

# Die Bedeutung der Raumberechnungen für das Zeigen und Schützen

## Ausstellungsbeleuchtung aus Sicht der Lichtplanung

Paul Walter Schmits

Bei der Beleuchtung von Kulturgut stehen in der Regel die Lichtquellen, Lampen, Leuchten und das Tageslicht im Zentrum der Aufmerksamkeit. Es wird in diesem Beitrag untersucht, inwieweit auch das an den Raumberechnungen reflektierte Licht unter beleuchtungstechnischen wie konservatorischen Aspekten relevant ist. Darüber hinaus werden grundsätzliche Hinweise aus Sicht der Lichtplanung zum Sehen und Schützen von Sammlungen in Ausstellungen vorgestellt.

*The importance of room surfaces for showing and protecting. Exhibition lighting from the perspective of lighting concepts*

*When it comes to the lighting of cultural assets, attention is usually focused on light sources, lamps, luminaires and daylight.*

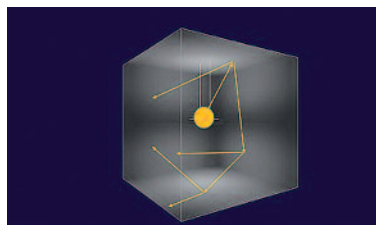
*This review examines the extent to which the light reflected from the room surfaces is also relevant in terms of lighting and conservation aspects. In addition, basic information from the perspective of lighting concepts for seeing and protecting collections in exhibitions is presented.*

### Indirektes Licht und sein Anteil an der Beleuchtung

Zur Beschreibung und Bewertung von Licht wird häufig die Beleuchtungsstärke herangezogen. Die Beleuchtungsstärke ist eine lichttechnische Größe, die als Lichtleistung (Lichtstrom) pro beleuchteter Fläche definiert ist und in Lux (lx) gemessen wird. Eine Aussage über die Quelle und den Verlauf des Lichtes ist dieser Größe nicht zu entnehmen.

Die Abbildung 1 zeigt idealisiert den Verlauf eines beliebigen von einer Lichtquelle ausgehenden Lichtstrahls. Wenn die Raumberechnungen nicht völlig schwarz sind, werden nacheinander mehrere Flächen getroffen. Die Lichtstrahlen werden weiter reflektiert, bis sie sich „totgelaufen“ haben – d. h. bis der letzte reflektierte Lichtanteil vernachlässigbar klein geworden ist (Abb. 1). In den meisten Lichtberechnungen wird vereinfachend angenommen, dass alle Oberflächen völlig diffus reflektieren. Das Verhältnis von dem auf die Fläche auftreffenden zu dem von ihr reflektierten Licht ist als Reflexionsgrad  $p$  definiert.

Auf eine betrachtete Fläche, z. B. auf ein Gemälde, fällt so nicht nur das Licht, das direkt von den Lichtquellen kommt. Zusätzlich wird es auch noch von der Summe des an den Raumberechnungen reflektierten Lichtes beleuchtet. Im Folgenden werden diese beiden Lichtanteile entsprechend als direktes und indirektes Licht bezeichnet.



1  
Idealisierter Verlauf eines von einer zentralen Lichtquelle ausgehenden Lichtstrahls in einem annähernd kubischen Raum mit diffus reflektierenden Oberflächen

Im Fall der resultierenden Beleuchtungsstärke ergibt sich so:

$$E_{\text{ges}} = E_{\text{dir}} + E_{\text{ind}}$$

mit

$E_{\text{ges}}$ : gesamte Beleuchtungsstärke (auf dem Objekt)

$E_{\text{dir}}$ : direkte Beleuchtungsstärke

$E_{\text{ind}}$ : indirekte Beleuchtungsstärke

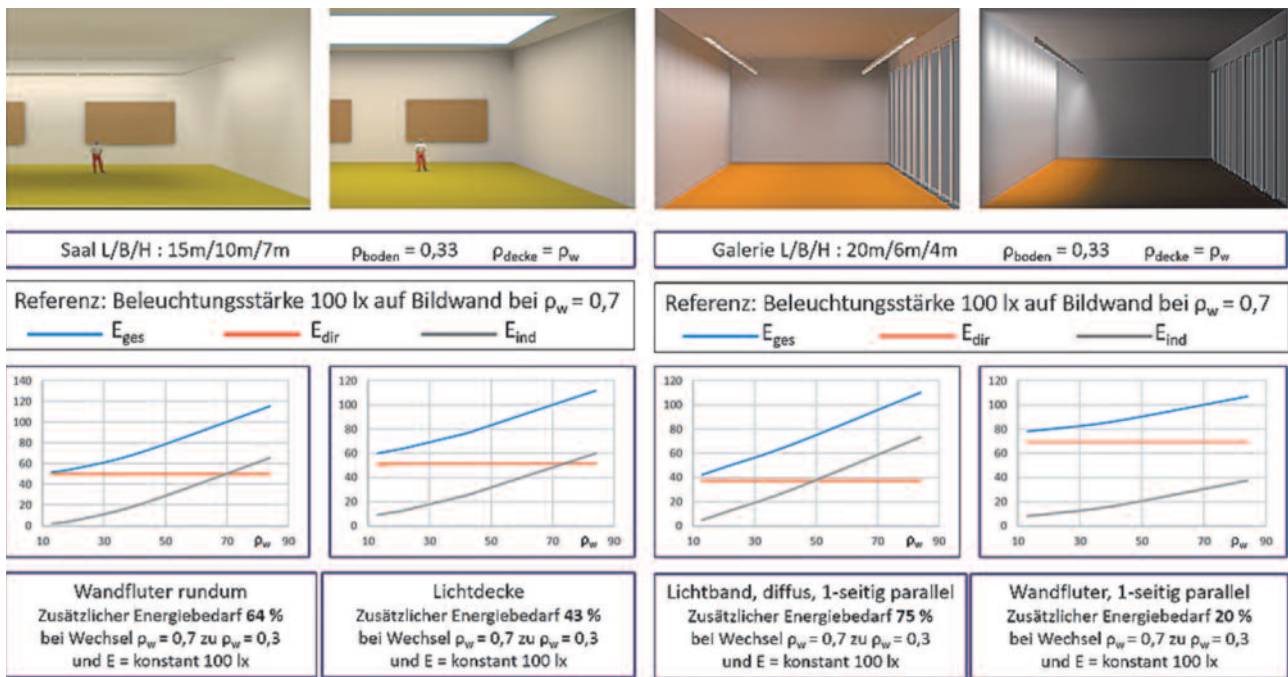
Die meisten in der Lichtplanung genutzten Berechnungsprogramme ermöglichen die getrennte Ausgabe der direkten ( $E_{\text{dir}}$ ) und der gesamten Beleuchtungsstärke  $E_{\text{ges}}$ . Die indirekte Beleuchtungsstärke  $E_{\text{ind}}$  ergibt sich als die Differenz von beiden.

Viele in der Ausstellungsbeleuchtung eingesetzten Leuchten, zum Beispiel Strahler oder Wandfluter, geben das Licht hauptsächlich in eine Vorzugsrichtung ab. Andere hingegen, z. B. Lichtdecken, strahlen gleichmäßig in alle Richtungen.

Die Lichtverteilung der Leuchten sowie die Raumproportionen entscheiden darüber, wie gleichmäßig sich das reflektierte Licht im Raum verteilt. So kann in einem hohen kubischen Raum mit Lichtdecke davon ausgegangen werden, dass auf allen Wänden vergleichbares indirektes Licht landet. In einer langgestreckten Galerie hingegen wird nur ein geringer Anteil des von einem einzelnen Scheinwerfer erzeugten indirekten Lichtes eine weit entfernte Wand zusätzlich aufhellen.

Neben dem Reflexionsverhalten der Raumberechnungen beeinflussen somit die Lichtverteilung und die Raumproportionen das Verhältnis von direktem zu indirektem Licht.

Für zwei Beleuchtungsarten sowie für zwei museumstypische Räume zeigt Tabelle 1 beispielhaft den Einfluss der Wand- und Deckenreflexionsgrade auf die gesamte, direkte und die indirekte Beleuchtungsstärke  $E_{\text{ges}}$ ,  $E_{\text{dir}}$  und  $E_{\text{ind}}$  (Tab. 1). Wird der Reflexionsgrad verkleinert, so bedeutet dies auch immer



Tab. 1  
Einfluss des Wand-Reflexionsgrades  $\rho_w$  auf die Wand-Beleuchtungsstärke und deren direkten und indirekten Anteil, Beispiele mit unterschiedlichen Raumproportionen und Lichtverteilungen (Berechnungen und Visualisierungen mit dem Beleuchtungsplanungsprogramm Relux)

eine Reduzierung des Indirekt-Anteils. Dieser muss durch einen höheren Direkt-Anteil kompensiert werden. Ist eine Zielvorgabe für die Beleuchtungsstärke einzuhalten, z. B. 100 lx, so muss der geringere Indirekt-Anteil durch zusätzliches direktes Licht kompensiert werden. Dies gilt für die gesamte Wandfläche, wenn hohe Gleichmäßigkeit gefordert wird.

Eine Erhöhung der von der Lichtquelle direkt abgestrahlten Beleuchtungsstärke kann aber nur durch eine Erhöhung der Lichtleistung (Lichtstrom) der Lichtquelle erfolgen und hat so auch einen größeren Energiebedarf zur Folge.

Für vier Beispiele ist in der Tabelle 1 die Energieerhöhung beim Wechsel von einem weißen Raum zu einem dunklen Raum bei konstanter Wandbeleuchtungsstärke  $E_{\text{ges}} = 100 \text{ lx}$  angegeben. Als Bezugswert für den weißen Raum wird hierbei ein mittlerer Reflexionsgrad  $\rho$  von 0,7 angenommen. Dies entspricht einer weißen Wand ( $\rho = 0,8$ ), die zu ca. 20 % mit mittelhellen Gemälden ( $\rho = 0,3$ ) behängt ist. Bei dem dunklen Raum wurde für Wand und Gemälde ein mittlerer Reflexionsgrad  $\rho$  von 0,3 angenommen.

Der Wechsel von einer hellen Wand zu einer dunklen wird also im Mittel mit einer Erhöhung des Energieverbrauchs um den Faktor 1,5 erkaufte.

Doch welche Konsequenzen hat der Wechsel für das Seherlebnis?

### Sehen und Adaptieren

Das visuelle Erleben von Hell und Dunkel wird bestimmt durch das auf die Netzhaut projizierte Bild der gesehenen Flächen. Die entsprechende lichttechnische Größe, die das

von einer beleuchteten und selbstleuchtenden Fläche in Richtung des Auges (Empfänger) abgestrahlte Licht beschreibt, ist die Leuchtdichte  $L$  mit der Einheit  $\text{cd/m}^2$ . Wie hell bzw. dunkel ein Detail tatsächlich empfunden/gesehen wird, hängt wesentlich vom Verhältnis der Leuchtdichte dieses Details zu der des Umfeldes ab. So kann das Licht einer Kerze in der Nacht blendend hell erscheinen, während es bei Tageslicht fast unsichtbar ist.

Die Anpassung an unterschiedliche Lichtsituationen wird Adaptation genannt.<sup>1</sup> Diese versetzt den Sehsinn in die Lage, sowohl bei hellem Tageslicht (typische Leuchtdichten zwischen  $2.000 \text{ cd/m}^2$  und  $20.000 \text{ cd/m}^2$ ) als auch bei künstlicher Beleuchtung (typische Leuchtdichten zwischen  $10 \text{ cd/m}^2$  und  $200 \text{ cd/m}^2$ ) visuelle Informationen aufzunehmen und zu verarbeiten. Zur Adaptation liefert die Änderung des Pupillendurchmessers einen, wenn auch nur geringen Beitrag. Der Pupillendurchmesser kann beim Erwachsenen zwischen 2 mm und 8 mm variieren. Hieraus folgt, dass durch Änderung der zugehörigen Pupillengröße nur ungefähr eine Anpassung von einer Zehnerpotenz möglich ist. Hauptsächlich erfolgt die Adaptation über die Veränderung der Empfindlichkeit des Rezeptoren-Systems in der Netzhaut. Dies geschieht durch die Änderung der Sehfärbstoffdichte in den Rezeptoren sowie durch komplexe neurologische Verschaltungen der Rezeptoren und der nachgeordneten Nervenzellen. Während die Änderung des Pupillendurchmessers sehr schnell erfolgt, brauchen die neurologischen Vorgänge bis zu mehreren Minuten – die Adaptationszeit. In Summe führen diese Anpassungsmechanismen zu einer Reihe von Konsequenzen für die Sehleistung unseres Auges. So können wir bei niedriger Adaptationsleuchtdichte weniger Sehdetails sowie geringere Helligkeits- und Farbunterschiede

erkennen. Unsere Fähigkeit, „gut“ zu sehen, nimmt mit sinkender Adaptationsleuchtdichte ab.

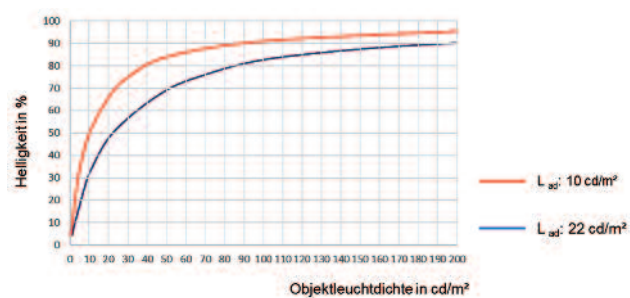
Die Adaptationsleuchtdichte  $L_{ad}$  wird von Schierz durch die mittlere Leuchtdichte in dem Teil des Gesichtsfeldes beschrieben, der einen Bereich von  $\pm 20^\circ$  ausgehend von der Hauptblickrichtung umfasst.<sup>2</sup> Im Museum entspricht dies ungefähr dem Aufmerksamkeitsbereich beim betrachtenden, aber nicht starren Schauen auf ein Exponat.

Immer wenn die Leuchtdichte eines Exponats  $L_{obj}$  eindeutig größer als die Adaptationsleuchtdichte  $L_{ad}$  ist, wird es als „heller“ empfunden; entsprechend wirkt das Exponat „dunkel“, wenn die Exponatleuchtdichte niedriger als die Adaptationsleuchtdichte ist.

Die Leuchtdichte (relativ zur Adaptationsleuchtdichte) ist somit zumindest auf der ersten Stufe des Sehprozesses die lichttechnische Größe, die der empfundenen Helligkeit entspricht. Wie bei vielen anderen Sinnen – z. B. beim Hören – verändert sich auch hier die Empfindung nicht linear mit dem physikalischen Reiz. In einem Bereich von ca. 2–3 Zehnerpotenzen um die Adaptationsleuchtdichte steigt die Helligkeit mit der relativen Leuchtdichte an. Über- oder unterschreiten die relativen Leuchtdichten diesen Bereich, so empfinden wir diese weitgehend undifferenziert als „sehr hell bis strahlend weiß“ bzw. „sehr dunkel bis tiefschwarz“.

Abbildung 2 zeigt diesen Helligkeitsverlauf in 100 % dargestellt über den Logarithmus der relativen Leuchtdichte  $L_{obj}/L_{ad}$  (Abb. 2).

Für zwei unterschiedliche Adaptationsleuchtdichten ist in Abbildung 3 die Helligkeit direkt als Funktion der Leuchtdichte dargestellt (Abb. 3). Hier ist der exponentielle Anstieg der Helligkeit mit der Leuchtdichte gut zu erkennen. Im Bereich nahe der Adaptationsleuchtdichte  $L_{ad}$  führt die Änderung der Exponatleuchtdichte  $L_{obj}$  zu einer differenzierten Helligkeitsempfindung. Sinkt die Leuchtdichte weiter ab, so führt dies zu einem sehr raschen Verdunkeln. Beim Anstieg hingegen geht bereits bei ungefähr der drei- bis vierfachen Leuchtdichte die Hellempfindung in eine Sättigung über.



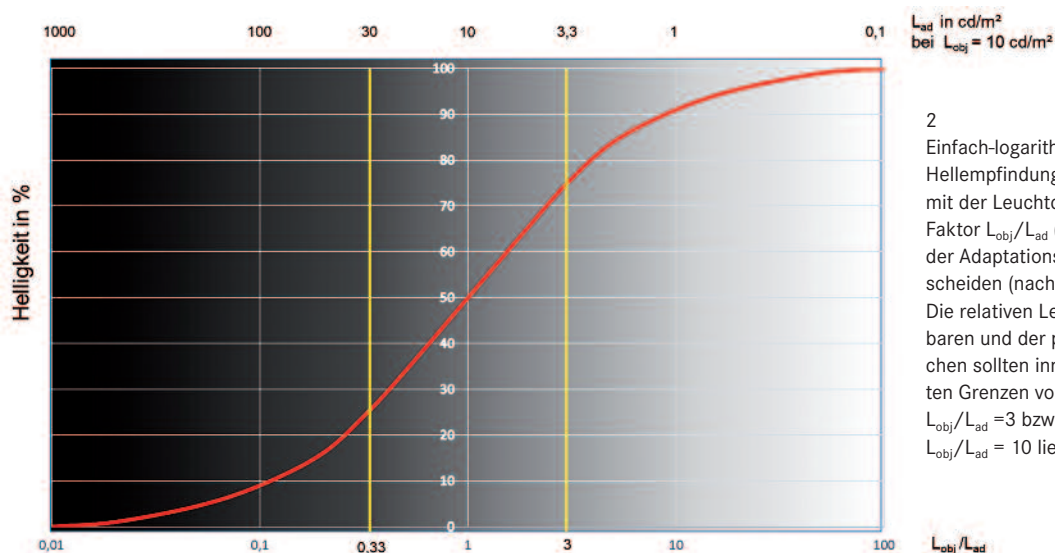
3  
Lineare Darstellung der Hellempfindung bei flächigen Exponaten als Funktion der Leuchtdichte für zwei unterschiedliche Adaptationsleuchtdichten

Wenn die Helligkeiten im Blickbereich sich stärker verändern, wenn also beispielsweise beim Bewegen im Raum sehr helle oder sehr dunkle Flächen im Sehfeld auftauchen, so haben diese natürlich einen Einfluss auf die Adaptation.

In diesem Fall verändert sich die Helligkeitsempfindung bei einer fixen Leuchtdichte  $L_{obj}$  des Exponats in Abhängigkeit von der sich ändernden Adaptationsleuchtdichte  $L_{ad}$ . Für eine konstante Leuchtdichte  $L_{obj}$  von 10 cd/m² ist der Einfluss der Adaptationsleuchtdichte auf die Helligkeitsempfindung im oberen Teil der Abbildung 2 dargestellt.

Bei einer fixen Objektleuchtdichte führen sehr hohe Adaptationsleuchtdichten (in Abb. 2 links) zu einer relativen Hellempfindung, bei der das Objekt zu dunkel für eine differenzierte Betrachtung wird. Entsprechendes gilt auch für sehr niedrige Adaptationsleuchtdichten, wie die relative Dunkeladaptation rechts in Abbildung 2 zeigt, bei der das Objekt unabgestuft hell wird.

In Richtlinien und Empfehlungen der Lichttechnik und der Ergonomie wird daher immer wieder gefordert, die Wechsel der Adaptationsleuchtdichten zu begrenzen, um die mit der Adaptation verbundene Arbeit (auf der Netzhautenebene s. o.) möglichst gering zu halten.



2  
Einfach-logarithmische Darstellung der Hellempfindung bei flächigen Exponaten mit der Leuchtdichte  $L_{obj}$ , die sich um den Faktor  $L_{obj}/L_{ad}$  (relative Leuchtdichte) von der Adaptationsleuchtdichte  $L_{ad}$  unterscheiden (nach BODMANN/VOIT 1962). Die relativen Leuchtdichten der unmittelbaren und der peripheren Umgebungsflächen sollten innerhalb der gelb markierten Grenzen von  $L_{obj}/L_{ad} = 0,33$  bis  $L_{obj}/L_{ad} = 3$  bzw. von  $L_{obj}/L_{ad} = 0,1$  bis  $L_{obj}/L_{ad} = 10$  liegen.

In Veröffentlichungen aus den 1940er Jahren<sup>3</sup> wurde bereits empfohlen, dass die Leuchtdichte des betrachteten Objektes (z. B. Buch oder Gemälde) zwischen einem Drittel und dem Dreifachen der Leuchtdichte des angrenzenden Umfelds (Tisch oder Wand) betragen soll. Für weiter entfernte periphere Flächen kann das Verhältnis auch zwischen 0,1 und 10 betragen.

Darüber hinaus ist allgemein bekannt, dass im Gesichtsfeld die Auffälligkeit von Objekten u. a. von ihrer Leuchtdichte abhängt. Bei gleichzeitigem Angebot von unterschiedlich hellen Flächen im Gesichtsfeld wird der Blick von den helleren angezogen.

Dies kann und sollte Konsequenzen für die Umgebung von musealen Objekten haben, im Besonderen für Gemälde.

### Der Einfluss der Raumbereitungen auf das Sehen

Häufig werden Gemälde auf möglichst gleichmäßig ausgeleuchteten Wänden präsentiert. Eine separate zusätzliche Anstrahlung ist unerwünscht, da diese ungleichmäßige Ausleuchtung als interpretatorischer Eingriff erlebt werden könnte. Wenn also von einer mittleren Wand-Beleuchtungsstärke ausgegangen werden kann, so lässt sich die Betrachtung der Leuchtdichten auch auf die Reflexionsgrade überführen.

Bei der Annahme einer mittleren fixen Wand-Beleuchtungsstärke  $E_w$  und diffuser Reflexionen  $\rho$  ergibt sich die Leuchtdichte der Wand ( $L_w$ ) und auch aller Objekte auf ihr ( $L_{obj}$ ) direkt über den einfachen Zusammenhang mit den zugehörigen Reflexionsgraden ( $\rho_w$  und  $\rho_{obj}$ ):

$$L_{obj} = \rho_{obj} \cdot E_w / \pi$$

bzw.

$$L_w = \rho_w \cdot E_w / \pi$$

Bei konstanter Beleuchtungsstärke  $E_w$  ist somit das Leuchtdichteverhältnis zwischen Objekt und Wand-Umfeld identisch mit dem Verhältnis der zugehörigen Reflexionsgrade:

$$L_{obj}/L_w = \rho_{obj}/\rho_w \quad \text{bei } E = \text{konstant}$$

Das oben empfohlene Verhältnis für die Leuchtdichten von Objekt und Umfeld von zwischen einem Drittel und dem Dreifachen gilt somit auch für das Verhältnis der zugehörigen Reflexionsgrade.

Idealerweise sollte zur Steigerung der Konzentration auf das Objekt dessen Reflexionsgrad ein wenig höher sein als das Umfeld. Dies gilt insbesondere, wenn das Objekt klein ist, d. h. im Vergleich zum Umfeld nur einen geringen Teil des Sehfeldes einnimmt.

Hilbert<sup>4</sup> empfiehlt den mittleren Reflexionsgrad von „hellen“ Gemälden mit  $\rho_{obj} = 0,4$  abzuschätzen und von dunklen mit  $\rho_{obj} = 0,2$ .

Bedenkt man, dass eine reinweiß gestrichene Wand auch nach Alterung einen Reflexionsgrad  $\rho_w$  von ca. 0,8 aufweist,



4  
Jan Obornik, Kopf, HAWK, schattenauffhellender Effekt beim Wechsel der Oberflächenfarbe des nahen Umfelds von Schwarz zu Weiß

so wird klar, dass die oben erwähnte lichttechnische Faustregel nicht für dunkle Gemälde erfüllt werden kann. Und mit Blick auf die Konzentration wird eine weiße Wand auch bei hellen Gemälden keine optimalen Sehbedingungen ermöglichen. Besser wäre ein Umfeld mit einem Reflexionsgrad zwischen  $\rho_w = 0,1$  und  $\rho_w = 0,4$ .

Die Reduzierung des Reflexionsgrades  $\rho_w$  führt zu einer niedrigeren Adaptationsleuchtdichte. Wie bereits in Abbildung 3 gezeigt wurde, liegt die Helligkeitskurve für die niedrigere Adaptationsleuchtdichte (hier:  $L_{ad} = 10 \text{ cd/m}^2$  für  $E = 100 \text{ lx}$  und  $\rho_w = 0,3$ ) für alle Objektleuchtdichten höher als bei der höheren Adaptationsleuchtdichte (hier:  $L_{ad} = 22 \text{ cd/m}^2$  für  $E = 100 \text{ lx}$  und  $\rho_w = 0,7$ ).

Bei kleinformatigen Objekten kann es zu einer weiteren Aufhellung kommen, wenn das unmittelbare Umfeld (zum Beispiel das Passepartout) einen niedrigen Reflexionsgrad aufweist. Hier wirkt dann neben der Änderung der großflächigen Adaptationsleuchtdichten noch zusätzlich eine neuronale Verknüpfung der Rezeptoren in der Netzhaut, die lokal zur Verstärkung der Kontraste führen.

Beide Effekte lassen das Objekt zwar heller wirken, führen aber nicht zu einer größeren Sehleistung mit erhöhter Detailerkennung, Farb- und Leuchtdichtedifferenzierung.

Die Qualität der Betrachtung wird aber in der Summe erhöht, wenn die Objekt-Umgebung ähnliche Reflexionsgrade wie das Objekt aufweist.

Wie bereits in Tabelle 1 gezeigt, kann die Absenkung der mittleren Reflexionsgrade der Wand von  $\rho_w = 0,7$  auf  $\rho_w = 0,3$  zu einer erheblichen Erhöhung des Energiebedarfs für die Beleuchtung führen. Die Entscheidung für die bessere Sehbedingung wird im beschriebenen Fall mit einer Erhöhung des Energiebedarfs für die Beleuchtung erkaufte.

Bei dreidimensionalen Ausstellungsobjekten – z. B. Skulpturen – bestimmt das Verhältnis von gerichtetem zu gestreutem Licht die plastische Erscheinung. Durch das gerichtete Licht – zum Beispiel von Scheinwerfern – entstehen auf dem Objekt



Schatten, die die visuelle Erscheinung und den Ausdruck des Objekts stark beeinflussen können. Das diffus gestreute indirekte Licht hellt diese Schatten merklich auf, ohne wiederum selbst Schatten zu erzeugen. Insbesondere das Reflexionsverhalten der nahen Umgebungsflächen trägt so wesentlich zur Gestaltung bei (s. Abb. 4).

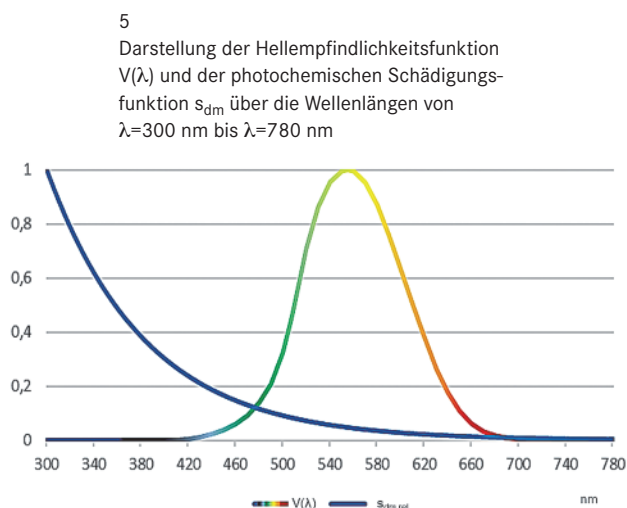
Auch für die Erscheinung des Raums haben Oberflächen eine prägende Wirkung. Durch den geringen Anteil an gestreutem indirektem Licht erhalten Räume mit sehr dunklen Oberflächen aufgrund der Dominanz des gerichteten Lichtes eine theatralische Wirkung. Dies geschieht insbesondere dann, wenn die Lichtquellen nicht großflächig (z. B. Lichtdecke), sondern klein sind (Downlight, Spots) und so sehr harte dramatische Schatten erzeugen. Räume mit hellen Wänden und Decke wirken hingegen immer sehr offen und licht und die Schattenkonturen sind weniger auffällig.

### Das Schädigungspotential als Maß der Licht-Schädigung

Licht ist naturwissenschaftlich definiert als elektromagnetische Strahlung in Wellenlängen zwischen  $\lambda = 380$  nm und  $\lambda = 780$  nm. In diesem Bereich reagiert das menschliche Sehsystem mit einer Helligkeitsempfindung, die abhängig von der Wellenlänge unterschiedlich ausfällt. Um die gleiche Hellempfindung zu erzeugen, wird beispielsweise für kurzwellige Strahlung bei  $\lambda = 450$  nm mehr als 10-mal so viel Strahlungsleistung benötigt wie bei  $\lambda = 550$  nm. In der Gesamtheit wird diese Reiz-Antwort-Beziehung für das Tagessehen durch die Hellempfindlichkeitsfunktion  $V(\lambda)$  beschrieben (s. Abb. 5).

Grundsätzlich können alle strahlungstechnischen Größen über die Wichtung mit  $V(\lambda)$  und die Multiplikation mit dem Proportionalitätsfaktor  $K_m$  in lichttechnische Größen transformiert werden.

Als Beispiel sei die Beleuchtungsstärke  $E$  genannt, die in der Regel als Bezugsgröße für die Beleuchtung einer Objektfläche herangezogen wird – unter anderem, da sie leicht gemessen und berechnet werden kann.



$$E = K_m \cdot \int E_{e,\lambda} \cdot V(\lambda) d\lambda \quad \text{Einheit lx (Lux)}$$

mit

$E$ : Beleuchtungsstärke

$K_m$ : 683 lm/W, Maximalwert des photometrischen Strahlungsäquivalents, dient der Anpassung an die lichttechnischen Einheiten

$E_{e,\lambda}$ : spektrale Bestrahlungsstärke

$V(\lambda)$ : spektrale Hellempfindlichkeit

$\lambda$ : Wellenlänge

Entsprechend der Beleuchtungsstärke, als visuelle Größe für die Beleuchtung, lässt sich mit der relativen spektralen Schädigungsfunktion  $s(\lambda)_{dm,rel}$  für die im Innenraum relevanten Wellenlängen von  $\lambda = 300$  nm bis  $\lambda = 780$  nm aus der spektralen Bestrahlungsstärke  $E_{e,\lambda}$  die schädigende Bestrahlungsstärke  $E_{dm}$  berechnen.

$$E_{dm} = \int E_{e,\lambda} \cdot s(\lambda)_{dm,rel} d\lambda \quad \text{Einheit W/m}^2 \quad (\text{Watt pro Quadratmeter})$$

mit

$E_{dm}$ : schädigende Bestrahlungsstärke

$E_{e,\lambda}$ : spektrale Bestrahlungsstärke

$s(\lambda)_{dm,rel}$ : relativen spektralen Schädigungsfunktion (s. Abb. 5)

$\lambda$ : Wellenlänge

Die Abbildung 5 zeigt die Hellempfindlichkeitsfunktion  $V(\lambda)$  und die relative spektrale Schädigungsfunktion  $s(\lambda)_{dm,rel}$ . Hieraus wird gut ersichtlich, dass ein Beleuchtungsstärkemessgerät schlecht geeignet ist, um die schädigende Wirkung von Licht zu bewerten.

Als guter Marker für die vergleichende Bewertung der Schädigung, insbesondere für die Auswahl der einzusetzenden Lichtquellen, hat sich das von der Internationalen Beleuchtungskommission CIE<sup>5</sup> beschriebene Schädigungspotential  $P_{dm}$  erwiesen:

$$P_{dm} = E_{dm} / E$$

Hierbei wird das Verhältnis der schädigenden Bestrahlungsstärke  $E_{dm}$  zur Beleuchtungsstärke  $E$  gebildet. Bei fixer Beleuchtungsstärke auf dem Exponat – z. B. 100 lx – ist das Schädigungspotential so ein direktes Maß für die zu erwartende Schädigung.

Für die vergleichende Auswahl einer Lichtquelle (Test) wird dessen Schädigungspotential ins Verhältnis zu dem Schädigungspotential einer Referenzlichtquelle (Ref) gesetzt. Dieses Verhältnis wird als relatives Schädigungspotential  $P_{dm,rel}$  oder auch Relative Damage Potential (RDP) bezeichnet:

$$RDP = P_{dm,test} / P_{dm,ref}$$

Da für die Beleuchtung in Museen und Galerien über lange Zeit das Spektrum der Glühlampe als Optimum angesehen und eingesetzt wurde, wird als Referenzlichtquelle die CIE

Tab. 2

Typische Werte des relativen Schädigungspotenzials RDP von Lichtquellen mit und ohne Kantenfilter und Gläsern (nach DIN SPEC 11524:2014-07, überarbeitet)

| Lichtquelle                         | Absorptionskantenfilter |                      |      |      | Glas      |         |                         |
|-------------------------------------|-------------------------|----------------------|------|------|-----------|---------|-------------------------|
|                                     | ohne                    | Filterkante bei (nm) |      |      | Flachglas |         | Verbund-Sicherheitsglas |
|                                     |                         | 380                  | 400  | 420  | einfach   | doppelt |                         |
| Tageslicht (D 65)                   | 2,80                    | 1,85                 | 1,60 | 1,25 | 2,40      | 2,30    | 1,50                    |
| Normlichtart A                      | 1,00                    | 0,90                 | 0,85 | 0,80 | 0,95      |         |                         |
| Leuchtstofflampe 3000 K warmweiß    | 1,05                    | 0,90                 | 0,85 | 0,75 | 1,00      |         |                         |
| Leuchtstofflampe 4000 K neutralweiß | 1,20                    | 1,10                 | 1,05 | 0,90 | 1,15      |         |                         |
| LED 3000 K warmweiß                 | 0,75                    | 0,75                 | 0,75 | 0,75 | 0,75      |         |                         |
| LED 4000 K neutralweiß              | 0,95                    | 0,95                 | 0,95 | 0,90 | 0,95      |         |                         |
| LED 5000 K kaltweiß                 | 1,05                    | 1,05                 | 1,05 | 1,05 | 1,05      |         |                         |

Tab. 3

Grenzwerte der Belichtung für Material-Kategorien gemäß CIE Publikation 157:2004

| Material-Kategorien gemäß CIE Publikation 157 | Grenzwert der Belichtung* |
|---|---------------------------|
| 1. Unempfindlich                              | unbegrenzt                |
| 2. Geringe Empfindlichkeit                    | 600 000 lx·h pro Jahr     |
| 3. Mittlere Empfindlichkeit                   | 150 000 lx·h pro Jahr     |
| 4. Hohe Empfindlichkeit                       | 15 000 lx·h pro Jahr      |

\* Die entsprechende Grenzbeleuchtungsstärke wird durch die Division durch die jährliche Betriebsdauer ermittelt. Z.B.: 600 000 lx·h entspricht 200 lx bei 3000 h oder 400 lx bei 1500 h.

Normlichtart A (Glühlampe mit der ähnlichsten Farbtemperatur 2856 K) festgelegt.<sup>6</sup>

Tabelle 2 zeigt typische relative Schädigungspotentiale (RDP) für im Museum gebräuchliche Lichtquellen mit und ohne Filterung (Tab. 2).

Um für die Schädigung durch Licht vergleichbare Grenzwerte festzulegen, geben die CIE-Empfehlungen die zulässige jährliche Belichtung für vier Material-Kategorien an (s. Tab. 3).<sup>7</sup> Die von der CIE angegebenen Grenzwerte basieren auf Erfahrungswerten aus der Zeit der Glühlampenbeleuchtung. Es ist in manchen Fällen sinnvoll, diese mit dem relativen Schädigungspotential an die aktuellen Lichtquellen anzupassen. Hierzu wird der Grenzwert der Belichtung durch das relative Schädigungspotential dividiert.

Ist der Wert des relativen Schädigungspotenzials größer als 1 (wie zum Beispiel bei den Tageslichtoptionen), bedeutet dies, dass die zu erwartende Schädigung größer ist als bei der Glühlampenbeleuchtung. Eine entsprechende Reduzie-

rung des Belichtungs-Grenzwertes ist daher angeraten. Diese kann und sollte durch Verkürzung der Präsentationszeiten, Reduzierung der Beleuchtungsstärke, Schutzfilter oder einer Kombination dieser Maßnahmen umgesetzt werden.

Im Fall, dass der Wert des relativen Schädigungspotenzials kleiner als 1 ist, besteht theoretisch entsprechend die Möglichkeit, den Belichtungs-Grenzwert und somit die Beleuchtungsstärke und/oder die Präsentationszeit entsprechend zu erhöhen.

Tabelle 2 gibt für warmweiße und neutralweiße LEDs solche Werte an. Somit liegt es nahe, zumindest beim Einsatz von warmweißen LEDs (RDP = 0,75) den Belichtungs-Grenzwert durch 0,75 zu dividieren und somit um ein Drittel anzuheben. Für die Material-Kategorien „2. Geringe Empfindlichkeit“ würde dies eine Erhöhung des Belichtungs-Grenzwertes von 600000 lx·h auf 800000 lx·h pro Jahr bedeuten oder entsprechend bei unveränderter Betriebszeit eine Erhöhung der Beleuchtungsstärke von 200 lx auf ca. 270 lx. Allerdings ist zu bedenken, dass die in Tabelle 2 angegebenen Werte typische Werte darstellen.

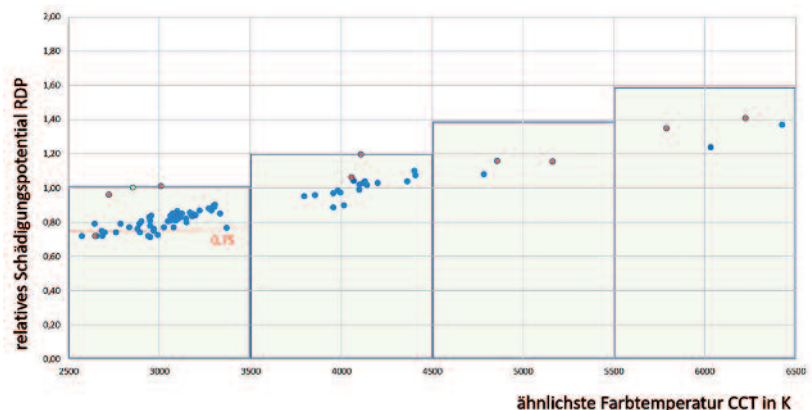
Die Abbildung 6 zeigt für eine Vielzahl von heute gebräuchlichen weißen LEDs das relative Schädigungspotenzial und die zugehörige (gemessene) ähnlichste Farbtemperatur CCT. Die gestrichelte rote Linie steht für das relative Schädigungspotenzial RDP = 0,75 aus Tabelle 2. Sie wird von vielen der warmtonigen LEDs im Bereich der ähnlichsten Farbtemperatur von CCT: 3000 K überschritten. Insbesondere die LEDs, die auf einer blauen LED im UV-nahen Bereich aufgebaut sind

6

Relatives Schädigungspotenzial RDP (Referenz Normlichtart A) und ähnlichste Farbtemperatur CCT für LEDs mit Blau-Spitze bei  $\lambda > 440$  nm (blaue Punkte) und Blau-Spitze bei  $\lambda < 440$  nm (rote Punkte).

Die unterlegten Bereiche zeigen eine Gruppierung in vier Intervalle: für 3000 K  $\pm$  500 K, 4000 K  $\pm$  500 K, 5000 K  $\pm$  500 K und 6000 K  $\pm$  500 K. Ist für eine LED die CCT bekannt, nicht aber die RDP, so wird empfohlen, den zu der CCT-Gruppe zugehörigen RDP-Wert für die Einstufung des Schädigungspotenzials zu nutzen: für die 3000-K-Gruppe RDP = 1, für die 4000-K-Gruppe RDP = 1.2, für die 5000-K-Gruppe RDP = 1.4 und für die 6000 K Gruppe RDP = 1.6.

Quellen der LED-Daten: Messungen an der HAWK, Hildesheim, Rathgen-Forschungslabor, Berlin sowie Angaben der LED Hersteller Seoul Semiconductor, Sora und Xicato.



(rot markiert), haben zumeist ein sehr hohes relatives Schädigungspotenzial (Abb. 6).

Die oben beschriebene Erhöhung des Belichtungs-Grenzwertes bei einem RDP-Wert  $< 1$  sollte daher nur durchgeführt werden, wenn der RDP-Wert für die tatsächlich eingesetzten Lichtquellen bekannt ist.

### Der Einfluss der Raumbooberflächen auf das Schädigungspotenzial

Wie zu Anfang beschrieben, ist das Licht, das ein Exponat erreicht, immer eine Mischung aus dem Licht, das direkt von der Lichtquelle kommt, und dem bereits von einer oder mehreren Raumbooberflächen reflektierten Licht. Entsprechend sollte die Betrachtung des Schädigungspotentials nicht nur auf die Lichtquelle, sondern auf die gesamte auf das Exponat auftreffende Beleuchtung bezogen werden.

Bei Kenntnis der spektralen Verteilungen der Oberflächenreflexion und der Lichtquelle kann sowohl der mit der Hellempfindlichkeitsfunktion  $V(\lambda)$  bewertete visuelle Reflexionsgrad  $\rho$  wie auch ein mit der Schädigungsfunktion  $s(\lambda)_{dm,rel}$  bewerteter Reflexionsgrad  $\rho_{dm}$  berechnet werden.

Der Einfluss des Indirektanteils auf das Schädigungspotential lässt sich mit einem der herkömmlichen Lichtberechnungsprogramme berechnen. Hierzu wird die Berechnung einmal mit den visuellen Reflexionsgraden ( $\rho$ ) und ein zweites Mal mit den „Schädigungs“-Reflexionsgraden ( $\rho_{dm}$ ) durchgeführt. Aus dem Verhältnis der beiden resultierenden Beleuchtungsstärken am Objekt lässt sich ein Korrekturfaktor  $f_{kor,raum}$  bestimmen. Dieser fällt kleiner als 1 aus, wenn insbesondere warmtonige Raumbooberflächen den UV-Anteil und auch den UV-nahen, bläulichen Lichtanteil nicht reflektieren. Mit Korrekturfaktor-Werten größer als 1 kann bei hellen bläulichen Raumfarben gerechnet werden.

Abbildung 7 zeigt beispielhaft für eine Tageslicht-Lichtdecke die Änderung des relativen Schädigungspotential (RDP) durch die Filterung mit diffusem Verbundglas und durch den Einfluss der Raumbooberflächen (Abb. 7).

Für die häufig verwendeten warmweißen LEDs (ca. 3000 K) ist in der Tabelle 4 der typische Einfluss von Raumfarbe, Reflexionsgrad und direkter/indirekter Lichtverteilung auf den mittleren Korrekturfaktor  $f_{kor,raum}$  gezeigt (Tab. 4).

Da die Korrekturfaktoren in den meisten Werten nur relativ wenig vom Wert 1 abweichen, kann der Einfluss des indirekten Lichtanteils auf das Schädigungspotential in vielen Fällen vernachlässigt werden.

### Schlussfolgerungen für die Praxis

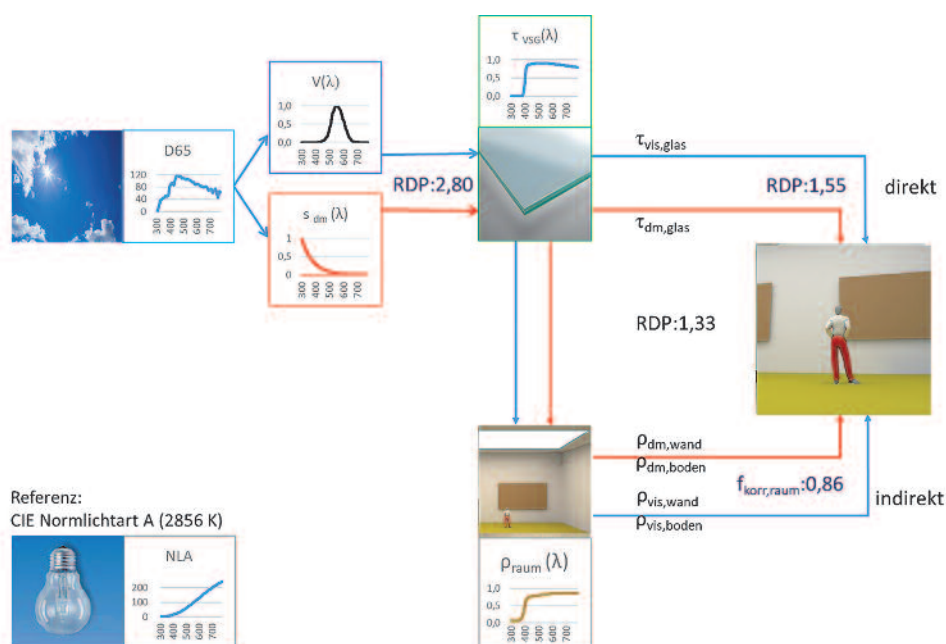
Bei der Beleuchtung von Ausstellungen können die Raumbooberflächen in vielfältiger Weise auf lichttechnische Größen und Qualitätsmerkmale Einfluss nehmen. Im Folgenden werden in einem Überblick Schlussfolgerungen für die Praxis aufgeführt.

#### Einfluss der Raumbooberflächen auf die Lichtverteilung

Räume mit hellen, weißlichen Oberflächen verfügen über einen hohen Anteil von diffusem Streulicht. In Räumen mit farbigen, dunklen Oberflächen dominiert das gerichtete, direkt von der Lichtquelle auf das Exponat abgestrahlte Licht.

#### Einfluss der Raumbooberflächen auf die Raumstimmung

Die Komposition aus gerichtetem direktem Licht und diffus gestreutem indirektem bestimmt die Raumstimmung. Aufgrund des höheren Anteiles an diffusem indirektem Licht wirken weiße Räume weniger dramatisch und inszeniert als dunkle Räume.



7

Prinzipieller Verlauf der Ermittlung des relativen Schädigungspotentials der Gesamtbeleuchtung (direkter und indirekter Anteil) am Beispiel eines Ausstellungssaals mit Tageslicht-Lichtdecke

| mittlerer Raumreflexionsgrad | dominierende Raumfarbe | dir/ind   | Korrekturfaktor $f_{\text{korrraum}}$ |
|------------------------------|------------------------|-----------|---------------------------------------|
| $p > 0,7$                    | rötlich                | 50% / 50% | 0,85                                  |
|                              | grünlich / bläulich    | 50% / 50% | 1,1                                   |
| $0,7 < p < 0,35$             | rötlich                | 80% / 20% | 0,9                                   |
|                              | grünlich / bläulich    | 80% / 20% | 1,1                                   |
| $p < 0,35$                   | rötlich                | 95% / 5%  | 1                                     |
|                              | grünlich / bläulich    | 95% / 5%  | 1                                     |

Tab 4

Typische Korrekturfaktoren  $f_{\text{korrraum}}$  zur Berücksichtigung des Raumeinflusses auf das relative Schädigungspotential für helle, mittelhelle und dunkle Räume unterschiedlicher Oberflächenfarben; Bezugslichtquelle: LED warmweiß (3000 K)

### ***Einfluss der Raumbereitungen auf das visuelle Erleben zweidimensionaler Exponate***

Im Vergleich zu weißen Räumen werden in dunkler Umgebung bei konstant gehaltener Beleuchtungsstärke Gemälde und andere zweidimensionale Exponate als heller empfunden. Nicht verbessert wird die Seheleistung (Detailerkennung und Differenzierung von Farben).

### ***Einfluss der Raumbereitungen auf das visuelle Erleben dreidimensionaler Exponate***

Dreidimensionale Objekte (Skulpturen etc.) werden häufig gezielt mit mehreren Lichtquellen aus unterschiedlichen Richtungen beleuchtet. Der Aspekt der erlebten Helligkeit wird hier primär von der Beleuchtungsstärke auf dem Exponat bestimmt. Der diffus gestreute, indirekte, von den nahen Oberflächen herrührende Lichtanteil hellt mögliche, vom Licht der Strahler erzeugte Schatten auf dem Exponat auf und beeinflusst so das Seherleben und die Inszenierung.

### ***Einfluss der Raumbereitungen auf den Energieverbrauch***

Bei gleicher Beleuchtungsstärke am Exponat muss in dunklen Räumen der geringere indirekte Lichtanteil durch eine Erhöhung des direkten Anteils kompensiert werden. Im Vergleich zu weißen Räumen liegt die notwendige Erhöhung bei ca. 50 %. Ungefähr entsprechend fällt die Erhöhung des Energieverbrauches für die elektrische Beleuchtung aus.

### ***Einfluss der Raumbereitungen auf die photochemische Schädigung***

Bei den aktuell im Museum genutzten warmweißen LEDs ist ein zusätzliches Einbeziehen der Raumbereitungen in die Bewertung des Schädigungspotentials nicht notwendig. Bei Lichtquellen mit UV-Anteilen (z. B. Tageslicht oder Leuchtstofflampen) können hellblaue Raumbereitungen zu einer nicht mehr zu vernachlässigenden Erhöhung des Schädigungspotentials führen.

Prof. Dr.-Ing. Paul W. Schmits

HAWK | Fakultät Gestaltung | Lighting Design

Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst

Hildesheim/Holzwinden/Göttingen

Renatastraße 11

31134 Hildesheim

paul.schmits-reinecke@hawk.de

paul.schmits@t-online.de

### **Anmerkungen**

- 1 Die Adaptation beeinflusst neben der Hellempfindung auch die Farbwahrnehmung. Letzteres wird in diesem Beitrag nicht behandelt.
- 2 SCHIERZ 2016, S. 69–97
- 3 MOON/SPENCER 1945
- 4 HILBERT 2002, S. 71, 72
- 5 CIE 157-2004
- 6 DIN 2014
- 7 CIE 157-2004

### **Literatur**

- BODMANN/VOIT 1962: H. W. Bodmann und E. A. Voit, Versuche zur Beschreibung der Hellempfindung. In: Lichttechnik 14 (1962), Nr. 8, S. 394–400
- CIE 157-2004: International Commission on Illumination, Control of Damage to Museum Objects by Optical Radiation, Wien 2004
- DIN 2014: DIN SPEC 11524: Erhaltung des kulturellen Erbes – Leitlinien und Verfahren für die Auswahl geeigneter Beleuchtung für Innenausstellungen, Berlin 2014
- HILBERT 2002: Günter S. Hilbert, Sammlungsgut in Sicherheit, Berlin 2002
- MOON/SPENCER 1945: Parry Moon und Domina E. Spencer, The Visual Effect of Non-Uniform Surrounds. In: Journal of the Optical Society of America, Vol 35, No 3, 1945, S. 233–248
- SCHIERZ 2016: Christoph Schierz, Physiologische und psychologische Grundlagen. In: Roland Baer et al., Beleuchtungstechnik Grundlagen. Hrsg. Deutsche Lichttechnische Gesellschaft e.V. LiTG, Berlin 2016, S. 69–97

### **Abbildungsnachweis**

Abb. 1–3, 5–7: Paul W. Schmits

Abb. 4: Mark Giesler, HAWK; © VG Bild-Kunst, Bonn 2021

Tab. 1 und 4: Paul W. Schmits

Tab. 2 und 3: basierend auf DIN 2014: DIN SPEC 11524, Überarbeitung: Paul W. Schmits