

licht.wissen 18

Licht für Museen und Ausstellungen



Freier Download auf
www.licht.de





Editorial

Licht als Material, Medium oder Thema von Kunstwerken beschäftigte Generationen von Künstlern und Künstlerinnen in vielfältiger Weise – von Vermeer über Monet bis zu Dan Flavin lassen sich verschiedenste künstlerische Ansätze finden. Und auch zahlreiche kunsthistorische Publikationen sind zu dem Thema „Licht in der Kunst“ veröffentlicht worden. Doch für Museumsdirektoren und Ausstellungskuratoren geht das Interesse an dem Umgang mit Licht meist über eine inhaltliche Auseinandersetzung innerhalb des Kunstwerks hinaus.

So ist auch die Beleuchtung von Kunst stets eine zentrale Frage im Rahmen ihrer Präsentation. Nicht nur unterstützt die Beleuchtung eine gewisse Atmosphäre, sie schafft auch Aufmerksamkeit und lenkt den Blick. Gelingen ist sie meist dann, wenn die Kunst in vollem Glanz erstrahlt, ohne dass der Besucher die Lichtsetzung unmittelbar bemerkt. Hierbei müssen neben ästhetischen Aspekten insbesondere konservatorische Vorgaben beachtet werden. Die Präsentation von Gemälden, Fotografien, Skulpturen oder archäologischen Fundstücken erfordert stets spezifische Lichtkonzepte. Fotografie darf nur mit sehr geringen Luxwerten beleuchtet werden, wohingegen Skulpturen aus verschiedenen Richtungen optimal ausgeleuchtet und damit regelrecht modelliert werden sollten, um ihre volle Wirkung im Raum zu entfalten.

*Um für den Betrachter von Kunst das ganz besondere und auratische Erlebnis perfekt zu inszenieren und die Kunstwerke in den richtigen Fokus zu rücken, muss also individuell und fallspezifisch auf Raumsituation, Medium und Ausstellungsort sowie Thema eingegangen werden. Dies kann eine Herausforderung darstellen, die ganzheitliche und technisch innovative Konzepte verlangt. Die mannigfachen Möglichkeiten, die es in diesem Bereich gibt, aufzuzeigen, hat sich das vorliegende Heft der Reihe *licht.wissen* verschrieben: „Licht für Museen und Ausstellungen“. Ausstellungsmacher, Kuratoren und Lichtplaner finden hier wertvolle Informationen zu der Lichtgestaltung im Museum, den technischen Voraussetzungen und Möglichkeiten. Von vertikaler Wandbeleuchtung über Licht für dreidimensionale Objekte bis zu Beleuchtungen im Außenbereich. Vielseitig einsetzbare LED-Lichtquellen und -werkzeuge werden erklärt und ein effektives, nachhaltig energiebewusstes Lichtmanagement skizziert. Technisch ausgeklügelte Tageslichtsysteme nach konservatorischen Kriterien zum Schutz wertvoller Kunstgegenstände runden das breitgefächerte Themenspektrum ab.*

Ich wünsche Ihnen bei der Lektüre viele erhellende Erkenntnisse und Impulse.


Max Hollein

Direktor Städel Museum, Liebieghaus Skulpturensammlung
und Schirn Kunsthalle Frankfurt

[Titelseite] Einstellbare Strahler mit Vorsatzlinsen akzentuieren Exponate und geben ein spannendes, differenziertes Lichtbild im funktionalen Raum. Städel Museum, Frankfurt am Main.

[01] Deckenlichter betonen die übergroßen Ballons einer omnipräsenten Wandskulptur, die Jung und Alt gleichermaßen fasziniert. Museum GoMA, Brisbane, Australien.



Licht für Architektur
und Außenwirkung
Seite 06



Räume und
Ausstellungszonen
im Museum
Seite 08



Licht im Museum und
Ausstellungsraum
Seite 10



Licht für
Wechselausstellungen
Seite 12



Licht für vertikale
Flächen
Seite 14



Lichtwerkzeuge:
Wandflutung
Seite 16



Lichtwerkzeuge:
Akzentbeleuchtung,
Framing
Seite 18

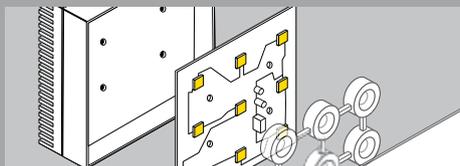


Licht für
dreidimensionale
Objekte
Seite 24



Licht-Spezial

LED-Lichtquellen, Lichtqualität und Wahrnehmung
Seite 20



Konservatorische Aspekte
Seite 28





Licht für Vitrinen
Seite 26



Lichtwerkzeuge:
Lichtdecken
Seite 32



Licht für
Ausstellungen
im Freien
Seite 36



Licht für
Fassaden
Seite 38



Dynamische
Inszenierung,
Lichtkunst
Seite 42



Licht für interaktive
Ausstellungen
Seite 44



Energieeffiziente
Sanierungskonzepte
Seite 46



Schriftenreihe
Impressum
Seite 50



Tageslichtsysteme
Seite 34



Lichtsteuerung
Seite 40



Lichttechnische Grundbegriffe
Seite 48





Licht für Architektur und Außenwirkung

Die internationale Museumslandschaft präsentiert sich enorm vielfältig. So unterschiedlich die Themen und Schwerpunkte der Häuser, so abwechslungsreich sind auch Baustile und architektonische Besonderheiten der Museumsgebäude. Architektur, Größe oder Standort – jedes Museum für sich ist individuell und einzigartig.

Museale Institutionen, die bedeutende Kulturgüter bewahren und präsentieren, unterstreichen ihren künstlerischen Rang gerne durch eine repräsentative Architektur. Sie erreichen damit einen hohen Wiedererkennungswert. Der optimale Einsatz von Kunstlicht unterstützt dabei, die architektonischen Alleinstellungsmerkmale hervorzuheben und das gesamte Gebäude repräsentativ in Szene zu setzen.

Der „Bilbao-Effekt“

Die Aufwertung von Orten durch das Errichten architektonisch herausragender Bauten nennt man den „Bilbao-Effekt“, in Anlehnung an das besonders markante und einzigartige Gebäude des Guggenheim-Museums in der nordspanischen Stadt Bilbao, das nach einem Entwurf des amerikanischen Architekten Frank O. Gehry entstand. Städteplanerisch verwandelte Bilbao mit diesem spektakulären Neubau die Industriebrache eines ehemaligen Hafenviertels in einen Ort kultureller Vielfalt.

Doch nicht nur die Architektur allein sorgt für die gewünschte Aufmerksamkeit, der urbane Lebensraum wird durch Licht gleichfalls aufgewertet und es entstehen Identifikationsobjekte für die Bürger einer Stadt. Durch ganzheitliche Beleuchtungskonzepte lassen sich aus Museumsbauten nächtliche Wahrzeichen erschaffen, deren Wahrnehmung im öffentlichen Raum, zum Beispiel durch temporäre Lichtinstallationen, noch verstärkt werden kann.

Eingangssituation

Der erste Eindruck ist entscheidend. Daher sollte der Eingangsbereich einladend gestaltet und von Weitem als solcher erkennbar sein. Licht spielt dabei atmosphärisch eine wichtige Rolle, weckt das Interesse der Passanten und lädt sie zu einem Besuch des Museums ein.

Hilfreich dabei ist eine klare, lichtgestützte Wegeführung, um Besuchern die Orientierung auf dem Gelände und im Gebäude zu erleichtern. Beleuchtete Skulpturen im Außenraum weisen schon aus der Ferne auf das Museum hin und erweitern die Ausstellung über das Gebäude hinaus.

Architektur im städtischen Kontext

Sollen Museen oder Ausstellungen im städtischen Kontext hervorgehoben werden, ist es essenziell, das Umfeld zu beachten. In einer Kleinstadt mit mittelalterlichem Flair beispielsweise kann gezielt auf die pittoreske alte Steinmauer des Gebäudes ausgerichtetes Streiflicht für die gewünschte Aufmerksamkeit sorgen. In Großstädten hingegen, in denen das Niveau der Lichtreize viel höher ist, sollten maßgeschneiderte Beleuchtungskonzepte entwickelt werden. So könnte vielleicht eine weithin sichtbare vertikale Beleuchtung die Blicke auf sich ziehen.

Außenwirkung durch Glasfassaden

Glaselemente lassen zum einen viel Tageslicht in das Gebäude und sorgen zum anderen für Leichtigkeit und Transparenz. Eine Trennung zwischen Innen und Außen wird bei diesem Gestaltungsansatz aufgehoben. Er ermöglicht Blicke von außen ins Innere und motiviert potenziell Interessierte so zu einem Besuch des Museums. Nachts kann die hinter dem Glas vorhandene Fassade beleuchtet werden, was zu eindrucksvollen Durchsichteffekten führt.

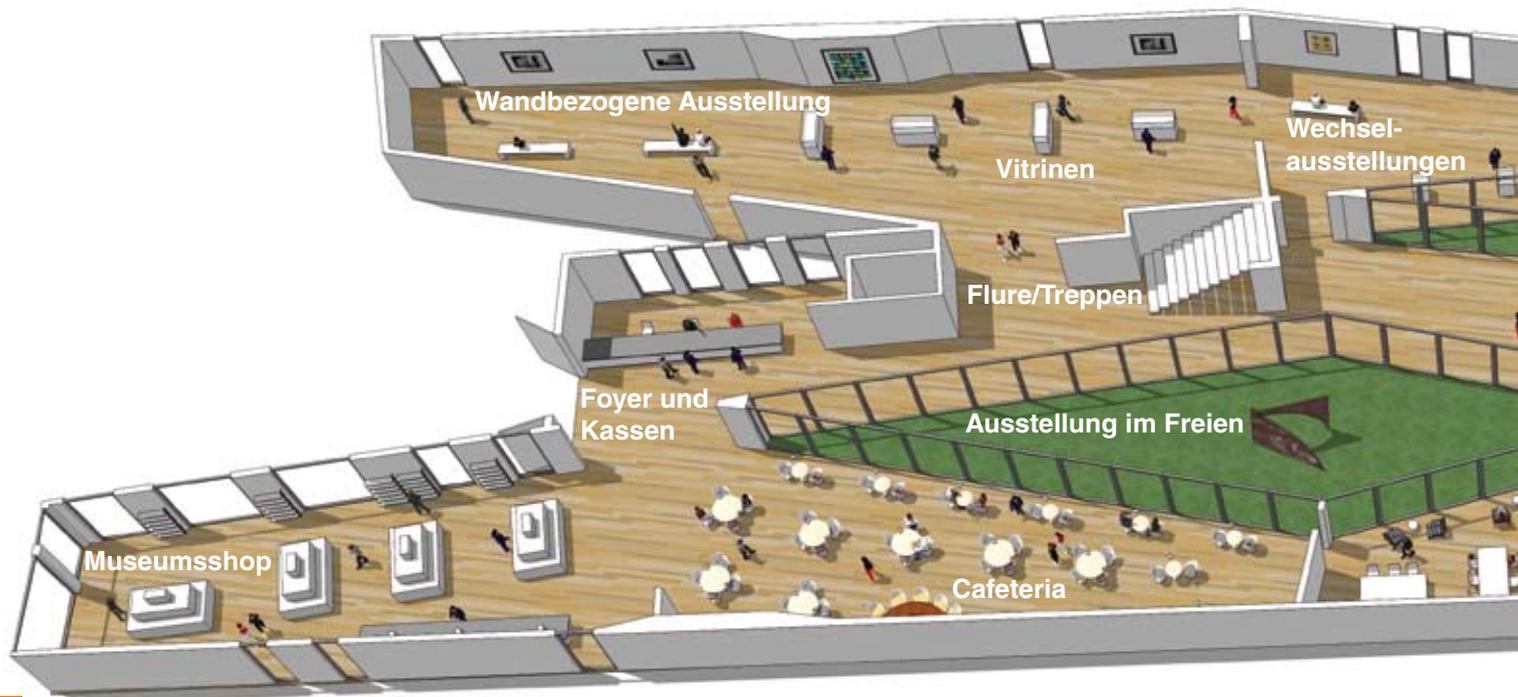
Generell kommunizieren beleuchtete Fassaden dem Besucher ein offenes Haus und wirken schon von Weitem sehr einladend. Durch beleuchtete Plakate oder Fahnen wird diese Geste zusätzlich verstärkt und die Aufmerksamkeit der vorbeilaufenden Passanten geweckt.

[02] Undurchdringlichkeit und Offenheit – der Blick auf die Innenstruktur des Gebäudes durch das große, heller beleuchtete Fenster in der sonst hermetischen Fassade weckt die Neugier der Passanten. Rautenstrauch-Joest Museum, Köln.

[03] Nähert man sich dem Gebäude, führt schon der erste Blick durch die Glasfassade ins Innere. Die Trennung zwischen Innen und Außen wird aufgehoben. Rheinisches Landesmuseum, Bonn.

[04] Der außergewöhnlichen Architektur wird durch die Beleuchtung Leichtigkeit verliehen. Oscar-Niemeyer-Kulturzentrum, Aivilés, Spanien.

[05] Klassizismus trifft Moderne – auch lichtechnisch wird dieser Kontrast durch die gestaltenden Downlights an der Fassade des Neubaus gelungen hervorgehoben. Villa Vauban, Luxemburg.



06

Räume und Ausstellungszonen im Museum

Dauer- oder Wechselausstellung, Vortragsraum oder Museumsshop. Um die Sehaufgaben von Besuchern und Mitarbeitern in den unterschiedlichen Räumen optimal zu unterstützen, sollten auf den jeweiligen Zweck abgestimmte Beleuchtungslösungen entwickelt werden.

Lichtplanung im Museum muss verschiedenste Parameter beachten: Lichtdramaturgie, ergonomische und konservatorische Aspekte, Richtlinien und Normen und vieles mehr. Dieses Kapitel reißt wesentliche Planungsbereiche und Hauptaspekte der jeweiligen Lichtsituationen kurz an. Die Folgekapitel spezifizieren die einzelnen Museumsbereiche und gehen mit passenden Beleuchtungslösungen ins Detail.

Licht im Museums- und Ausstellungsraum
Für Präsentation und Beleuchtung von Kunst gelten besondere Regeln. Um Werke optimal zu inszenieren, müssen viele Aspekte beachtet werden: Ist das Museum ein historisches Gebäude oder ein tageslichtdurchlässiger Neubau? Gibt es konservatorische Anforderungen? Mit viel Fingerspitzengefühl muss ein Gesamtbeleuchtungskonzept erstellt werden, das verfügbare Lichttechnik optimal einsetzt.

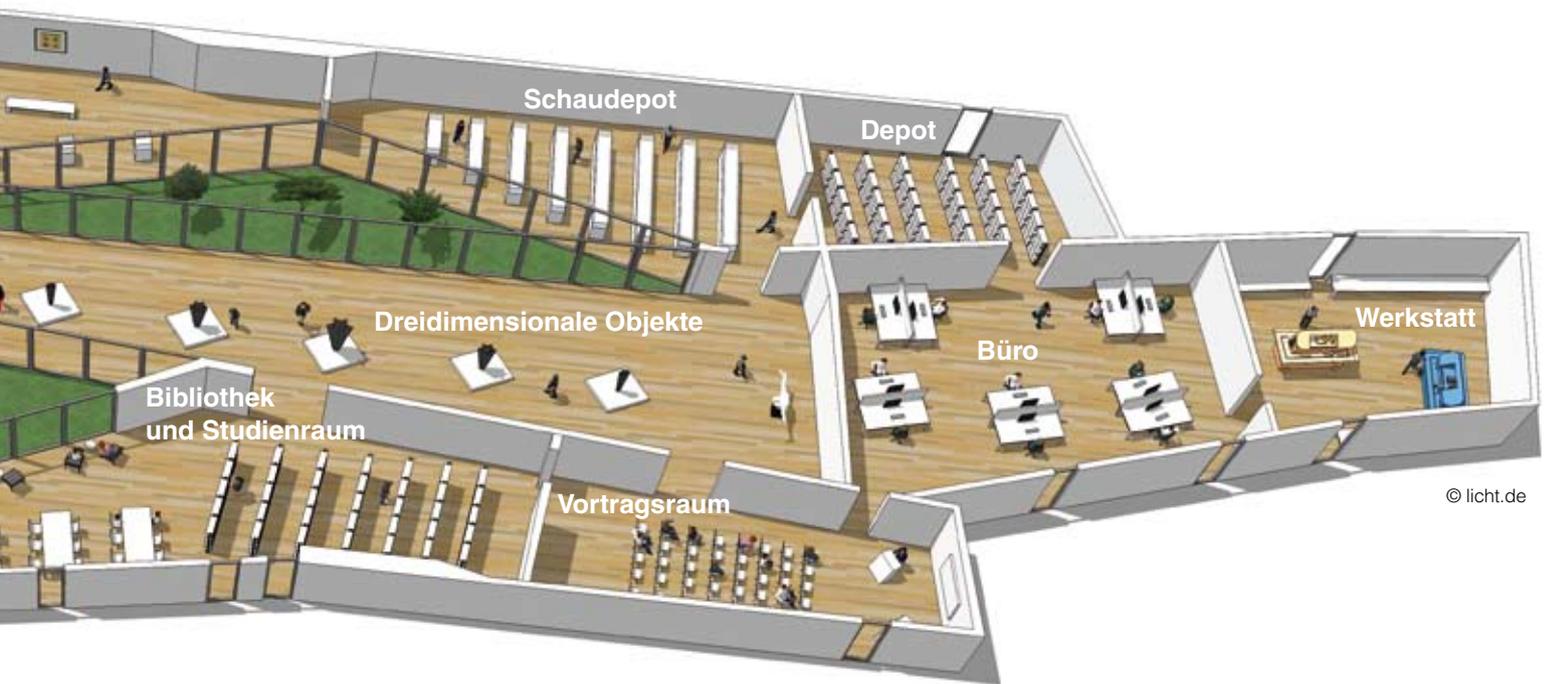
Licht für Wechselausstellungen
Temporäre Ausstellungen fördern Attraktivität und Besucherzahlen. Je nach Ausstellungskonzept erfordern sie flexible Beleuchtungslösungen. Gut geeignet für Wechselausstellungsbereiche sind

Stromschienensysteme mit werkzeugfrei adaptierbaren Strahlern oder in die Decke integrierte, kardanische Downlights mit wechselbaren Optiken.

Licht für vertikale Flächen
Neben zurückhaltender, diffuser Wandflutung über Tages- oder Kunstlichtdecken empfiehlt sich hier die Montage flexibel bestückbarer Stromschienen parallel zur Ausstellungswand. Daran adaptiert, ermöglichen flächig oder fokussiert abstrahlende Lichtwerkzeuge Wandflutungen oder kontrastreiche Hell-Dunkel-Zonen. Alternativ können diese Funktionen auch über Einbau-Downlights erzielt werden.

Licht für dreidimensionale Objekte
Skulpturale Werke brauchen raumbezogene Lichtkonzepte. An Wand, Boden oder Decke platzierte Spots und Leuchten für gerichtete Seitenlichter (Modelling) können Brillanz und Dreidimensionalität der Exponate unterstreichen und ihre Materialität betonen. Konservatorische Aspekte sind dabei ebenso zu berücksichtigen wie Blickachsen, Sockelflächen und Wege im Raum. Besucher sollten sich frei bewegen können und nicht geblendet werden.

[06] Grafische Darstellung unterschiedlicher Bereiche in einem Museum. Das Licht muss spezifische Bedürfnisse verschiedenster Personen in den Funktions- und Ausstellungsbereichen erfüllen.



Licht für Vitrinen

Besonders wertvolle oder kleine, empfindliche Objekte werden geschützt in Vitrinen präsentiert. Die Beleuchtung sollte entweder spiegelungsfrei von außen erfolgen oder durch miniaturisierte und einstellbare LED-Leuchten oder Lichthauben blendfrei von innen.

Licht für Ausstellungen im Freien

Archäologische Ausgrabungsstätten, Technikparks oder Skulpturengärten: Lichtstarke Außenraum-Beamer, fest installierte Strahler oder Bodeneinbauleuchten setzen bei Dunkelheit neue Wahrnehmungsakzente. Die Lichtquelle wird dabei immer betrachterabgewandt oder mit Blendenschutzvorrichtungen versehen montiert.

Foyer und Kassen

Eingangsbereiche sind die Visitenkarte des Hauses. Foyers mit architektonisch repräsentativer, harmonischer Lichtatmosphäre signalisieren einen freundlichen Empfang. Nach DIN EN12464-1 mit 500 Lux blendfrei ausgeleuchtete Arbeitsbereiche an Kassen mit Bildschirmen sowie eine lichttechnisch transparente Wegeföhrung zu Ausstellungsräumen, Cafeteria oder Waschräumen garantieren hohe Funktionalität.

Flure und Treppen

DIN EN12464-1 für öffentliche Gebäude bestimmt für „Verkehrswege“ wie Flure und Treppenhäuser mindestens 100 Lux Beleuchtungsstärke auf dem Bodenniveau. Auch Sicherheits- und Rettungszeichen-

leuchten müssen in das ästhetische Zusammenspiel von Architektur und Ausstellungsgeschehen integriert werden.

Vortragsraum

Multifunktionale ausgestattete Veranstaltungsräume benötigen situationsgerechte Lichtszenen. Präsentationsflächen sollten mindestens die 1,5-fache Beleuchtungsstärke des Raumes aufweisen, das heißt, bei einer Raumbeleuchtungsstärke von 500 Lux sollten die Vortrags- und Präsentationsbereiche mit mindestens 750 Lux ausgeleuchtet werden. Konzentrationsfähigkeit, Aufnahmevermögen und Kommunikationsbereitschaft erhöhen sich damit signifikant.

Cafeteria und Museumsshop

Cafeteria und Museumsshop gehören zum Museumserlebnis. Besucher lieben hochwertig ausgestattete Museumscafés und den Erwerb kunstnaher Souvenirs. Downlights oder dekorative, blendfreie Pendelleuchten tragen zu einer angenehmen, anregenden und erholsamen Atmosphäre in der Cafeteria bei. Im Museumsshop werden Bücher und Accessoires mit einem Mix aus direktem und indirektem Licht von Strahlern oder Downlights gut ausgeleuchtet. Das erleichtert die Orientierung und motiviert zum Kauf.

Bibliothek und Studienraum

Die richtige Bibliotheksbeleuchtung schafft Übersicht, hilft beim Auffinden gewünschter Literatur, erleichtert das Lesen und prägt eine ruhige, leicht anregende Atmosphäre.

Je anspruchsvoller die Sehaufgabe, desto höher die Beleuchtungsanforderung, auch in den ruhigen, separierten Studienräumen, wo besondere Dokumente aus Beständen und Archiven eingesehen werden können. Hier sind nach DIN EN12464-1 mindestens 200 Lux bei den vertikalen Beleuchtungsstärken auf den Regalvorderseiten sowie Buch- und Dokumentenrücken einzuhalten. Lesebereiche sollten mit 500 Lux ausgeleuchtet werden.

Depot und Schaudapot

Für einfache Arbeiten in Magazin, Depot oder Archiv wird weniger Licht benötigt, als beim Umgang mit kleinteiligem Lagergut oder für Leseaufgaben (Beschriftungen, Formularerfassung). Hier sind relativ hohe Beleuchtungsstärken wichtig. Viele Museen öffnen ab und zu ihre Depots, um die dort „verborgenen“ Schätze zugänglich zu machen. Dann sollten die Qualitätsanforderungen für die Beleuchtung von Ausstellungsräumen gelten.

Werkstatt

Werkstätten im Museum benötigen eine funktionelle Arbeitsplatzbeleuchtung nach DIN EN12464-1 mit mindestens 500 Lux auf den Arbeitsflächen und eine Farbwiedergabe von mindestens R_a 90 durch die Leuchtmittel.

 Weitere Hinweise zur Beleuchtung am Arbeitsplatz in licht.de Heft 04 „Gutes Licht im Büro“ und Heft 05 „Industrie und Handwerk“.

Licht im Museums- und Ausstellungsraum

Beleuchtungskonzepte im Museum – ob für Dauer- oder Sonderausstellungen – sollten immer die kuratorische Grundidee aufgreifen und sie lichttechnisch optimal unterstützen. Dabei sind ästhetische und gestalterische Prinzipien ebenso wie architektonische und konservatorische Anforderungen zu berücksichtigen.

[07] Konservatorische Lichtplanung fügt sich ästhetisch in die denkmalgeschützte Architektur ein. Fresken der Kapelle der Eleonora da Toledo im Palazzo Vecchio in Florenz.

[08] Gerichtete Akzentbeleuchtung im dunkel gehaltenen Raum setzt den Fokus auf die Exponate. Brandhorst Museum, München.

[09] Eine Lichtdecke schafft für Gemäldegalerien ideales, gleichmäßiges Licht im Raum. Germanisches Nationalmuseum Nürnberg.

Gute Lichtplanung beginnt mit der Aufgabenanalyse: Wie sind die architektonischen Rahmenbedingungen? Wie sind die Energiekapazitäten? Ist der kontrollierte Einsatz von Tageslicht gegeben? Gibt es konservatorische Vorgaben? Die funktionale Museumsbeleuchtung nach kuratorischen Maßgaben ist bei Neubau wie Sanierung Teil des Baugeschehens. Auch der gleichmäßige, vertikale Lichteinfall auf die Wände muss genau geplant werden. Lichtdecken und flächig abstrahlende Leuchten erzeugen eine diffuse Grundbeleuchtung im Ausstellungsraum. Besondere Ausstellungsbeleuchtungen werden vom Ausstellungsgestalter sowie Kurator, der Technik oder dem Restaurator des Museums nach individuellen Anforderungen

angepasst. Diffuse Grund- sowie spezifische Ausstellungsbeleuchtung sollten koordiniert eingesetzt werden, um ästhetisch wie wirtschaftlich optimale Lösungen zu schaffen.

Beleuchtungstechnisch unterscheidet man architektonisch integrierte und additive Lichtlösungen. Integrierte Lichtlösungen erfordern eine enge Abstimmung mit bauausführenden Architekten oder Denkmalschutz. Additive Lösungen werden meist mit angebauten oder abgependelten Stromschienen für flexible Strahler umgesetzt. In beiden Fällen sollte geprüft werden, ob Ein- bzw. Anbaubaupunkte zu erwartende Lasten tragen können und die Brandschutzanforderungen erfüllt sind.



Projektprozess Licht für Museen und Ausstellungen

Zum Prozess der Planung einer guten Museums- und Ausstellungsbeleuchtung gehört, dass alle Beteiligten von Anfang an vollständig in das Ausstellungskonzept involviert werden. Je nach Örtlichkeit, Aufgabenstellung und Anwendung müssen die einzelnen Schritte differenziert umgesetzt werden. Einzelne Punkte müssen gegebenenfalls mehrfach überprüft, modifiziert und abgearbeitet werden. Folgende Schritte sind im Lichtplanungsprozess besonders zu bedenken:

- Bedarfsbudget-Ermittlung der geforderten Beleuchtungslösung
- Erstellung Gesamtkonzept Beleuchtung (unter Berücksichtigung architektonischer Gegebenheiten, Tageslicht, Ausstellungs- und Lichtkonzept)
- Bemusterung
- Kostenplanung inklusive Montage
- Entscheidung aufgrund
 - kuratorischer
 - lichtplanerischer
 - konservatorischer
 - energieeffizienter
 - und wirtschaftlicher Aspekte
- Ausführung, Justierung, Übergabe und Bauabnahme

White Cube versus Black Box

Der Charakter der Lichtplanung kann von zwei extremen Raumkonzepten bestimmt werden: „White Cube“ und „Black Box“. Die Black Box „löscht“ mit der Dunkelheit den Blick auf den physischen Raum. Exponate, Figuren, statische und bewegte Bilder wirken prominenter. Auch in extrem reduzierter, fokussierter Lichtdosierung erscheint alles sehr deutlich. Die Objekte erlangen als Unikate monumentale Wirkung. Die „szenografische“ Black Box tendiert zur Reduktion, vermittelt Stille und Innenschau.

Im White Cube wirken einfachere Parameter. Der Präsentationsrahmen ist neutral, sachlich, eingegrenzt. Die Kunst wirkt für sich, Werke werden gleichmäßig ausgeleuchtet. Bilder und Wände ergeben eine homogene Einheit, dem Besucher vermittelt sich ein heller, weiter, ruhiger Raumeindruck. Im White Cube werden vor allem moderne Kunst und Rauminstallationen präsentiert.

Bestimmten Grundmustern folgend, erfordern Ausstellungen in der Regel ähnliche lichttechnische Notwendigkeiten. Dabei kommt es selten zu reinen idealtypischen Lösungen. Häufiger sind am Projekt als Ganzem orientierte Kombinationslösungen:

Ausstellungstyp Historischer Raum – Räume in originaler Erhaltung und Ausstattung

Die Beleuchtung kann hier durch abgependelte Leuchten mit einem Direkt-Indirekt-Anteil zur Anstrahlung der Decke realisiert werden, oder durch freistehende Leuchten, die, gut abgeschirmt, die Exponate von der Seite beleuchten. In diesen Räumen gibt es häufig auch Tageslichtdecken oder künstliche Lichtdecken. Tageslicht sollte allerdings auf die konservatorischen Werte gefiltert werden.

Ausstellungstyp Inszenierung – Konfiguration für eine komplexe Gesamtwirkung

Exponate werden in weitgehend abgedunkelten Räumen inszeniert. Dabei kommen lichttechnische Erfahrungen aus der

Bühnentechnik zur Anwendung, vor allem Akzentstrahler. Aus dem Dunkel heraus leuchtende Vitrinen überheben die Exponate. Der Ausstellungsraum selbst tritt in den Hintergrund.

Ausstellungstyp Galerie – Vorwiegend serielle Präsentation von Exponaten ohne Hervorhebung einzelner Objekte

Die Atmosphäre ist unaufdringlich. Tageslicht-Oberlichter spenden gleichmäßige, fast schattenlose Helligkeit. Architektur und Dimensionen des Raumes bleiben sichtbar und erlebbar.

Weitere Varianten bestehen in der vertikal gleichmäßigen Ausleuchtung von Hängewänden oder in der Hervorhebung serieller Exponate durch Akzentbeleuchtung. Auch die Kombination beider Beleuchtungsarten mit einem Helligkeitsschwerpunkt auf der vertikal beleuchteten Wand in Augenhöhe ist möglich.



Licht für Wechselausstellungen

Um regelmäßig ein breiteres Publikum anzuziehen, zeigen viele Museen parallel zu den Dauerausstellungen ihrer Sammlungsbestände auch attraktive Wechselausstellungen. Für Museumsbereiche mit immer wieder neuen Exponaten sollten Beleuchtungslösungen daher möglichst so flexibel geplant werden, dass sie wechselnde Anforderungen erfüllen können.

Wechselausstellungen bieten für Museen die Chance, neben dem Stammpublikum neue Zielgruppen zu gewinnen. Für begrenzte Zeit und mit Leihgaben kuratiert, definieren Leihverträge die konservatorischen Anforderungen für die Präsentation im Museum. Für Licht- und Klimatechnik gilt dabei immer mindestens der Standard der Dauerausstellung; nicht selten wird auch eine besondere technische Ausstattung gefordert.

Flexibilität

Wechselausstellungen bedeuten mitunter räumliche Veränderungen. Die Beleuchtungsanlage in den entsprechenden Museumsbereichen sollte daher möglichst flexibel modifizierbar sein. Raumbeleuchtungen schaffen durch Lichtdecken oder breitstrahlende Leuchten bereits flächig-diffuse Lichtverhältnisse. Im Rahmen individueller Lichtkonzepte können zudem gezielt Akzente über gerichtetes Licht gesetzt werden. Technisch empfiehlt sich hierfür eine anpassungsfähige Infrastruktur mit Stromschienen unter der Decke, an denen schnell und werkzeuolos schwenk- und drehbare Strahler an jeder beliebigen Stelle montiert werden können. Einige Stromschienen sollten für eine Wandbeleuchtung parallel zu den Wänden verlaufen, andere in rechteckiger oder quadratischer Anordnung, um alle Bereiche im Raum zu erreichen. Die Schienen können dafür in die Decke eingelassen oder an der Decke montiert werden. Auch eine Abhängung der Schienen über Drahtseile ist möglich.

Die eingesetzten Strahler sollten mit wechselbaren Optiken unterschiedliche Ausstrahlwinkel erzeugen können. Einzeln dimmbare Strahler und eine flexible Lichtsteuerung ermöglichen die Anpassung der Beleuchtung für alle Arten von Exponaten, auch für höchst lichtempfindliche Ausstellungsstücke, bei denen

das Beleuchtungsniveau aus konservatorischen Gründen sehr weit abgesenkt werden muss.

Alternativ zu den Stromschienen ist auch die Verwendung von Einzelleuchten denkbar, z.B. kardanisch frei ausrichtbare Einbau-Downlights. Fest in der Decke installiert, lassen sie sich um bis zu 360° drehen und um ca. 30° schwenken (bei Richtstrahlern ist der Drehbereich geringer). Raum- und Deckenansicht wirken ungestört und ruhig. Auch bei Downlights lässt sich der Ausstrahlwinkel verändern. Das Auswechseln der Optiken und die Einstellung des gewünschten Schwenkwinkels sind etwas aufwendiger als bei Stromschienenstrahlern. Dauerhaft installierte Downlights im Wechselausstellungsbereich setzen außerdem eine gut abgestimmte Planung bezüglich Architektur und Ausstellungsanforderungen voraus.

Oft wird die Einstellung für die „richtige Beleuchtung“ erst kurz vor der Ausstellungseröffnung gefunden. Eine unkomplizierte Handhabung der beschriebenen Leuchten für eine flexible Ausleuchtung der Exponate ist daher von großem Vorteil. Für schwer zugängliche Stellen könnten fernsteuerbar einzustellende Strahler die bedarfsgerechte Lösung sein.

Bei Wechsel-, Sonder- und Wanderausstellungen kommen oft mobile Stellwände zum Einsatz, die über Wandausleger mit Strahlern eine zielgerichtete Beleuchtung der Exponate ermöglichen. Der Abstand der Leuchte von der Stellwand sollte eine gute, akzentuierende Lichtverteilung ermöglichen. Optimal für diese Lösung ist eine in die Stellwand integrierte Elektrifizierung, die über Bodentanksteckdosen oder Stromschienenadapter gespeist wird. So werden gefährliche Stolperfallen vermieden.

[10] Zurückhaltend in die Architektur integrierte kardanische Leuchten eignen sich durch ihre Flexibilität sehr gut für Wechselausstellungen. Rheinisches Landesmuseum, Bonn.

[11] Ein punktgenaues Ausrichten der Strahler lässt Exponate plastisch erscheinen. K21, Düsseldorf.

[12] Parallel zur Wandfläche erlaubt die galeriartige Ausleuchtung der Bilder mit Strahlern an Wandauslegern einen blendfreien Blick. Photokina, Köln.







Licht für vertikale Flächen

Eine ideale und zugleich vielseitige Beleuchtung der Wände ist für viele Museen eine der zentralen Herausforderungen. Ob akzentuiert oder einheitlich, Kunstwerke sollten mithilfe der richtigen Beleuchtung passend zum Ausstellungskonzept in Szene gesetzt werden.

Eine wandbezogene Beleuchtung im Museum wird in der Regel in enger Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Kurator und Ausstellungsarchitekten entwickelt. Im Grundsatz unterscheidet man zwei grundlegend verschiedene Beleuchtungsstile.

Die Wandflutung

Die Wandflutung mit großflächig angelegter Beleuchtung wirkt tendenziell sachlich und neutral. Räume erscheinen ruhig, weit und hell. Sie bieten viel gleichberechtigte Präsentationsfläche. Bilder hängen hier mit der gleichen Gewichtung nebeneinander, die Ausstellungsräume wirken vereinheitlicht, weniger individuell, universeller. Der Betrachter wird zum Interpretieren des Gesehenen. Er entscheidet, wohin er seine Aufmerksamkeit wenden möchte. Das Licht unterstützt ihn dabei.

Die akzentuierte Wandbeleuchtung und eine ihrer Unterarten, das „Framing“. Akzentuierung entsteht, wenn Objekte im Raum gezielt heller leuchten als ihre Umgebung. Der Leuchtdichtekontrast sollte – mit mindestens 5:1 – so gewählt werden, dass Objekte besonders hervorgehoben wahrgenommen werden. Eine akzentuierende Beleuchtung ist durch einfache Montage einzelner Strahler innerhalb des gewählten Schienensystems

flexibel umsetzbar. Sie schafft spannungsreiche Raumsituationen. Der Blick des Betrachters wird durch Licht auf bestimmte Gegenstände im Raum gelenkt, der Ausstellungsmacher entscheidet, wie er den Fokus steuert.

Für dreidimensionale Objekte, zum Beispiel Reliefe, gilt: Richtet man zwei oder mehr Strahler auf sie, werden Höhen- und Tiefenstrukturen optisch herausgearbeitet. Es entsteht ein räumlicher Blick auf das Objekt.

Auf den folgenden Seiten werden beide Ansätze detaillierter erklärt und die dazugehörigen Lichtwerkzeuge vorgestellt. Eine gute Lösung für viele Ausstellungen liegt auch in der Kombination beider Stile. Das Zusammenspiel von Objektakzentuierung mit generalisierender Wandflutung schafft ein besonderes Spannungsfeld im Raum.

Farbige Wände

Farbige Wände als Gestaltungselement findet man häufig in Gemäldegalerien der „Alten Meister“. Bewusst wird ein starker, dennoch farblich abgestimmter Kontrast zwischen Wand und Bild gewählt, der harmonisch wirkt. Auch für Ausstellungskonzepte mit farbigen Wänden ist eine gleichmäßige Wandflutung sehr gut geeignet.



[13] Schienensysteme mit Leuchten in unterschiedlichen Ausstrahlwinkeln ermöglichen eine flexible Anpassung an die Exponate. Long Museum, Shanghai.

[14] Akzentuiertes Licht auf die Reliefe an der Wand rechts lässt diese dreidimensional erscheinen. Fränkische Galerie, Kronach.

[15] Große Meister entfalten ihre besondere Wirkung im gleichmäßigen Licht auf farbigen Wänden. Gemäldegalerie, Berlin.

Lichtwerkzeuge: Wandflutung

Bilder und Reliefe hängen oder stehen meist mit geringem Abstand vor der Wand. Mit einer Wandflutung werden sie für den Betrachter in einem hellen, harmonischen und sachlichen Umfeld präsentiert.

Für alle flachen, an der Wand exponierten Ausstellungsgegenstände ist die gleichmäßige Ausleuchtung über eine flächige Wandbeleuchtung ideal geeignet. Sie schafft neutrale Hintergründe, sodass Bild und Wand eine Einheit bilden können. Sollen Objekte in sachlicher Atmosphäre präsentiert werden, ist die Wandflutung das ideale Instrument. Vertikalen Flächen wird so bewusst jede Dramatik genommen. Nicht nur Bild und Wand sollen gleichwertig wahrgenommen werden, sondern auch alle im Raum gezeigten Kunstwerke. So kann der Betrachter sich – unbeeinflusst von Akzentuierung und szenografischen Elementen – seinen eigenen Eindruck von den Arbeiten verschaffen.

Anwender nutzen für diese Beleuchtungsstrategie in der Regel Leuchten mit asymmetrischer Lichtverteilung durch entsprechende Linsensystemen oder Reflektoren (siehe Abbildung 20). Die optimale Positionierung von Wandflutern richtet sich immer konkret an der zu beleuchtenden Wand aus. Qualitativ hochwertige, entblendete Wandfluter verteilen das Licht nahezu komplett gleichmäßig vom oberen

Wandansatz bis zum Bodenniveau, wobei die wandnahen Bodenflächen nicht direkt mitbeleuchtet werden (siehe Abbildung 18).

Großformatige Bilder

Besonders für großformatige Kunstwerke eignet sich das Beleuchtungskonzept der Wandflutung optimal, da hier die Notwendigkeit der einheitlichen Raumausleuchtung in besonderer Weise zum Tragen kommt. Bei kleinen Räumen, die von einer quadratischen Grundform abweichen, ist es sehr wichtig, auf die korrekte geometrische Anordnung von Leuchten und Lichtsystemen zu achten. In der Regel sollte sie in der Form der Grundfläche des Raumes entsprechen.

Eine gute Gleichmäßigkeit des Lichts auf den Wänden kann - mithilfe von großen Leuchtflächen - auch durch Lichtdecken oder große, aufgesetzte Leuchten, die Oberlichter simulieren, erzielt werden.

Betonung der Architektur durch vertikale Beleuchtung

Die Wandflutung schafft durch die Betonung der Flächigkeit der gefluteten Wände nicht nur eine explizite Weite und Raum-

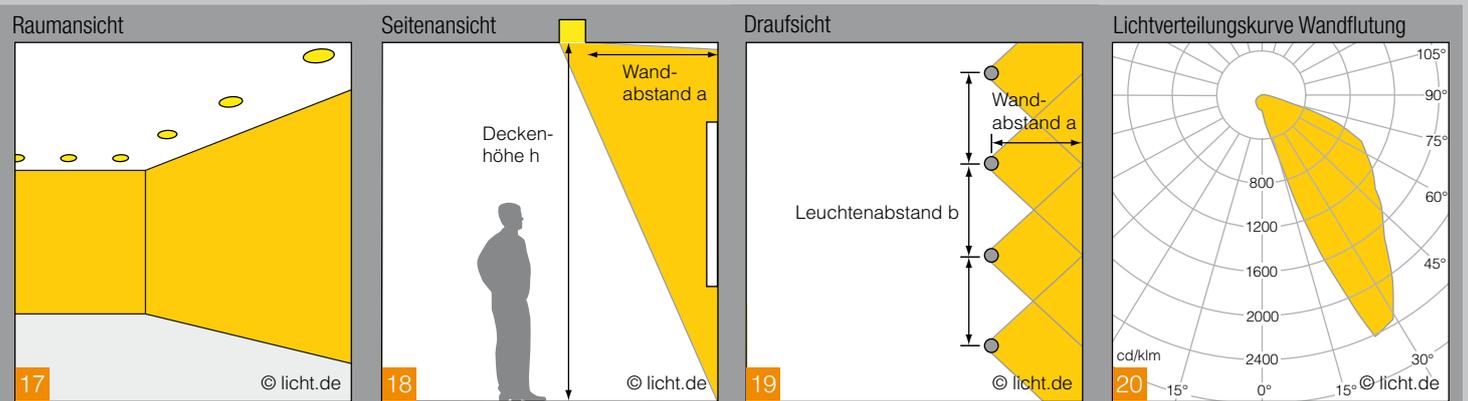


16

tiefe, sondern auch eine wahrnehmbare räumliche Abgrenzung einzelner Ausstellungszonen zueinander. Der entstehende helle, ruhige Raumeindruck bildet den idealen Hintergrund für Kunstwerke und andere Exponate; der Raum wirkt als homogene Einheit. Durch die Reflexion über die Wände sorgt die Wandflutung zugleich für eine angenehme Helligkeit in der Raummitte und kann je nach Geometrie des Raums als Beleuchtung sogar komplett ausreichen.

Lichtwerkzeuge im Vergleich: A) Leuchten für hell geflutete Wände

Für eine homogene Wandflutung [17-20] (siehe Abb. Anordnungsmethode) ist eine korrekte Anordnung der Leuchten, orientiert an Lichtverteilung und Raumgeometrie, wichtig. Es gilt die Faustregel: Der Wandabstand „a“ der Wandfluter sollte ein Drittel der Deckenhöhe „h“ betragen. Der Leuchtenabstand zwischen den Leuchten „b“ entspricht in etwa dem Wandabstand „a“. Er sollte das 1,5fache des Wandabstandes auf keinem Fall überschreiten. Eine Bemusterung vor Ort ist zu empfehlen und liefert die genauen Positionsangaben.



17

© licht.de

18

© licht.de

19

© licht.de

20

© licht.de



Ergänzung der Wandflutung durch Akzente

Eine Wand muss natürlich nicht grundsätzlich flächig beleuchtet sein. Je nachdem, wie man die vertikale Raumfläche lichttechnisch behandeln möchte, können Anwender auf verschiedene Lichtwerkzeuge und Positionierungsmethoden zurückgreifen. Für Ausstellungen, denen eine extreme Beschränkung auf das Konzept der Wandflutung nicht gerecht wird, weil man sie als zu uniform erlebt, eröffnet die Kombination mit der Akzentbeleuchtung die ideale Ergän-

zung. Einerseits sorgt die Wandflutung für eine homogene Grundhelligkeit im Raum und sichert so eine gute Erkennbarkeit der Exponate. Andererseits setzt der Einsatz von gezielt gerichteten Strahlensystemen mit höherer Beleuchtungsstärke Akzente in Richtung lichtdramaturgischer Differenzierung einzelner Kunstwerke oder stärkerer Modellierung von Skulpturen.

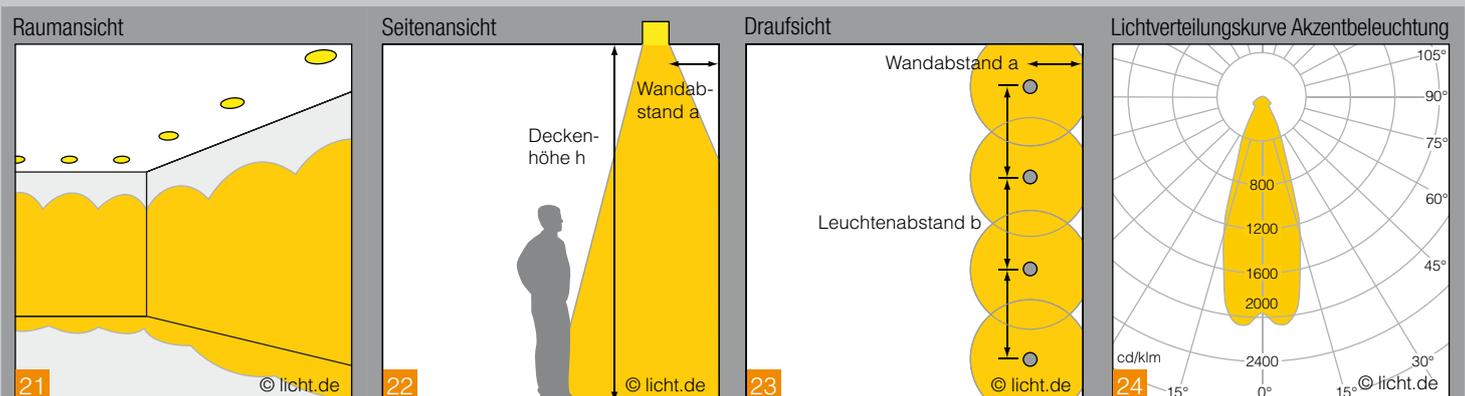
Selbstverständlich lässt sich auch die eigentliche Wandabwicklung durch gezielte

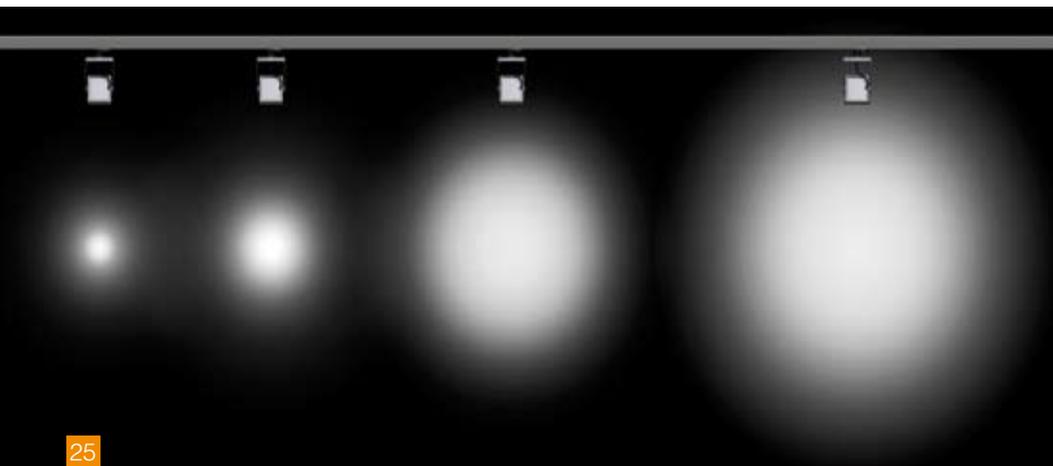
Akzente lichttechnisch inszenieren und verleiht so dem Raum eine Lebendigkeit und Rhythmik. Siehe dazu auch die Grafiken 21 bis 24.

[16] Eine gleichmäßig helle Lichtverteilung auf den Wänden verleiht der Präsentation eine sachliche Atmosphäre. Saatchi Gallery, London.

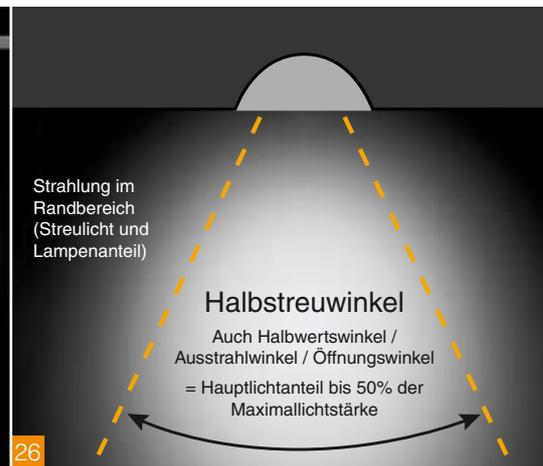
Lichtwerkzeuge im Vergleich: B) Leuchten für rhythmisch akzentuiert beleuchtete Wände

Sollen die Wände akzentuiert beleuchtet werden [21-24], kann dieses mit engstrahlenden Leuchten realisiert werden. Wandnah platzierte Downlights mit ihren vertikalen, aufeinanderfolgenden Lichtkegelabschnitten, sogenannten „Scallops“, verleihen dem Raum eine besondere Lichtdynamik.





25



26

Lichtwerkzeuge: Akzentbeleuchtung, Framing

Eine weit verbreitete Art der Beleuchtung in Ausstellungen und Museen ist die Akzentbeleuchtung. Genau definierte und fokussierte Lichtkegel heben die besonderen Vorzüge einzelner Exponate hervor. Sie werden im Vorfeld durch Kuratoren und Ausstellungstechnik perfekt justiert.

Die Akzentbeleuchtung ist variabel einsetzbar. Sie eignet sich zur Beleuchtung von Bildern jeglicher Größe, zur Anstrahlung dreidimensionaler Objekte und zur Ausleuchtung von Exponaten in Vitrinen. Die flexible Akzentbeleuchtung im Museum kann unkompliziert durch an Stromschienen adaptierbare Strahler erzeugt werden, die schnell an die jeweiligen Ausstellungsverhältnisse angepasst werden können. Das spart Zeit und langfristig auch Betriebs- und Beleuchtungskosten. Hilfreich bei der richtigen Strahlerauswahl sind Lichtverteilungskurven (anhand von sogenannten „Polardiagrammen“ und „Kegeldiagrammen“) der Hersteller. Für Dauerausstellungen können auch Downlights, besonders Richtstrahler, verwendet werden, die die gleichen Effekte erzielen.

Lichtwirkungen bei der Akzentbeleuchtung
Soll die Wandfläche akzentuiert beleuchtet werden, so kann dieses mit engstrahlenden Leuchten (siehe auch Seite 17, Abb. 21-24) realisiert werden. Die vertikalen, aufeinanderfolgenden Lichtakzente verleihen dem Raum durch ihren Hell-Dunkel-Verlauf auf der Wand eine gewisse Lichtdynamik. Sie führen den Blick des Ausstellungsbesuchers und bewirken seine ungestörte Konzentration auf die Kunst. Interieur und Architektur spielen dabei nur eine sekundäre Rolle. Je enger die Lichtkegel, umso dramatischer ihre Wirkung, je breiter, umso stärker werden Exponate auch als Teil des Raumes wahrgenommen. Damit ein Lichtkegel als Akzent ins Auge fällt, muss der Helligkeitsunterschied zwischen Exponat und Umfeld mindestens 1:5

betragen. Bei einem Kontrast von 1:20 sind deutliche Akzente zu sehen, bei 1:100 wirkt die Installation geradezu dramatisch, was nur in sehr dunklem Umfeld möglich ist.

Reflexblendung und Sehkomfort

Auch der Sehkomfort der Beleuchtung trägt wesentlich zur Qualität des Ausstellungserlebnisses bei. Enge Lichtkegel und abgeschirmte Lichtaustrittsflächen minimieren die Direktblendung und störende Reflexblendungen.

Halbstreuwinkel

Der Halbstreuwinkel beschreibt den photometrisch relevanten Winkelbereich einer Lichtstärkeverteilung. Dieser Winkel entsteht zwischen den beiden Punkten bei denen die maximale Lichtstärke noch 50% beträgt. Der Halbstreuwinkel definiert den Durchmesser eines Lichtkegels, sagt aber nichts über die Begrenzung von Streulicht und mögliche Blendung aus.

30° Museumswinkel

Zur Gemäldeausleuchtung bietet sich eine „30°-Museumswinkel“-Konzeption an. Die geeignete Lichtquelle muss, je nach Bildgröße und Entfernung, nach Halbstreuwinkel und Lichtstärke ausgewählt werden, um die erforderliche vertikale Beleuchtungsstärke für die auszuleuchtende Fläche zu gewährleisten. Hält der Planer die geometrische Relation zwischen Lichtquelle und Exponat ein, ist auch eine Betrachtung aus naher Distanz ohne störende Überlagerungsschatten möglich (siehe Abbildungen 30 und 31).

[25, 26] Die DIN-Norm 5040-4:1999-04 spricht hier von Halbstreuwinkeln. Für Strahler und Reflektorlampen mit rotationssymmetrischer Lichtstärkeverteilung gilt: Engbündelnd: < 10°, Bündelnd: 10° bis 35°, Breitstrahlend: > 35°

[27] Die engen Ausstrahlwinkel der Leuchten verursachen durch Hell-Dunkel-Zonen eine starke Lichtdynamik im Raum. Kunstmuseum, Göteborg.

[28] Lichtakzente heben die einzelnen Werke hervor und geben dem Raum eine ordnende Struktur. Brandhorst Museum, München.

[29] Beim „Framing“ wird exakt ausschließlich das Bild beleuchtet, der Rest des Raumes bleibt ausgespart. Die Kunstwerke wirken dadurch, als ob sie von innen heraus leuchten würden. Musée Magritte, Gent.



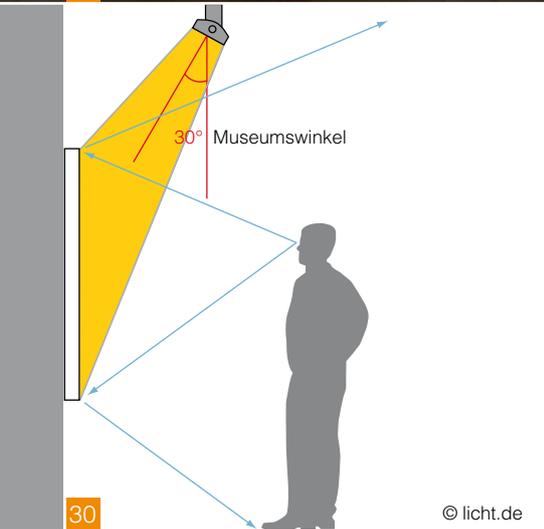
27



28

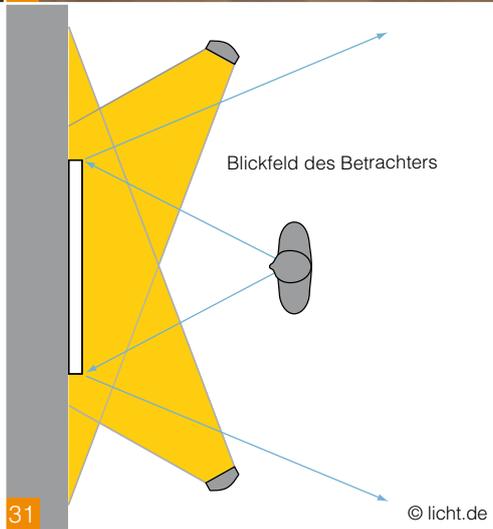


29



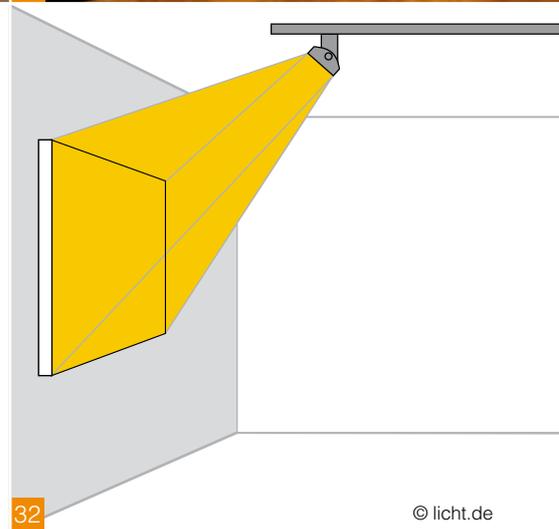
30

© licht.de



31

© licht.de



32

© licht.de

Leuchten korrekt positionieren

Bei der Beleuchtung von Gemälden und Skulpturen [27, 30] bietet sich das bewährte Prinzip des 30°-Museumswinkels an, bei dem das Licht in einem Einfallswinkel von 30° auf das zu beleuchtende Objekt trifft. Ein steilerer Einfallswinkel würde für ein zu starkes Streiflicht sorgen und folglich lange Schatten unterhalb des Bildrahmens erzeugen. Bei größerer Distanz zwischen Leuchte und Exponat wächst die Wahrscheinlichkeit einer störenden Schattenbildung durch den Betrachter auf dem Bild.

Reflexblendung vermeiden

Positioniert man zur Beleuchtung eines Bildes zwei Strahler jeweils seitlich [31], vermeidet man bei dessen Betrachtung nicht nur eine Reflexblendung auf dem Exponat, sondern auch eine Verschattung des Bildes. Bei mit Glas gerahmten Bildern können Spiegelungen der Leuchten auf der Scheibe lästige Blendmomente bewirken und den Genuss der Betrachtung behindern. Abgeschirmte Lichtaustrittsflächen, enge Lichtkegel und eine optimale Anordnung der Leuchten helfen dabei, Reflexblendungen zu vermeiden.

Framing

Framing als besonderes Highlight: [32] Begrenzt man Lichtkegel exakt auf das Bildformat des Exponates, scheint das Bild eigenständig von innen heraus zu leuchten. Diesen Effekt nennt man Framing (engl. Einrahmung). Als Lichtwerkzeuge verwendet man hier Strahler mit Konturenschiebern und Projektionslinsen. Die Wirkung kontrastreicher Hell-Dunkel-Szenen wird durch diese Art der Beleuchtung besonders unterstrichen.

LED-Lichtquellen, Lichtqualität und Wahrnehmung

Hochwertige LED-Lichtquellen sind unentbehrlich für die moderne Museumsbeleuchtung. Faktoren wie gute Lichtausbeute, Farbtemperatur und Farbwiedergabe, Lebensdauer und Lichtverteilung sind wichtige Voraussetzungen, um die spezifischen Anforderungen an gute Beleuchtung zu erfüllen.

[34] Die abgebildeten LED-Module eignen sich für vielfältige Anwendungen, wie die Erzeugung linearer Lichtstrukturen, die Akzentuierung von Exponaten oder die Ausleuchtung großer Raumflächen.

[35] Aufbau einer LED-Leuchte: Die an der LED-Platine entstehende Wärme muss über das Gehäuse mit spezifischem Kühlkörper abgeführt werden, damit Lichtqualität und Langlebigkeit erhalten bleiben. Die Optik sorgt für Lichtlenkung und passenden Abstrahlwinkel.

[37] In der Praxis sind LEDs während ihrer gesamten Einsatzzeit, abhängig von der jeweiligen Anwendung, praktisch wartungsfrei. Die Einflussfaktoren auf die einzelne LED können ebenfalls Auswirkungen auf das gesamte LED-Modul haben.

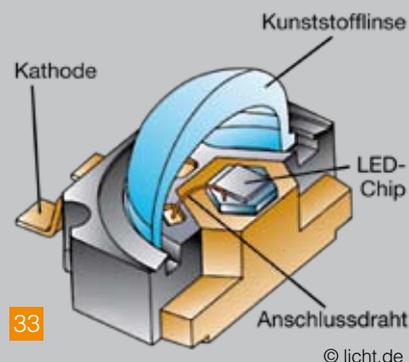
Um sich für das richtige LED-Lichtsystem in der optimal auf Beleuchtung und Betrieb abgestimmten Qualität entscheiden zu können, empfiehlt es sich, sämtliche Anforderungen an die Beleuchtung im Vorfeld zu definieren. Dabei spielen Parameter wie Lichtausbeute [lm/W], Farbwiedergabe, ähnlichste Farbtemperatur [CCT], Lebensdauer, Betriebsweise, Lichtstromverhalten, Baugröße, Lichtverteilung, Binning, Wartungsfaktoren, Lichterzeugungsprinzip und die Umgebungsbedingungen eine besonders wichtige Rolle.

Dieses Kapitel konzentriert sich grundlegend auf die spezifischen Funktionsweisen und die Eigenschaften von LEDs. In Museen und Ausstellungen sind sie heute die wohl am häufigsten zum Einsatz kommenden modernen Lichtquellen.

Das Grundprinzip der LED

LEDs (Light Emitting Diodes) bauen sich aus mehreren Halbleiterschichten (Layern) auf. In der jeweils aktiven Schicht

wird beim Betrieb der Diode über Gleichspannung Licht erzeugt, direkt oder durch eine reflexive Auskopplung. Während herkömmliche Glühlampen immer ein kontinuierliches Lichtspektrum aussenden, lässt sich über eine LED Licht in einer ganz bestimmten Farbe emittieren. Sie ist im Wesentlichen abhängig vom verwendeten Halbleitermaterial.



© licht.de

Photolumineszenz

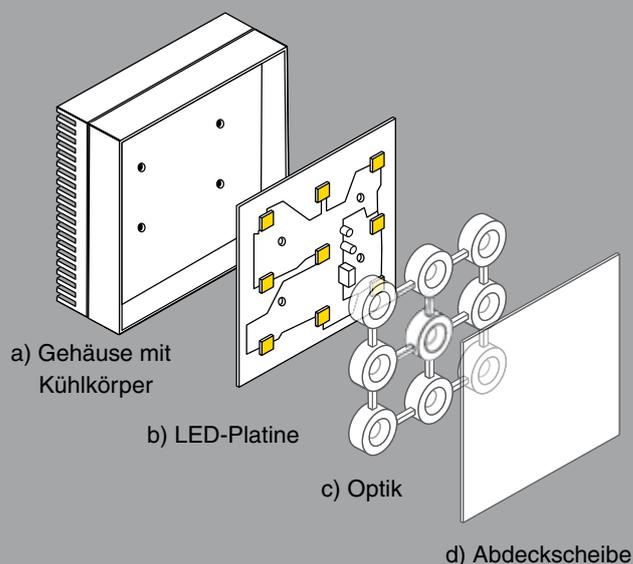
Blaue LEDs können weißes Licht erzeugen, wenn man sie mit einer dünnen Phosphorschicht versieht. Das energiereiche,

LED-Module



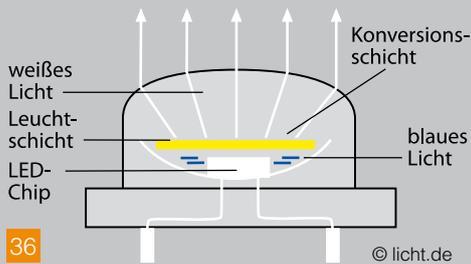
34

Aufbau einer LED-Leuchte



© licht.de

kurzwellige blaue Licht der LED bringt die Phosphorschicht zum Leuchten: Sie gibt energieärmeres gelbes Licht ab. Ein Teil des blauen Lichts wird hier also durch die wie ein Filter wirkende Phosphorschicht in weißes Licht umgewandelt. Je nach Dosierung des Phosphor-Farbstoffes können verschiedene Weiß-Töne entstehen, wie Warmweiß, Neutralweiß oder Kaltweiß.



36

Vorteile der LED-Technik

Im Vergleich zu anderen Lichttechnologien bieten LEDs neben maximaler Zuverlässigkeit und Funktionalität auch unter schwierigen Umgebungsbedingungen viele Vorteile. Anwender profitieren auch vom hohen wirtschaftlichen Nutzen durch niedrigen Energieverbrauch, einer langen Lebensdauer bei hoher Effizienz und längeren Wartungsintervallen. Dabei bieten sich vielfältige Designmöglichkeiten mit LEDs durch Lichtfarbenvielfalt, kompakte Abmessungen und Flexibilität der Module, aber auch durch stufenlose

Dimmbarkeit in Kombination mit einem passenden Vorschaltgerät. Durch ihre kleinen Abmessungen sind LED-Leuchten optimal für den Einsatz in der Museums- und Ausstellungsarchitektur geeignet. Sie sind zuverlässig, schaltfest und reagieren sofort, zeichnen sich durch hohe Stoß- und Vibrationsfestigkeit aus, emittieren so gut wie keine UV- oder IR-Strahlung, bieten eine hohe Farbwiedergabe und sind nachhaltig sowie quecksilberfrei.

Einflussfaktoren auf Zuverlässigkeit und Lebensdauer

In Abhängigkeit der Anwendungssituation und unter Berücksichtigung der Betriebsbedingungen sind LED-Systeme im Vergleich zu traditionellen Lichttechniken nahezu wartungsfrei, denn bei guten Bedingungen können LEDs eine Lebensdauer von 50.000 Stunden und mehr erreichen. Für eine lange Lebensdauer empfiehlt es sich, die Datenblätter mit den entsprechenden Angaben zum Einsatz der LED-Leuchten zu beachten.

LEDs fallen im Vergleich zu anderen Lichtquellen nur äußerst selten aus. Es wird empfohlen, die typenbedingte Lichtstromdegradation zu beachten und bei der Planung zu berücksichtigen. In der untenstehenden Grafik [37] werden Einflussfaktoren dargestellt, die Auswirkungen

auf die einzelne LED und auch auf das gesamte LED-Modul und dessen Lebensdauer haben.

Die Temperaturentwicklung

Wann immer Licht entsteht, entsteht auch Wärme. In der Regel wirkt sich diese nachteilig auf Lebensdauer und Lichtstrom der LEDs aus. Daher ist es sehr wichtig, schon bei der Konstruktion durch ein Wärmemanagement mit entsprechenden Kühlkörpern dafür zu sorgen, die entstehende Wärme gut abzuleiten. LED und Leuchtgehäuse (mit dem Kühlkörper) sollten also thermisch optimal miteinander verbunden werden. Grundsätzlich gilt die Regel: Je kühler, desto höher die Lebensdauer und umso effizienter und heller das Licht der LED.

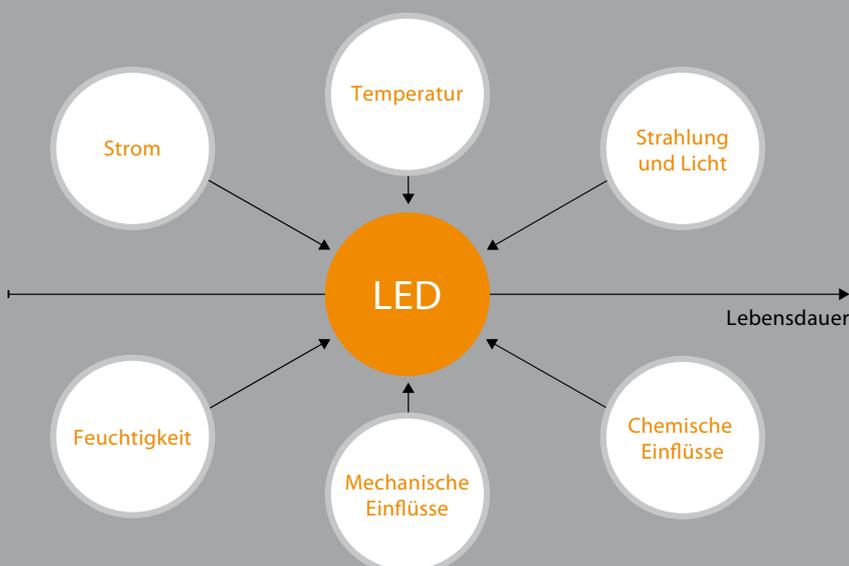
LED-Module

LED-Module erzeugen Licht über Platinen, die mit Einzel-LEDs bestückt sind. Je nach Beschaffenheit sind die Module bereits mit einer Optik zur Lichtlenkung und einem Kühlkörper ausgestattet. Mit ihrer ursprünglichen Optik verteilen LEDs das Licht in der Regel breitstrahlend in einem Halbstreuwinkel von 150°, der nicht für alle Anwendungsbereiche geeignet ist. Justierbare optische Systeme ermöglichen eine bessere Kontrolle der Lichtverteilung. Sie können aus einer breit- auch eine engstrahlende Lichtverteilung machen.

Umdenken

Die Verwendung moderner LEDs in Leuchten und optischen Systemen erfordert im Vergleich zur Lichtplanung mit traditionellen Lichtquellen einen anderen Ansatz bei der Projektierung. LEDs sind im professionellen Bereich meist nicht mehr schnell und werkzeuglos austauschbar. Um hier Standards zu setzen, gibt es verschiedenste Aktivitäten der Leuchtenindustrie, um Module und Light-Engines einfach austauschbar zu machen.

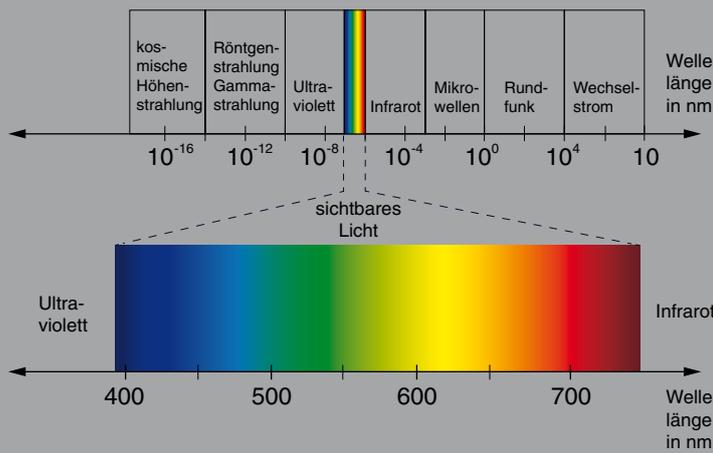
Einflussfaktoren auf die LED-Lebensdauer



37

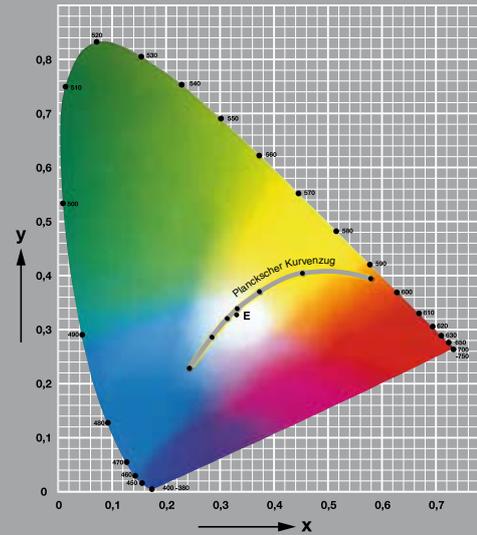
© licht.de

Spektrum des Lichts



38

CIE-Farbdreieck mit Planckschem Kurvenzug



39

Qualitätsprodukte

LEDs liegen im Trend und bieten für die allermeisten Anwendungsbereiche eine ideale Lösung. Allerdings empfiehlt es sich angesichts der Vielfalt von LED-Produkten aus aller Welt, sich genau mit den Produkten auseinanderzusetzen. Ungeeignete Systeme zeigen oft erst im Betrieb ihre Schwächen.

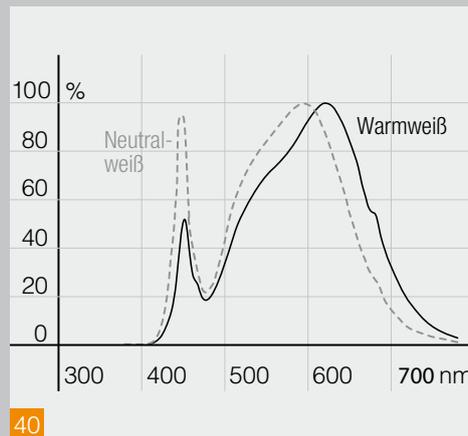
Geeignete LED-Leuchten und -Systeme müssen bestimmte Kriterien erfüllen, wie z.B. eine nur ganz geringe Anzahl an Frühausfällen, die Möglichkeit, ältere Qualitätsstufen in einheitlichen Lichtfarben und homogener Helligkeit mit gleicher Lichtqualität nachzurüsten. Sie bieten eine gute Wärmeableitung, einen guten Wartungsfaktor sowie eine lange Lebensdauer des gesamten Systems. Wichtig sind in diesem Zusammenhang besonders die Stichworte „Wärmemanagement“ und „Binning“.

Spektrum

Um eine Lichtqualität für die praktische Anwendung zu bestimmen, sollte man neben der Lichtfarbe auch die spektralen Farbwiedergabe-Eigenschaften (Farbwiedergabeindex R_a) einer Lichtquelle kennen. Das Licht einer Glühlampe beispielsweise setzt sich aus einem kontinuierlichen Spektrum zusammen, ganz anders als bei Entladungslampen (Hochdruckentladungs- und Leuchtstofflampen) mit diskreten Spektren. Für LEDs gilt je nach Lichtfarbe ein nahezu durchgehendes Spektrum.

LEDs sind nahezu frei von UV- und IR-Strahlung und haben damit einen geringen Schädigungsfaktor. Sie eignen sich

also besonders gut für die Beleuchtung sensibler und wertvoller Exponate. Spektren von warmweißen und neutralweißen LED-Lichtquellen im Vergleich:



40

Im Kapitel „Konservatorische Aspekte“ auf Seite 30 sind auf den Abbildungen [01-03] die Spektren verschiedener Lichttechnologien im Vergleich zu sehen.

Lichtfarbe und Farbwiedergabe

Die Lichtfarbe einer Lichtquelle wird durch die ähnlichste Farbtemperatur, angegeben in Kelvin (K), bestimmt. Niedrige Werte (Farbtemperatur unter 3.300 K) stehen für warmweiße Beleuchtung, höhere für kühlere (Neutralweiß zwischen 3.300 K und 5.300 K; Tageslichtweiß höher als 5.300 K).

Inwieweit der farbliche Eindruck eines Objektes bei künstlicher Beleuchtung richtig wahrgenommen und beurteilt wird, hängt von der Spektralqualität der verwendeten Lichtquelle ab. Als Bewertungssystem wird hier der sogenannte Farbwiedergabeindex R_a verwendet. Je höher dieser Wert ist (max R_a 100), desto

„natürlicher“ werden die Objektfarben im Vergleich zu der Referenzlichtquelle wahrgenommen. Für Farbtemperaturen bis 5.000 K dient als Referenz die Glühlampe, bzw. der „Schwarze Körper“ welcher im Planckschen Kurvenzug abgebildet wird.

Die Wahrnehmung ist abhängig von Farbtemperatur und Farbwiedergabeeigenschaften der eingesetzten LEDs. Beispiel: Rote Farbtöne erscheinen bei warmweißem Licht gesättigter und brillanter als bei tageslichtähnlichem Licht – auch wenn beide Lichtquellen einen hohen R_a -Wert aufweisen.

Schädigungsfaktor

Zur Bewertung der aus konservatorischer Sicht der Museen geeigneten Lichtquellen berechnet man den „relativen Schädigungsfaktor“ aus dem Verhältnis von schädigungswirksamer Bestrahlungsstärke zur Beleuchtungsstärke. Eine warmweiße LED-Beleuchtung hat einen geringeren Schädigungsfaktor als beispielsweise eine Beleuchtung durch Niedervolt-Halogenlampen mit oder ohne UV-Filter und ist daher für empfindliche Objekte besser geeignet.

Binning

In der Produktion von LED-Chips kommt es fertigungsbedingt zu leichten Abweichungen: Lichttechnische Eigenschaften können beispielsweise in Farbe und Leuchtkraft variieren. Um eine konstante Lichtqualität mit homogenem Helligkeitsniveau und vereinheitlichter Lichtfarbe zu gewährleisten, müssen LEDs einer



41

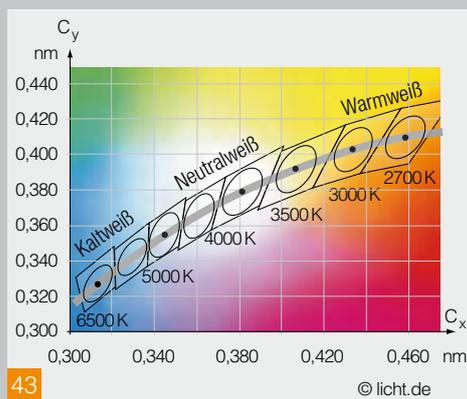


42

Charge sortiert werden. Das passiert in sogenannte „Bins“ (englisch: Behälter/ Klasseneinteilung). Dieser „Binning“-Prozess ist besonders bei weißen LEDs von großer Bedeutung. Auswahlkriterien beim Binning sind der Lichtstrom (gemessen in Lumen), die Farbtemperatur (gemessen in Kelvin), der Farbort und die Vorwärtsspannung (gemessen in Volt).

Heute definiert die ANSI-Norm (American National Standards Institute) Farbwertabweichungen mithilfe der MacAdams-Ellipsen. Sie beschreiben gerade wahrnehmbare Farbabstände auf den XY-Koordinaten.

ANSI-Farbwerte, Detail aus Grafik [39]:



43

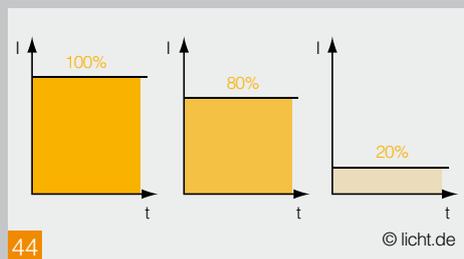
Die Kurve in Grafik [43] zeigt den Planckschen Kurvenzug (BBL = Black Body Locus). Hier werden die Farbkoordinaten mit unterschiedlichen Temperaturen (K = Kelvin) der abgegebenen Strahlung angegeben. So lassen sich die Farbkoordinaten in Farbtemperaturen übertragen. Angaben von MacAdams-Ellipsen informieren den Nutzer darüber, wie weit beispielweise die Lichtfarbe einzelner LED-Module vonein-

ander abweicht. Nach ANSI-Norm sollte der Farbwert innerhalb einer Ellipse mit vier Schwelleneinheiten liegen. LEDs aus diesen jeweils eng gefassten Bins garantieren eine einheitliche Lichtfarbe. In einem Binning mit < 3 Step MacAdam sind Farbunterschiede so gut wie nicht wahrnehmbar.

Stromdimmung bei LED-Lichtquellen

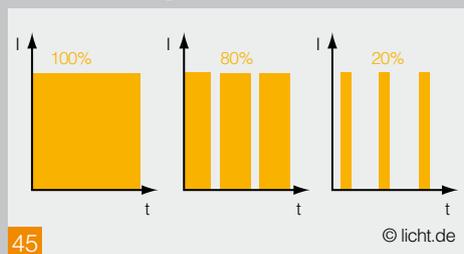
Auch das Dimmen von LEDs ist heute technisch komfortabel möglich. Das Absenken der Amplitude des Vorwärtstromes führt zu einer Reduktion des Lichtstroms. Sobald ein gewünschtes Licht- oder Stromniveau eingestellt ist, bleibt dieses zeitlich konstant.

Stromdimmung:



44

PWM-Dimmung



45

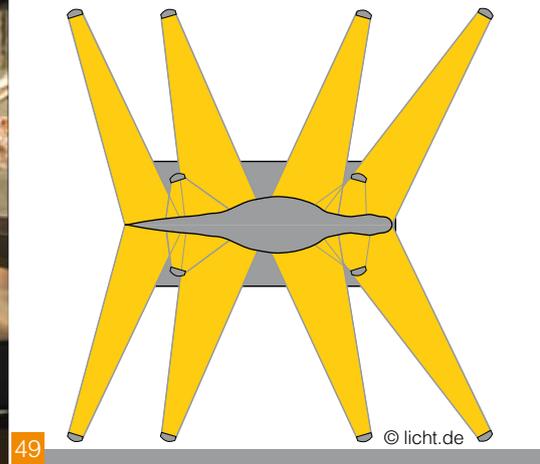
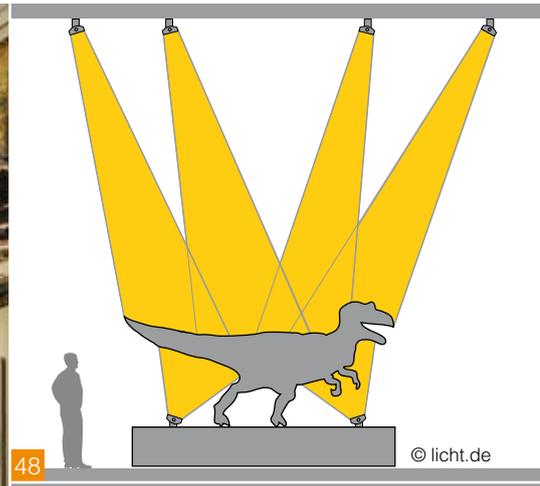
Auch die Reduktion des Mittelwerts des Vorwärtstromes – die sogenannte Pulsweiten-Modulation (PWM) – führt zur

LED-Lichtdimmung. Der Stromfluss durch die LED wird rhythmisch nach einer bestimmten PWM-Frequenz unterbrochen. Je größer die Stromlücken zwischen den Stromphasen, desto niedriger wird der effektive bzw. der mittlere Strom durch die LED und damit deren wahrgenommene Helligkeit. Die PWM-Frequenz sollte dabei in einem für das menschliche Auge nicht wahrnehmbaren Bereich über 300 Hz liegen, damit kein erkennbares „Flimmern“ entsteht, obwohl faktisch eine entsprechende Lichtmodulation vorliegt. Um die Vorteile beider Verfahren optimal zu nutzen, können diese auch kombiniert werden.

[38] Licht ist der für das Auge sichtbare Teil der elektromagnetischen Strahlung. Im elektromagnetischen Spektrum umfasst der Bereich des Lichts Wellenlängen von etwa 380 nm bis 780 nm. An das sichtbare Licht grenzen die Bereiche der Infrarot- (Wellenlängen zwischen 780 nm und 1 nm) und Ultraviolettstrahlung (Wellenlängen zwischen 10 nm und 380 nm).

[39] Die Kurve im Inneren des Farbdreiecks zeigt den Planckschen Kurvenzug (BBL = Black Body Locus).

[41, 42] Beispiel für eine verbesserte Wahrnehmung nach erfolgter Sanierung. Durch höhere Leuchtdichten werden die Wandmalereien für die Besucher deutlich besser erkennbar. Sixtinische Kapelle, Rom. Photo Copyright - Governatorato dello Stato della Città del Vaticano – Direzione dei Musei.



Licht für dreidimensionale Objekte

Dreidimensionale Objekte überzeugend in Szene zu setzen, ist beleuchtungstechnisch eine besondere Herausforderung. Brillanz, Materialität und Form von Skulpturen und Plastiken werden erst durch die richtige Lichtsetzung für die Museumsbesucher wirklich sichtbar.

Modelling – Dreidimensionalität begreifbar machen

Dreidimensionale Objekte [48-52] lassen sich durch ein geschicktes Kombinieren der Leuchten-Ausstrahlwinkel angemessen modellieren und plastisch darstellen. Der Begriff „Modelling“ steht für ein gekonntes Zusammenspiel zwischen Licht und Schatten am Objekt. Die Bilder 50-52 links zeigen, wie unterschiedlich Licht ein und denselben Körper wahrnehmbar macht. Abbildung 50 zeigt eine diffus-flächige Beleuchtung. Auf Abbildung 51 wird die Büste nur von einer einzigen Leuchte von links oben angestrahlt. Die Folge: starke Schlagschatten und nicht erkennbare Bereiche auf der rechten Seite. Zusätzlich zum Hauptlicht sorgt in Abbildung 52 ein geringeres Aufhellungslicht mit einem zweiten Strahler für ausgewogene Kontraste und direkte, vollumfängliche Erfassbarkeit. Dreidimensionale Exponate werden also in ihrer Raumtiefe betont, wenn sie durch mehrere Strahler aus unterschiedlichen Positionen mit verschiedenen Lichtstärken und Ausstrahlwinkeln beleuchtet werden. Um Spiegelungen und Schlagschatten zu vermeiden, ist die Position der Strahler sorgfältig auszuwählen. Störende Schatten lassen sich z. B. durch eine Überlappung unterschiedlicher Beleuchtungsstärken auf dem Objekt reduzieren. Werden zu flache Lichteinfallswinkel gewählt, gerät der Betrachter leicht zwischen Lichtquelle und Objekt und steht sich dann selbst im Licht.

Konzeptionell sollten immer Materialität, Form, Empfindlichkeit und Umgebung der Exponate berücksichtigt werden. Dreidimensionale Objekte lassen sich durch Licht und Schatten modellieren, flächiges diffuses Licht wirkt schattenärmer und ruhiger. Akzentlicht hingegen arbeitet Objektstrukturen heraus und hohe punktuelle Leuchtdichten sorgen für Brillanz.

Formen durch Schatten

Harte Schatten oder weichere, effektvolle Schattenverläufe über Rundungen und Kanten setzen das Objekt effektiv in Szene. Entscheidend dafür ist die Position der Lichtquelle. Steile Lichteinfallswinkel bei kurzer Distanz führen zu langen vertikalen Schatten. Zu flache Einfallswinkel bewirken horizontal ausgerichtete Schlagschatten. Beim „Modelling“ von Skulpturen und Bildern hat sich ein Einfallswinkel von 30° bewährt. Weitere Informationen links im Kasten Modelling.

Brillanz

Exponate mit Brillanz vermitteln einen hochwertigen Eindruck, vor allem bei glänzenden Oberflächen wie Kristallglas, Metall oder Porzellan. Sie wirken edler, eleganter und hochwertiger. Glanz resultiert aus unterschiedlichen Helligkeiten, erzeugt durch den Einsatz von Punktlicht- und Flächenstrahlern. Bewegt sich der Besucher im Raum, scheinen die Glanzpunkte auf den Oberflächen zu wandern. Dieser interessante Effekt erzeugt Aufmerksamkeit. Die Glanzpunkte lassen Kanten und Wölbungen der Exponate erahnen. Brillanzeffekte hängen mehr von der Kompaktheit der Lichtquelle ab, als von der Intensität des Lichts. Gute Lichtwerkzeuge sind hier Strahler mit einem engen Ausstrahlungswinkel.

Diffuses, flächiges Licht – für die nüchterne Objektdarstellung

Großflächige Lichtdeckeneinheiten oder Raster aus eng angeordneten Leuchten erzeugen direktes, flächiges Licht. Leuch-

ten mit satinierten oder mikrop Prismatischen Frontabdeckungen eignen sich dafür sehr gut. Das gestreute Licht verteilt sich gleichmäßig von der Decke in den Raum.

Indirektes Licht, beispielsweise aus Lichtvouten und Hinterleuchtungen, zeigt seinen Reiz in der weichen, diffusen Verteilung. Strahlt es Richtung Decke oder wird es über die Wände reflektiert, bleibt der Blick des Betrachters umfassender, weniger auf Details gelenkt. Diese Beleuchtungsstrategie verleiht einem Raum Höhenwirkung und greift architektonische Gestaltungsmerkmale strukturierend auf.

Werden mehrere dreidimensionale Objekte beleuchtet, empfiehlt sich eine flutende Rasterbeleuchtung über der Ausstellungsfläche. Indirekter Tageslichteinfall oder Lichtdecken erzeugen diffuses Raumlicht mit weichen Schatten und einen eher ruhigen Eindruck. Im Vergleich zu kontrastreicher Akzentbeleuchtung wirken Objekte so eher neutral. Die diffuse Beleuchtung trägt auch dazu bei, dass die Exponate gleichberechtigter wahrgenommen werden.

In der Museumspraxis werden akzentuierende wie diffuse Beleuchtungsarten gerne kombiniert. Je nach gewünschtem Ergebnis hat man damit alle notwendigen Lichtwerkzeuge zur Hand, um Formen betont zu unterstreichen.

[46] Wird der Dinosaurier aus verschiedenen Richtungen angestrahlt, wirkt er viel plastischer und realer. Naturhistorisches Museum, Wien.

[47] Hier bleibt der Raum im Dunkeln. Licht und Schatten unterstützen die plastische Figürlichkeit. Die Skulpturen werden in den Fokus des Betrachters gerückt. Museo del Duomo, Mailand.



53



54



55

Licht für Vitrinen

Auch wenn die LED-Technik durch die Miniaturisierung viele neue Möglichkeiten eröffnet: Exponate in Vitrinen professionell zu beleuchten, bleibt eine anspruchsvolle Aufgabe. Für ein optimales Ergebnis müssen Lichtplaner, Ausstellungsgestalter und Vitrinenbauer eng zusammenarbeiten.

Um wertvolle Exponate vor Verschmutzung oder Beschädigung zu schützen, werden sie in vielen Museen „hinter Glas“ in Vitrinen präsentiert (lateinisch vitrum = Glas). Klimavitrinen sorgen sogar für konstante Temperatur und Luftfeuchtigkeit.

Glasscheiben schaffen eine Distanz zwischen Objekt und Betrachter, die das Erlebnis schmälern kann. Diesem Eindruck versucht man über die Beleuchtung entgegenzuwirken. In der musealen Vitrinenbeleuchtung sollte die Verglasung aus der Wahrnehmung weitgehend ausgeblendet werden. Das bedeutet in erster Linie, einen Lichtreflex auf den Scheiben zu vermeiden, der das Glas als transparenten Werkstoff überhaupt erst sichtbar werden lässt (siehe Kasten unten).

Die praktische Umsetzung der Beleuchtung ist von Ausstattung und Bauform der Vitrine abhängig. Grundsätzlich

unterscheidet man freistehende, an- oder eingebaute Vitrinen. Je nach Proportionen differenziert man auch zwischen Hoch-, Tisch- oder Pultvitrinen. Besondere Bedingungen ergeben sich zudem daraus, ob die Vitrinen einen Rahmen oder sogar eine Haube besitzen oder ganz aus Glas bestehen.

Ganzglasvitrinen sind von außen wie von innen beleuchtbar. Vorteil der Beleuchtung von außen ist, dass sie konzeptionell und technisch Teil des gesamten Beleuchtungssystems im Ausstellungsraum ist. Eine übermäßige Wärmebildung im Inneren der Vitrine wird vermieden.

Bei Vitrinen mit Lichthauben wurden lange, in die Haube integrierte Leuchtstofflampen mit Blendschutzrastern verwendet. Auch faseroptische Lichtsysteme kamen hier zum Einsatz. Doch die moderne LED-Technik mit flexiblen Miniaturisierungsmög-

lichkeiten, geringem Wärmeeintrag sowie UV- und IR-freiem Licht setzt sich heute mehr und mehr durch. Hersteller bieten inzwischen Baukastensysteme mit Miniaturoptiken für brillantes, gerichtetes Licht, wie auch lineare LED-Profile für eine schattenarme Ausleuchtung von Exponaten an. Auch die Auswahl passender Lichtfarben und eine gute Farbwiedergabe sind für ein optimales Ergebnis entscheidend.

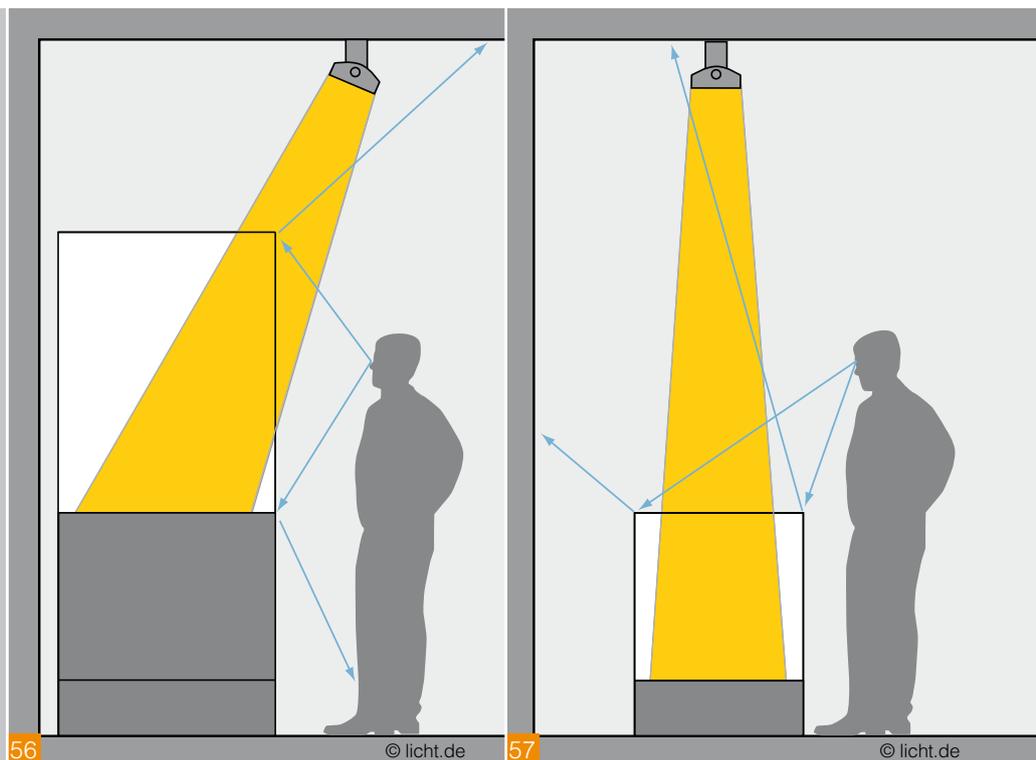
[53] Die edlen Exponate in Vitrinen werden von der Decke aus blendfrei und gleichwertig in Szene gesetzt. Mathematisch-physikalischer Salon, Zwinger, Dresden.

[54, 55] Vitrinen mit Lichthauben, Ganzglasvitrinen und spezielle Klimavitrinen sorgen hier nicht nur für den optimalen Schutz der antiken Exponate, sondern auch für einen ungestörten Blick des Betrachters. Links: Domschatzkammer, Aachen. Rechts: Aomori Museum of Art, Tokio, Japan.

Spiegelungen vermeiden

Glas stört die Betrachtung von Exponaten kaum, solange es nicht durch Reflexe und Spiegelungen als trennende Ebene sichtbar wird. Bei der Positionierung von Lichtquellen, ob innerhalb oder außerhalb der Vitrine, sollte also darauf geachtet werden, dass sie sich, aus dem Blickwinkel des Betrachters gesehen, nicht auf den Glasflächen spiegeln. Auch dunkle Rückwände sowie eine gedämpfte Grundhelligkeit im Raum reduzieren Reflexionseffekte – ebenso wie die Verwendung von entspiegeltem Glas.

Beleuchtungswinkel: Insbesondere bei der Beleuchtung von Ganzglasvitrinen mit Strahlern von außen sollte der Beleuchtungswinkel so gewählt werden, dass Betrachter nicht durch Reflexe und Spiegelungen der Lichtquelle geblendet werden. Für Hochvitrinen [56] eignet sich in der Regel ein Beleuchtungswinkel steil von vorne, bei Tischvitrinen [57] eine Beleuchtung senkrecht von oben. Zusätzlich muss für ein makellooses Bild gegebenenfalls auf den Schattenwurf durch die Glaskanten geachtet werden.





58



59

Objektschädigung durch optische Strahlung

Photochemischer Vorgang

Ursache

- Spektrale Verteilung der auftreffenden Strahlung
- relative spektrale Objektempfindlichkeit
- Bestrahlungsstärke
- Bestrahlungsdauer

Wirkung

- Farbveränderungen
- Verblassen
- Veränderung im Farbton
- Farben werden dunkler
- Verlust von Brillanz
- Ausfransen von Stoffen
- Brüchigkeit
- Risse

Wärmestrahlung

Ursache

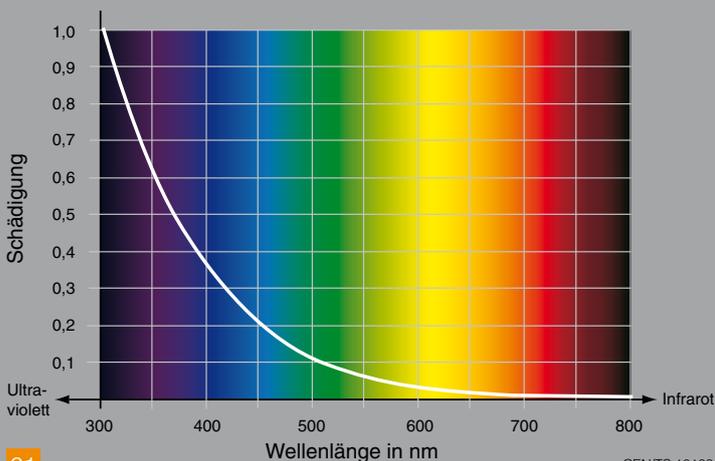
- Umgebungstemperatur
- Bestrahlungsstärke
- Thermische Empfindlichkeit des Exponats

Wirkung

- Trocknungsschwind
- Mechanische Spannungen
- Rissbildung
- Herabsetzen der Elastizität

60

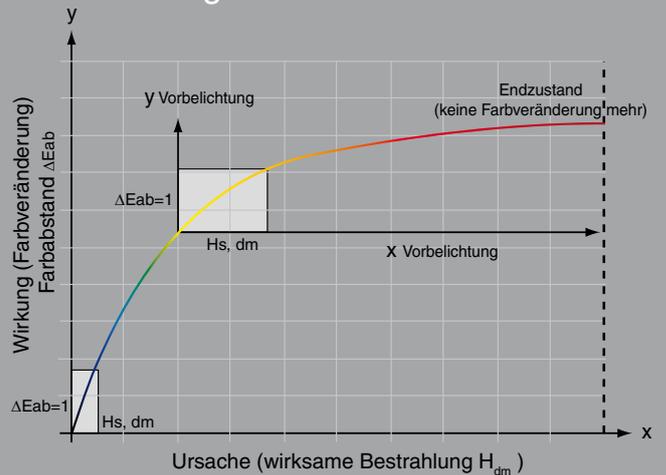
Empfindlichkeitskurve für Schädigung:



61

CEN/TS 16163

Bewertungsschema für Lichtschäden



62

CEN/TS 16163

Konservatorische Aspekte

Nach den „Standards für Museen“ des ICOM (The International Council of Museums) sollen Museen Kultur- und Naturerbe der Menschheit vermitteln und bewahren. Zeugnisse aus Vergangenheit und Gegenwart dauerhaft zu erhalten, erfordert spezifische Kenntnisse zu potenziellen Schadensfaktoren und besondere Technologien.

Als eine der wichtigsten Aufgaben der Konservatoren hat sich die „Präventive Konservierung“ durchgesetzt. Sie versucht, mögliche Schäden an Werken – auch durch Licht – so gering wie möglich zu halten. Grundsätzlich gilt: Jede Strahlung, ob im sichtbaren oder nicht sichtbaren Wellenlängenbereich, kann schädigen. Hinzu kommen Wechselwirkungen mit anderen Faktoren, wie Temperatur, Feuchte, Luftverschmutzung und andere. Restauratorische Grundbedingungen und Anforderungen an die Präsentation müssen also grundsätzlich bestmöglich in Einklang gebracht werden. Die LED-Technologie bietet allerdings heute die Möglichkeit, sowohl den Lichtschutz zu gewährleisten als auch deutlich verbesserte Sehbedingungen für den Betrachter zu schaffen.

Photochemische Reaktionen

Strahlung ist Energie, die von den Molekülen eines Kunstwerks absorbiert oder reflektiert wird und so unterschiedliche chemische Reaktionen mit anderen Molekülen erzeugt, die Materialschädigungen bedeuten können. Jedes Molekül eines Exponats benötigt dafür eine spezifische Mindest-Aktivierungsenergie. Wird diese durch Lichtstrahlung erreicht oder überstiegen, kann es zu einer direkten Spaltung (Photolyse) der Molekülbindung, also zum Zerfall des Werkes, kommen. Fremdmoleküle wie Sauerstoff, Wasserdampf oder Schadstoffe sowie eine verschmutzte Oberfläche begünstigen diesen Prozess durch Photooxidation.

Die Schädlichkeit der Lichtstrahlen sinkt mit steigender Wellenlänge, und die Empfindlichkeit der Exponate ist auch materialabhängig. Die Empfindlichkeitskurve für Schädigungen (Abb. 61 auf Seite 28) zeigt, dass Strahlung in der Wellenlänge von 365 nm ein 135-fach höheres Schadenspotenzial aufweist als Strahlung im Gelbgrün-Bereich bei 546 nm.

Ursachen photochemischer Reaktionen

Maßgeblich für die Schädigung von Objekten durch Strahlung bzw. Licht sind:

- **Spektrale Zusammensetzung des Lichts bzw. der optischen Strahlung**
Energie und Schädlichkeit der Strahlung steigen mit kürzer werdender Wellenlänge (UV>Blau>Grün>Gelb>Rot>IR). Welche Lichtquelle mit welchem Spektrum wurde gewählt? Gibt es Filter oder andere lichtlenkende Materialien? LED-Lichtquellen weisen kein UV-Licht auf. Sie sind daher grundsätzlich zu bevorzugen.
- **Relative spektrale Objektempfindlichkeit**
Wird durch die unterschiedlichen Materialien bedingt: Organische sind besonders anfällig für photochemische Veränderungen, anorganische meist stabiler.
- **Bestrahlungsstärke E [W/m²]**
Die gesamte Strahlungsleistung, die auf die betroffene Oberfläche trifft, gemessen in W/m². Sie ist nicht zu verwechseln mit der Beleuchtungsstärke.
- **Bestrahlungsdauer H [Ws/m²]**
Meint in der Regel die Öffnungszeit des Museums plus Wartungszeiten. Außerhalb der Öffnungszeiten sollte jegliche Bestrahlung der Exponate möglichst vermieden werden.

Der Schwellenbestrahlungswert

Schon bei der ersten Lichtexposition beginnt die Veränderung lichtempfindlichen Materials, zunächst unschwellig, später evident. Kriterien für Schädigungen sind sichtbare Farbveränderungen (ΔE). Mit der Berechnung der Schwelle von unsichtbarer zu sichtbarer Veränderung definiert man für jedes Material dessen eigenen Schwellenbestrahlungswert, der sich in bestimmte Empfindlichkeitskategorien einordnen lässt. Lichtschäden addieren sich auf und sind irreversibel, es erfolgt also keine Regeneration (siehe Abb. 62 auf Seite 28).

Maßgeblich für eine Schädigung ist die Dosis der Strahlung, also das Produkt aus **Bestrahlungsstärke x Zeit**.

Bei konstanter Bestrahlung ergibt sich die photochemisch wirksame Bestrahlung (Dosis) H in Wh/m² zu:

$$H_{dm} = E_{dm} \times t$$

(dm = damage of materials)

Beispiel:

In einer Sonderausstellung soll ein Exponat mit 100 Lux beleuchtet werden. Bei einer geplanten Dauer von 100 Tagen und 10 Stunden täglich ergibt sich eine Betriebszeit von 1000 Stunden und somit eine Dosis von 100 lx x 1000 h = 100.000 lxh.

Dieser Wert muss niedriger sein als der festgelegte Grenzwert (siehe auch Abb. 70 auf S.31). Wird der Grenzwert überschritten, kann sowohl über die Beleuchtungsstärke als auch über die Ausstellungszeit die maximale Dosis angepasst werden.

[58] Der Schutz weltberühmter Wandgemälde gilt als konservatorische Herausforderung. Sixtinische Kapelle, Rom. Photo Copyright - Governatorato dello Stato della Città del Vaticano – Direzione dei Musei.

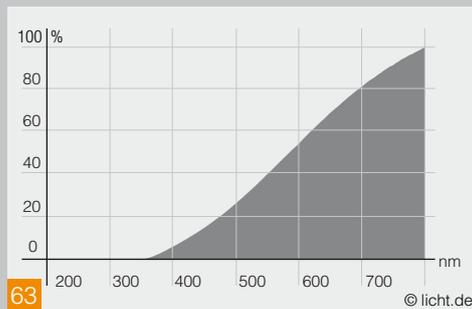
[59] Messgeräte helfen dabei, die reale Strahlenbelastung zu ermitteln.

[60] Darstellung zweier verschiedener Vorgänge, die als Ursache für die Objektschädigung durch Licht oder Strahlung gelten.

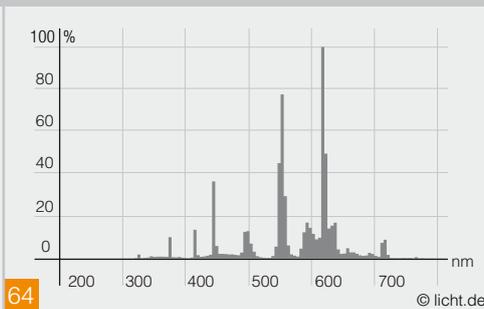
[61] Die Schädlichkeit von Lichtstrahlen sinkt mit steigender Wellenlänge, wie man in der Empfindlichkeitskurve für Schädigung sieht.

[62] Bewertungsschema für Lichtschäden: Lichtschädigungen addieren sich auf und sind nicht mehr rückgängig zu machen.

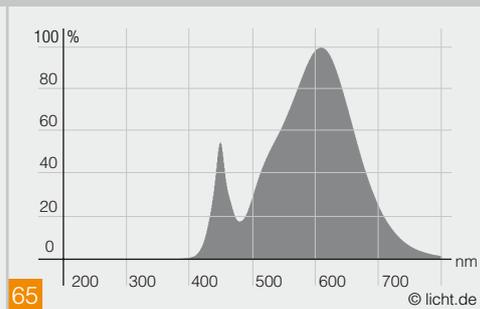
Spektrum Niedervolt Halogenlampe



Spektrum Leuchtstofflampe FL 830



Spektrum LED Lösung mit 3000 K



Schädigungsfaktor

Der Schädigungsfaktor beschreibt das Schädigungspotenzial einer Lichtquelle, abhängig von ihrem Spektrum. Schädigende Bestrahlungsstärke und Beleuchtungsstärke am Exponat stehen in einem festen Verhältnis zueinander. Berücksichtigt werden dabei

- das Spektrum der Lichtquelle
- die relative spektrale Empfindlichkeit des Exponats
- der relative spektrale Hellempfindlichkeitsgrad des menschlichen Auges
- sowie eine potenzielle Filterung

Es gilt: Je höher der Schädigungsfaktor (Relative Damage Factor), desto größer die Schädigung.

Wärmestrahlung

Wärmestrahlung entsteht durch den IR-Anteil in der Lichtquelle. Je nach Beschaffenheit des Exponats absorbiert es, sobald es beleuchtet wird, Strahlungsenergie, die, wenn nicht photochemisch, so doch thermisch wirksam wird. In welchem Maße das Objekt dadurch Schaden erleidet, ist abhängig von seinen Materialeigenschaften.

In jedem Fall führt Wärme zu einer beschleunigten chemischen Alterung. Der Temperaturanstieg ist neben Dauer und Intensität der Bestrahlung vom Absorptionsgrad der Oberfläche abhängig. Dunkle Oberflächen absorbieren mehr Wärme als weiße oder metallisch glänzende Texturen.

Von der Temperaturleitzahl des Materials ist es abhängig, wie sich die Wärme im Material verteilt. Für organische Materialien gilt die Faustregel: Eine um 10 °C höhere Temperatur führt zu doppelt so schneller Alterung. Empfindliche Materialien, wie Wachs, Holz oder ähnliches, sind besonders gefährdet. Bei gut isolierenden Materialien kann es zu einer stärkeren Temperaturerhöhung auf der Ober-

fläche kommen. Übliche Schäden durch Wärme sind mechanische Spannungen, Verlust der Elastizität, Rissbildungen und Austrocknungen. Hohe IR-Anteile in den Lichtquellen sollten daher vermieden bzw. ausgefiltert werden.

Tageslicht

Ungefiltertes Tageslicht ist um ein vielfaches schädlicher als künstliches Licht. Ursache ist die hohe Beleuchtungsstärke und der hohe Blauanteil im Spektrum. Tageslicht sollte im Museum nie direkt und ungefiltert, sondern nur baulich reduziert verwendet werden. Jalousien oder Klappläden an Außenfenstern blenden nicht nur Tageslicht, sondern auch den Wärmeeintrag in das Gebäude ab. Fensterscheiben und Oberlichter sollten UV- und IR-Anteile absorbieren. Weitere Details siehe Kapitel „Lichtdecken“ und „Tageslicht“ Seiten 32-35.

Schutzmaßnahmen

- **Die Auswahl der Lichtquelle**
Tabellen zum Schädigungsfaktor besagen, dass besonders warmweiße LED-Leuchten ein geringeres Schädigungspotenzial aufweisen als andere Lichtquellen. Der konservatorische Vorteil der LEDs ist, dass sie keinerlei schädliche UV- und IR-Strahlung produzieren. LED-Lichtquellen eignen sich daher gerade für die Museumsbeleuchtung.
- **Ausfiltern schädigender Strahlung**
Sollten andere Lichtquellen als LED-Leuchten eingesetzt werden, können unerwünschte Strahlungsanteile je nach Anforderung für die verschiedensten Spektralbereiche speziell ausgefiltert werden. So besteht bei empfindlichen Exponaten oft der Wunsch, Strahlung bis zu 420 nm auszufiltern. Dies erfolgt durch dichroitische Filter. Je steiler dabei die Kennlinie, umso sauberer wird ausgefiltert. Beachtet werden sollte aber, dass jeder Filter den Wirkungsgrad einer Leuchte vermindert und den Farbwiedergabe-Index verändert.

Zeitliche Begrenzung der Bestrahlungsdauer

Exponate und Ausstellungsräume sollten nicht länger als unbedingt nötig beleuchtet werden. Neben der Bestrahlungsstärke kann über eine deutliche Verringerung der Bestrahlungszeit (gemäß des Bunsen-Roscoe'schen Gesetzes) die potenzielle Schädigung nachhaltig reduziert werden.

Dafür gibt es mehrere Möglichkeiten: Außerhalb der Öffnungszeiten ist vollkommene Dunkelheit das Beste. Für die notwendige Reinigung (Putzlicht) oder Aufbau-, Abbau- und Reparaturarbeiten ist eine separate Grundbeleuchtung empfehlenswert, die die Exponate nicht belastet. Auch mechanisch können Exponate vor Lichteinfall geschützt werden, indem sie unter Klappen oder in Schubladen verborgen werden, die der Besucher bei Interesse selbst öffnet. Auch Vitrinen mit Schaltern für „Light on Demand“ erfordern Mitwirkung, sind jedoch ein probates Mittel, um vor allem sehr empfindliche organische Exponate zu schützen.

Besteht das Museum aus vielen Einzelräumen, in denen sich nicht dauerhaft Besucher aufhalten, empfiehlt es sich, die Beleuchtung durch den Publikumsverkehr mittels Bewegungsmeldern oder anderer Sensoren aktivieren zu lassen. Die Schaltung sollte bereits vor dem Betreten des Raumes, für den Besucher unmerklich, erfolgen. Mittels Nachlaufsteuerung kann das Licht dann zeitverzögert wieder ausgeschaltet werden.

Generell kann die Verwendung von Lichtsteueranlagen, dimmbaren Leuchten und ähnlichen Steuerungen zur Reduzierung des Schädigungspotenzials empfohlen werden. Das technische Personal des Hauses sollte jedoch entsprechend geschult und in der Lage sein, die komplexen Systeme an die jeweiligen Anforderungen anzupassen.

Empfindlichkeitsklassen und Expositionszeiten

			
1. Kategorie Unempfindlich	2. Kategorie Geringe Empfindlichkeit	3. Kategorie Mittlere Empfindlichkeit	4. Kategorie Hohe Empfindlichkeit
Feste, lichtunempfindliche Materialien	Dauerhafte, etwas lichtempfindliche Materialien	Weniger dauerhafte, lichtempfindliche Materialien	Sehr lichtempfindliche Materialien
Metalle, Mineralien, Stein, Glas, echte Keramik, Emaille	Öl- und Temperagemälde, Fresken, ungefärbtes Leder und Holz, Horn, Knochen, Elfenbein, Lack, verschiedene Kunststoffe	Kostüme, Aquarelle, Pastelle, Wandteppiche, Drucke, Zeichnungen, Manuskripte, Tapeten, Gouachen, gefärbtes Leder, botanische Proben, Felle, Federn	Zeitungen, Historische Dokumente, Fotodrucke, Transparente, Papyrus, preiswerte synthetische Farben, Seide, historische Textilien
Grenzwerte Beleuchtungsstärke in Lux (lx)			
Unbegrenzt	200	50	50
Jährliche Präsentationszeit in Stunden pro Jahr (h/a)			
Unbegrenzt	3.000 z.B. 250 Tage (bei 12h proTag)	3.000 z.B. 250 Tage (bei 12h proTag)	300 z.B. 37 Tage (bei 8h proTag)
Grenzwerte der Belichtung pro Jahr in lx h/a			
Unbegrenzt	600.000	150.000	15.000

CEN/TS 16163

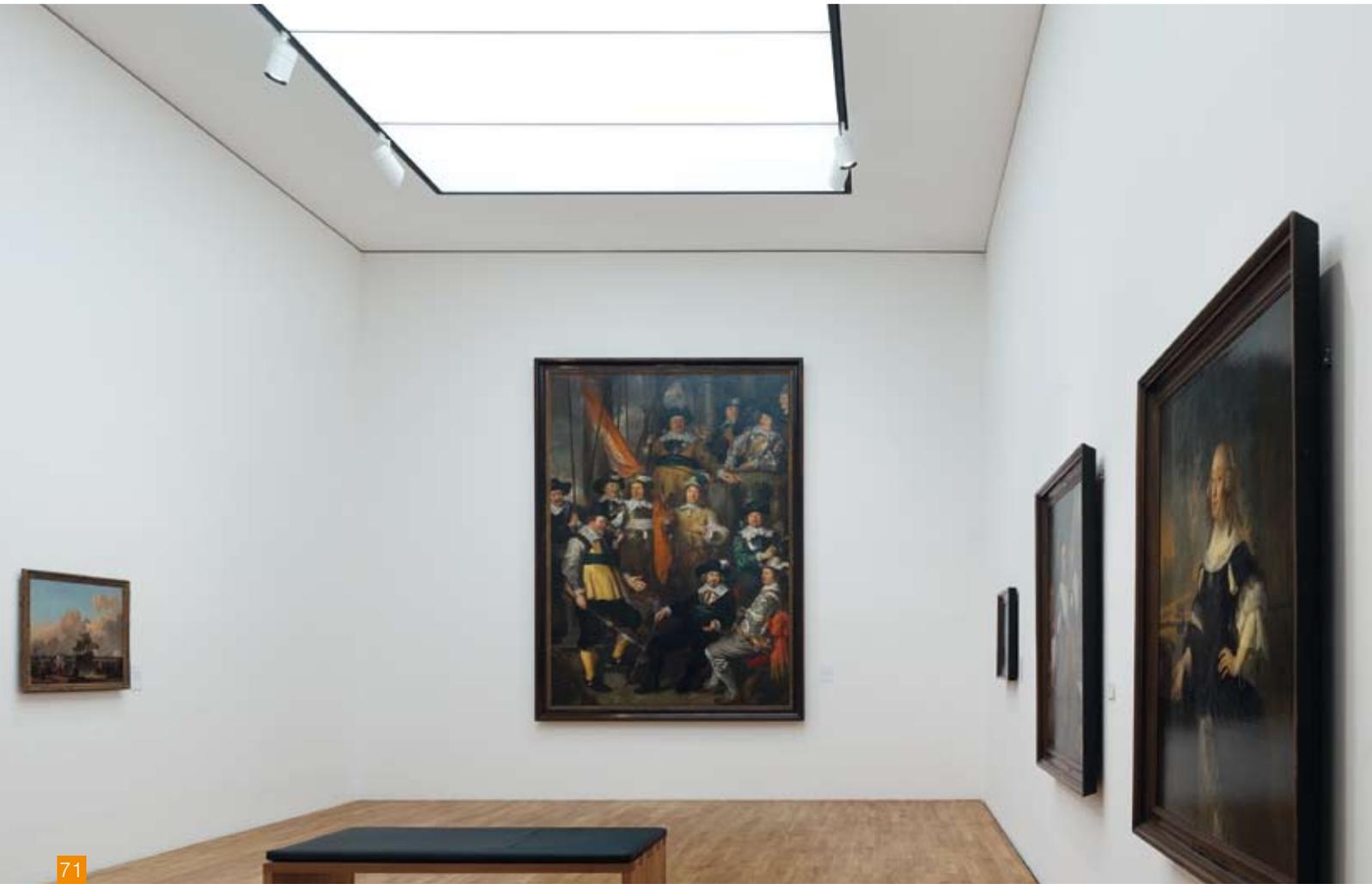
[63-65] Vergleich unterschiedlicher Lichtquellen: Die Vorteile einer LED-Beleuchtung sind hier gut zu erkennen, da diese nahezu UV- und IR-frei ist. Damit lassen sich in der Praxis deutlich höhere Expositionszeiten und /oder Beleuchtungsstärken erzielen.

[66-70] Diese Tabelle gibt eine Übersicht über mögliche Expositionszeiten. Die musealen Exponate sind in vier Empfindlichkeitsklassen eingeteilt, denen jeweils ein Grenzwert der Beleuchtungsstärke zugewiesen wird. Ausgehend von den jeweils bekannten Schwellenbestrahlungszeiten werden daraus Grenzwerte für jährliche Belichtungen und Präsentationszeiten berechnet.

Diese Übersicht kann nur eine erste Empfehlung sein. Sie rechnet vereinfachend nur mit Beleuchtungsstärken und nicht mit Bestrah-

lungsstärken. Weiterhin ist eine Zuordnung zu den Empfindlichkeitskategorien oft schwierig, wenn es sich um Mischproben handelt.

Vor allem im Leihverkehr werden einzelne Exponate mit einem Lichtpass versehen. Darin werden Beleuchtungsstärken und Expositionszeit des Objekts vermerkt, aus denen sich die Strahlungsdosis errechnet. Der Lichtpass legt in der Regel eine von der Empfindlichkeit des Exponats abhängige jährliche Strahlungsdosis fest, die insgesamt nicht überschritten werden darf.



Lichtwerkzeuge: Lichtdecken

Tageslicht zu simulieren, folgt dem Wunsch, jederzeit ein natürliches und qualitativ hochwertiges Ausstellungserlebnis zu ermöglichen. Technisch ausgeklügelte Lichtdecken liefern dabei ein konstantes, von Wetter und Tageszeit unabhängiges, UV-freies Licht.

[71] Klassische Kombination aus diffusem Licht über eine Lichtdecke und gerichtete Spots. Villa Vauban, Luxemburg.

[72, 73] Lichtdecken erzeugen gleichmäßiges, diffuses Licht im Raum. Damit die leuchtende Fläche homogen leuchtet, sollte der Abstand zwischen den einzelnen LED-Lichtquellen nicht zu groß sein.

[74, 75] Das diffuse, weiche Deckenlicht sorgt für eine gleichmäßige Beleuchtung von Wand und Raum. Lenbachhaus, München.

Funktionale Lichtdecken stehen für lichtstarke, sich zurückhaltend in die Architektur eingliedernde Beleuchtungslösungen. Bei opaler Abdeckung entsteht eine dem bedeckten Tageslichthimmel ähnliche Lichtqualität ohne UV-Strahlung. Milchüberfanggläser und Abdeckungen aus satinierem oder strukturiertem Glas für gerasterte Deckenentwürfe ermöglichen die Montage von LED-Lösungen analog zum Profilraster. In jeder Lichtdecke entsteht Wärme, die gezielt abgeleitet werden sollte. Für gutes, gleichmäßiges Licht (Abb. 73) sollte der Abstand b zwischen den einzelnen LED-Komponenten gleich dem Abstand a zwischen LED-Komponenten und Lichtdeckenabschluss sein.

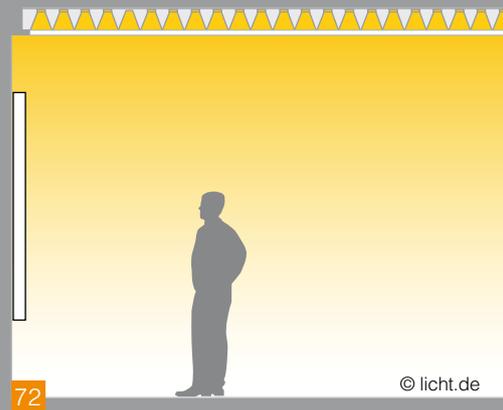
Raumproportionen, Charakter und Art der gezeigten Exponate bestimmen Größe und Einteilungen der Lichtdecke sowie den Über-

gang zwischen Decke und Wand. Durchgängige, fugenfreie Lichtdecken haben eine eigene Ästhetik, ihre Großflächigkeit verleiht dem Raum einen zurückhaltenden Charakter. Sie lassen sich mithilfe flexibler Spannfolien konstruieren und genau anpassen. Variable Spotsysteme ergänzen die Qualität einer Tageslichtdecke um die Möglichkeit, mit gerichtetem Licht Akzente auf Wand und Exponate zu setzen.

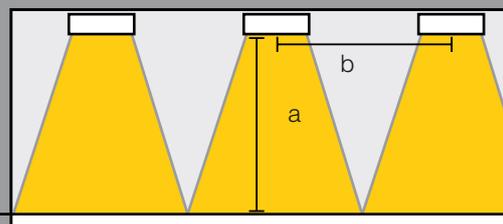
Tageslichtsimulation

Wetterunabhängige Lichtdecken mit Tageslichtqualität weisen konstant hohe Leuchtdichten zwischen 500 bis 1.000 Candela pro m^2 , bei ganz hohen Räumen sogar bis 2.000 Candela pro m^2 auf. Der ideale Raum für eine Lichtdecke ist mindestens 6 Meter hoch. Ist der Raum niedriger, ist ein Großteil des Sichtfeldes eingenommen. Das Licht

Lichtdecke mit künstlichem Licht



Lichtdeckendetail



könnte blenden. Dimmt man aus konservatorischen Gründen die Lichtwerte, geht die Tageslichtqualität der Decke verloren. Sie kann dann grau und erdrückend wirken.

Lichtfarben

Die Lichtfarbe prägt die (Licht-) Stimmung und damit das Raum- und Ausstellungserlebnis. Modulationsfähige LED-Hinterleuchtungen in der Decke erzeugen unterschiedliche Weißtöne („Tunable White“), die dem natürlichen Tageslicht sehr nahe kommen.

Warmes Licht mit geringer Beleuchtungsstärke kann als angenehm oder festlich empfunden werden. Kältere Weißlichttöne mit hoher Lichtstärke wirken eher anregend und aktivierend. Das „Einspielen“ bläulicher Lichttöne kann sogar einen „Tageslichthimmel“ simulieren.

Lichtdecken sollten immer von Spezialisten geplant und umgesetzt werden, da hier viele Gewerke Hand in Hand arbeiten müssen. Weitere Infos zu Tageslichtsystemen auf den Seiten 34-35.



Tageslichtsysteme

Noch im frühen 19. Jahrhundert waren Museumsräume vom Tageslicht abhängig. Mit der Erkenntnis, dass Sonnenlicht die Exponate schädigt, ging man dazu über, Museen mit überwiegend künstlicher Beleuchtung zu konzipieren. Heute werden Tageslichträume dank modernster Lichtsystemtechnik wieder sehr gerne eingeplant.

Von Tageslicht durchflutete Räume stellen für die Präsentation von Kunstwerken einen hohen Qualitätsfaktor dar. Tageslicht sorgt für einen positiven, hellen Gesamteindruck im Raum und bietet Orientierung zu Zeit, Ort, Wetter und Ausrichtung des Raumes. Zudem verfügt es über ein relativ gleichmäßiges Spektrum und lässt Gegenstände dadurch in ihren natürlichen Farben erstrahlen.

Die potenziell schädigende Wirkung des Tageslichts auf Exponate darf bei der Lichtplanung allerdings nicht vernachlässigt werden. Lichtempfindliche Ausstellungsstücke erfahren durch die Einstrahlung von Tageslicht eine photochemische Änderung. Möglicherweise verändert sich die Farbe durch Verblässen oder Nachdunkeln. Sogar Form, Struktur oder Oberfläche können massiv Schaden nehmen und reißen, splintern, austrocknen, oder Ähnliches. Vor allem bei Aquarell- und Ölmalereien werden im Museum bei Tageslichteinfall Farbveränderungen befürchtet.

Die ungünstige Wirkung von Tageslicht wird mittels folgender Parameter bestimmt:

- Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke
- spektrale Verteilung der Strahlung
- Bestrahlungsdauer
- relative spektrale Objektempfindlichkeit

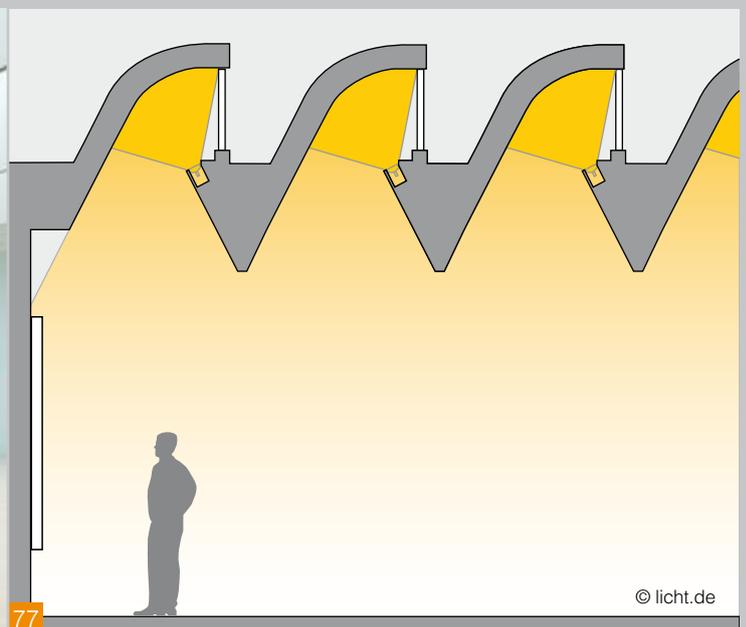
In tagesbelichteten Museen müssen die positiven Aspekte natürlichen Lichts mit den konservatorischen Anforderungen für die Exponate in Einklang gebracht werden. Die Lichtplanung sollte daher nur von erfahrenen Fachplanern vorgenommen werden.

Tageslichtmuseum

Im frühen 19. Jahrhundert arbeiteten die öffentlichen Museumsbauten vollständig mit Tageslicht, da es keine Alternative für die Ausstellungsbeleuchtung gab. Schon früh kamen daher Oberlichter zum Einsatz. Erst als in den 1950er und 1960er Jahren die Erkenntnis einsetzte, dass Sonnenlicht eine teilweise schädigende Wirkung auf die Ausstellungsstücke hat, wurden nur noch Museen mit ausschließlich künstlicher Beleuchtung gebaut. In bestehenden

[76, 77] Moderne Lichttechnik kann nahezu unsichtbar Einfallrichtung und Lichtverteilung einer natürlichen Lichtquelle nachempfinden. Hier gelangt Tageslicht über Reflektorflächen in den Raum, das direkte Sonnenlicht wird ausgefiltert. Melden die Sensoren zu wenig Tageslicht, wird mit indirektem Kunstlicht unmerklich nachgeholfen. Lenbachhaus, München.

[78, 79] Direktes Tageslicht wird über die Prismen ausgefiltert, nur Licht aus nördlichen Richtungen dringt in den Innenraum. Kunstmuseum Ahrenshoop.



Häusern wurden vorhandene Lichtöffnungen verschlossen und die Ausstellungsmacher konzentrierten sich von nun an auf fensterlose Räume. Dank der Weiterentwicklung modernster Steuerungs- und Regelungstechniken für Tageslichtsysteme ist heute der Einsatz von Tageslicht im Museum wieder möglich.

Oberlichter

Gemäldegalerien sind im Sinne einer klassischen Tageslichtbeleuchtung meist mit Oberlichtern ausgestattet, die für eine gleichmäßige, diffuse Beleuchtung sorgen. Das großflächig von oben einfallende Tageslicht erreicht nahezu alle Bereiche eines Raumes, auch freistehende Vitrinen, Skulpturen und Stellwände. Es lässt weiche Schatten im Raum entstehen.

Tageslichtsysteme und ihre Möglichkeiten

In der Entwicklung von Tageslichtsystemen geht es prinzipiell darum, die Vorteile und Qualitäten natürlichen Lichtes zu nutzen und seine Nachteile technisch zu kompensieren. Dafür entwarf man optische Komponenten, die zum einen wie ein effizienter und gleichzeitig lichtdurchlässiger Sonnenschutz wirken, zum anderen als lichtlenkende Bauteile dienen. Tageslicht wird damit kalkulierbar einsetzbar, ohne dass es seine Dynamik verliert. Dabei machen sich Hersteller verschiedene optische Gesetzmäßigkeiten wie Reflexion, Transmission und Brechung zu eigen, um

das für Schäden, Raumerwärmung und Blendeffekte verantwortliche direkte Sonnenlicht auszublenden und zugleich nur das durch die Filterung weniger energiereiche, an sich diffusere Tageslicht gezielt in den Innenraum zu lenken. Allen Systemen ist dabei gemeinsam, dass sie auf einem richtungsabhängigen Transmissionsverhalten mit Sperr- und Durchlassbereich basieren.

Tageslichtsysteme werden in zwei Kategorien eingeteilt:

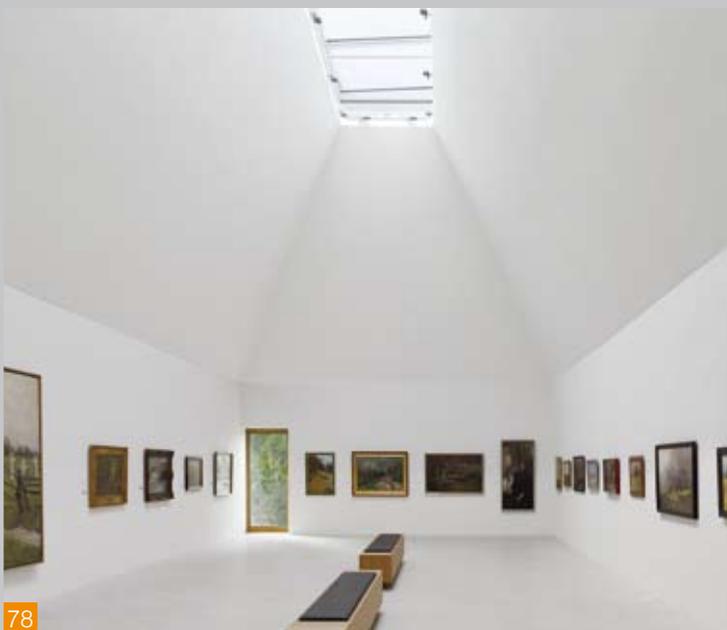
1. **Reflektorsysteme** nutzen die hochwertigen Reflexionseigenschaften verwendeter Materialien und deren spezielle Formgebung zur Erfüllung der jeweiligen Funktion (Sonnenschutz/Lichtlenkung).
2. **Prismensysteme** nutzen die am Prisma geltenden optischen Gesetze (Totalreflexion/Brechung) und die Reflexion an dünnen Aluminiumschichten.

Anwendungsbereiche

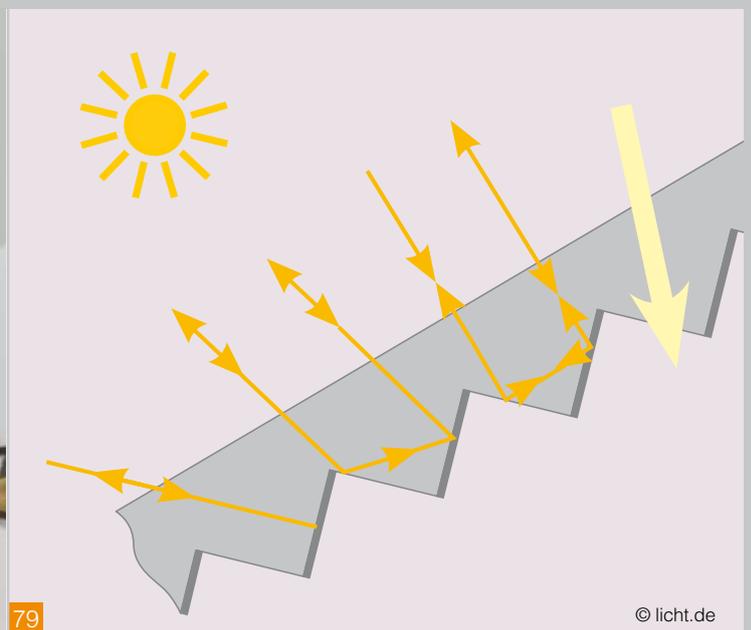
Tageslicht integrativ zu nutzen, bedeutet, es durch die Oberlichter einzufangen und auf die Wände zu richten, um lichtdurchflutete Ausstellungsräume zu schaffen. Nutzt man ein Prismensystem in einem Glasdach, kann dies die direkte Sonneneinstrahlung reflektieren und nur das aus nördlicher Richtung auftreffende diffuse Tageslicht in den Innenraum hineinlassen. Feststehende Systeme können mithilfe

unterschiedlicher Prismenstrukturen beziehungsweise Drehungen der Prismenplatten an die projektspezifischen Anforderungen angepasst werden, die zum Beispiel aus der geografischen Lage, der Neigung der Verglasung, der Orientierung an der Himmelsrichtung und vielem mehr entstehen. Mit dem eher flachen und diffusen Tageslicht allein kommt man allerdings oft nicht aus. Als zusätzliche Komponente sollte noch eine Akzentbeleuchtung über Strahler gesetzt werden.

Reicht Tageslicht für die Beleuchtung des Raumes generell nicht aus, wird es zusätzlich durch LED- oder Langfeldleuchten ergänzt oder ersetzt, die unterhalb der Prismenverglasung angebracht werden und sich durch sehr gleichmäßiges Licht auszeichnen. Das Oberlicht wird dann zum Raum hin mit einer Lichtdecke aus Folienmaterial bezogen, das die Leuchten und Lichtlenkungssysteme verdeckt. Um das bedarfsgerechte Zusammenspiel von Tages- und Kunstlicht zu sichern, ist eine zentrale Lichtsteuerung notwendig. Nur so kann trotz des zusätzlichen Kunstlichts die Dynamik des Tageslichtes im Raum erhalten bleiben. Der Besucher erlebt damit eine einheitliche Lichtquelle an der Decke, die dezent in den Hintergrund tritt und der präsentierten Kunst den Vorrang lässt.



78



79

Licht für Ausstellungen im Freien

Ausstellungsflächen im Außenraum, wie Skulpturengärten, historische Freiluftmuseen oder Technikparks mit großen, manchmal noch beweglichen Objekten, erfordern maßgeschneiderte, blendfreie Beleuchtungslösungen, die zwischen Exponaten und Umfeld eine ästhetische und erläuternde Verbindung schaffen.

Bei einigen Museen liegen die Ausstellungsflächen überwiegend im Freien. „Freilicht“-Museen zum Beispiel bestehen aus historischen Dörfern, die die frühere ländliche Lebensweise zeigen. Naturmuseen beherbergen große Außenräume, Naturlandschaften, in denen Pflanzen, Vögel und Insekten in ihrer Artenvielfalt zu sehen sind. Kontexte und Bedingungen der einzelnen Museen sind sehr unterschiedlich. Allgemein gültige Regeln für die Beleuchtung lassen sich hier nicht aufstellen, jedoch sollte Streulicht generell vermieden werden.

Eingänge und Vorplätze

Exponate auf Museumsvorplätzen und in Eingangsbereichen erweitern Ausstellungen

in den Außenbereich. Eine erhöhte Präsenz des Museumsgeschehens und eine Art „Markenidentität“ entstehen und wecken Interesse. Beleuchtungskonzepte für Exponate im Außenraum sollten mit denen des Museumsgebäudes korrespondieren.

Skulpturengärten im Außenraum

Skulpturenparks von Kunstmuseen erweitern das Ausstellungsgeschehen um eine zusätzliche Dimension. Bei Tageslicht von allen Seiten gleichberechtigt sichtbar, lassen sich die Exponate bei Dunkelheit durch Licht herausragend inszenieren. Auch im öffentlichen Umfeld platzierte abstrakte Skulpturen können ein echter Blickfang sein und sich zu reizvollen



80



81

Skulpturenensembles in das Stadtbild einfügen. Ihre nächtliche Beleuchtung sollte vielschichtige Bezüge zur Umgebung aufgreifen. Sie kann aus effizienten, langlebigen LED-Scheinwerfern oder LED-Bodeneinbauleuchten bestehen. Zusätzlich sollte, beispielsweise mit Drahtkörben, eine Vandalismussicherung montiert sein.

Technikmuseen

In Technikmuseen findet man Exponate, die – wegen ihrer Größe und Funktion – kaum in geschlossenen Räumen gezeigt werden können, zum Beispiel Lokomotiven, die noch betriebsbereit sind und im Museumsbetrieb für Sonderfahrten genutzt werden. Auch Flugzeuge werden häufig im Freien präsentiert und nachts effektiv beleuchtet.

Durch die sorgfältig inszenierte Präsentation im Freien durch eine differenzierte Anstrahlung, beispielsweise mit Außenraum-Beamern aus größerer Entfernung, wird dem Besucher die Größe

und Dynamik der Exponate häufig erst bewusst. Werden die Leuchten an Masten montiert, lassen sich Lichtakzente aus optimalen Einfallswinkeln setzen. Sinnvoll ist zusätzlich eine Beleuchtung von unten mit Bodeneinbauleuchten oder am Boden montierten Strahlern.

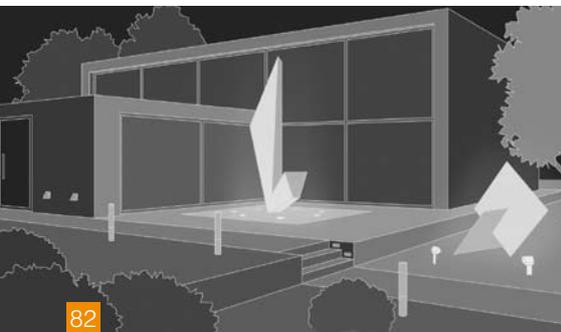
Archäologische Objekte

Die Beleuchtung archäologischer Außenobjekte ist eine besondere Herausforderung, da jedes Umfeld einzigartig ist. Ziel kann es daher nur sein, sich der optimalen Lösung zwischen Gestaltung und Aufwand anzunähern. Die Platzierung von Lichtwerkzeugen im historischen Kontext muss sorgsam mit dem Denkmalschutz abgestimmt werden. Für die Beleuchtung von Säulen bietet sich ein Streiflicht aus Bodeneinbaustrahlern an. Fassaden, Torbögen und Wände werden je nach Gestaltungsansatz gleichmäßig mit Wandflutern beleuchtet, spezielle Architekturelemente können durch Spots akzentuiert werden.

[80] Skulpturengärten von Museen können einen wesentlichen Teil der Ausstellungsfläche bilden. Sind die Exponate am Tag im Park von allen Seiten gleichberechtigt sichtbar, erlebt man sie nachts durch die Anstrahlung und Inszenierung völlig anders. Danubiana, Meulensteen Art Museum, Bratislava.

[81] Die Kunsthalle in Emden, mit hell erleuchteter Schiffsanlegestelle und von unten angestrahelter Skulptur.

[83] Antike Bauten und archäologische Funde bedeuten lichttechnisch eine Herausforderung. Jeder Ort ist aufgrund seiner besonderen Bedingungen einzigartig und erfordert ein eigenes Lichtkonzept. Fori Imperiali, Rom.



82

Objektbeleuchtung im Außenraum

Das Spektrum der lichttechnischen Werkzeuge [82] und planerischen Möglichkeiten im Außenraum ist im Prinzip das gleiche wie im Innenraum. Nur die Leuchten und die Montagevorrichtungen unterscheiden sich in ihrem wassergeschützten Aufbau und der höheren Schutzklasse für den Außeneinsatz. Auch für Blendschutz, Kontraste und Lichtrichtung gelten die gleichen Gesetze. Allerdings ist zu beachten, dass das Umfeld außen deutlich dunkler und variabler ist. Die Umgebungsbedingungen verändern sich fortlaufend durch Jahreszeiten und Wetter. Um die Dreidimensionalität der Ausstellungsstücke hervorzuheben, sollten pro Objekt mehrere Lichtquellen mit unterschiedlichen Ausstrahlwinkeln eingesetzt werden. Die Lichtrichtung sollte immer blendfrei, vom Betrachter abgewandt, gewählt werden. Als Leuchten eignen sich Bodeneinbaustrahler oder fest montierte Außenstrahler.



83



84

Licht für Fassaden

Ob klassizistischer Altbau oder postmoderne Architektur, Glas-, Beton- oder Stahlkonstruktion – die technischen Möglichkeiten in der Beleuchtung von Fassaden und deren Akzentuierung in ihrem jeweiligen Umfeld durch den gezielten Einsatz von Licht sind heute vielfältiger und ausgereifter denn je.

Betonen am Tage natürliche Lichtstimmungen architektonische Besonderheiten von Gebäuden, bietet der Einsatz individueller, nächtlicher Beleuchtungslösungen viele zusätzliche gestalterische Möglichkeiten auf der Fassade. Drei Lichtdimensionen sind dabei besonders zu beachten:

1. Fläche: Breitstrahlende Leuchten aus geringer Distanz oder lichtstarke Fluter, z.B. an gegenüberliegenden Masten oder Gebäuden, leuchten vertikale Ebenen gleichmäßig aus. Das flächig auftreffende Licht lässt Fassaden gleichmäßig hell, aber weniger plastisch wirken.

2. Plastizität: Nahe der Fassade angebrachte, akzentuierende Leuchten schaffen Plastizität. Die gut kontrollierbare Lichtverteilung bringt Details wie Simse, Vorsprünge und Fenster mit „dramatischen“ Hell-Dunkel-Kontrasten verstärkt zur Geltung. In Kombination mit der flächigen Beleuchtung entsteht so ein enger Bezug zur Architektur.

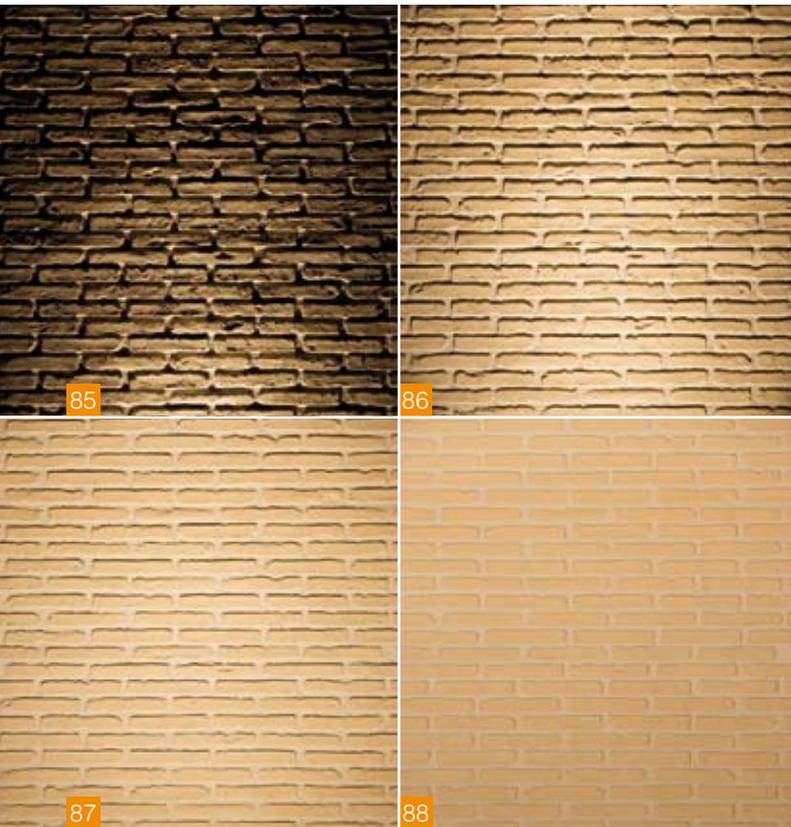
3. Räumlichkeit: Der Einsatz von Licht in von innen heraus leuchtenden Fenstern oder beleuchteten Fensterlaibungen gliedert die Fassade.

Lichtwerkzeuge

Je nach Planung kommen Bodeneinbauleuchten, LED-Liniensysteme oder verschiedene Strahler für den Außenbereich zum Einsatz. Ausgereifte Optiken, Reflektoren und Linsen steuern das Licht genau dahin, wo es auch gebraucht wird, ob modulierbar und blendfrei zur Ausleuchtung von Details oder zur gleichmäßigen Ausleuchtung von Wänden und vertikalen Plakatierungsflächen. Alle Komponenten müssen natürlich wetterfest und vandalismussicher sein. Moderne Leuchten mit effizienten Lichtquellen reduzieren Lichtimmissionen und Lichtsmog. Studien belegen, dass LED-Lösungen nicht nur viel Energie sparen, sondern auch weit weniger Insekten anlocken als vergleichbare Halogen-Metaldampflampen.

[84] Akzentuierte Beleuchtung eines historischen Gebäudes: Die Säulen werden einzeln angestrahlt, der Sims oben und die Treppen werden mit höheren Leuchtdichten herausgehoben. Durch eine die Beleuchtung der zurückliegenden Wand wird eine besondere Tiefenwirkung in den Arkaden geschaffen. Kunstmuseum, Göteborg.

[89] Geflutete, architektonisch hochinteressante Fassade, in der Klassizismus und Moderne spielerisch gegenübergestellt werden. Militärlhistorisches Museum, Dresden.



Wände und Texturen

Bei der Beleuchtung von Fassaden entscheidet unter anderem der Abstand der verwendeten Leuchten zur angestrahlten Wandfläche stark über die Wahrnehmung von Farbe, Materialität und Oberfläche. Je nach Entfernung der Lichtquelle werden dabei ganz unterschiedliche Aspekte betont.

Positioniert man eine Leuchte beispielsweise sehr nahe an der Mauer, wie in diesem Beispiel [85] bei ca. 30cm, und richtet den Lichtkegel auf sie, beleuchtet das Licht die auswölbende Oberfläche des Steins, während Einbuchtungen im Schatten verborgen bleiben. Die Mauer erscheint damit in starken Hell-Dunkel-Kontrasten, Farben werden nur sehr schlecht wahrgenommen. Es dominiert die Oberflächenstruktur, sodass die Mauer dunkel und bedrohlich wirken kann.

Befindet sich die Leuchte in einem Abstand von ca. 90 cm vor der Mauer [86], ändert sich das Bild: Die Oberflächenstruktur erscheint weniger dominant und man kann bereits einige Farben erkennen.

Erhöht man die Distanz der Leuchte auf 3 m [87] bzw. 9 m [88], erscheint die Fläche merklich weicher und flacher. Die Farben werden klarer und besser erkennbar, während die Oberflächenstruktur immer unspezifischer wird. Das Auge kann hervorstechende und eingebuchtete Stellen nicht mehr voneinander unterscheiden.



Lichtsteuerung

Analysiert man als Anwender gezielt die Funktionen und Nutzungszusammenhänge der Räume eines Museums, stellt man fest, dass einige mit konstanten Lichtsituationen auskommen, andere aber, in denen durch Umbau und Wechselausstellungen mehr passiert, flexiblere, anpassungsfähigere Lichtlösungen brauchen.

Bei der Analyse des Lichtbedarfs in einem Museum begegnet man in der Ausgangssituation vielen Fragen: Besteht der Bedarf nach Flexibilität? Ist viel oder wenig Licht gefordert? Wird eine Anstrahlung von einer bestimmten Seite benötigt? Es kann auch mal sein, dass die Beleuchtung in angrenzenden Raumzonen stört oder dass Tageslicht in so ausreichendem Maße vorhanden ist, dass man auf das künstliche Licht in bestimmten Tagesphasen gänzlich verzichten kann. Dieses setzt voraus, dass die elektro- und lichttechnische Infrastruktur das Anbinden von Lichtsteueranlagen ermöglicht. In Zukunft wird das immer mehr Stand der Technik sein.

Moderne Licht- und Steuerungskonzepte bieten optimal „smarte“ Verknüpfungen von intelligenten, steuerbaren Leuchten mit Dimmfunktionen und veränderbaren Lichtfarben, Bedienelementen, Tageslicht- und Bewegungssensorik sowie elektronischen Vorschaltgeräten und Steuergeräten. Sie können nicht nur die Lichtintensität und -qualität steuern und dabei den Energieverbrauch senken,

sondern arbeiten noch dazu hundertprozentig nutzungsspezifisch. Auf diese Weise ist es möglich, für Menschen mit unterschiedlichen Aufgaben und Sehnotwendigkeiten im Museum – und zwar nicht nur für die Besucher im Ausstellungsraum – genau das passende Licht einzustellen, sei es in der Restaurationswerkstatt, im Büro des Museumsdirektors, in der Bibliothek und im Archiv, für die Kuratorin und ihr Ausstellungskonzept oder die Gäste im Museumscafé, um nur einige zu nennen.

Intelligentes Lichtmanagement

Moderne Lichtmanagementsysteme können diese Leistungsstärke vor allem durch den Einsatz intelligenter Sensorik und Software anbieten. Professionelles Lichtmanagement bedeutet für Museen eine deutliche Differenzierung im Wettbewerb, beispielsweise in Form einer auf Flexibilität ausgelegten Beleuchtung, die nicht nur Energie spart, sondern darüber hinaus den Museumsbesuch durch die Inszenierung passender Lichtstimmungen zu einem Erlebnis macht.

[90] Über ein Laptop lassen sich die einzelnen Beleuchtungskomponenten des Raumes ansteuern und justieren.

[91, 92] Sich farbig veränderndes Licht im Museumsfoyer begrüßt die Besucher mit dynamischen Lichtsequenzen. Palacio Ferreyra, Córdoba, Argentinien.





Ein weiterer Vorteil für die verantwortlichen Museumskuratoren, Techniker und Künstler ist, dass sie sich das Licht gezielt passend und sinnvoll akzentuierend zu den Exponaten einstellen können. Mehrkanalige LED-Leuchten lassen sich in ihren spektralen Anteilen variieren und in ihrer Farbtemperatur (K) verändern. Auch die Bestrahlungsleistung $[W/m^2]$ lässt sich gemäß konservatorischen Kriterien reduzieren. Zusätzlich zur Lichtvariabilität sind Leuchten an unzugänglichen Stellen oder in sehr hohen Räumen über Steuerungen auch in ihrer Position veränderbar. Sie lassen sich elektronisch drehen und schwenken. Und selbstverständlich kann man sich über diese Systeme jederzeit „on demand“ zu ihrem Energieverbrauch informieren und Verbrauchsauswertungen erstellen.

Intelligentes Gebäudemanagement

Für diese komfortablen Funktionalitäten in Gebäuden stellen Licht- und Elektroindustrie, aber auch die IT-Branche ein umfassendes Repertoire an Gebäudeautomationssystemen mit passender Anwendungssoftware zur Verfügung.

Als klassische, drahtgebundene Technologien im Bereich der Lichtsteuerung haben sich Programme wie Digital Addressable Lighting Interface (DALI), Digital Multiplex (DMX) oder KNX seit langem bewährt.

In den letzten Jahren sind mehr und mehr Systeme dazugekommen, die auf Funkbasis (ZigBee, Bluetooth), W-LAN oder LAN/Ethernet aufsetzen. In naher Zukunft dürften vermutlich sämtliche elektrotech-

nisch, aber auch autark funktionierenden Komponenten in einem Gebäude oder im öffentlichen Raum bereits mit einer individuellen IP-Adresse ausgestattet sein.

Lichtsteuerungssysteme müssen vor allem aber auch bedienbar bleiben. Schon in der Konzeptionierungsphase sollte der Systemintegrator dieses Ziel sicherstellen. Über eine leicht verständliche Bedienschnittstelle, zum Beispiel mittels einer logischen App für Lichtszenarien, lässt sich dies unkompliziert ermöglichen. Im Kern sind Lichtmanagementsysteme höchst komplex, doch mit der entsprechend intuitiv bedienbaren Steuerung steht einer Nutzerfreundlichkeit nichts im Wege.



Sicherheitsbeleuchtungssysteme

Sicherheitsbeleuchtungssysteme [93] in öffentlichen Gebäuden schalten sich automatisch ein, wenn die Allgemeinbeleuchtung ausfällt. Sie ermöglichen damit den Besuchern, sich auch im Notfall im Gebäude zurechtzufinden und es bei Gefahr schnell zu verlassen. Voraussetzung dafür sind Sicherheits- und Rettungszeichenleuchten. Sie zeigen Rettungswege nach draußen sowie zu Schutzeinrichtungen auf und ermöglichen so auch einen schnelleren Zugriff auf Feuerlöscher. Damit helfen sie, Gefahren für Menschen in Gebäuden zu reduzieren und Leben zu retten. Gemäß DIN EN 1838 ist eine horizontale Beleuchtungsstärke von mindestens einem Lux auf der Mittelachse eines bis zu zwei Meter breiten Rettungsweges vorgeschrieben.

 Detaillierte Informationen hierzu sind im licht.de Heft 10 Notbeleuchtung, Sicherheitsbeleuchtung zu finden.

Dynamische Inszenierung, Lichtkunst

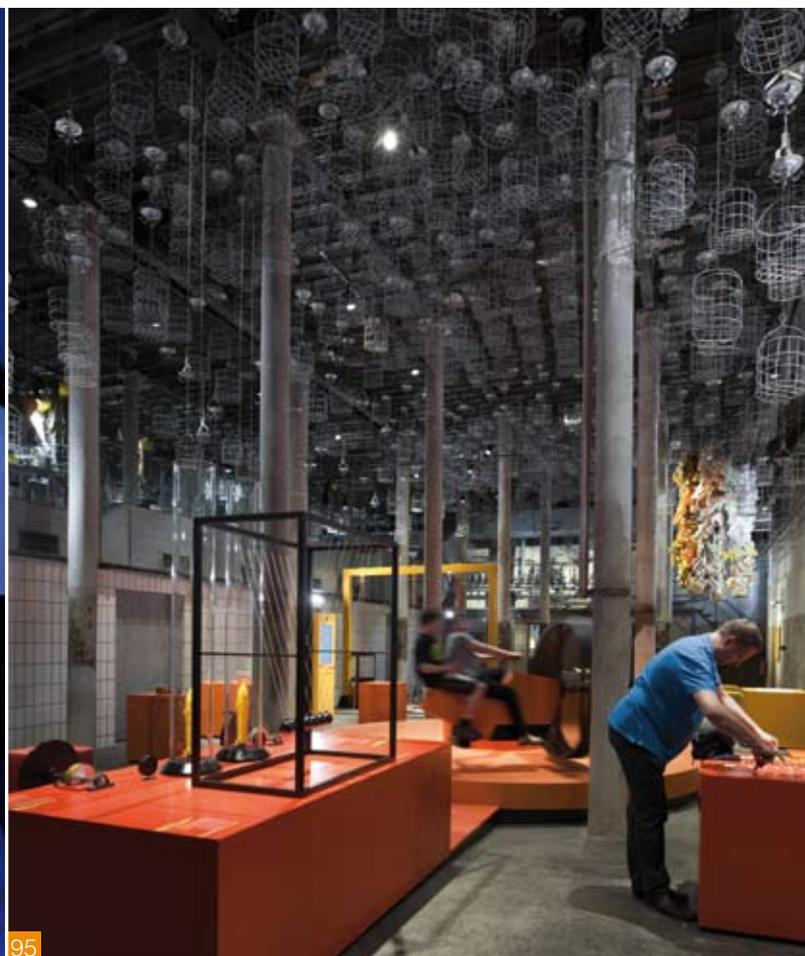
Nach dynamischen Beleuchtungskonzepten inszenierte Gebäude erscheinen immer wieder in neuem Licht und ziehen damit die Blicke auf sich. Lichtkunst als Stilmittel geht sogar noch einige Schritte weiter. Sie hat sich im letzten Jahrhundert regelrecht als eigenständige Kunstrichtung etabliert.

Künstliches Licht wird in unserem Umfeld überwiegend eingesetzt, um Sehbedingungen zu verbessern, sich im Dunklen gut orientieren zu können oder für mehr Sicherheit zu sorgen. Neben diesen funktionalen Aspekten gilt es aber auch, Objekte zu illuminieren und im Dunklen sichtbar zu machen.

Eine dynamische Inszenierung mit Licht ergänzt die reine Beleuchtung um eine weitere Qualität. Gebäude oder Objekte werden in einer Weise in Szene gesetzt, dass sie die Umgebung formal bereichern. Immer wieder sollen sie in neuem, beispielsweise unterschiedlich farbigem Licht erscheinen oder sogar als Projektionsfläche

für Bilder und Botschaften dienen, die „auf-rütteln“ und zum Nachdenken anregen können oder einfach nur einer ganz eigenen Ästhetik dienen.

Durch unsere natürliche Umgebung sind wir an dynamische Lichtveränderungen gewöhnt. Schon das Tageslicht weist durch seine stetige Bewegung und ständig wechselnde Zustände eine ausgeprägte Dynamikbandbreite auf. Unser Umfeld wirkt lebendig und abwechslungsreich. Will man diese Lebendigkeit oder eine eigene gestalterische Dynamik mit künstlichem Licht nachts oder innerhalb von Gebäuden erzeugen, gibt es verschiedene technische Möglichkeiten.



Eine recht einfache Herangehensweise an die Komposition von Lichtdynamik kann die Verwendung zweier unterschiedlicher Lichtfarben sein, um einen lebendigen Kontrast zu erzielen. Hierbei wird der Ausstellungsraum in einen kalten Lichtton (8.000 Kelvin) getaucht und das Exponat mit akzentuiertem, warmweißem Licht (2.700 K) angestrahlt. Dynamik bedeutet also nicht zwingend nur, zeitlich sich verändernde Lichtzustände zu schaffen, sondern kann durch gezielte Lichtdifferenzierung auch innerhalb eines Raumes erzeugt werden.

Um das passende dynamische Lichtkonzept für ein Museum bzw. eine Ausstellung zu kreieren, ist das richtige Gespür für Raum und Kunst gefordert sowie die Fokussierung auf die wichtigsten Details. Nur bei einer perfekten Dynamik zwischen Licht, Raum und Exponat entsteht ein für den Betrachter beeindruckendes optisches Erlebnis. Ein erfahrener Lichtplaner weiß, wie eine gezielte Lichtdifferenzierung erzeugt wird.

Immer häufiger begegnet man dauerhaften Lichtinstallationen, die Bauwerke besonders in Szene setzen und optisch von der Umgebung absetzen wollen. Diese Form der dynamischen Beleuchtung, oft auch als "Architainment" bezeichnet, ist nur in Feinabstimmung mit dem Landschafts- und Städtebau sowie den Umweltschutzbehörden möglich. Vorgaben und Regelungen dafür werden meist in sogenannten Masterplänen oder Lichtleitwerken niedergeschrieben, die in vielen Städten von fachkundigen Lichtbeiräten mitentwickelt wurden.

Lichtkunst

Licht wird jedoch nicht nur genutzt, um Gegenstände oder architektonische Besonderheiten hervorzuheben. Auch das Licht an sich wird um seiner Faszination willen präsentiert und hält als „Lichtkunst“ Einzug in unser tägliches Leben. Lichtkünstler präsentieren ihre kreativen Ideen auf den verschiedensten Lichtveranstaltungen, wie der Luminale in Frankfurt und

Glow in Amsterdam oder im Zentrum für Lichtkunst in Unna. Sie machen das Licht als eigenständiges Kunstwerk erlebbar.

[94] Warmweiß beleuchtete Objekte heben sich besonders gut von einem kaltweißen Hintergrund ab. Fundación Cristóbal Balenciaga, Getaria, Spanien.

[95] Die Besucher werden animiert, selbst aktiv zu werden. Energeticon, Alsdorf.

[96] Fassadeninszenierung zum Jahr des Lichts 2015. Mit 200 Strahlern wird die Fassade durch wechselnde Lichtbilder in Szene gesetzt. Deutsches Museum, München.

[97] Lichtkunst im Zentrum für Internationale Lichtkunst, Unna.



96



97



Licht für interaktive Ausstellungen

Anders als im klassischen Museum, durch das der Besucher sich mithilfe einer Ausstellungsbroschüre navigiert oder den erläuternden Worten eines Tour-Guides lauscht, erlebt der Besucher eines interaktiven Museums sofort eine direkte Wechselbeziehung zwischen sich und dem betrachteten Objekt.

Moderne Museums- und Ausstellungskonzepte setzen auf Interaktion, durch die jeder Besucher tiefer in die Welt und den Kontext der Exponate eintauchen kann. Durch dieses Prinzip und die entsprechenden technischen Funktionen gelingt es nicht nur, einen größeren, sondern auch einen heterogenen Interessentenkreis aus jüngeren wie älteren Menschen auf verschiedenen Ebenen zu erreichen. Grundsätzlich sind dem technisch Machbaren keine Grenzen gesetzt. Kuratoren und Techniker haben viele Gestaltungsmöglichkeiten für Innovatives, um sich interaktiv nahezu uneingeschränkt im Museum zu bewegen. Licht spielt dabei eine sehr wichtige Rolle. Es kann weit mehr leisten, als einen Raum „nur“ zu beleuchten.

Licht als Informationsträger

In der Interaktion des Besuchers mit Gegenständen oder Experimenten einer Ausstellung lässt sich Licht gezielt als Informationsträger oder Signal für Feedbacks einsetzen. Dafür muss ein Impulsaustausch zwischen Experiment und Beleuchtungsanlage stattfinden. Moderne Lichtsysteme können derartige Impulse verarbeiten und mit entsprechenden Lichteinstellungen reagieren. Bei einem Kälte-Wärme-Experiment beispielsweise kann die Beleuchtung durch entsprechende Lichtfarben bestimmte Einstellungen signalisieren.

Interaktive Lichtkonzepte

Lichtplaner und Museumsmitarbeiter können heute auf ein enormes Portfolio an Licht- und Steuerungstechnik zurückgreifen und Lichtkonzepte zu jedem gewünschten Thema umsetzen. Ausstellungsbereiche lassen sich gezielt in bestimmte Lichtstimmungen tauchen, um eine passende Atmosphäre zu schaffen und die Wahrnehmung des Betrachters zu steuern. So eignet sich beispielsweise bläulich-kaltes Licht gut, um Erwartungen der Besucher an die faszinierende

Weltraumtechnik in den Weiten des Universums zu verstärken. Ergänzend aktivierte Bildprojektionen laden unweigerlich zu einem Ausflug ins All ein. Lichtreflexe lassen Eishöhlen zu faszinierenden Erlebniswelten werden. Fokussiertes Licht lenkt die Aufmerksamkeit auf bestimmte Dinge im Raum und gezielte Dunkelheit blendet irrelevante Bereiche aus. Leben und Untergang der Dinosaurier lässt sich noch spannender und vielschichtiger untermalen, wenn Besucher aus Animationseffekten zwischen „Alltag“ und „Dramatik“ wählen können.

Technologisch gesehen, hat die Zukunft der Lichttechnik im Museum schon begonnen: Die Didaktik trifft bereits die Smartphone Community. Mittels drahtloser Verbindung zwischen Mobiltelefon und Beleuchtungsanlage sind beispielsweise individuelle Themenrouten, Informationsabfragen und direkte Interaktionen möglich. Entsprechende Apps können auf der Homepage des Museums downloadbar sein. So lässt sich der Museumsbesuch sehr individuell planen und gestalten, spannende Erkenntnisse oder Bilder von Exponaten können direkt gepostet und mit Freunden geteilt werden. Darüber hinaus liefern diese Apps dem Betreiber anhand von Auswertungen, Points of Interest und Nutzerdaten ein wertvolles Feedback. Moderne Museen und Ausstellungen sind somit auch in der Welt der Social Media angekommen.

[98] Große und kleine Museumsbesucher werden von anfassbaren Objekten angesprochen. Die Beleuchtung sorgt für einen schwebenden Charakter der Exponate. Planetarium, Moskau.

[99] Interaktion sorgt für Aktivität der Museumsbesucher. Bei der Beleuchtung von Bildschirmen muss auf Blendfreiheit geachtet werden. Energeticon, Alsdorf.

[100] Ausstellungs- und Museumshinweise können per App abgerufen werden. Licht und Ton werden, durch den Standort des Nutzers gesteuert, am jeweiligen Ort automatisch abgespielt. Städel Museum, Frankfurt am Main.

[101] Die blau beleuchteten Wände erinnern an Arbeiten von Yves Klein. Palacio Ferreyra, Córdoba, Argentinien.



102



103

Energieeffiziente Sanierungskonzepte

Nicht nur aus Gründen der Kostenersparnis, auch in Bezug auf die Verantwortung für kommende Generationen wird ein umsichtiger Umgang mit Energie und Ressourcen immer wichtiger. Jeder Neubau, jede Sanierung, auch von Museumsgebäuden, bietet die Chance einer energieeffizienten Aus- oder Umrüstung.

Seit 1992 gibt es staatenübergreifende Klimaschutzkonferenzen, die im europäischen Rahmen mit Richtlinien wie der 2010/31/EU EPBD (Energy Performance of Buildings Directive) Regeln für die Gesamtenergieeffizienz von Gebäuden vorgeben. Diese beziehen sich auf Energieeffizienz, umweltgerechte Gestaltung sowie die Lichttechnik in Gebäuden (näheres auf www.licht.de).

Die Richtlinie 2002/91/EG (national als Energieeinsparverordnung (EnEV)) zur Gesamtenergieeffizienz bezieht sich auch auf Einrichtungen und Nutzflächen von mehr als 500 Quadratmetern für gewerbliche, freiberufliche, kulturelle, soziale oder behördliche Zwecke mit starkem Publikumsverkehr und nimmt Einfluss auf Produkte und Planungsprozesse. Für Museumsneubau, Verkauf, Neuvermietung oder Verpachtung ist unter Anwendung der Berechnungsmethode DIN V 18599 ein EnEV-(Energieeinsparverordnung-)Nachweis verpflichtend.

Förderprogramme

Verschiedenste Fördermaßnahmen des Bundes, der Länder und der Kommunen unterstützen energieeffiziente Sanierungsmaßnahmen. Weitere aktuelle Infos sind auf www.licht.de zu finden.

Effizienter Umgang mit Licht im Museum

Neben der Aufgabe, dem Besucher den Aufenthalt so angenehm und interessant wie möglich zu gestalten, spielt im Ausstellungskonzept auch der sensible und damit energiebewusste Umgang mit Licht eine entscheidende Rolle. Bis zu 50 Prozent des gesamten Energiebedarfs eines Hauses können auf die Beleuchtung entfallen. Akzentuierung, Hinterleuchtung, indirekte Ausleuchtung, Licht aus Vouten, Lichtdecken, Tageslichtergänzung, vertikale Beleuchtung, Vitrinenlicht und vieles mehr erfordern sorgfältige, fachliche Lichtplanung und eine energieeffiziente Lichttechnik. Besonders bei Lichtkonzepten mit Vouten oder Lichtdecken muss auf die effiziente Auswahl transmittierender oder reflektierender Materialien geachtet werden.

Sanierung am Beispiel: Lichtdecke mit zwischenmontierter Blendrasteroptik

Lichtdecken sind Teil einer Beleuchtungsstrategie, deren Ziel eine gleichmäßige Ausleuchtung der Ausstellungsräume mit Tageslichtanmutung ist. In vielen Museen werden diese Lichtdecken noch mit herkömmlichen Leuchtstofflampen und konventionellen Vorschaltgeräten betrieben. Eine 30 m² große Lichtdecke mit 70

Lichtleisten, 58W/940 KVG, erzeugt eine Anschlussleistung von ca. 4.900 W. Bei jährlich 2.500 Betriebsstunden und 0,2 €/kW/h Strompreis entstehen jährlich Stromverbrauchskosten in Höhe von 2.450 €. Ersetzt man die älteren Lichtleisten durch lineare LED-Leuchten (Lichtausbeute ca. 125 lm/W bei gleicher Lichtfarbe), werden schnell 50% Strom gespart. Eine Amortisationsrechnung gibt Auskunft über den ROI (Return on Investment).

Auch in den anderen Nutzungsbereichen des Museums, wie Verwaltung, Werkstätten, Technik, Lager, Bibliothek, Vortragsräumen, Cafeteria, usw. ergeben sich weitere Sanierungspotenziale.

[102] Die „Pink Lounge“ wird mit linearen LED-Einbauleuchten von der Decke aus homogen und energieeffizient beleuchtet. Museo Jorge Rando, Málaga, Spanien.

[103] Mit der Sanierung wurde hier die Shed-Tageslicht-Beleuchtung um moderne LED-Strahler ergänzt. Lenbachhaus, München.

Checkliste Sanierung

Parameter für Sanierungsvorhaben	Projektbeteiligte <i>Raum für Notizen, Hinweise und Zuständigkeiten</i>	
	Museum: Museumsleiter, Technischer Leiter, Kurator, Restaurator / Konservator, Wissenschaftler, Eigentümer, Förderverein, Vorstand	Baubeteiligte: Bauherrenvertreter, Öffentliche Hand, Politik, Facility-Manager, Architekt, Lichtplaner, Elektroplaner, Elektriker, Ausstellungsplaner
1:1 Leuchten-Austausch oder Neuplanung? Soll mit der Sanierung auch die Lichtqualität und Lichtrichtung verbessert werden, ist eine detaillierte Lichtplanung mit neuen Montageorten der Leuchten erforderlich. Beim einem reinen 1:1 Austausch muss die Effizienz und Lichtqualität der Leuchten und Lichtquellen verglichen werden!		
Helligkeitsniveau Welche Beleuchtungsstärken [lx] und Leuchtdichten [cd/m ²] fordern die Richtlinien und sind einzuhalten? Verschiedene Funktionen und Bedürfnisse der Menschen im Gebäude beachten! Grundsätzlich ist eine individuelle Abstimmung mit den Objektverantwortlichen zu empfehlen.		
Amortisationszeit Zu beachten: Helligkeitsniveau der Neuanlage, Energieverbrauch vorher/nachher, reale Brennzeiten, Tageslichtnutzung, Lichtmanagementsystem, Kosten Installationsaufwand, Systemeffizienz der Neuanlage, Lebensdauer von Betriebsmittel und Lichtquelle, Kosten Neuanlage, ...		
Ausstellungskonzept: Flexibilität ermöglichen Ausstellungskonzepte sind oft temporär und variabel, gerade bei Wechselausstellungen. Bei der Sanierung sollte auf eine flexible und an die unterschiedlichen Bedürfnisse anpassbare Lichtlösung geachtet werden.		
Lichtkonzept Flutung, Akzentuierung, Framing etc. Kriterien zur Auswahl der geeigneten Lichtwerkzeuge festlegen! Auch alle Funktions- und Nebenräume dabei beachten!		
Lichtmanagement: Schaltung und Steuerung Moderne Leuchten und Lichtmanagementsysteme ermöglichen eine flexible, immer der Situation angepasste Lichteinstellung (Leuchten werden automatisch gesteuert). Das spart Energie, reduziert die Wartung und wirkt sich positiv auf die Amortisationszeit aus.		
Materialien im Raum/Lichtreflexion Für eine effiziente Beleuchtung beachten: Dunkle Materialien und Flächen reduzieren über die Lichtreflexion die Gesamthelligkeit im Raum. Bei den Lichtberechnungen müssen diese Faktoren mit einbezogen werden.		
Gütekriterien Beleuchtung ermitteln Lichtfarbe und Farbwiedergabe beachten! Lichtquellen können bei unterschiedlichen Farbwiedergaben trotz gleicher Leistung unterschiedliche Lichtausbeuten [lm/W] aufweisen. Bitte Herstellerangaben beachten und ggf. Einfluss auf die Amortisationszeit prüfen.		
Betriebsbedingungen der Beleuchtungsanlage Zusammenhang zwischen Temperatur, Lichtstromverhalten, Lebensdauer und Lichtfarbe beachten! Einbausituation auch hinsichtlich Temperaturentwicklung prüfen (Wärmestau in Vouten und Hinterleuchtungen ausschließen)!		
Nutzungszeiten ermitteln Anhand der Nutzungszeiten lassen sich die notwendigen Betriebszeiten für die Lichanlage ableiten. Es empfiehlt sich, diese für jeden Raum gesondert zu ermitteln und zu hinterfragen. Hier besteht ein großes Einsparpotenzial. Die Lichtsteuerung kann für „light on demand“ sorgen.		
Tageslicht Tageslicht spart Energie, kann aber empfindlichen Objekten schaden! Für konservatorisch unproblematische Bereiche kann Tageslicht mit Steuerungssensorik eingesetzt werden.		
Konservatorik Lichtstrahlung und die Einwirkdauer kann schädliche Auswirkungen auf Objekte haben. IR- und UV-Schutzmaßnahmen für Leuchten und Lichtquellen beachten! Herstellerangaben bezüglich Lichtspektrum und Farbwiedergabe geben Aufschluss über Schädigungspotenzial.		

Lichttechnische Grundbegriffe

Grundgrößen der Lichttechnik

Die gesamte, ringsum sichtbare Lichtleistung eines Leuchtmittels entspricht dem **Lichtstrom Φ** . Gemessen in Lumen (lm), berücksichtigt dieser auch die Helligkeitsempfindlichkeit des menschlichen Auges.

Die **Lichtausbeute η** misst das Verhältnis von Lichtstrom zu elektrischer Leistung und damit die Wirtschaftlichkeit eines Leuchtmittels. Die Maßeinheit ist lm/W. Bei einem Leuchtenvergleich über lm/W müssen zudem die Verluste durch Vorschaltgeräte berücksichtigt werden.

Die **Lichtstärke I**, gemessen in Candela (cd), bewertet die Lichtmenge, die in eine bestimmte Richtung abgestrahlt wird. Sie ist als Lichtstrom pro Raumwinkel definiert und wird von lichtlenkenden Elementen wie Reflektoren beeinflusst. Die Lichtstärkeverteilungskurve (LVK) zeigt das Lichtausstrahlungsverhalten der jeweiligen Leuchte.

Die **Leuchtdichte L** ist die photometrische Helligkeitsgröße einer selbstleuchtenden oder beleuchteten Fläche. Die Maßeinheit Candela/Quadratmeter (cd/m²) gibt die Lichtstärke auf einem definierten Ausschnitt dieser Fläche an, wobei die Leuchtdichte stark vom Reflexionsgrad der beleuchteten Fläche abhängt.

Die **Beleuchtungsstärke E** erfasst den Lichtstrom, der von einer Lichtquelle auf eine definierte Fläche trifft. Diese in Lux (lx) angegebene Größe ist wichtig für die Dimensionierung der Innenbeleuchtung. In den Normen DIN EN 12464 Teil 1 und 2 „Licht und Beleuchtung – Beleuchtung von Arbeitsstätten in Innenräumen und im Freien“ werden entsprechende Werte vorgegeben.

Leuchtenbetriebswirkungsgrad

Er beschreibt das Verhältnis abgegebenen Lichtstroms einer Leuchte zum Lichtstrom der verwendeten Leuchtmittel und wird (nach DIN EN 13032-2 „Messung und Darstellung photometrischer Daten von Lampen und Leuchten – Teil 2: Leuchten für die Innenraum- und Außenbeleuchtung“) auch als „Light Output Ratio“ (LOR) bezeichnet. Bei vielen LED-Leuchten wird oft auch ein LOR von 100% angegeben, da das LED-Leuchtmittel fest mit der Leuchte verbunden ist.

Reflexionsgrad ρ

Der Reflexionsgrad sagt aus, welcher Anteil des auftreffenden Lichtstroms – abhängig von Farbe und Oberflächenbeschaffenheit – von Flächen reflektiert wird. Er verbessert sich mit zunehmender Helligkeit und/oder Glätte der Oberfläche, und

erhellt dann umso stärker die Umgebung. Bei weißen Wänden und Decken liegt der Reflexionsgrad bei $\rho = 80$ Prozent.

Blendung

Blendung vermindert Sehleistung und Sehkomfort. Direktblendung wird von Leuchten oder sehr hellem Tageslicht verursacht, kann aber auch durch Reflexe, Spiegelungen auf glänzenden Oberflächen entstehen. Lichtquellen sollten deshalb in Blickrichtung abgeschirmt und richtig eingestellt sein.

Schatten und Modelling

Lichtstärke, Lichtrichtung und Schattigkeit müssen stimmen, damit Gegenstände, wie zum Beispiel Skulpturen, Reliefe und Texturen, erkannt und plastisch wahrgenommen werden. Im Modelling ist das Verhältnis von diffusem zu gerichtetem Licht ausgewogen.

Wartungswert

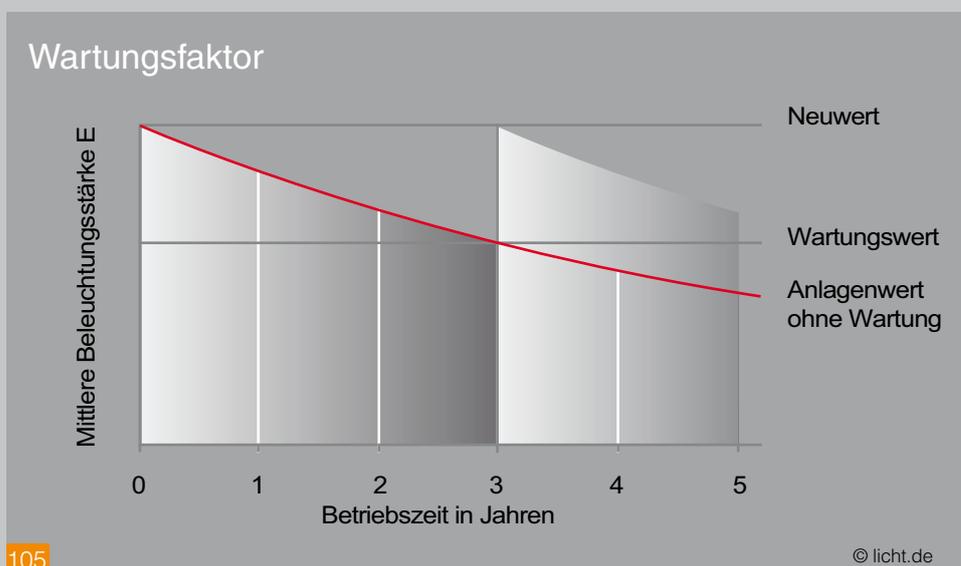
Der Wartungswert ist der auf eine bestimmte Fläche bezogene Wert in Lux, unter den die mittlere Beleuchtungsstärke auf einer bestimmten Fläche nicht sinken sollte. Abnutzung, Verschmutzung und Alterung von Lampen, Leuchten und Räumen verringern die Beleuchtungsstärke. Neuanlagen müssen mit höheren Beleuchtungsstärken dimensioniert werden (Neuwert), um diese Verringerung zu kompensieren. Bei der Lichtplanung wird diese Abnahme mit dem Wartungsfaktor erfasst:

$$\text{Wartungswert} = \text{Wartungsfaktor} \times \text{Neuwert}$$

Ein Lichtmanagementsystem kann unter anderem den Wartungswert über die Betriebszeit regulieren und so Energie einsparen.

Wartungsfaktor MF (maintenance factor)

Der Wartungsfaktor ist definiert als Verhältnis von Wartungswert zu Anfangswert der Beleuchtungsstärke. Er errechnet sich aus dem Produkt von Lampen-Lichtstromrückgang LLMF, Lampen-Lebensdauereinfluss LSF, Leuchtenverschmutzungseinfluss LMF und Raumverschmutzungseinfluss RMF.



Ansicht mit Spiegelung:



106

Ansicht ohne Spiegelung:



107

Gute Farbwiedergabe:



108

Schlechte Farbwiedergabe:



109

Lichtfarben

Lichtfarben bestimmen Raumeindruck und Wiedergabe der Exponate durch die Farbtemperatur der künstlichen Lichtquelle in Kelvin (K). Niedrige Werte stehen für warmtonige Beleuchtung, höhere für kühlere. Man kann sie in drei Kategorien einteilen: Warmweiß (Farbtemperatur unter 3.300K), Neutralweiß (zwischen 3.300K und 5.300K) sowie Tageslichtweiß (mehr als 5.300K). Warmweißes Licht betont rote und gelbe Farben, höhere Farbtemperaturen betonen blaue und grüne Farben.

Farbwiedergabe

Der Farbwiedergabeindex R_a hängt vor allem von Art und Qualität eines Leuchtmittels, also der spektralen Zusammensetzung des Kunstlichts ab und bewertet die Wiedergabe von Farben bei künstlicher Beleuchtung. Werte von $R_a = 100$ bedeuten eine sehr gute Farbwiedergabe. Moderne LED-Lichtquellen erreichen sehr gute Werte.

Kontrast

Kontrast ist der Unterschied zwischen zwei Objekten oder einem Objekt und seiner Umgebung in Leuchtdichte oder Farbe. Mit sinkendem Kontrast steigt die Schwierigkeit einer Sehaufgabe.

Kontrastwiedergabe

Kriterium für die Begrenzung der Reflexblendung. Die Kontrastwiedergabe wird durch den Kontrastwiedergabefaktor (CRF) beschrieben, der für die Sehaufgabe das Verhältnis des Leuchtdichtekontrasts bei gegebener Beleuchtung zum Leuchtdichtekontrast bei Referenzbeleuchtung definiert.

Spektrale Zusammensetzung des Lichts/der optischen Strahlung

Für das Lichtspektrum gilt: UV>Blau>Grün>Gelb>Rot>IR. Bei kürzer

werdender Wellenlänge steigen Energie und Schädlichkeit der Strahlung an. Entscheidend in der Konservatorik ist, welches Spektrum die gewählte Lichtquelle hat und ob es Filter oder andere lichtlenkende Materialien gibt. LED-Lichtquellen weisen nahezu kein UV- und IR-Licht auf. Sie sind daher grundsätzlich zu bevorzugen.

Relative spektrale Objektempfindlichkeit

Sie wird durch die unterschiedlichen Materialien bedingt: Organische Verbindungen sind besonders anfällig für photochemische Veränderungen, anorganische sind meist stabiler.

Bestrahlungsstärke E [W/m²]

Die gesamte Strahlungsleistung, die auf die betroffene Oberfläche trifft, misst man in W/m². Sie entspricht nicht der Beleuchtungsstärke, denn diese Strahlungsleistung wird vielmehr mit der Empfindlichkeitskurve des Auges bewertet.

Der Schwellenbestrahlungswert

Die Überschreitung einer Schwelle von unsichtbarer zu sichtbarer Veränderung der Kunst durch Lichteinstrahlung definiert man als Schwellenbestrahlungswert. Für jedes Material lässt sich ein eigener, normierter Wert ermitteln, der sich in bestimmte Empfindlichkeitskategorien einordnen lässt. Lichtschäden addieren sich auf und sind irreversibel, eine Regeneration erfolgt nicht. Maßgeblich für eine Schädigung ist immer die Dosis der Strahlung, also das Produkt aus Bestrahlungsstärke x Zeit.

Scallop

Ein sogenannter „Scallop“ ist ein Lichtkegel von Strahlern oder Einbauleuchten, der sich auf der Wand hyperbelförmig, also in Bogenform, abbildet.

Halbstreuwinkel

Da der Halbstreuwinkel (auch Ausstrahlungswinkel, Halbwertswinkel oder Öffnungswinkel) der in der Lichttechnik gebräuchlichste Strahlungswinkel ist, wird sein Wert häufig vom Leuchtenhersteller angegeben. Vom menschlichen Auge nicht wahrnehmbar, beschreibt er einen messtechnisch relevanten Bereich von Strahlung, mit dem eine abstrakte Grenze (Abgleich) definiert wird. In diesem Winkel sinkt die Lichtstärke zwischen zwei Punkten auf 50 Prozent des Maximalwertes ab. Ein Halbstreuwinkel misst außerdem den Durchmesser eines Lichtkegels. Gemäß DIN 5040 gilt der Halbstreuwinkel bis 10° als engbündelnd, von 10° bis 35° als bündelnd und über 35° als breitstrahlend.

30° Museumswinkel

Für die Gemälde- und Skulpturenbeleuchtung sollte das Licht idealerweise in einem Lichteinfallswinkel von 30° - dem sogenannten „Museumswinkel“ - einfallen. Wählt man einen steileren Einfallswinkel, wäre ein störend starkes Streiflicht die Folge, das lange Schatten auf dem Exponat erzeugt. Bei mehr Abstand zwischen Leuchte und Museumsobjekt besteht das Risiko, dass der Betrachter selbst Schatten auf Bild oder Skulptur wirft.

[105] Wartungsfaktor: Entwicklung der Beleuchtungsstärke mit/ohne Wartung.

[106, 107] Spiegeln sich Leuchten beispielsweise im Schutzglas des ausgestellten Bildes, kann der Betrachter Teile des Werkes nicht mehr wahrnehmen.

[108, 109] Die Farbwiedergabe der Lichtquelle ist entscheidend, um Farben unverfälscht erfassen zu können. Bei einer sehr schlechten Farbwiedergabe sieht der Blumenstrauß hier im Bild entsprechend eintönig aus.

Jedes Heft!

€10,-

Die Schriftenreihe von licht.de

licht.wissen 20 Nachhaltige Beleuchtung

40 Seiten über Nachhaltigkeit, Wertschöpfungsketten, Finanzierung und Förderung von Umweltschonenden Projekten. Best Practice Beispiele und Checklisten für die Sanierung runden das Heft ab.



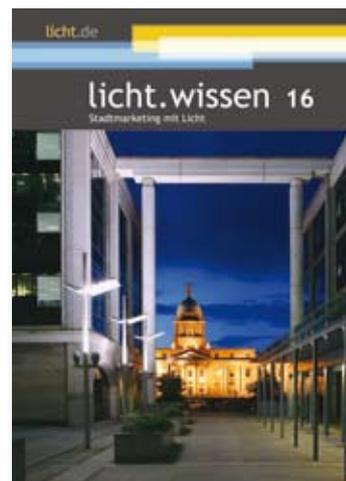
[licht.wissen 09] 40 Seiten zur Sanierung mit aktuellen Fördermöglichkeiten und zahlreichen praxisnahen Lösungsbeispielen, die zeigen, wie viel Energie durch Modernisierung eingespart werden kann.



[licht.wissen 02] 56 Seiten mit allen wichtigen Informationen zur fachgerechten und effizienten Beleuchtung von Bildungsstätten. Zudem wird dargestellt, wie durch gute Beleuchtung Motivation und Leistung von Lernenden gefördert werden kann.



[licht.wissen 15] Auf 40 Seiten beschäftigt sich Heft 15 mit allen Fragen guter Beleuchtung rund ums Haus. Es gibt viele praxisbezogene Tipps und Anregungen, wie man Haus und Garten ins richtige Licht setzen und zugleich für ein funktionsgerechtes und sicheres Umfeld sorgen kann.



[licht.wissen 16] 40 Seiten zur individuellen Beleuchtung von Städten und Gemeinden: Heft 16 erklärt, wie sich Kommunen durch attraktive und energieeffiziente Lichtgestaltung profilieren können. Drei Masterpläne und viele Praxisbeispiele stellen gute Lösungen für das Stadtmarketing vor.

licht.wissen – per Post oder als kostenfreie PDF-Datei (Download) unter www.licht.de/lichtwissen

- | | | |
|--|---|---|
| 01 Die Beleuchtung mit künstlichem Licht (2008) | 08 Sport und Freizeit (2010) | 16 Gute Beleuchtung rund ums Haus (2009) |
| 02 Besser lernen mit gutem Licht (2012) | 09 Sanierung in Gewerbe, Handel und Verwaltung (2014) | 17 Stadtmarketing mit Licht (2010) |
| 03 Straßen, Wege und Plätze (2014) | 10 Notbeleuchtung, Sicherheitsbeleuchtung (2012) | 18 LED: Das Licht der Zukunft (2010) |
| 04 Licht im Büro, motivierend und effizient (2012) | 11 Gutes Licht für Hotellerie und Gastronomie (2005) | 19 Licht für Museen und Ausstellungen (2016) |
| 05 Industrie und Handwerk (2009) | 12 Beleuchtungsqualität mit Elektronik (2003) | 20 Wirkung des Lichts auf den Menschen (2014) |
| 06 Shopbeleuchtung, attraktiv und effizient (2011) | 13 Arbeitsplätze im Freien (2007) | 21 Nachhaltige Beleuchtung (2014) |
| 07 Gesundheitsfaktor Licht (2012) | 14 Ideen für Gutes Licht zum Wohnen (2009) | |

All booklets are available in English as PDFs, download free of charge at www.licht.de/en

Alles über Beleuchtung!

Herstellerneutrale Informationen

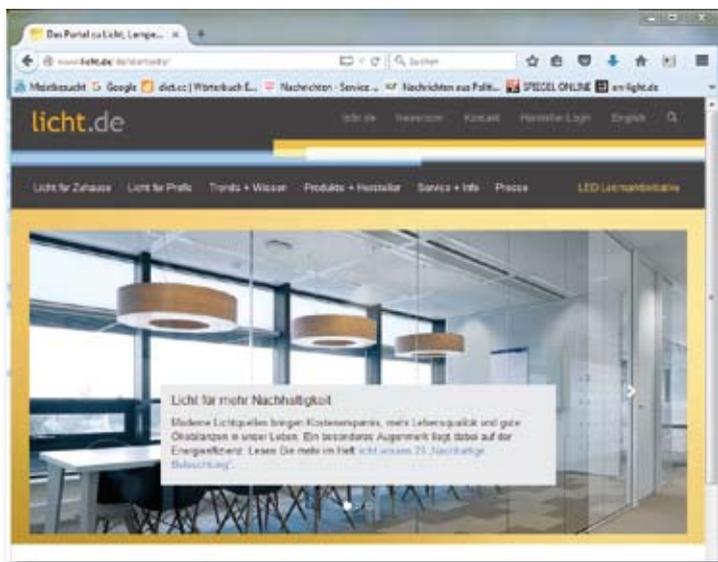
licht.de informiert über die Vorteile guter Beleuchtung. Die Fördergemeinschaft Gutes Licht hält zu allen Fragen des künstlichen Lichts und seiner richtigen Anwendung umfangreiches Informationsmaterial bereit. Die Informationen sind herstellerneutral und basieren auf den relevanten technischen Regelwerken nach DIN und VDE.

licht.wissen

Die Hefte 1 bis 20 der Schriftenreihe licht.wissen geben Informationen zur Lichtenwendung. Diese Themenhefte erläutern anhand vieler Beleuchtungsbeispiele lichttechnische Grundlagen und zeigen beispielhafte Lösungen. Sie erleichtern damit auch die Zusammenarbeit mit Fachleuten der Licht- und Elektrotechnik. Alle lichttechnischen Aussagen sind grundsätzlicher Art.

www.licht.de

Ihr umfangreiches Lichtwissen präsentiert die Fördergemeinschaft auch im Internet unter www.licht.de. Architekten, Planer, Installateure und Endverbraucher finden hier auf rund 5.000 Seiten praxisorientierte Tipps, viele Lichtenwendungen und aktuelle Informationen zu Licht und Beleuchtung.



www.twitter.com/licht_de
www.twitter.com/all_about_light



www.facebook.com/lichtde

Impressum

Herausgeber

licht.de
Fördergemeinschaft Gutes Licht
Lyoner Straße 9, 60528 Frankfurt am Main
Tel. 069 6302-353, Fax 069 6302-400
licht.de@zvei.org, www.licht.de

Redaktion, Text, Gestaltung und Realisation

LightAgentur, Bonn
Lektorat Christiane Kersting, Lüdenscheid
Druck e&b engelhardt und bauer – Kraft Druck GmbH, Ettlingen

ISBN-Nr. Druckausgabe 978-3-945220-09-2

ISBN-Nr. PDF-Ausgabe 978-3-945220-10-8

Februar 2016 (02/16/10/18II)

Berücksichtigt wurden die bei Herausgabe gültigen DIN-Normen und VDE-Vorschriften. Wiedergegeben mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. Maßgebend für das Anwenden der DIN-Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH, Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Der komplette oder auszugsweise Nachdruck von licht.wissen 18 ist mit Genehmigung des Herausgebers gestattet.

Bildnachweis

Bildnummern Rückseite:

		110
111	112	113
114	115	116

Bilder

Titelbild: Andrea Flak, Kunstrechte: © Michael Riedel, Courtesy Gabriele Senn Galerie, Wien, © VG Bild-Kunst, Bonn; [01] Ian Barnes, © VG Bild-Kunst, Bonn; Editorial Portraitfoto: Städel Museum, Frankfurt am Main, Gaby Gerster; Hingergrundbild Inhaltsverzeichnis: Toon Grobet; [02] Rainer Rehfeld; [03] Dirk Vogel; [04] 274km Fotografia; [05] Lukas Roth; [07] Frieder Blickle; [08] Haydar Koyupinar; [09] Lothar Reichel; [10] Dirk Vogel; [11] Thomas Mayer, © VG Bild-Kunst, Bonn; [12] Dirk Vogel, Kunstrechte: Hubertus Prinz zu Hohenlohe; [13] Yeastudio Photographer; [14] Alexandra Lechner; [15] Timm Rautert; [16] Rudi Meisel, © VG Bild-Kunst, Bonn; [26] Conceptlicht, Traunreut; [27] Thomas Mayer; [28] Haydar Koyupinar; [29] Dirk Vogel, © VG Bild-Kunst, Bonn; [41, 42] Governatorato dello Stato della Città del Vaticano – Direzione dei Musei; [46] Rudi Meisel; [47] Jürgen Eheim; [50-52] Aksel Karcher; [53] Andrea Flak; [55] Joshua Liebermann/Das Fotoarchiv; [58] Governatorato dello Stato della Città del Vaticano – Direzione dei Musei; [59] Sabine Wenzel; [66] Jürgen Eheim; [67] Thomas Mayer; [71] Lukas Roth; [74] Michael Kayser, © VG Bild-Kunst, Bonn; [75] Lukas Roth; [76] Michael Kayser; [78] Stefan Müller; [80] Dirk Vogel; [81] Rudi Meisel; [83] Vittorio Storaro; [84] Thomas Mayer; [89] Jan Bitter; [90-92] Rogerio Reis; [94] Nano Canas; [95] Thomas Mayer; [96] Robert Pupeter; [97] Alexander Ring, Kunstrechte: © VG Bild-Kunst, Bonn; Eye of Light, HC Berg; [98] Mariakraynova/Shutterstock.com; [99] Thomas Mayer; [100] Städel Museum, Frankfurt am Main, Miguletz; [101] Rogerio Reis; [102] Jesús Granada; [103] Michael Kayser; [106,107] DSM Advanced Surfaces, © VG Bild-Kunst, Bonn; [110] Volker Kreidler; [111] Luca Petrucci; [112] Thomas Mayer; [113] Yeastudio Photographer; [114] Thomas Mayer; [115] Dirk Vogel; [116] Bruno Klomfar.

Alle anderen Bilder, 3D-Visualisierungen und Grafiken stammen von licht.de-Mitgliedsunternehmen oder wurden im Auftrag von licht.de angefertigt.

licht.wissen 18

Licht für Museen
und Ausstellungen



licht.de

Fördergemeinschaft Gutes Licht
Lyoner Straße 9
60528 Frankfurt am Main
Tel. +49 (0)69 63 02-353
Fax +49 (0)69 63 02-400
licht.de@zvei.org
www.licht.de