



ZUMTOBEL

Zumtobel Research

Vermessung der Beleuchtung von Pablo Picassos „Harlekin“ (1916) im Stadtmuseum Lindau

August und September 2011

ISBN 978-3-902940-02-5



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Vorwort		5
----------------	--	---

Zusammenfassung		6
------------------------	--	---

1 Problemstellung		9
2 Stand der Wissenschaft		
3 Forschungshypothesen		
4 Theoretischer Hintergrund		10

5 Forschungsmethoden	5.1 Wahl der Methoden	12
	5.2 Versuchsaufbau	12
	5.3 Versuchsdurchführung	14

6 Ergebnisse	6.1 Objektunabhängige Leuchtendaten	16
	6.2 Leuchtendaten am Objekt	19
	6.3 Berechnung für die Beleuchtungssituationen im Museum	22
	6.4 Bewertung der Ergebnisse	24

7 Beispiele	7.1 Städel Museum in Frankfurt	26
	7.2 Kunsthistorisches Museum in Wien	27
	7.3 Ethnologisches Museum in Berlin	27

8 Diskussion und Ausblick		28
----------------------------------	--	----

9 Literatur		29
--------------------	--	----



Harlekin, Pablo Picasso, 1916, Bleistift auf Papier, 30 x 21,5 cm, aus privater Sammlung

An einer Zeichnung von Pablo Picasso von 1916, die als Motiv einen Harlekin zeigt, sollen verschiedene Beleuchtungsparameter, die im Speziellen für Kunst relevant sind, bewertet werden. Die Bewertungsparameter umfassen elektrische und lichttechnische Eigenschaften der Leuchten sowie Beleuchtungsstärke, Homogenität, wirksame Beleuchtungsstärke E_{dm} und Schädigungspotential P_{dm} nach CIE 157:2004. Im Speziellen werden zwei Strahler mit den Leuchtmitteln Halogenleuchte und LED in mehreren Einstellungen miteinander verglichen. Die Messungen vor Ort wurden am 30. August 2011 im Zuge der Picasso Ausstellung im Stadtmuseum Lindau durchgeführt.

Zusammenfassung

In Museen und Galerien finden sich oft Meisterwerke der Kunst. Um die wertvollen Exponate optimal in Szene zu setzen, gilt es nicht nur die architektonischen und künstlerischen Ansprüche zu erfüllen, sondern auch konservatorische Anforderungen zu berücksichtigen. Denn auch Licht kann, wenn nicht richtig eingesetzt, Ausstellungsstücke schädigen. Umso wichtiger ist es, eine passende Lichtlösung mit adäquater Beleuchtung zu verwenden, die Objekte schonend und dennoch effektiv inszeniert. Eine neue Argumentationsgrundlage bietet hierbei der kürzlich für Zumtobel erstellte Prüfbericht des Fachbereichs Lichttechnik der TU Darmstadt. Dabei wurde mit vordefinierten Bewertungsparametern die Qualität verschiedener Leuchtmittel anhand eines realen Kunstobjektes geprüft. Das Hauptergebnis: Die Verwendung einer modernen LED-Technologie vermindert durch ihre speziellen Eigenschaften die UV- und Infrarotstrahlung, hält die Farbtemperatur konstant während des Dimmens und erhöht die Energieeffizienz bei einem gleichzeitig geringen Schädigungspotential der Kunstobjekte.

Als Untersuchungsobjekt wurde die Picasso Zeichnung „Harlekin“ von 1916 gewählt. Sie war im Rahmen der Picasso Ausstellung „Meisterzeichnungen eines Jahrhundertgenies“ im Sommer 2011 im Stadtmuseum in Lindau am Bodensee ausgestellt und konnte vor Ort für die Studie genutzt werden.

Für die Untersuchung wurden nacheinander zwei verschiedene auf die Zeichnung gerichtete Lichtquellen installiert. Verglichen wurden zwei Strahler – der eine mit konventioneller Lampentechnik (Halogen-glühlampen), der andere mit LED. Um die verschiedenen Ausprägungen der Leuchtmittel prüfen zu können, wurden Bewertungsparameter, die insbesondere für Kunstobjekte relevant sind, festgelegt. Sie umfassen sowohl die elektrischen als auch die lichttechnischen Eigenschaften der Leuchten, darunter:

- die Lichtfarbe
- die spektrale Strahlungsverteilung
- die Farbwiedergabe
- die Beleuchtungsstärke
- die Homogenität
- das Schädigungspotential
- die elektrische Anschlussleistung

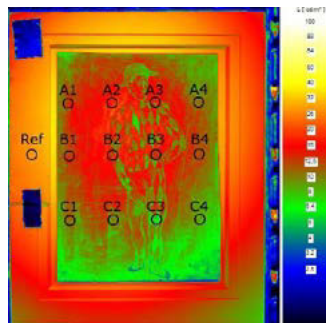
Für die konventionelle Beleuchtungstechnik wurde der Zumtobel Strahler XENO verwendet, der sich über ein Potentiometer dimmen lässt. Als LED-Part kam der ARCOS Strahler mit Tunable White Funktion zum Einsatz. Lichtfarbe und Helligkeit lassen sich bei der LED-Leuchte über ein DALI-Steuersystem von 2 700 bis 6 500 K stufenlos einstellen. Um die Einflüsse der Lichtquellen vergleichen zu können, untersuchte Zumtobel die Bewertungsparameter bei unterschiedlichen Ausgangssituationen: Der Halogenstrahler wurde im gedimmten und ungedimmten Zustand bemessen. Beim LED-Strahler wurden verschiedene Farbtemperatur-Einstellungen von Warm- bis Kaltweiß vorgenommen.

Als eines der wichtigsten Bewertungsparameter gilt das Schädigungspotential. Hierbei handelt es sich um den Grad der Objektschädigung, der sich durch die spektrale Strahlungsverteilung des Leuchtmittels und der spektralen Empfindlichkeit des Kunstobjektes beschreibt. Neben der IR-Strahlung, welche an den Objekten Wärme verursacht und damit zum Austrocknen als auch zu Rissbildungen führen kann, sowie dem für das menschliche Auge sichtbaren Licht spielt die UV-Strahlung bei der Schädigung eine wesentliche Rolle. Je kurzwelliger die Strahlung desto schädigender ist diese für die Kunstobjekte. Der Betrachter kann diese Schädigung meist an einer Farbänderung beobachten, wie z.B. das Verblässen eines Bildes unter dem Einfluss von Tageslicht, welches in der Regel einen hohen UV-Anteil aufweist. Je nach Trägermaterial des Kunstwerkes gibt es entsprechend der CIE Norm 157:2004 festgelegte Materialkennwerte die Basis für die spektrale Empfindlichkeit sind.

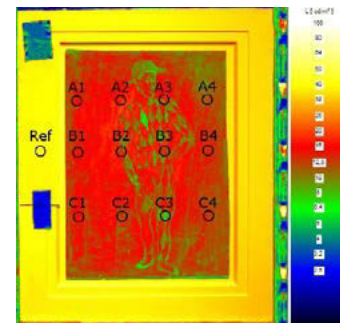
Das beim „Harlekin“ verwendete Material ist dünnes, leicht gewelltes Papier, das auf ein schweres Trägerpapier aufgezogen ist, und von der endgültigen Beschaffenheit dem Hadernpapier am ähnlichsten ist. Aus diesem Grund wurden die Eigenschaften dieser Papierart zur Schädigungsbewertung verwendet.

Die LED-Beleuchtung wurde auf ein ähnliches Beleuchtungsniveau wie die Halogenbeleuchtung geregelt. Das Ergebnis zeigt, dass die Beleuchtung durch die Halogenstrahler sichtbare Ungleichmäßigkeiten aufweist im Gegensatz zu der LED-Beleuchtung. Während sich die Farbtemperatur beim Dimmen des Halogenstrahlers von 2900 K bis zu 2000 K verändert, ist die Farbtemperatur des LED-Strahlers unverändert. Die Farbwiedergabe ist für den Halogenstrahler mit einem R_a 99 ausgezeichnet. Aber auch der LED-Strahler hat in den warmen Farbtemperaturen einen R_a 91 bis 93 (sehr gut), nur bei kalten Farbtemperaturen (6500 K) sinkt der Wert auf R_a 84.

Ergebnisse der lichttechnischen Vermessung an Picassos „Harlekin“ der Halogen- und LED-Beleuchtung im Vergleich



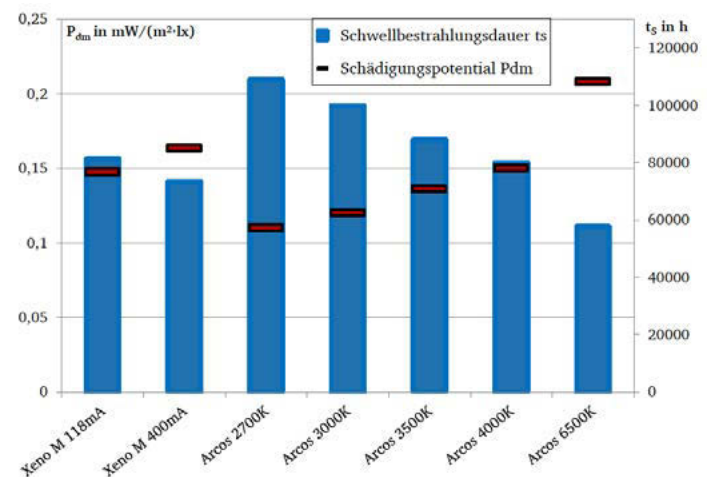
Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit Halogenstrahler XENO M 1/100 W QR111, gedimmt, 118 mA



Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit ARCOS 3 LED Tunable White, 2700 K, gedimmt 19%

Die in diesem Fall gemessene LED-Beleuchtung weist bei ähnlicher Farbtemperatur wie der Halogenstrahler ein niedrigeres Schädigungspotential auf. Bei einer neutralen Farbtemperatur ist das Schädigungspotential vergleichbar mit der Halogenbeleuchtung. Ein geringeres Schädigungspotential bedeutet in diesem Fall, dass bei gleicher Beleuchtungsstärke eine geringere wirksame Bestrahlungsstärke vorhanden ist und die kritische Bestrahlungsdauer erhöht werden kann. Zudem ist der notwendige Energieaufwand bei der LED-Beleuchtung deutlich geringer. Erst bei höheren Farbtemperaturen überschreitet die LED-Beleuchtung das Schädigungspotential einer gedimmten Halogenbeleuchtung.

Schädigungspotential und Schwellenbestrahlungsdauer der untersuchten Lichtsituationen im Vergleich



Es lohnt sich also, LED in der Museumsanwendung einzusetzen unter Berücksichtigung einer möglichst unschädlichen spektralen Verteilung der Lichtquelle.

1 Problemstellung

2 Stand der Wissenschaft

3 Forschungshypothesen

Problemstellung

Durch den Einzug der LED-Technologie auch in der Beleuchtung von Kunstwerken in der Museumsanwendung, ist die Frage nach der Schädigung der spektralen Verteilung dieser in Diskussion gekommen. Die vorgestellte Fallstudie zeigt anhand einer Picasso Ausstellung, die im Lindauer Stadtmuseum zu Gast war, wie unterschiedliche Beleuchtungsparameter und Qualitätsfaktoren ausgeprägt sind. Dabei wurde die eingesetzte gedimmte Halogenbeleuchtung mit einer LED-Beleuchtung in unterschiedlichen Farbtemperaturen verglichen.

Stand der Wissenschaft

Heutzutage wird in Museen typischerweise mit Halogenbeleuchtung gearbeitet, da diese hervorragende Werte in der Farbwiedergabe erreicht und auch ein geringes Schädigungspotential für Kunstobjekte ausweist. Mit Einführung der LED als alternative Lichtquelle kam es zu einer großen Verunsicherung: Schmalbandige LED-Spektren hatten eine schlechte Farbwiedergabe, kaltweiße LEDs wiesen ein hohes Schädigungspotential auf.

Forschungshypothesen

Diese Fallstudie soll zeigen, dass eine moderne LED-Beleuchtung in der Museumsanwendung gegenüber der Halogenbeleuchtung Vorteile in der Lichtqualität und der Energieeffizienz haben kann und für den Einsatz definitiv geeignet ist. Je nach Spektrum der verwendeten LED-Lichtquelle ist auch das Schädigungspotential mindestens vergleichbar mit der Halogenbeleuchtung.

- Die LED-Beleuchtung ist effizienter als die Halogenbeleuchtung
- Das Schädigungspotential von LED-Beleuchtung ist geringer als das der Halogenbeleuchtung
- Das Schädigungspotential verändert sich deutlich mit der Auswahl des Spektrums und der Farbtemperatur
- Der Einsatz von tageslichtweißer LED-Beleuchtung ist nicht geeignet für die Beleuchtung sensibler Objekte

4 Theoretischer Hintergrund

4.1 Farbwiedergabe

Der Farbwiedergabeindex R_a wird nach DIN 6169-2 berechnet. Weiterhin werden die Indizes R_i für die einzelnen Farben R1 bis R14 angegeben.

4.2 Homogenität

Die Gleichmäßigkeit der Beleuchtung kann ein Maß für die Qualität der Inszenierung eines Kunstwerkes sein. Sie wird ausgedrückt mit den Werten U_0 und U_1 .

$$U_0 = \frac{x_{\min}}{\bar{x}}$$

$$U_1 = \frac{x_{\min}}{x_{\max}}$$

Je näher die beiden Werte gegen 1 gehen, desto gleichmäßiger ist ein Feld von Messwerten. Die Gleichmäßigkeit wird für die Farbtemperatur und die Beleuchtungsstärke berechnet.

4.3 Berechnung des Schädigungspotentials

Zu Beginn werden die wichtigsten Größen für die Abschätzung des Gefahrenpotentials der optischen Strahlung erläutert. Der technische Report CIE 157:2004 definiert die wirksame Bestrahlungsstärke E_{dm} , welche die Schädigung der Objekte verursacht, nach der Formel

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

mit der spektralen Bestrahlungsstärke $E_{e,\lambda}$, der relativen spektralen Objektempfindlichkeit $s(\lambda)_{dm,rel}$ und der Wellenlänge λ . Die relative spektrale Objektempfindlichkeit $s_{dm,rel}(\lambda)$ ist

$$s_{dm,rel}(\lambda) = e^{-b(\lambda-300)}$$

mit der Materialkonstante b .

Das Schädigungspotential ist das feste Verhältnis der wirksamen Bestrahlungsstärke E_{dm} und der Beleuchtungsstärke E und gilt für eine Beleuchtungssituation und ein Objekt oder Material:

$$P_{dm} = \frac{E_{dm}}{E}$$

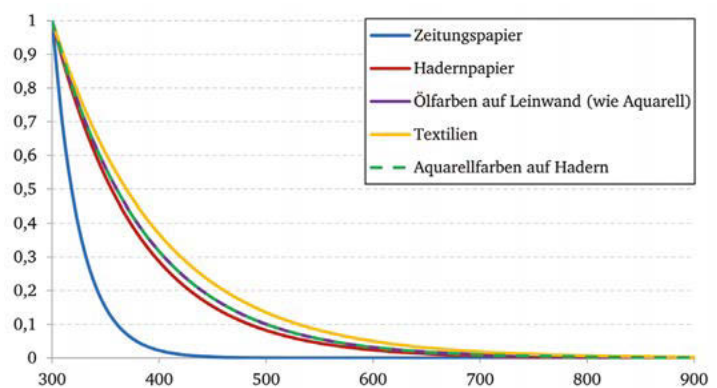
Mit diesen Größen lässt sich die Schwellenbestrahlungszeit oder kritische Bestrahlungsdauer t_s definieren, nach deren Ablauf die Gefahr sichtbarer Schädigung besteht:

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

mit der materialabhängigen Schwellenbestrahlung $H_{s,dm}$.

Die folgende Tabelle fasst die materialabhängigen Parameter für verschiedene Stoffe zusammen (nach CIE 157:2004). Die einzelnen spektralen Objektempfindlichkeiten sind in Grafik unten dargestellt.

Material	Schwellenbestrahlung	Materialkonstante b
	$H_{s,dm} \left[\frac{\text{W}\cdot\text{h}}{\text{m}^2} \right]$	
Zeitungspapier	5	0,0380
Hadernpapiere	1200	0,0125
Ölfarben auf Leinwand	850	0,0115
Textile Materialien	290	0,0100
Aquarellfarben auf Hadern	175	0,0115



Die relativen, spektralen Objektempfindlichkeiten für verschiedene Materialien nach CIE 157:2004

5 Forschungsmethoden

5.1 Wahl der Methoden

Für die Untersuchung von elektrischen und lichttechnischen Parametern wurden zwei Leuchten miteinander verglichen: eine Halogenbeleuchtung und eine farbtemperaturveränderliche LED-Beleuchtung. Die Messgrößen wurden zunächst direkt im Museum an dem Gemälde aufgenommen. Anschließend wurden die Messwerte im Labor verifiziert und speziell für die Messung der Strahldichte der sensible Spektralbereich erweitert.

5.2 Versuchsaufbau

Messobjekte:



Halogenstrahler XENO M 1/100W QR111
(Art. Nr. 60 711 692), die Leuchte lässt
sich über ein Potentiometer dimmen



ARCOS 3 LED Tunable White
(Art. Nr. 60 711 570), Lichtfarbe und
Helligkeit lassen sich über ein DALI-
Steuersystem einstellen

Der Halogenstrahler wurde bei voller (400 mA, 231 V) sowie bei gedimmter Leistungsaufnahme (118 mA, 231 V) gemessen, der LED-Strahler bei den Dimmwerten 100% und 19% und den eingestellten Farbtemperaturen 2700, 3000, 3500, 4000 und 6500 Kelvin. Die gemessenen Größen und bewerteten Parameter sind:

Gemessene Größen, bewertete Parameter

Messungen vor Ort:	Elektrische Leistungsaufnahme
	Beleuchtungsstärke im Messraster
	Farbtemperatur (CCT) im Messraster
	Farbort im Messraster
	Leuchtdichteaufnahme des Bildes
	Spektrale Strahldichte 380 bis 780 nm
Messungen im Labor:	Spektrale Strahldichte 250 bis 900 nm
Berechnungen:	Homogenität der Beleuchtungsstärke
	Homogenität des Farbortes und Farbtemperatur
	Farbwiedergabeindex CRI (R_a und R_i)
	Schädigungspotential
	Wirksame Beleuchtungsstärke
	Kritische Beleuchtungszeit

Lichttechnische Messungen

Die spektrale Strahldichte vor Ort wurde mit dem Konica Minolta CS1000 vermessen, das im Mai 2009 kalibriert wurde. Das Beleuchtungsstärke- und Farbmessgerät HCT-99 (S.-Nr. 4936M) wurde am 05. März 2010 geprüft. Die Messkamera LMK 98-3 DXP 2031 erfuhr ihre letzte Kalibrierung am 01. September 2009. Das im Labor verwendete SP320-166 wurde am 05. Mai 2011 geprüft. Alle zur Kalibrierung verwendeten Normale sind auf Nationale Normale rückführbar.

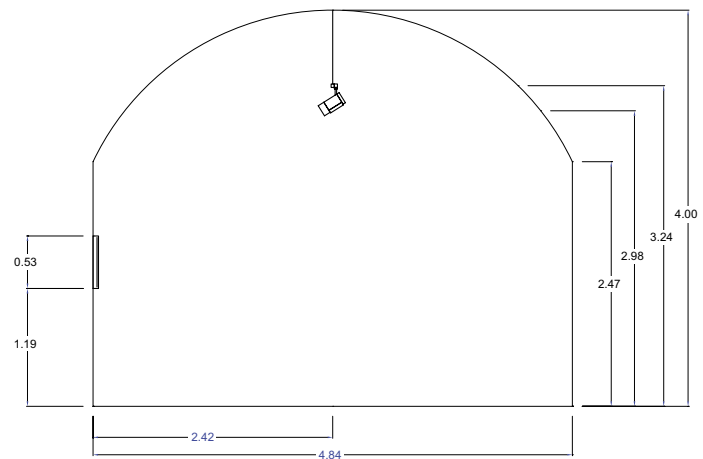
Elektrische Messungen

Düwi 07975 vor Ort, LMG500 im Labor, kalibriert im Februar 2011.

5.3 Versuchsdurchführung

Messungen im Museum

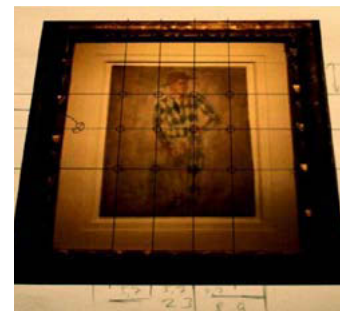
Aufgrund der konservatorischen Klimatisierung im Museum konnten die Messungen nicht im vorgeschriebenen Temperaturbereich von $25 \pm 2^\circ\text{C}$ erfolgen. Im Museum herrschte eine Temperatur von 18°C . Die Beleuchtung erfolgte von einer Stromschiene, die an der Decke angebracht war. In der Zeichnung lässt sich die Raumgeometrie erkennen. Mittels einer halbtransparenten Folie wurde ein vorher angelegtes Messraster auf die an der Wand hängende Originalzeichnung übertragen.



Raummaße



Messanordnung im Stadtmuseum Lindau



Das Messraster wurde so definiert, dass die Messpunkte das Knie, die Hand, die Schulter, den Ellbogen des „Harlekin“ sowie eine Auswahl an Hintergrundpunkten enthalten. Auf diese Weise werden die im Bild vorhandenen Farben bestmöglich repräsentiert. Links wird ein Referenzweiß angebracht.

Messungen im Labor

Die Messungen im Labor fanden auf einer optischen Bank statt. Die Leuchten wurden mindestens eine halbe Stunde vor den Messungen eingebrannt. Die spektralen Bestrahlungstärken wurden in zwei Metern Entfernung im Zentrum der Lichtverteilung der jeweiligen Leuchte vermessen. Die Messungen wurden für jede Leuchte bei voller Helligkeit und bei der gleichen Betriebshelligkeit wie im Museum durchgeführt.



Messanordnung im Labor



6 Ergebnisse

6.1 Objektunabhängige Leuchtendaten

Die folgenden Tabellen zeigen die Berechnungen aus der spektralen Strahllichtmessung im Labor sowie die Leistungsmessung. Die spektralen Strahlungsverteilungen sind in der Grafik abgebildet. In nächsten Abschnitt sind die Farbwiedergabeindizes R_i der einzelnen Leuchten und Einstellungen zu finden.

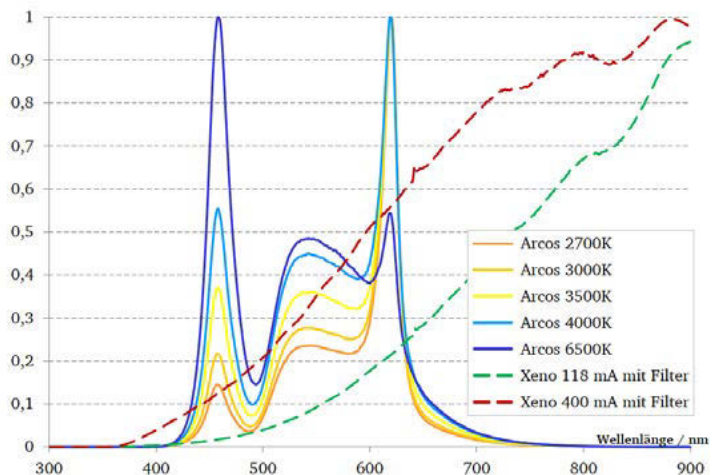
Der Halogenstrahler XENO wurde in gedimmtem und ungedimmtem Zustand vermessen. Der LED-Strahler ARCOS wurde ebenfalls bei der Einstellung 100 % (ungedimmt) vermessen, außerdem wurde ein Dimmwert gewählt – hier 19 % – der dem gedimmten Zustand des Halogenstrahlers entsprach, in dem die Beleuchtungsstärke am Objekt abgeglichen wurde. Zusätzlich wurden am DALI-Steuersystem verschiedene Werte der korrelierten Farbtemperatur eingestellt.

Tabelle I: Objektunabhängige Daten der Leuchten

	XENO gedimmt	XENO ungedimmt	ARCOS 2700 K	ARCOS 2700 K	ARCOS 3000 K	ARCOS 3000 K
Dimmung	30 %	100 %	19 %	100 %	19 %	100 %
Leistungsaufnahme [W]	27,0	92,4	14,1	27,9	14,1	27,1
CCT [K]	2032	2717	2519	2546	2786	2790
x	0,52361	0,45898	0,47443	0,47047	0,45138	0,44969
y	0,41434	0,41118	0,41200	0,40892	0,40598	0,40330
R_a	99	99	91	92	93	93

	ARCOS 3500 K	ARCOS 3500 K	ARCOS 4000 K	ARCOS 4000 K	ARCOS 6500 K	ARCOS 6500 K
Dimmung/Strom	19 %	100 %	19 %	100 %	19 %	100 %
Leistungsaufnahme [W]	13,6	26,3	13,5	25,8	13,8	26,6
CCT [K]	3258	3252	3722	3690	5909	5863
x	0,41862	0,41775	0,39371	0,39432	0,32366	0,32467
y	0,39494	0,39214	0,38496	0,38287	0,33609	0,33534
R_a	93	94	91	92	84	85

Spektren normiert



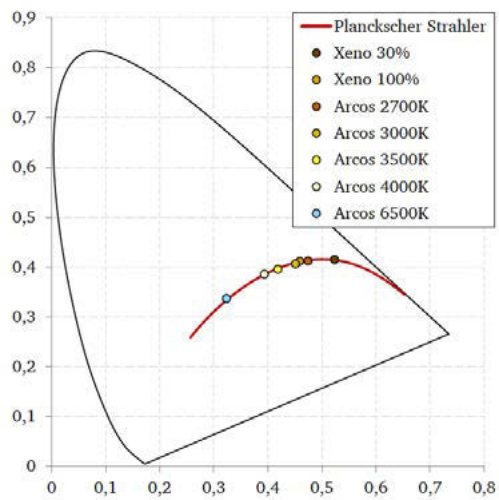
Normierte Spektralverteilungen

Tabellen R_a und R_i Werte

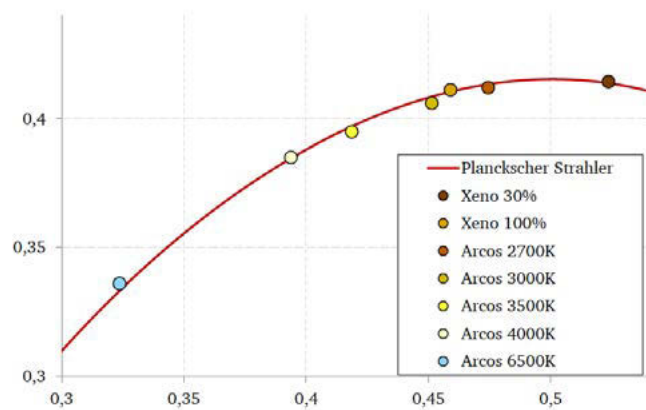
Tabelle II: Farbwiedergabewerte der Leuchten

	XENO 118 mA gedimmt	XENO 400 mA ungedimmt	ARCOS 2700 K	ARCOS 3000 K	ARCOS 3500 K	ARCOS 4000 K	ARCOS 6500 K
R_a	99	99	91	93	93	91	84
R_1	99	98	92	95	99	96	86
R_2	99	99	99	99	97	94	92
R_3	100	100	90	90	90	89	90
R_4	98	98	91	94	97	93	80
R_5	98	98	96	99	95	90	82
R_6	99	99	90	93	94	91	84
R_7	99	99	92	92	93	92	89
R_8	97	97	79	79	80	78	73
R_9	95	94	46	46	47	41	24
R_{10}	98	98	92	89	84	79	73
R_{11}	98	98	86	91	94	90	76
R_{12}	98	98	84	77	67	59	50
R_{13}	99	99	93	96	99	95	88
R_{14}	100	100	90	91	91	92	94

Darstellung der Farbörter in der Normfarbtafel



Farbörter der Lichtquellen in der Normfarbtafel

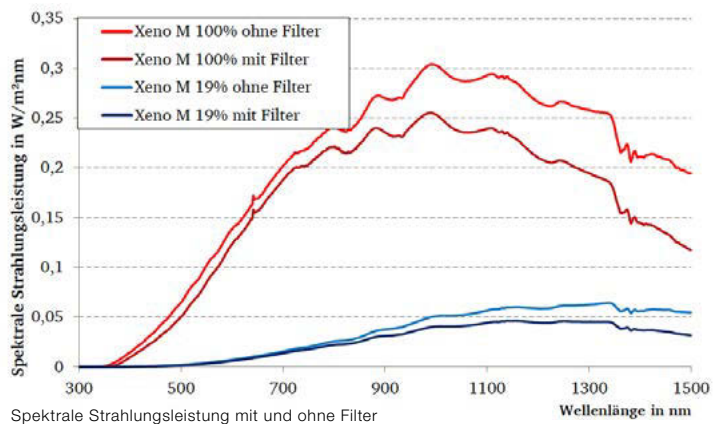


Vergrößerter Ausschnitt

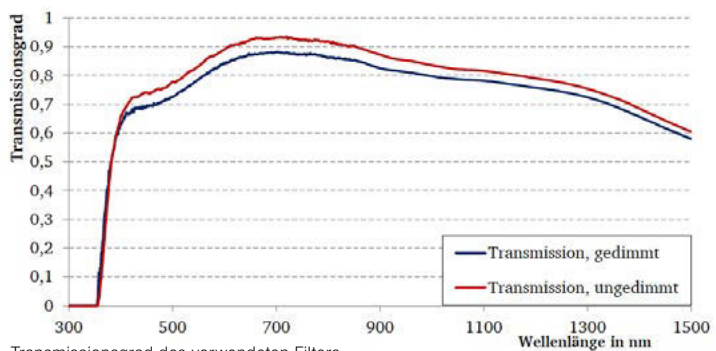
Vermessung des IR/UV-Filters

Der Halogenleuchte XENO M ist ein IR/UV-Sperrfilter vorgesetzt, damit die für das Bild schädlichsten spektralen Anteile möglichst gering gehalten werden. Dieser Filter wurde im Labor spektral vermessen.

Die obere Abbildung zeigt die gemessenen Spektren für den Halogenstrahler mit und ohne Filter, jeweils in gedimmtem und ungedimmtem Zustand. Das bei etwa 640 nm zu sehende lokale Maximum ist ein bekannter Kalibrierfehler und nicht weiter zu beachten. Um die Filtereigenschaften besser einschätzen zu können, wurde im Wellenlängenbereich von 250 nm bis 1500 nm gemessen.



Spektrale Strahlungsleistung mit und ohne Filter



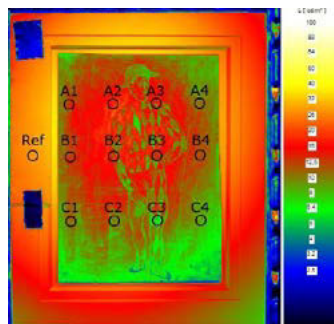
Transmissionsgrad des verwendeten Filters

Die untere Abbildung zeigt den berechneten Transmissionsgrad im gedimmten und ungedimmten Zustand. Der Unterschied zwischen beiden Zuständen liegt an einer möglichen Temperaturabhängigkeit der Filtereigenschaften. Um das zu klären wäre jedoch eine separate Testreihe nötig.

Unterhalb einer Wellenlänge von 356 nm lässt der Filter kein Licht passieren – die in der Grafik sichtbaren Werte stammen aus dem Detektorrauschen, wie aus der oberen Abbildung deutlich zu erkennen ist. Bei ca. 700 nm hat der Transmissionsgrad mit etwas über 93 % sein Maximum und fällt dann im Infrarotbereich auf 62 % ab. Wie der unteren Abbildung zu entnehmen ist, hat besonders die Filterwirkung unter 350 nm einen großen Einfluss auf das Schädigungspotential, da hier die Objektempfindlichkeit sehr groß ist. Im längerwelligen Bereich, bei Hadernpapieren über 700 nm, hat die Strahlung keinen Einfluss mehr auf die Schädigung des Materials.

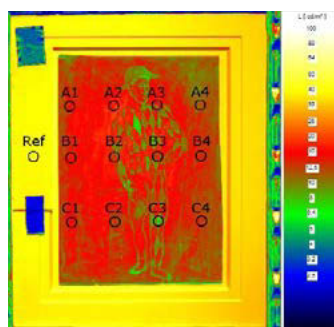
6.2 Leuchtendaten am Objekt

Die im Folgenden gezeigten Leuchtdichteaufnahmen und Messwerte wurden vor Ort im Stadtmuseum Lindau aufgenommen. Die Messdaten wurden nicht direkt auf der Objektebene aufgenommen, sondern auf dem Schutzglas vor dem Gemälde. Die Transmission des Glases konnte nicht ermittelt werden, da sowohl keine Typenangabe zum Glas gemacht wurde als auch ein Entfernen und eine Vermessung des Glases nicht möglich waren. Es ist daher in Betracht zu ziehen, dass die tatsächlichen Schädigungspotentiale durch die UV-Schutzwirkung des Glases bei allen gemessenen Spektren um wenige Prozent geringer sind und die kritische Bestrahlungszeit etwas länger ausfällt. Der Referenzpunkt „Ref“ mit bekanntem Reflexionsgrad diente zur Kalibrierung der Messungen.



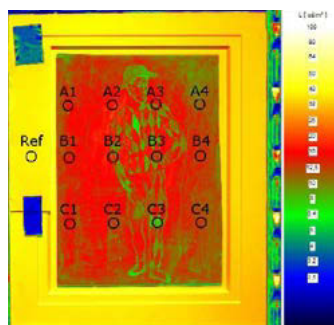
Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit Halogenstrahler XENO M 1/100 W QR111, gedimmt, 118 mA

	1	2	3	4	
A	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
B	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
C	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1



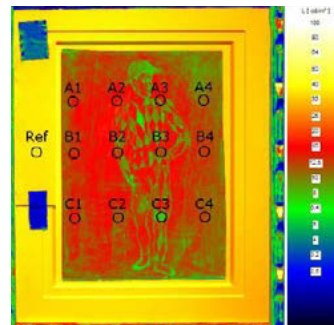
Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit ARCOS 3 LED Tunable White, 2700 K, gedimmt 19%

	1	2	3	4	
A	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
B	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
C	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1



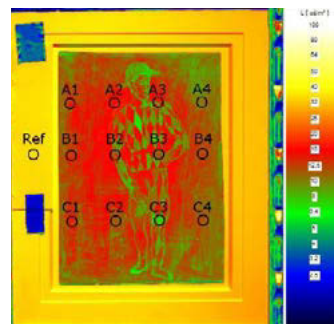
Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit ARCOS 3 LED Tunable White, 3000 K, gedimmt 19%

	1	2	3	4	
A	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
B	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
C	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1



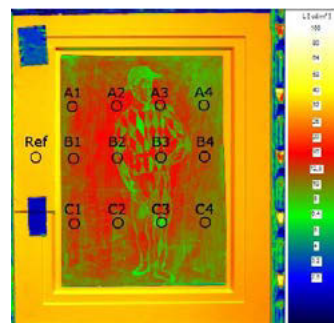
Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit ARCOS 3 LED Tunable White, 3500 K, gedimmt 19%

	1	2	3	4	
A	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
B	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
C	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1



Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit ARCOS 3 LED Tunable White, 4000 K, gedimmt 19%

	1	2	3	4	
A	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
B	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
C	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1



Leuchtdichteaufnahme: Beleuchtung mit ARCOS 3 LED Tunable White, 6500 K, gedimmt 19%

	1	2	3	4	
A	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
B	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1
C	x	0,5240	0,5240	0,5243	0,5163
	y	0,4040	0,4034	0,4025	0,4095
	CCT (K)	1900	1966	1940	2038
	E (lx)	124,9	146,2	132,2	104,1

6.3 Berechnung für die Beleuchtungssituationen im Museum

Für die Berechnungen der Homogenität und der Mittelwerte für Beleuchtungsstärke und CCT wurden die im Museum erhobenen Messwerte verwendet. Das Schädigungspotential basiert auf den spektralen Messungen im Labor. Die kursiven Werte für die ungedimmte Halogenleuchte wurden nur auf dem bedeckten „Harlekin“ gemessen, um das Bild nicht unnötig hoher Strahlungsbelastung auszusetzen.

Das beim „Harlekin“ verwendete Material ist dünnes, leicht gewelltes Papier, das auf ein schweres Trägerpapier aufgezogen ist. Es soll durch das Hadernpapier repräsentiert werden.

Beleuchtungssituation im Museum

	XENO gedimmt	XENO ungedimmt	ARCOS 2700 K	ARCOS 3000 K	ARCOS 3500 K	ARCOS 4000 K	ARCOS 6500 K
Farbtemperatur im Zentrum der Leuchte [K]	2032	2717	2519	2786	3258	3722	5909
$U_{0,CCT}$	0,971	0,991	0,992	0,986	0,976	0,990	0,984
$U_{1,CCT}$	0,952	0,986	0,982	0,973	0,965	0,980	0,969
Mittlere Beleuchtungsstärke \bar{E} [lx]	112,4	2651,2	136,4	130,3	126,7	123,1	118,4
Minimale Beleuchtungsstärke E_{min} [lx]	71,8	1647,4	124,2	119,6	116,9	112,8	108,7
Maximale Beleuchtungsstärke E_{max} [lx]	146,2	3427,2	136,4	138,0	133,0	130,1	123,8
$U_{0,E}$	0,639	0,621	0,911	0,918	0,923	0,917	0,919
$U_{1,E}$	0,491	0,481	0,862	0,867	0,879	0,867	0,879
R_a	99	99	91	93	93	91	84

Schädigungspotential $\left[\frac{mW}{m^2 \cdot lx}\right]$

Zeitungspapier	0,0009	0,0026	0,0008	0,0010	0,0013	0,0016	0,0026
Hadernpapier	0,1476	0,1637	0,1102	0,1202	0,1365	0,1501	0,208
Öl auf Leinwand	0,2025	0,2102	0,1394	0,1510	0,1698	0,1856	0,2532
Textilien	0,3338	0,3128	0,2000	0,2142	0,2374	0,2569	0,3414
Aquarell auf Hadern	0,2025	0,2102	0,1394	0,1510	0,1698	0,1856	0,2532

Wirksame Bestrahlungsstärke $\left[\frac{mW}{m^2}\right]$ bei mittlerer Beleuchtungsstärke auf dem Gemälde

Zeitungspapier	0,105	6,911	0,112	0,131	0,165	0,192	0,311
Hadernpapier	16585	43411	15026	15666	17289	18481	2465
Öl auf Leinwand	22756	55719	19018	19678	21511	22846	29978
Textilien	37518	82921	27284	27912	30072	31623	40422
Aquarell auf Hadern	22756	55719	19018	19678	21511	22846	29978

Schwellenbestrahlungszeit [h] bei mittlerer Beleuchtungsstärke auf dem Gemälde

Zeitungspapier	47799	724	44704	37993	30356	26037	16057
Hadernpapier	75353	2764	79863	76599	69406	64932	48670
Öl auf Leinwand	37353	1526	44694	43196	39514	37205	28354
Textilien	7730	350	10629	10390	9643	9170	7174
Aquarell auf Hadern	7690	314	9202	8893	8135	7660	5838

Wirksame Bestrahlungsstärke $\left[\frac{mW}{m^2}\right]$ bei gleicher Beleuchtungsstärke $E = 100$ lx

Zeitungspapier	0,093	0,261	0,082	0,101	0,130	0,156	0,263
Hadernpapier	14756	16374	11016	12023	13646	15013	20824
Öl auf Leinwand	20245	21016	13943	15102	16978	18559	25319
Textilien	33379	31277	20003	21421	23735	25689	34140
Aquarell auf Hadern	20245	21016	13943	15102	16978	18559	25319

Schwellenbestrahlungszeit [h] bei gleicher Beleuchtungsstärke $E = 100$ lx

Zeitungspapier	53726	19182	61291	49717	38381	32095	19040
Hadernpapier	81325	73287	108933	99808	87941	79933	57627
Öl auf Leinwand	41985	40445	60964	56283	50065	45799	33571
Textilien	8688	9272	14498	13538	12218	11289	8494
Aquarell auf Hadern	8644	8327	12551	11588	10308	9429	6912

6.4 Bewertung der Ergebnisse

Beleuchtungsstärke

Wie aus den Tabellen in 6.3 ersichtlich, wurde die LED-Leuchte auf ein ähnliches Beleuchtungsniveau geregelt wie die Halogenleuchte. Es fällt auf, dass es der Halogenleuchte auf der kleinen Fläche des „Harlekin“ nicht gelingt, eine so homogene Beleuchtung zu erzeugen, dass die Ungleichmäßigkeiten vom Betrachter nicht bemerkt werden. Dies ist in der Regel ab einem U_0 bzw. U_1 von $>0,9$ der Fall. Diese Ungleichmäßigkeiten können die Wirkung des Bildes auf den Betrachter deutlich beeinflussen. Der LED-Strahler erzeugt eine gleichmäßige Lichtverteilung mit hohen Werten U_0 und U_1 . Die Regelung der Beleuchtungsstärke erfolgt beim Halogenstrahler über Stromdimmung und ist stufenlos über einen weiten Bereich möglich. Jedoch wird die Lichtfarbe stark beeinflusst und verändert sich von 2000 K bis zu 2900 K. Die Dimmung der Beleuchtungsstärke des LED-Strahlers erfolgt unabhängig von der Lichtfarbe.

Lichtfarbe

Der gedimmte XENO M erzeugt weißes Licht mit sehr niedriger Farbtemperatur. Das Licht ist mit Kerzenlicht vergleichbar. Um Lichtfarben zu erzeugen, die dem Betrachter weiß erscheinen, muss die Stromzufuhr erhöht werden, so dass sehr hohe Beleuchtungsstärken erzeugt werden. Höhere Beleuchtungsstärken sorgen jedoch wiederum für eine erhöhte E_{dm} . Die Gleichmäßigkeit der Lichtfarbe erreicht hohe Werte. Die Lichtfarbe des LED-Strahlers lässt sich unabhängig vom Beleuchtungsstärkeniveau regeln, wobei die gemessenen Werte der Farbtemperatur von den Einstellwerten teilweise stark abweichen (siehe Tabelle 6.1/I).

Farbwiedergabe nach DIN 6196 / CIE 13.3-1995

Die Farbwiedergabewerte des Halogenstrahlers sind mit R_f - und R_a -Werten von 99 ausgezeichnet, was in der Natur der Sache begründet liegt. Bei den verschiedenen Spektren der LED-Leuchte gibt es unterschiedliche Ergebnisse. Bei Farbtemperaturen bis 4000 K überschreitet der R_a 90 Punkte und ist als „sehr gut“ zu bezeichnen. Bei höheren Farbtemperaturen, hier 6500 K sinkt der Wert auf 84 Punkte und ist nur mehr als „gut“ zu bezeichnen. Bei LEDs ist insbesondere die Farbwiedergabe von tiefroten Farben problematisch, jedoch werden mit steigender Farbtemperatur auch tiefblaue Farben nicht ganz korrekt wiedergegeben. Tabelle 6.1/II zeigt alle Farbwiedergabewerte.

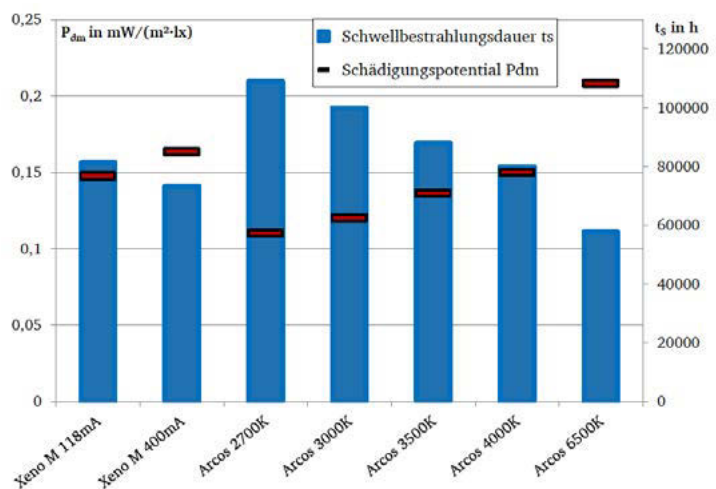
Schädigungspotential, wirksame Beleuchtungsstärke und kritische Bestrahlungszeit

Das Schädigungspotential eines Spektrums kann ohne weiteres verglichen werden, da dies eine relative Größe ist, die von der Gesamtenergie des Spektrums unabhängig ist. Ein hier gemessenes ARCOS-LED-Spektrum weist bei vergleichbarer Farbtemperatur gegenüber einem Halogenspektrum bei allen in der CIE 157:2004 notierten Materialien geringere Schädigungspotentiale auf. Dies führt bei gleicher Beleuchtungsstärke zu geringeren wirksamen Bestrahlungsstärken und damit zu deutlich erhöhten kritischen Bestrahlungsdauern. Vergleicht man beispielsweise bei gleicher Beleuchtungsstärke ($E = 100 \text{ lx}$) das Spektrum der Halogenleuchte bei 2900 K (ungedimmt) mit dem der ARCOS bei 2780 K, so ist es mit dem LED-Strahler bei den meisten Materialien möglich, die Beleuchtungszeit um etwa 50 % zu verlängern, ohne dass ein sichtbarer Schaden eintreten könnte. Bei Zeitungspapier ist die kritische Beleuchtungsdauer sogar um 300 % verlängert.

Aber auch bei den im Museum vorgefundenen, unterschiedlichen Beleuchtungssituationen weist die in der Farbe vergleichbare LED-Beleuchtung trotz höherer Beleuchtungsstärken eine geringere wirksame Bestrahlungsstärke und damit eine längere kritische Bestrahlungszeit auf.

Erst bei höheren Farbtemperaturen (ca. 3250 K) der LED-Beleuchtung werden die Bestrahlungszeiten im Museum der Halogenbeleuchtung bei 2150 K vergleichbar.

Abschließend soll noch bemerkt werden, dass in diese Betrachtung das Schutzglas vor dem Bild nicht mit einbezogen werden konnte, weshalb die tatsächlichen Schädigungspotentiale durch die UV-Schutzwirkung des Glases bei allen gemessenen Spektren um wenige Prozent geringer und die kritische Bestrahlungszeit etwas länger einzuschätzen sind.



Schädigungspotential und Schwellenbestrahlungsdauer bei 100 lx

7 Beispiele

7.1 Städel Museum in Frankfurt

Mit einer vollständigen LED-Beleuchtung, bestehend aus ARCOS 3 Tunable White, Projektoren und einer Speziallösung für die Oberlichter wurde das Projekt Städel Museum in Frankfurt realisiert. Zu Beginn des Projektes stand die Frage im Mittelpunkt, ob die LED-Beleuchtung nicht schädigender ist als die Halogenbeleuchtung. Mit Hilfe der Studie konnten die Kuratoren, sowie die Entscheider des Städel Museums überzeugt werden. Die Beleuchtung für das gesamte Gebäude wurde entsprechend des Konzeptes realisiert. Der erste Teil des Museums wurde im Dezember 2011 eröffnet. Der zweite Teil folgte im Februar 2012.



Architektur: Schneider + Schumacher | DE
Lichtplanung: Licht Kunst Licht | DE
Lichtlösung: ARCOS 3 Tunable White, ARCOS 3 LED-Projektoren,
LED-Speziallösung für Oberlichter

7.2 Kunsthistorisches Museum in Wien

In der Revitalisierung eines Gebäudeflügels, der ab Frühjahr 2012 die Ausstellungsfläche des Kunsthistorischen Museums erweitert, wurde sehr stark auf hohe Qualität der Lichtfarbe und der Brillanz sowie auf ein möglichst geringes Schädigungspotenzial der Beleuchtung gelegt. Die Vitrinen werden mit SUPERSYSTEM mit hoher Farbwiedergabeindex realisiert. Die Raumbeleuchtung ist eine Mischung aus SUPERSYSTEM und modernen LED Lüstern STARBRICK.



Lichtplanung: Die Lichtplaner | DE
Lichtlösung: SUPERSYSTEM 2,5 W CRI90 (Vitrinen), STARBRICK
4-fach-Lüster mit zusätzlichen SUPERSYSTEM Spots (Räume)

7.3 Ethnologisches Museum in Berlin

Die Ausstellungserneuerung im Ethnologischen Museum in Berlin hat höchsten Wert auf die Minimierung der Schädigung durch Beleuchtung gelegt. Auf Grund der zum Teil sehr empfindlichen Ausstellungsstücke wurden die Vitrinen mit SUPERSYSTEM mit erhöhtem Farbwiedergabeindex und geringstmöglichem Schädigungspotenzial akzentuiert. Die Eröffnung erfolgte im Frühjahr 2011.



Lichtplanung: Licht Kunst Licht | DE
Lichtlösung: Vitrinen SUPERSYSTEM 2,5 W CRI90

8 Diskussion und Ausblick

Die Studie hat belegt, wie wichtig die Betrachtung von unterschiedlichen Lichtquellen bei Kunstobjekten ist und welche Vorteile die LED beinhaltet. Daraus lässt sich zusammenfassen:

In Kunst- und Kulturanwendungen gilt es vor allem schädliche Infrarot- und Ultraviolettstrahlung sowie hohe Beleuchtungsstärken so gering wie möglich zu halten. Werden diese Faktoren beachtet, minimiert sich das Risiko deutlich, dass Farben ausbleichen oder empfindliche Materialien Schaden nehmen. Blendungen sollten ebenfalls vermieden werden, damit die ausgestellten Objekte korrekt zur Geltung kommen. Eine hohe Energieeffizienz und lange Wartungsintervalle bei der Beleuchtung garantieren zudem einen reibungslosen Museumsbetrieb.

Die LED-Technologie bietet dahingehend viele Vorteile: Eine entsprechend gut ausgewählte LED hat ohne Filter eine geringere oder gleich hohe IR- und UV-Strahlung, wie andere Lichtquellen mit Filter. Das fokussierte Licht und die hohe Farbwiedergabe von $R_a > 90$ eignet sich hervorragend für die Akzentbeleuchtung. Zudem verringert sich der Wartungsaufwand durch die besonders lange Lebensdauer der Lichtquellen. Weiters sind LED äußerst energieeffizient und schonen so nicht nur die Exponate, sondern auch die Umwelt und das Budget.

Mit Tunable White bietet die LED-Technologie den Vorteil, unterschiedliche Farbtemperaturen, von Warmweiß bis Neutral- bzw. Kaltweiß, ganz ohne Lampen- oder Leuchtentausch einsetzen zu können. So kann die optimale Farbtemperatur dem Material des Ausstellungsobjekts entsprechend angepasst werden, um feinste Nuancen herauszuarbeiten und Eigenheiten emotional zu betonen. Selbst bei gedimmter Leuchte bleibt die Farbtemperatur konstant und verbessert die Wahrnehmung der Exponate.

Prüfbericht PB320/2011:
„Vermessung der Beleuchtung von Pablo Picassos Harlekin“ (1916)
im Stadtmuseum Lindau, 2011, S. Söllner, N. Müller

CIE 157/2004 – Technical Report:
„Control of damage to Museum objects by optical radiation“



ZUMTOBEL

Deutschland

ZG Licht Mitte-Ost GmbH
Grevenmarschstrasse 74-78
32657 Lemgo
T +49/(0)5261 212-0
F +49/(0)5261 212-7777
info@zumtobel.de
zumtobel.de

ZG Licht Nord-West GmbH
Stahlwiete 20
22761 Hamburg
T +49/(0)40 53 53 81-0
F +49/(0)40 53 53 81-99
info@zumtobel.de
zumtobel.de

ZG Licht Süd GmbH
Solmsstr. 83
60486 Frankfurt
T +49/(0)69 26 48 89-0
F +49/(0)69 26 48 89-80
info@zumtobel.de
zumtobel.de

Österreich

ZG Lighting Austria GmbH
Donau-City-Strasse 1
1220 Wien
T +43/(0)1/258 26 01-0
F +43/(0)1/258 26 01-82845
welcome@zumtobel.at
zumtobel.at

Schweiz

Zumtobel Licht AG
Thurgauerstrasse 39
8050 Zürich
T +41/(0)44/305 35 35
F +41/(0)44/305 35 36
info@zumtobel.ch
zumtobel.ch

Headquarters

Zumtobel Lighting GmbH
Schweizer Strasse 30
Postfach 72
6851 Dornbirn, AUSTRIA
T +43/(0)5572/390-0
info@zumtobel.info

zumtobel.com

zumtobel.com/art