernachlässigbar.

2.4.3 Rechnerische Untersuchung von konservatorischen Fragen

2.4.3.1 Bedeutung der Schwellenbestrahlungsdauer

Obwohl das Schädigungspotenzial die entscheidende Größe zur Beschreibung der einer Beleuchtungssituation innewohnenden Möglichkeiten zur Schädigung eines Exponats oder Materials darstellt, so ist diese Größe doch wenig anschaulich und für die Praxis der Museumsarbeit und Ausstellungsgestaltung nicht gut handhabbar.

Es ist daher sinnvoll, aus den bekannten Größen die Schwellenbestrahlungsdauer t_s zu berechnen, d.h. diejenige Zeit, die ein Objekt oder Material einer Beleuchtung ausgesetzt sein muss, bis die dadurch verursachten Schäden, z.B. Farbenveränderungen merklich werden. Dies ist der Fall, wenn die Schwellenbestrahlung $H_{S, dm}$ eines Materials erreicht ist (vgl. Tabelle 2.1, Abschnitt 2.3.2).

Die Beziehung für die Schwellenbestrahlungsdauer t_s ist als Gleichung (20) in Abschnitt 2.2.4 und als Gleichung (34) in Abschnitt 2.3.3 angegeben:

$$t_s = \frac{H_{S, dm}}{E_{dm}} = \frac{H_{S, dm}}{P_{dm} \cdot E} \quad (36)$$

in h mit

$H_{S, dm}$...Schwellenbestrahlung in Wh/m² (vgl. Tabelle 2.1),
 P_{dm} ...Schädigungspotenzial in mW/m²·lx
 EBeleuchtungsstärke in lx

Schwellenbestrahlung und Schädigungspotenzial können aus den Tabellen in der vorliegenden Schrift entnommen werden. Die Beleuchtungsstärke kann mit Hilfe eines Beleuchtungsstärkemessers ausreichender Qualität am Objekt gemessen werden oder sie ergibt sich aus Beleuchtungsberechnungen oder aus Beleuchtungsstärkeforderungen, z.B. als Teil einer Ausleihvereinbarung für Ausstellungsstücke.

2.4.3.2 Berechnung der Schwellenbestrahlungsdauer

Aufgabenstellung: Ein Wandteppich soll in einer ständigen Ausstellung, die ohne Tageslicht nur durch normale Glühlampen beleuchtet wird, gezeigt werden. Gewünschte Beleuchtungsstärke am Objekt 200 lx.

Konservatorische Daten:

- Schwellenbestrahlung für Textilmaterialien (Tabelle 2.1, Abschnitt 2.3.2): $H_{S, dm} = 290 \text{ Wh/m}^2$
- Schädigungspotenzial für Allgebrauchsglühlampen ohne Filter: $P_{dm} = 0,209 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{lx}$

Berechnung mit Gleichung (21):

$$t_s = \frac{H_{S, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{290 \text{ Wh}}{\text{m}^2}}{\frac{0,209 \text{ mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 200 \text{ lx}}$$

$$t_s = \frac{290.000 \text{ mWh}}{\text{m}^2} \cdot \frac{1}{\frac{0,209 \text{ mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 200 \text{ lx}}$$

$$t_s = 6.983 \text{ h} \quad (24)$$

Bei einer täglichen Expositionszeit von 8 h an 6 Tagen je Woche, d.h. von etwa 50 h/Woche einschließlich Reinigungszeit, bedeutet dies eine Schwellenbestrahlungsdauer von

$$t_s = \frac{6.938}{50} = 138 \text{ Wochen (2,65 Jahre)}$$

Erst oder schon nach einer Expositionszeit von über 2,5 Jahren besteht die Gefahr, dass unter den gegebenen Ausstellungsbedingungen an dem Wandteppich Schädigungen durch Farbveränderungen auftreten können.

Es soll hier erneut darauf hingewiesen werden, dass die Versuchsergebnisse, auf denen die Berechnungen beruhen, im engeren Sinne nur für die untersuchten Proben gelten und es nicht auszuschließen ist, dass andere nicht untersuchte Textilfarben, wie sie vielleicht bei dem hier ausgestellten Teppich verwendet wurden, sich eher verfärben können.

Andererseits gelten die Versuchsergebnisse überwiegend für frische, noch unbestrahlte Proben und hier jeweils für die empfindlichsten Proben innerhalb jeder Materialgruppe, so dass bei gealterten Exponaten, die bereits einige Zeit einer Beleuchtung ausgesetzt waren, längere Schwellenbestrahlungsdauern erwartet werden können.

2.4.3.3 Verringerung der Beleuchtungsstärke

Angesichts der immer bestehenden Unsicherheiten über das Verhalten der museumstypischen Materialien wären in dem vorigen Beispiel weitergehende konservatorische Maßnahmen zu empfehlen.

Als nächstliegender Schritt in dem hier behandelten Beispiel bietet sich die Verringerung der Beleuchtungsstärke auf 100 lx an. Bekanntlich wird durch die Halbierung der Beleuchtungsstärke die Schwellenbestrahlungsdauer verdoppelt.

Die Schwellenbestrahlung und das Schädigungspotenzial sind wie im vorigen Abschnitt 2.4.3.2.

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{290.000 \text{ mWh}}{\text{m}^2}}{\frac{0,209 \text{ mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 100 \text{ lx}}$$

$$t_s = 13.876 \text{ h} \quad (38)$$

Die Halbierung der Beleuchtungsstärke bringt eine Verdopplung der schädigungsfreien Ausstellungszeit auf 277 Wochen oder über 5,3 Jahre. Die Beleuchtungsstärke kann durch eine Bestückung der Leuchten mit Lampen geringerer Leistung bzw. geringeren Lichtstromes, durch lichtschwächende Filter oder durch Dimmen von Leuchtstofflampen verringert werden. Beim Dimmen von Glühlampen tritt zusätzlich zur Verminderung des Lichtstromes oder der Beleuchtungsstärke eine Rotverschiebung der Strahlung und damit eine weitere Verringerung des Schädigungspotenzials auf.

Das niedrigere Beleuchtungsniveau führt allerdings zu visuell schlechteren Bedingungen: Kleine Details, Kontraste, Farben und Farbunterschiede werden weniger gut wahrgenommen.

2.4.3.4 Verwendung einer weniger schädigenden Lichtquelle

Die Schwellenbestrahlungsdauer kann auch durch ein niedrigeres Schädigungspotenzial verlängert werden, z.B. durch Wahl einer weniger schädigenden Lichtquelle. Pressglas-Reflektorlampen PAR 38 weisen ein noch geringeres Schädigungspotenzial als Allgebrauchsglühlampen auf.

Es wird in diesem Beispiel wieder die Ausstellungssituation aus Abschnitt 2.4.3.2 zugrunde gelegt:

- Gewünschte Beleuchtungsstärke: 200 lx
- Schwellenbestrahlung: 290 Wh/m²
- Schädigungspotenzial für Pressglas-Glühlampe PAR 38 ohne Filter: $P_{dm} = 0,185 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{lx}$

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{290.000 \text{ mWh}}{\text{m}^2}}{\frac{0,185 \text{ mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 200 \text{ lx}}$$

$$t_s = 7.838 \text{ h} \quad (39)$$

Bei Verwendung von Pressglas-Glühlampen statt normaler Glühlampen kann der Wandteppich 900 h länger ohne Gefahr durch Schädigung gezeigt werden. Insgesamt ist eine Expositionszeit von 157 Wochen (3 Jahre) möglich.

2.4.3.5 Verwendung von Filtern

Das Schädigungspotenzial der ungefilterten Glühlampen kann durch zusätzliches Filtern reduziert werden, z.B. durch einen üblichen Absorptionsfilter vom Typ UVILEX 390.

Konservatorische Daten:

- Gewünschte Beleuchtungsstärke: 200 lx
- Schwellenbestrahlung: 290 Wh/m²
- Schädigungspotenzial für Glühlampen und Filter UVILEX 390: $P_{dm} = 0,177 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{lx}$

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{290.000 \text{ mWh}}{\text{m}^2}}{\frac{0,177 \text{ mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 200 \text{ lx}}$$

$$t_s = 8.192 \text{ h} \quad (40)$$

Gegenüber ungefilterten Glühlampen wird die Schwellenbestrahlungsdauer um über 1.250 h verlängert. Es wird eine schädigungsfreie Expositionszeit von 164 Wochen (3,15 Jahre) bei den genannten Ausstellungsbedingungen erreicht.

Bei Verwendung eines hochwirksamen dichroitischen Filters mit einer Kantenlage von $\tau(\lambda) = 50\%$ bei 420 nm Wellenlänge (Schädigungspotenzial: $P_{dm} = 0,165 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{lx}$) kann die Schwellenbestrahlungsdauer auf

$$t_s = 8.788 h$$

entsprechend 176 Wochen (3,4 Jahre) verlängert werden.

2.4.3.6 Kombination mehrerer konservatorischer Maßnahmen

Verschiedene konservatorische Maßnahmen können natürlich auch miteinander kombiniert und gewissermaßen hintereinander geschaltet werden. Dabei sollte im Einzelfall geprüft werden, ob der konservatorische Effekt in einem sinnvollen Verhältnis zu dem erforderlichen Aufwand steht.

Als Beispiel soll noch einmal die in Abschnitt 2.4.3.2 vorgestellte Ausstellungssituation des ausschließlich durch Glühlampen beleuchteten Wandteppichs dienen. Er soll durch nur wenig schädigende Pressglas-Reflektorglühlampen bei reduzierter Beleuchtungsstärke von 100 lx beleuchtet werden, wobei zusätzlich ein handelsüblicher UV-Filter UVILEX 390 eingesetzt wird.

Weitere konservatorische Daten:

- Schwellenbestrahlung: 290 Wh/m²
- Schädigungspotenzial für Reflektorlampe PAR 38 und Filter UVILEX 390: $P_{dm} = 0,166 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{lx}$

$$t_s = \frac{H_{S, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{290.000 \text{ mWh}}{\text{m}^2}}{\frac{0,166 \text{ mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 100 \text{ lx}}$$

$$t_s = 17.470 h$$

(41)

Diese Schwellenbestrahlungsdauer entspricht einer nach dem gegenwärtigen Stand der zugrundeliegenden Daten unkritischen Expositionsdauer von 349 Wochen (6,7 Jahre).

2.4.3.7 Dimmen von Glühlampen

Beim Dimmen von Glühlampen und Halogenglühlampen werden nicht nur der Lampenlichtstrom und damit die Beleuchtungsstärke herabgesetzt, sondern gleichzeitig die spektrale Strahlungsverteilung der Lampe zu roten Strahlungsanteilen, d.h. zu längeren Wellenlängen hin verschoben. Durch diese Verschiebung wird die Farbtemperatur der Lampe herabgesetzt. Damit verbunden ist eine Verminderung der kurzwelligen, d.h. der besonders schädigenden Strahlungsanteile. Durch Dimmen von Glühlampen - gleichbedeutend mit einer Verringerung der Farbtemperatur - kann das Schädigungspotenzial herabgesetzt werden.

In dem Beispiel nach Abschnitt 2.4.3.2 soll die Gefahr von Schädigungen an dem Wandteppich durch Dimmen von Glühlampen vermindert werden. Die Allgebrauchsglühlampen mit einer Farbtemperatur von 2.850 K im Normalbetrieb sollen auf 2.500 K hinuntergedimmt werden. Es ist nicht zu empfehlen, die Lampen weiter zu dimmen, weil dann das Licht zu rotstichig wird und die Farben des Wandteppichs verzerrt wiedergegeben werden. Die Beleuchtungsstärke von 200 lx soll durch das Dimmen nicht reduziert werden, um die Erkennbarkeit nicht zu beeinträchtigen. Dies kann durch zusätzliche Leuchten erreicht werden.

Konservatorische Daten:

- Schwellenbestrahlung für Textilmaterialien unverändert: $H_{S, dm} = 290 \text{ Wh/m}^2$
- Schädigungspotenzial P_{dm} für Glühlampen ohne Filter bei 2.500 K: $P_{dm} = 0,181 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{lx}$

Berechnung der Schwellenbestrahlungsdauer:

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{290.000 \text{ mWh}}{m^2}}{\frac{0,181 \text{ mW}}{m^2 \cdot lx} \cdot 200 \text{ lx}}$$

$$t_s = 17.470 \text{ h} \quad (42)$$

Gegenüber ungedimmten Lampen (vgl. Abschnitt 2.4.3.2) kann die Schwellenbestrahlungsdauer um ungefähr 1.070 h verlängert werden. Bei unveränderten Ausstellungsbedingungen (Exposition von je 8 h an 6 Tagen in der Woche, d.h. 50 h/Woche) kann bei gedimmten Glühlampen der Teppich 160 Wochen (über 3 Jahre) ausgestellt werden, ohne dass sichtbare Schädigungen zu erwarten sind.

Diese Schwellenbestrahlungszeit kann durch Absenken der Beleuchtungsstärke und durch zusätzliche Filter weiter verlängert werden.

2.4.3.8 Verwendung von Bildverglasungen

Bildverglasungen dienen hauptsächlich dem Schutz der Bilder, Graphiken oder Zeichnungen vor Verschmutzung und Beschädigung. Durch geeignete Gläser können die Exponate auch wirkungsvoll gegen Schädigungen infolge optischer Strahlung geschützt werden.

Als Beispiel soll eine Ausstellung von Aquarellen dienen, die mit einfachem Floatglas 3 mm verglast sind und durch Halogenglühlampen mit einer Farbtemperatur von 3.000 K mit 200 lx beleuchtet werden.

Konservatorische Daten:

- Schwellenbestrahlung für Aquarell: 175 Wh/m²
- Schädigungspotenzial bei Glühlampen 3.000 K mit Verglasung durch Floatglas 3 mm: P_{dm} = 0,220
- Beleuchtungsstärke: 200 lx

Berechnung der Schwellenbestrahlungsdauer:

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{175.000 \text{ mWh}}{m^2}}{\frac{0,220 \text{ mW}}{m^2 \cdot lx} \cdot 200 \text{ lx}}$$

$$t_s = 3.977 \text{ h} \quad (43)$$

Mit den bisher angenommenen Ausstellungsbedingungen von 50 h/Woche Expositionszeit ergibt sich eine kritische Bestrahlungsdauer ohne die Gefahr sichtbarer Schädigungen von knapp 80 Wochen (1,5 Jahre).

Durch Verglasung mit einem speziellen UV-Schutzglas mit eingelegter UV-Schutzfolie, durch welches 98% der UV-Strahlung absorbiert werden, z.B. MIROGARD Protect, kann die Schwellenbestrahlungsdauer verlängert werden.

Konservatorische Daten:

- Schädigungspotenzial bei Glühlampen 3.000 K bei MIROGARD Protect: $P_{dm} = 0,196 \text{ mW/m}^2\cdot\text{lx}$
- Übrige Daten wie vorhergehend

Berechnung der Schwellenbestrahlungsdauer:

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{175.000 \text{ mWh}}{\text{m}^2}}{\frac{0,196 \text{ mW}}{\text{m}^2\cdot\text{lx}} \cdot 200 \text{ lx}}$$

$$t_s = 4.464 \text{ h} \quad (44)$$

Durch die hochwertige Bildverglasung lässt sich die Schwellenbestrahlungsdauer um knapp 500 h steigern. Es wird unter den oben angenommenen Ausstellungsbedingungen eine ungefähre Expositionszeit von fast 90 Wochen (1,7 Jahre) erreicht.

Ein Vergleich mit den anderen untersuchten konservatorischen Maßnahmen zeigt, dass aufwändige und teure Bildverglasungen die Schwellenbestrahlungsdauer nur in begrenztem Maß verlängern können.

<i>Verwandte Lichtart</i>	<i>Verlängerung von t_s um</i>
Weniger schädliche Lichtquellen (Abschnitt 2.4.3.4)	900 h
Einfache Filter (Abschnitt 2.4.3.5)	1.250 h
Dichroitische Filter (Abschnitt 2.4.3.5)	1.850 h
Weniger schädliche Lichtquellen mit einfachen Filtern bei halbiertes Beleuchtungsstärke (Abschnitt 2.4.3.6)	10.500 h

2.4.3.9 Gleichzeitige Beleuchtung durch mehrere Lichtquellen

In vielen Fällen werden die Exponate in Museen durch zwei oder mehr Arten von Lichtquellen gleichzeitig beleuchtet, z. B. durch Tageslicht und künstliches Licht oder durch eine Grundbeleuchtung mit Leuchtstofflampen und eine zusätzliche Anstrahlungsbeleuchtung mit Halogenleuchtstofflampen.

Ausstellungssituation: In einem historischen Gebäude mit Seitenfenstern wird eine Sammlung von Aquarellen gezeigt. Zum Schutz der empfindlichen Exponate vor zu hellem Tageslicht wird durch lichtdurchscheinende Vorhänge und durch geregelte Jalousien die Beleuchtungsstärke an den Wänden auf einen örtlichen und zeitlichen Mittelwert von 200 lx konstant gehalten. Während der Öffnungszeiten der Ausstellung werden die Räume zusätzlich diffus durch freistrahrende Leuchtstofflampen oberhalb einer abgehängten Decke aus lichtdurchlässigem Gewebe gleichmäßig mit einer mittleren Wandbeleuchtungsstärke von 100 lx ausgeleuchtet. Die textile Decke hat einen farbneutralen, d.h. wellenlängenunabhängigen Transmissionsgrad und dient nur der Streuung und Schwächung des Lichts. Dasselbe gilt für das Gewebe der Vorhänge. Es werden Leuchtstofflampen Warmweiß DE LUXE, Lichtart 32-930 verwendet, die tageslichtabhängig geregelt werden.

Konservatorische Daten:

- Tägliche Einwirkung des Tageslichts mit $E_1 = 200 \text{ lx}$ im Monatsmittel 10 h/d, berechnet aus den mittleren Tageslichtquotienten an den Wänden und den meteorologischen Tageslichtdaten nach DIN 5034, Teil 2 [15]

- Sicherheitsverglasung der Fenster nach Widerstandsklasse B 1: Schädigungspotenzial $P_{dm1} = 0,333$ $mW/m^2 \cdot lx$
- Mittlere Beleuchtungsstärke durch künstliches Licht: $E_2 = 100$ lx
- Öffnungszeit, d.h. auch tägliche Bestrahlungszeit durch künstliche Beleuchtung: 8 h/d
- Schädigungspotenzial des Leuchtstofflampenlichts, Lichtart 32-930: $P_{dm2} = 0,229$
- Schwellenbestrahlung für Aquarellfarben nach Tabelle 2.1 in Abschnitt 2.3.2: $H_{S, dm} = 175$ Wh/m^2

Nach Gleichung (28) in Abschnitt 2.3.2 addieren sich die durch die beiden Lichtarten hervorgerufenen schädigenden Bestrahlungen:

$$H_{dm} = H_{dm1} + H_{dm2} = E_{dm1} \cdot t_1 + E_{dm2} \cdot t_2 \quad (45)$$

Mit der Definition des Schädigungspotenzials nach (32) in Abschnitt 2.3.3 ergibt sich für die gesamte Bestrahlung:

$$H_{dm} = P_{dm1} \cdot E_1 \cdot t_1 + P_{dm2} \cdot E_2 \cdot t_2$$

Tägliche Bestrahlung:

$$H_{dm} = \frac{0,333 \text{ mW}}{m^2 \cdot lx} \cdot 200 \text{ lx} \cdot 10 \frac{h}{d} + 0,229 \frac{\text{mW}}{m^2 \cdot lx} \cdot 100 \text{ lx} \cdot 8 \frac{h}{d}$$

$$H_{dm} = 660 \frac{\text{mWh}}{m^2 \cdot d} + 183,2 \frac{\text{mWh}}{m^2 \cdot d}$$

$$H_{dm} = 0,843 \frac{\text{Wh}}{m^2 \cdot d} \quad (46)$$

Die Aquarelle werden täglich mit einer schädigenden Bestrahlung von insgesamt etwa 0,84 $Wh/m^2 \cdot d$ belastet.

Die Schwellenbestrahlungsdauer ergibt sich durch Vergleich dieser Bestrahlung mit der Schwellenbestrahlung $H_{S, dm}$ für Aquarellfarben auf Papier. Es ist zu berechnen, in wieviel Tagen mit einer schädigenden Bestrahlung von je 0,84 $Wh/m^2 \cdot d$ die Schwellenbestrahlung $H_{S, dm} = 175$ Wh/m^2 erreicht wird:

$$t_s = \frac{H_{S, dm}}{H_{dm}} = \frac{175 \frac{\text{Wh}}{m^2}}{0,843 \frac{\text{Wh}}{m^2 \cdot d}}$$

$$t_s = 208 \text{ Tage} \quad (47)$$

Bei einer Schwellenbestrahlungsdauer von etwas mehr als 200 Tagen und 6 Öffnungstagen in der Woche können die Aquarelle nur 34 Wochen unter den oben gegebenen Bedingungen gezeigt werden, wenn man Schädigungen mit sehr großer Wahrscheinlichkeit ausschließen will.

Zum Schutz der Exponate sind also zusätzliche konservatorische Maßnahmen sowohl beim Tageslicht als auch bei der künstlichen Beleuchtung zu empfehlen. Dabei ist das Tageslicht vorrangig zu behandeln, da es zu mehr als drei Viertel zur gesamten wirksamen Schädigung beiträgt (vgl. Berechnung (33)).

Mögliche Maßnahmen beim Tageslicht:

- Ausschluss des Tageslichts außerhalb der Öffnungszeiten der Ausstellung mit Hilfe von zusätzlichen lichtundurchlässigen Vorhängen oder Rollos
- Beschränkung der Bestrahlungszeit durch Tageslicht auf die Öffnungszeiten der Ausstellung: unter Berücksichtigung dunkler Tage im Winter
- mittlere Bestrahlungszeit 7 h
- Reduzierung der Beleuchtungsstärke durch Tageslicht auf 100 lx mit Hilfe einer zusätzlichen Graufolie mit einem Transmissionsgrad von 50 % auf der Fensterverglasung

Maßnahmen bei künstlicher Beleuchtung:

Umkleidung der Lampen mit UV-Schutzfolie SALEDATA, Schädigungspotenzial

$$P_{dm2} = 0,168 \text{ mW/m}^2 \cdot \text{lx}$$

Aus visuellen Gründen soll das Beleuchtungsniveau nicht abgesenkt werden.

$$H_{dm} = P_{dm1} \cdot E_1 \cdot t_1 + P_{dm2} \cdot E_2 \cdot t_2$$

$$H_{dm} = 0,333 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 100 \text{ lx} \cdot 7 \text{ h} + 0,168 \frac{\text{mW}}{\text{m}^2 \cdot \text{lx}} \cdot 100 \text{ lx} \cdot 8 \text{ h}$$

$$H_{dm} = 238,7 \frac{\text{mWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} + 134,4 \frac{\text{mWh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}$$

$$H_{dm} = 0,3731 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}} \quad (48)$$

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{H_{dm}} = \frac{175 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2}}{0,3731 \frac{\text{Wh}}{\text{m}^2 \cdot \text{d}}}$$

$$t_s = 469 \text{ Tage} \quad (49)$$

Durch die konservatorischen Maßnahmen wird die Schwellenbestrahlungsdauer mehr als verdoppelt, hauptsächlich bewirkt durch eine Verminderung der schädigenden Bestrahlungsstärke und Bestrahlungszeit des Tageslichts auf fast ein Drittel.

Unter den verbesserten Bedingungen können die Aquarelle jetzt 79 Wochen (1,5 Jahre) ohne zu erwartende Schädigungen ausgestellt werden.

2.4.3.10 Konservatorische Maßnahmen bei Papieren geringer Qualität

Prinzipiell unterscheiden sich die Maßnahmen, die bei Zeitungspapieren, z.B. als Teil von Kollagen, oder bei Arbeiten auf Papier geringer Qualität, z.B. häufig bei Zeichnungen von Bildhauern, nicht von denen für Aquarelle, textile Materialien oder Ölbilder.

Der wesentliche Unterschied besteht in der extremen Empfindlichkeit dieser Papiere gegen kurzwellige Strahlung mit einer Schwellenbestrahlung von nur 5 Wh/m² (vgl. Tab. 2.1, Abschnitt 2.3.2) und in der spektralen Objektempfindlichkeit mit einem steileren Abfall mit zunehmender Wellenlänge. Das bedeutet, dass sich Maßnahmen zur Reduzierung der kurzwelligen Strahlungsanteile stärker als bei anderen Materialien auswirken werden, dass sich aber trotz relativ niedriger Schädigungspotenziale nur geringe Schwellenbestrahlungszeiten ergeben.

Als Beispiel möge eine Ausstellung von Bildhauerzeichnungen auf sehr einfachen Papieren dienen, die zudem wegen der großen Formate teilweise unverglast aufgehängt sind. Die Beleuchtung erfolgt mit Standard-Halogenglühlampen QT 12 mit einer reduzierten Beleuchtungsstärke von 100 lx.

Berechnung der Schwellenbestrahlungsdauer:

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{5.000 \text{ Wh}}{m^2}}{\frac{0,026 \text{ mW}}{m^2 \cdot lx} \cdot 100 \text{ lx}}$$

$$t_s = 1.923 \text{ h} \quad (50)$$

Mit den hier angenommenen Ausstellungsbedingungen einer Expositionszeit von 50 h/Woche ergibt sich eine ungefährdete Ausstellungszeit von 38 Wochen (fast 0,75 Jahre).

Da dieser Zeitrahmen für eine Dauerausstellung nicht ausreicht, sind konservatorische Maßnahmen erforderlich, z.B. eine Filterung mit Glaskeramik-Filtern ROBAX / 5 mm und Verminderung des Schädigungspotenzials auf $P_{dm} = 0,0025 \text{ mW/m}^2 \cdot lx$; die übrigen Daten bleiben unverändert.

Berechnung der Schwellenbestrahlungsdauer:

$$t_s = \frac{H_{s, dm}}{P_{dm} \cdot E}$$

$$t_s = \frac{\frac{5000 \text{ Wh}}{m^2}}{\frac{0,0025 \text{ mW}}{m^2 \cdot lx} \cdot 100 \text{ lx}}$$

$$t_s = 20.000 \text{ h} \quad (51)$$

Die Schwellenbestrahlungsdauer kann auf 20.000 h erhöht werden, entsprechend 400 Wochen zu je 50 h Ausstellungszeit (über 7,5 Jahre).

Unter der Voraussetzung, dass die spektrale Objektempfindlichkeit tatsächlich dem experimentell ermittelten Verlauf mit einer Abnahme nach Null noch im sichtbaren Spektralbereich bei ~450 nm Wellenlänge folgt, können bei Zeitungspapier und ähnlichen Papieren durch einfache Maßnahmen sehr gute konservatorische Ergebnisse erzielt werden.

2.4.3.11 Aufeinander folgende Beleuchtungssituationen

Verschiedene Beleuchtungssituationen folgen auch zeitlich aufeinander, z.B. im Falle einer Wanderausstellung, deren Exponate nacheinander unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen gezeigt werden. Konservatorisch ist es unerheblich, ob schädigende Bestrahlungen gleichzeitig oder nacheinander auf ein Exponat wirken.

In beiden Fällen werden die einzelnen Bestrahlungen H_{dm1} , H_{dm2} usw. aufsummiert und daraus wie in Abschnitt 2.4.3.9 die resultierende Schwellenbestrahlungsdauer berechnet.

3. Normen- und Literaturverzeichnis

- [1] DIN 5033, Teil 3, Farbmessung, Farbmaßzahlen, 1991
- [2] DIN 6174, Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der CIELAB-Formel, 1979
- [3] DIN 54000, Prüfung der Lichtechtheit von Textilien, Grundlagen für die Festlegung und Durchführung der Prüfung und für die Bewertung der Prüfungsergebnisse, 1969
- [4] DIN 54001, Prüfung der Farbechtheit von Textilien, Herstellung und Handhabung des Graumaßstabes zur Bewertung der Änderung der Farbe, 1988
- [5] DIN 6167, Beschreibung der Vergilbung von nahezu weißem oder nahezu farblosem Material, 1985
- [6] G. S. Hilbert; Sammlungsgut in Sicherheit, Berliner Schriften zur Museumskunde, Band 1, Gebr. Mann Verlag, Berlin, 1996
- [7] S. Aydinli; Museumsbeleuchtung: Was bringt die Filterung des kurzwelligen Strahlungsanteils? Tagungsberichte der 10. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz, LICHT 92, Saarbrücken 14.-17.9.1992, S. 384-398
- [8] S. Aydinli, W. Prah, G. Roessler, G. Schröder; Museumsbeleuchtung unter konservatorischem Aspekt: Zulässige Bestrahlungszeiten mit verschiedenen Lichtquellen und Filtern, Tagungsberichte der 11. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Deutschlands, der Niederlande, Österreichs und der Schweiz, LICHT 94, Interlaken, 14.-16.9.1994, S. 550-557
- [9] S. Aydinli, G.S. Hilbert, J. Krochmann; Über die Gefährdung von Ausstellungsgegenständen durch optische Strahlung, LICHTFORSCHUNG 5 (1983), H. 1, 35-47
- [10] S. Aydinli, E. Krochmann, G.S. Hilbert, J. Krochmann; On the Detoriation of Exhibited Museum Objects by Optical Radiation, CIE-Publication No. 89, Technical Collection 1990/3, S. 25-36
- [11] W. Prah, G. Roessler; Ermittlung minimaler Schädigungspotentiale für die Beleuchtung von Exponaten in Museen und deren praktische Umsetzung, Tagungsband der 13. Gemeinschaftstagung der Lichttechnischen Gesellschaften Österreichs, Deutschlands, der Niederlande und der Schweiz, LICHT 98, Bregenz, 16.-18.9.1998, S. 389-299
- [12] G.S. Hilbert, S. Aydinli; Zur Beleuchtung musealer Exponate unter Beachtung neuerer konservatorischer Erkenntnisse, LICHT 43 (1991), 566-577
- [13] G.S. Hilbert, S. Aydinli, J. Krochmann; Zur Beleuchtung musealer Exponate, RESTAURO 97 (1991), H. 5, 313-321
- [14] DIN 58 191, „Optische Strahlungsfiler“, Teil 2: Begriff, Kurzbeschreibung und Beschriftung von Kantenfiltern, Mai 1982
- [15] DIN 5034, „Tageslicht in Innenräumen“, Teil 2: Grundlagen, Februar 1985