

*Die visuelle Wahrnehmung  
von Kunstwerken im Nationalmuseum  
San Matteo (Pisa, Italien)*

Zumtobel Research

University of Pisa - D.E.S.T.E.C.  
Dott.ssa Francesca Feltrin  
Prof. Ing. Francesco Leccese  
Ing. Giacomo Salvadori

Zumtobel  
Ing. Dario Maccheroni

National Museum of San Matteo  
Dott.ssa Rosanna Morozzi  
Dott. Pierluigi Nieri

ISBN 978-3-902940-76-6



## Inhalt

<b>Kurzzusammenfassung</b>	5
<b>1. Museumsbeleuchtung und visuelle Wahrnehmung</b>	6
<b>2. Das Nationalmuseum San Matteo (Pisa, Italien)</b>	8
2.1 Ausgewählte Kunstwerke	8
2.2 Versuchsaufbau	8
<b>3. Zumtobel-Leuchten</b>	12
<b>4. Beleuchtungseinstellungen</b>	14
4.1 Sacra Conversazione	15
4.2 Madonna del Latte	19
<b>5. Versuchsablauf</b>	23
<b>6. Testergebnisse</b>	24
6.1 Sacra Conversazione	25
6.2 Madonna del Latte	28
<b>7. Statistische Analyse</b>	31
7.1 Sacra Conversazione	31
7.2 Madonna del Latte	32
<b>8. Schlussfolgerungen</b>	33
8.1 Kontrast	33
8.2 Betonung des Kunstwerks	34
8.3 Persönliche Präferenz	34
8.4 Präferenz gegen Neutralität	35
<b>Anhang A - Die Freude an Farbe</b>	36
<b>Anhang B - CIE 157:2004</b>	43



## Kurzzusammenfassung

Diese Studie ging der Frage nach, in welcher Weise unterschiedliche Lichtquellen, deren jeweilige Umgebung und der durch sie hervorgerufene Kontrast zwischen dem Kunstwerk und dessen Hintergrund, des Besuchers visuelle Wahrnehmung von Kunst und Raum und dessen Vorlieben für bestimmte Lichteinstellungen beeinflussen. Die Studie umfasst als Untersuchungsgegenstand einen psychophysischen Versuch, der in zwei Ausstellungssälen des Nationalmuseums von San Matteo in Pisa (Italien) stattfand. Der Versuch nutzt hierzu zwei Kunstwerke aus der Dauerausstellung, zum einen ein Tafelbild und zum anderen eine Marmorskulptur. Der Test wurde an 55 Personen durchgeführt, deren Aufgabe es war, bestimmte Beleuchtungssituationen für die beiden Kunstwerke zu bewerten, indem sie diese in Bezug auf Kontrast, verbesserte Darstellung der charakteristischen Merkmale der Werke und schlussendlich ihrer persönlichen Präferenz verglichen.

Ziel der Studie war es, herauszufinden, ob es einen Zusammenhang zwischen den drei genannten Parametern gibt und insbesondere, ob der Kontrast und die verbesserte Darstellung der Merkmale des jeweiligen Kunstwerks einen konkreten Einfluss auf die Vorlieben der Testpersonen hatten. Ziel war es letztlich, diejenigen Beleuchtungseinstellungen zu ermitteln und eindeutig zu bestimmen, die sowohl im Hinblick auf Vermittlung der Ursprungsbotschaft des Künstlers, als auch auf den Kunstgenuss des allgemeinen Museumsbesuchers den besten Eindruck hinterließen. Darüber hinaus sollte der Versuch herausfinden, ob die Betrachter bestimmte Lichteinstellungen nur deshalb bevorzugen, da sie die besonderen Merkmale der Kunstwerke besser darstellen, oder ob ihre persönliche Präferenz tatsächlich von anderen Faktoren wie individuelle Emotionen und speziellen Botschaften der Kunstwerke beeinflusst wird.

Der Versuch basierte auf verschiedene Beleuchtungseinstellungen: drei übliche, die mittels warmem Licht durch Strahler und Wandfluter erzeugt wurden, und eine Einstellung, bei der kleinere Strahler mit verschiedenen CCTs gemischt wurden, anhand derer die so genannte Monza-Methode getestet wurde. Zur Herrichtung der verschiedenen Beleuchtungseinstellungen wurden ARCOS LED-Strahler und -Wandfluter sowie SUPERSYSTEM II-Strahler justiert, die eine Kombination der verschiedenen Leuchten und der unterschiedlichen Einstellungen, Optiken und Linsen aufwiesen.

Die Studie hatte zum Ergebnis, dass die Betrachter im Allgemeinen eher neutrale Einstellungen bevorzugten, die ein mittleres Kontrastverhältnis zwischen den Exponaten und ihrem jeweiligen Hintergrund erzeugten. Darüber hinaus wurden die Lichtlösungen, die als entspannend und einfach beschrieben wurden, als die angenehmsten und interessantesten bewertet, während einheitliche Lichtszenarien hingegen als langweilig und nicht zur Verbesserung der Darstellung der Kunstwerke geeignet angesehen wurden.

# 1. Museumsbeleuchtung und visuelle Wahrnehmung

Museen werden heutzutage als teilnehmerorientierte Institutionen und soziale Räume wahrgenommen. Sie repräsentieren einen Schwerpunkt der städtischen Kulturszene und eine soziale Begegnungsstätte: Die Menschen besuchen Museen, um dort ihre Freizeit zu verbringen, umherzuschlendern und sich mit Freunden zu treffen, und selbst die Gebäude an sich stellen wichtige Wahrzeichen der Städte dar. Doch wie mehrere statistische Forschungsarbeiten zeigen, kommt nur ein sehr geringer Teil der Museumsbesucher aufgrund ihrer Leidenschaft für Kunst oder Architektur und ist bereits damit zufrieden, die Kunstwerke einfach zu betrachten. Es gibt zahlreiche Untersuchungen zur Interaktion zwischen Museumsbesuchern und den Ausstellungsstücken: Normalerweise geht ein durchschnittlicher Betrachter zu einem Kunstwerk, sieht es sich weniger als zwei Sekunden lang an, liest weitere zehn Sekunden lang den Text an der Wand, schaut dann noch einmal zurück auf das Gemälde und geht weiter. Aus diesem Grund entwickeln viele Museen verständlichere und auffälligere Kunstaustellungen, um mehr Besucher anzulocken und die Betrachter dazu zu ermutigen, sich wirklich auf die Kunst einzulassen und sie während ihres Besuchs zu genießen. Deshalb liegt das Hauptziel von Museen darin, den Besuchern ein tolles visuelles Erlebnis zu bieten, sie ins Staunen zu versetzen und ein Kunstverständnis zu vermitteln.

Dieses Ziel kann mit einer sorgfältig konzipierten Beleuchtung der Ausstellung erreicht werden. Große Teile der aktuellen Forschung zur Museumsbeleuchtung konzentrieren sich auf die Präferenzen und visuelle Wahrnehmung der Besucher, um Lichtlösungen zu finden, mit denen der visuelle Eindruck der ausgestellten Kunstwerke modelliert, und als Konsequenz dessen, das bestmögliche visuelle Erlebnis für die Museumsbesucher erzielt werden kann. Architektur- und Beleuchtungsparameter haben tatsächlich eine starke Auswirkung auf die visuelle Wahrnehmung von Kunstaustellungen, denn durch sie kann man die beste Betonung der ausgestellten Kunstwerke erzielen. Für Museumsausstellungen kann man verschiedene Leuchtentypen verwenden – einzelne oder mehrere Strahler, lineare Leuchtmittel oder Wandfluter – und bei allen können unterschiedliche Reflektoren, Linsen, Blendringe oder anderes Zubehör verwendet werden, mit dem man das ausgesendete Licht kontrolliert. Außerdem stellen die Einstellung der Leuchten und die Auswahl der passenden Leuchtentypen – genau wie die Kombination verschiedener Lichtquellen auch – einen wesentlichen Schritt bei der Kuratation von Kunstaustellungen dar, da man mit verschiedenartigen Ausführungen unterschiedliche Beleuchtungseffekte erzielen kann, zum einen für die Kunstwerke selbst, zum anderen aber für den gesamten Ausstellungsraum. Die Beleuchtungsgestaltung baut eine festgelegte Beziehung zwischen den Ausstellungsstücken, dem Hintergrund und dem Umfeld des Ausstellungsraumes auf, je nach Sinn und Zweck der Ausstellung und den Gefühlen, die sie den Betrachtern vermitteln soll. So leuchtet beispielsweise ein breiter Strahler oder Wandfluter sowohl den Hintergrund als auch das Kunstwerk aus und



Museo del Duomo - Mailand, Italien



Städel Museum - Frankfurt, Deutschland

schafft so ein eher gleichmäßiges Beleuchtungsszenario, während schmalere und kleinere Lichtstrahlen nur auf die Oberfläche des Kunstwerks treffen und den Hintergrund nicht beleuchten. Abschließend lässt sich sagen, dass dasselbe Kunstwerk auf unterschiedliche Arten beleuchtet werden kann, je nach Größenordnung der Lichtstrahlen, ihres Umfelds, ihrer Ausrichtung und Form.

Zusätzlich zu diesen Faktoren hat die Farbtemperatur (CCT) der Lichtquelle einen sehr starken Einfluss auf die Farbwahrnehmung der Menschen und den visuellen Eindruck, den ein Kunstwerk hinterlässt. Traditionell werden wärmere Lichtquellen für die Museumsbeleuchtung eingesetzt, da Wolfram-Lichtquellen die Hauptquellen darstellten, bevor das Solid State Lighting (SSL) entwickelt wurde. LEDs bieten Kunstaustellungen viele Vorteile: höhere Beleuchtungseffizienz, minimaler Gehalt an IR- und UV-Strahlung (stellt eine bessere Konservierung der Kunstwerke sicher) und insbesondere die Abstimbarkeit des Spektrums. Durch die Abstimbarkeit des Spektrums kann das Spektrum der Lichtquellen gestaltet und jede erforderliche Farbtemperatur erzielt werden. Tatsächlich untersuchen viele Forscher den Einfluss der Farbtemperatur auf die visuelle und Farberscheinung von ausgestellten Kunstwerken in Museen sowie das Niveau der Beleuchtungsstärke und die Farbwiedergabe, um die besten Lichtlösungen für Betrachter in Museen herauszustellen. Mehrere Studien haben gezeigt, dass neutrale Farbtemperaturen (4000 K – 5700 K) das bevorzugte Beleuchtungsdesign für die Ausstellung von Gemälden in Museen darstellen; dies wurde in kontrollierten Museumsumgebungen getestet. Darüber hinaus wurde kürzlich von Francesco Iannone und Serena Tellini (Consuline Architeti Associati, mit Sitz in Mailand) ein neuer interessanter Ansatz entwickelt. Bei der sogenannten Monza-Methode erschafft man eine dynamische Beleuchtung für Kunstwerke und verwendet dabei LEDs mit unterschiedlichen Farbtemperaturen, die man auf der Oberfläche des Kunstwerks mischt, abhängig von den Farben und den Details in verschiedenen Bereichen des Kunstwerks. Diese Methode soll eine dreidimensionale und lebendigere visuelle Wirkung auf die Kunstwerke haben und so den Betrachtern die Bedeutung der Kunst besser verständlich machen.

Abschließend ist festzustellen, dass man durch die Beleuchtung das Museumserlebnis wirklich zu schätzen lernt und die ausgestellten Kunstwerke sowie die Aussagen der Künstler genießt und versteht. Mit einer hohen visuellen Qualität, Blendungskontrolle, genauer Farbwiedergabe, Chromatizität und dem angemessenen Leuchtdichtekontast zwischen dem Umfeld und den Ausstellungsstücken kann man für jedes Kunstwerk das richtige Beleuchtungs-Mikroklima erschaffen und dabei jeweils dessen besondere Geschichte, Feinheit und Interpretation einbeziehen.

## 2. Das Nationalmuseum San Matteo (Pisa, Italien)

Der Versuch wurde im Nationalmuseum San Matteo in Pisa (Italien) durchgeführt. Das Museum befindet sich im mittelalterlichen Kloster San Matteo, in dem die Kunstsammlungen seit 1949 beherbergt werden. Die Ausstellungssäle liegen im ersten Stockwerk des Gebäudes und umgeben den alten Klosterhof. Vom Eingang des Museums aus blickt man auf den Fluss Arno. Das Museum zeigt einige der wichtigsten Sammlungen mittelalterlicher Gemälde und Skulpturen aus ganz Europa und beinhaltet Kunstwerke der berühmtesten Künstler Italiens aus dem 11. bis 13. Jahrhundert.

Die Ausstellungsgestaltung des Museums wurde in den 1970er Jahren erneuert: Die Sammlung wurde damals nach Epoche und Art der Kunstwerke organisiert, wobei jeder Raum ein bestimmtes Thema erhielt. Die Gestaltung der Ausstellung zwingt die Besucher nicht, einen bestimmten Weg zu gehen, und es gibt keine eindeutige chronologische Reihenfolge der Ausstellungsstücke. Die Lichtplanung wurde in den 1970er Jahren mit Halogenstrahlern auf Stromschienen umgesetzt, die an der Decke befestigt wurden. Deshalb wird die Ausstellung mit warmem Licht beleuchtet, das die Farben der Gemälde perfekt betont, besonders bei den vielen Goldgrundgemälden. Vor Kurzem wurde die Beleuchtung des Ausstellungssaals für Renaissancegemälde erneuert und dieser mit LED-Strahlern eingerichtet.

### 2.1 Ausgewählte Kunstwerke

Die Versuche wurden an zwei unterschiedlichen Kunstwerken durchgeführt, einem zweidimensionalen und einem dreidimensionalen: die *Sacra Conversazione* von Domenico Ghirlandaio und die *Madonna del Latte* von Nino Pisano und Andrea Pisano. Die *Sacra Conversazione* (1479) ist ein Tafelbild, das bei den Renaissancegemälden gezeigt wird (Kategorie „Geringe Empfindlichkeit“, Anhang B), während die *Madonna del Latte* eine Marmorskulptur mit dekorativer Vergoldung ist (Kategorie „Unempfindlich“, Anhang B) und bei den Skulpturen der Spina-Kirche gezeigt wird.

### 2.2 Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bestand aus einem Aluminiumgestell mit zwei Dreifußständern und zwei horizontalen Elementen. Das Gestell war 3,20 m lang und ermöglichte eine Höheneinstellung von 1,60 m bis 3,00 m. Auf den horizontalen Elementen konnten die Stromschienen der Leuchten befestigt werden. Durch diesen Aufbau konnten alle Leuchten gleichzeitig am Gestell befestigt und während der Tests problemlos von einer Konfiguration zur anderen geschaltet werden. Zudem konnten die Leuchten aufgrund der Länge des Gestells an den Enden der Stromschienen befestigt werden, sodass nicht nur eine frontale Beleuchtung, sondern auch eine Beleuchtung von der Seite oder eine Kombination von beidem eingestellt werden konnte.



**Nationalmuseum San Matteo (Pisa, Italien)**  
Ausstellungsraum 9 - Renaissance-Gemälde



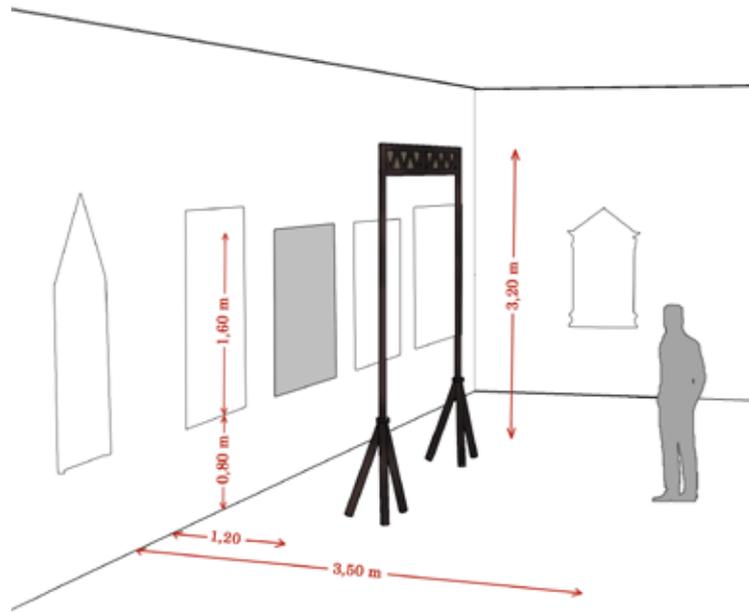
**Nationalmuseum San Matteo (Pisa, Italien)**  
Ausstellungsraum 9 - Sacra Conversazione (1479)

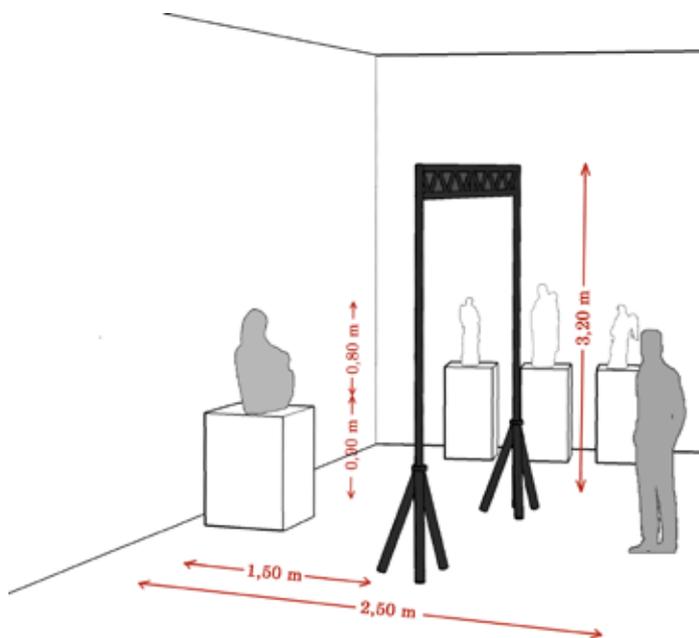
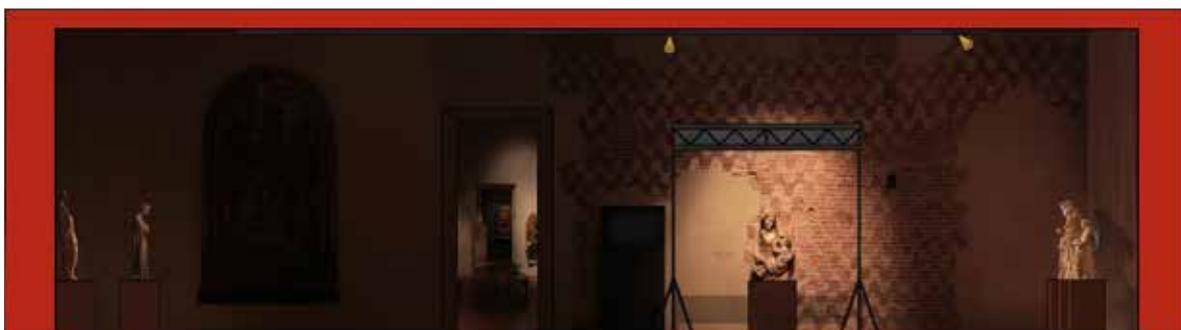


**Nationalmuseum San Matteo (Pisa, Italien)**  
Ausstellungsraum 6 - Plastiken der Kirche zu Spina



**Nationalmuseum San Matteo (Pisa, Italien)**  
Ausstellungsraum 6 - Madonna del Latte (1343-1347)





### 3. Zumtobel-Leuchten

Die bei diesem Versuch verwendeten Lichtquellen sind die Hauptleuchten, die von Zumtobel für die Beleuchtung von Museen produziert werden. Die folgenden drei Leuchtentypen wurden verwendet:

- SUPERSYSTEM II-Strahler (mini, midi und maxi),
- ARCOS LED expert-Strahler (ARCOS 2 und ARCOS 3),
- ARCOS Wandfluter.

Die Strahler wurden mit verschiedenen Optiken (Superspot, Spot, Flood und Wideflood) und Linsen verwendet, um bestimmte Beleuchtungseffekte, Strahlenformen und Dimensionen auf den Kunstwerken zu erzielen. Alle Lichtquellen verfügen über einen Farbwiedergabeindex (Ra) von über 92 und senden keine IR- oder UV-Strahlung aus, was ein Ausbleichen der Farben verhindert.

Die für den Versuch ausgewählten SUPERSYSTEM II-Leuchten hatten eine Farbtemperatur (CCT) von 3000 K und 4000 K, die ARCOS-Leuchten von 3000 K.

#### 3.1 Messungen

Die für die Versuche verwendeten Lichtquellen wurden mit einem Konica Minolta CL-500A Leuchtdichte-Spektrophotometer gemessen. Von jeder Lichtquelle wurden das Spektrum, die Farbtemperatur, die chromatischen Koordinaten und der Farbwiedergabeindex (Ra) gemessen.

## Haupt-Leistungsmerkmale der SUPERSYSTEM II - Strahler

	Mini	Midi	Maxi
Größe (mm)	26	45	65
Luminous Flux (lm)	350	550	900
RA	>92		
CCT (K)	2700 – 3000 – 4000		
Super Spot - Beam	10°	8°	8°
Spot - Beam	20°	20°	13°-18°
Flood - Beam	32°	34°	29°
Wide Flood - Beam	57°	57°	54°

## Haupt-Leistungsmerkmale der ARCOS - Leuchten

	2 LED expert	3 LED expert	Wallwasher
Größe (mm)	100	120	320
Luminous Flux (lm)	850	2000	1000
RA	98	98	>90
CCT (K)	3000 – 4000		
Super Spot - Beam	8°-10°	8°-10°	-
Spot - Beam	11°-15°	11°-15°	-
Flood - Beam	22°-30°	22°-30°	-
Wide Flood - Beam	32°-40°	32°-40°	-

## Haupt-Leistungsmerkmale der ARCOS - und SUPERSYSTEM II - Strahler

	CCT (K)	RA	x	y	u'	v'
SupersystemII Mini 3000K	3009	92	0,44	0,42	0,25	0,53
SupersystemII Mini 4000K	3963	91	0,38	0,38	0,22	0,50
SupersystemII Midi 3000K	2963	93	0,44	0,41	0,25	0,52
ARCOS LED 3 expert 3000K	3100	97	0,43	0,40	0,25	0,52
ARCOS LED 2 expert 3000K	3019	95	0,44	0,40	0,25	0,52
ARCOS Wallwasher 3000K	3174	87	0,42	0,40	0,25	0,52

SUPERSYSTEM II-Strahler  
(mini, midi und maxi)

ARCOS Wandfluter

ARCOS LED expert-Strahler  
(ARCOS 2 und ARCOS 3)

## 4. Beleuchtungseinstellungen

Für die beiden Kunstwerke wurden zwei Sätze mit Beleuchtungskonfigurationen erstellt, jeweils vier unterschiedliche Konfigurationen für das Gemälde und die Skulptur. Für das Gemälde wurde die Beleuchtung so gestaltet, dass die Farben, Details und Figuren des Kunstwerks betont wurden, und die Konfigurationen mit einer oder mehreren Lichtquellen bewirkten verschiedene Beleuchtungseffekte auf der Oberfläche. Für die Skulptur hingegen mussten Licht und Schatten auf dem Kunstwerk erzeugt werden, um Form, Volumen und Details des Kunstwerks sichtbar und ansprechend erscheinen zu lassen. In beiden Fällen sollten die unterschiedlichen Konfigurationen verschiedene Kontrastverhältnisse zwischen den Ausstellungsstücken und dem Hintergrund sowie insgesamt unterschiedliche Beleuchtungseffekte erzeugen.

Vier Beleuchtungskonfigurationen pro Kunstwerk lieferten eine angemessene Anzahl unterschiedlicher Szenarien, ohne die Testteilnehmer mit zu vielen Beleuchtungsszenen zu überfordern, an die sie sich erinnern und sie bewerten mussten. Die verschiedenen Leuchten wurden getestet und Simulationen mit Dialux durchgeführt, um zu untersuchen, welche Leuchte und welche Optik für die ausgewählten Kunstwerke angemessen wären. Die Linsen wurden hingegen erst direkt im Versuchsraum ausgewählt, bevor die Tests durchgeführt wurden. Für die Skulptur war eine Dialuxsimulation nur sehr kompliziert durchführbar, besonders aufgrund der Farbwiedergabe des Marmors und der goldenen Dekorationen, deswegen wurden Tests direkt an der Statue im Versuchsraum durchgeführt, bevor der Versuch stattfand.

Die vier Beleuchtungskonfigurationen, die für jedes Kunstwerk erstellt wurden, sowie die zwei aktuellen Beleuchtungskonfigurationen des Museums werden durch die Messung der Beleuchtungsstärke und der Leuchtdichte mit einem Delta OHM Luxmeter und einem Hagner S4 Photometer beschrieben. Auf den Kunstwerken und ihren Hintergründen wurden mehrere Messpunkte ausgewählt. Zudem wurde das Auftreten von UV-Strahlung mit einer weiteren Delta OHM-Untersuchung getestet.

Nachdem Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke an verschiedenen Punkten der Kunstwerke und ihrer Hintergründe gemessen wurden, berechnete man die Durchschnittswerte für Beleuchtungsstärke und Leuchtdichte der Kunstwerke und ihrer Hintergründe, um die Kontrastverhältnisse zu berechnen und den veränderten Kontrast bei den verschiedenen Konfigurationen zu untersuchen. Darüber hinaus wurden die Durchschnittswerte der Beleuchtungsstärke mit den Grenzwerten der aktuellen Gesetzgebung verglichen, sowohl in Hinblick auf die höchste Beleuchtungsstärke als auch die jährliche Belichtungszeit, die für Museumsbeleuchtung erlaubt sind. Das Nationalmuseum San Matteo hat normalerweise an 306 Tagen im Jahr (berechnet für 2018) für Besucher geöffnet, 11,5 Stunden an Werktagen und 5 Stunden an Feiertagen, das macht insgesamt ungefähr 3130 Stunden pro Jahr.

#### 4.1 Beleuchtungseinstellungen für die Sacra Conversazione

Die Konfiguration 1 – für die Sacra Conversazione wurde mit drei SUPERSYSTEM-II Strahlern mini umgesetzt, zwei mit einer Farbtemperatur von 3000 K und einer mit einer Farbtemperatur von 4000 K. Mit dieser Konfiguration sollte die Monza-Methode getestet und ein lebendigerer Beleuchtungseffekt auf dem Gemälde erzeugt werden, indem Quellen mit unterschiedlichen Farbtemperaturen auf bestimmte Bereiche des Gemäldes gerichtet wurden. Die beiden Strahler mit einer Farbtemperatur von 3000 K wurden auf zwei Bereiche in der Nähe der Gesichter der fünf Figuren gerichtet, während der Strahler mit der kälteren Farbtemperatur auf Bereiche mit kälteren Farben gerichtet wurde, also das blaue Kleid der Madonna. Die Superspot-Optik wurde bei den 4000 K-Strahlern verwendet, und die Spot-Optik bei den beiden 3000 K-Strahlern. Die gemessene UV-Strahlung entsprach  $0,2 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ .

Die Konfiguration 2 – wurde mit zwei SUPERSYSTEM II-Strahlern midi (3000 K) umgesetzt, die seitlich vom Gemälde befestigt wurden. Diese Konfiguration war traditioneller, da der gesamte Bereich des Gemäldes gleichmäßig beleuchtet wurde und es keine besonderen Akzente auf Bereichen des Kunstwerks gab. Bei beiden Leuchten wurde eine Flood-Optik verwendet, um die gesamte Oberfläche des Gemäldes zu beleuchten. Die gemessene UV-Strahlung entsprach  $0,1 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ .

Die Konfiguration 3 – wurde mit einem ARCOS 3 LED expert-Strahler (3000 K) umgesetzt. Mit einer Wideflood-Optik und einer Zerstreuungslinse wurden die Strahlenabmessungen so weit wie möglich vergrößert und das gesamte Gemälde beleuchtet. Diese Konfiguration betonte allerdings die Madonna und das Kind stärker als die anderen Figuren. Die gemessene UV-Strahlung entsprach  $0,2 \times 10^{-3} \text{ W/m}^2$ .

Die Konfiguration 4 – wurde mit einem ARCOS 2 LED expert-Strahler (3000 K) und dem ARCOS-Wandfluter (3000 K) umgesetzt. Der Wandfluter wurde frontal vor dem Gemälde positioniert, während der Strahler, direkt neben dem Wandfluter positioniert, leicht gekippt wurde, um das Gesicht der Madonna zu betonen. Darum sorgte diese Konfiguration für eine gleichmäßige Beleuchtung des Gemäldes mit einem Lichtakzent auf den Gesichtern der Madonna und des Kindes. Für diese Konfiguration wurde eine Superspot-Optik verwendet und eine trübe Linse gewählt. Die gemessene UV-Strahlung entsprach  $0 \text{ W/m}^2$ .



Leuchten-Aufstellung auf den Tragestrukturen der Sacra Conversazione:  
Konfiguration 1 (a), Konfiguration 2 (b), Konfiguration 3 (c), Konfiguration 4 (d)



Erscheinungsbild der Sacra Conversazione unter den vier Test-Beleuchtungen:  
Konfiguration 1 (a), Konfiguration 2 (b), Konfiguration 3 (c), Konfiguration 4 (d),



Ausgewählte Messpunkte auf der Sacra Conversazione

Gemessene Beleuchtungsstärke (lx) auf dem Gemälde für alle vier Test-Beleuchtungskonfigurationen

Messpunkte	E (lx) - Konfig. 1	E (lx) - Konfig. 2	E (lx) - Konfig. 3	E (lx) - Konfig. 4
1	90	77	29	27
2	125	182	524	266
3	247	74	57	30
4	120	95	81	75
5	16	25	16	63
6	41	35	42	66
7	7	8	8	22
8	22	23	23	55

Kalkulierte jährliche Belichtung für alle vier Test-Beleuchtungskonfigurationen

	Konfig. 1	Konfig. 2	Konfig. 3	Konfig. 4
jährliche Belichtung (lx*Stunden/Jahr)	334.910	253.530	391.250	275.440

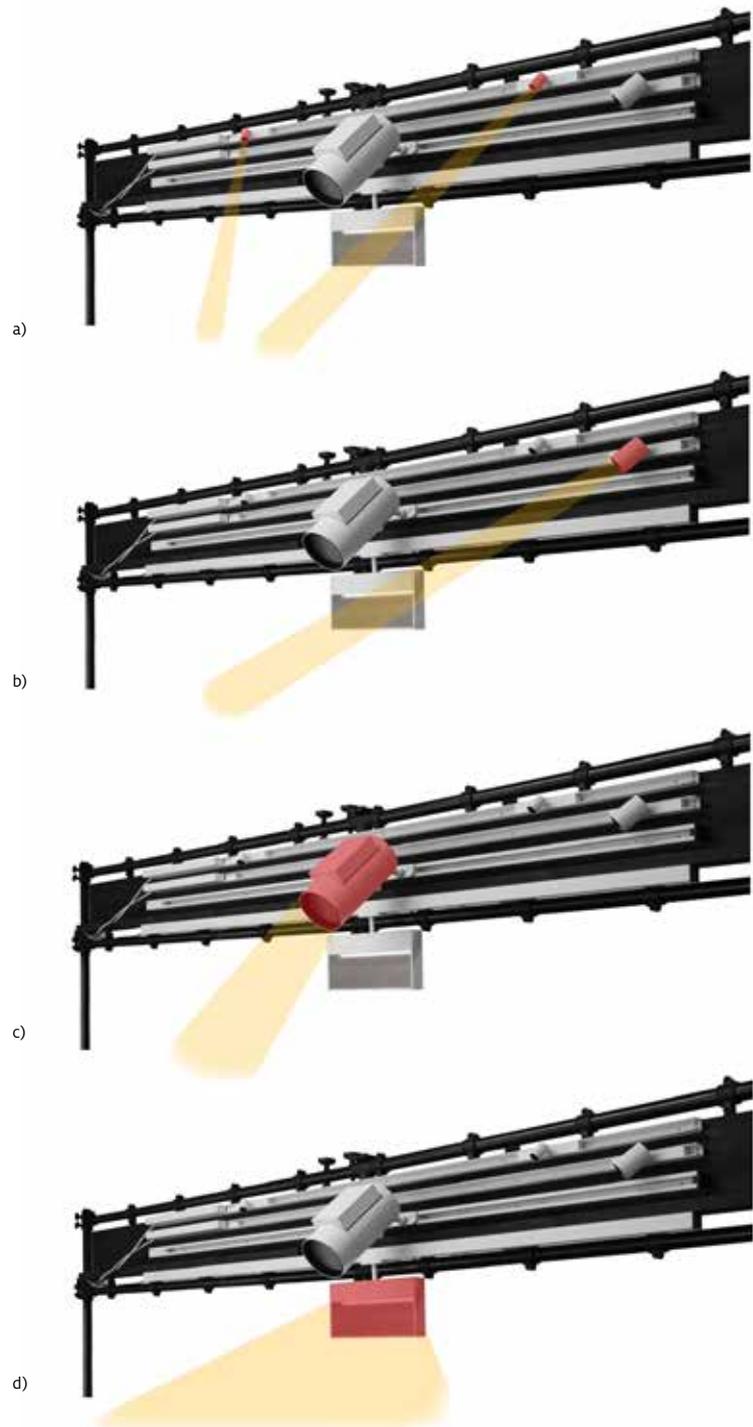
## 4.2 Beleuchtungseinstellungen für die Madonna del Latte

Die Konfiguration 1 – für die Madonna del Latte wurde mit zwei SUPERSYSTEM II-Strahlern mini mit einer Farbtemperatur von 3000 K umgesetzt. Einer der Strahler war auf das Gesicht der Madonna gerichtet, der andere auf den Körper des Kindes. Somit kann die erste Konfiguration als traditionell angesehen werden, da sie die beiden Strahler auf die Gesichter der beiden Figuren lenkt und die Statue in allen Details sichtbar ist. Bei beiden Strahlern wurde die Superspot-Optik verwendet. Die gemessene UV-Strahlung entsprach  $0 \text{ W/m}^2$ .

Die Konfiguration 2 – wurde mit einem einzelnen SUPERSYSTEM II-Strahler midi (3000 K) umgesetzt, der seitlich auf der linken Seite des Gestells positioniert wurde. Diese Position wurde gewählt, um die Gesichter der Madonna und des Kindes direkt zu beleuchten und einen größeren Kontrast zwischen Licht und Schatten auf der restlichen Skulptur zu erzielen. Es wurde die Spot-Optik verwendet. Die gemessene UV-Strahlung entsprach  $0 \text{ W/m}^2$ .

Die Konfiguration 3 – wurde mit einem einzelnen frontalen Strahler umgesetzt, einem ARCOS 3 LED expert-Strahler (3000 K), der auf die Gesichter der Madonna und des Kindes gerichtet wurde. Es wurde eine Superspot-Optik gewählt, um nur die Statue zu beleuchten und einen schärferen Kontrast zwischen dem Ausstellungsstück und dem Hintergrund zu erzeugen, außerdem wurde eine Zerstreuungslinse verwendet, um das Licht so breit wie möglich zu zerstreuen. Diese Konfiguration erzielte einen sehr dramatischen Effekt, da der Hintergrund beinahe unsichtbar und der Marmor der Statue durch diesen Kontrast betont wurde. Die gemessene UV-Strahlung entsprach  $0 \text{ W/m}^2$ .

Die Konfiguration 4 – wurde allein mit dem ARCOS-Wandfluter umgesetzt, um einen gleichmäßigeren Beleuchtungseffekt auf der Skulptur und ihrem Hintergrund zu erschaffen. Hintergrund und Skulptur wurden im Ergebnis gleich stark beleuchtet, was zu einem einfachen Beleuchtungseffekt führte, doch alle Details und Dekorationen des Kunstwerks waren deutlich sichtbar. Der Wandfluter wurde frontal vor der Skulptur positioniert.



Leuchten-Aufstellung auf den Tragestrukturen der Sacra Conversazione:  
Konfiguration 1 (a), Konfiguration 2 (b), Konfiguration 3 (c), Konfiguration 4 (d)



Erscheinungsbild der Madonna del Latte unter den vier Test-Beleuchtungen:  
Konfiguration 1 (a), Konfiguration 2 (b), Konfiguration 3 (b), Konfiguration 4 (d).



Ausgewählte Messpunkte auf der Madonne del Latte

Gemessene Beleuchtungsstärke (lx) auf der Skulptur für alle vier Test-Beleuchtungskonfigurationen

Messpunkte	E (lx) - Konfig. 1	E (lx) - Konfig. 2	E (lx) - Konfig. 3	E (lx) - Konfig. 4
1	44	134	75	175
2	94	128	54	131
3	65	54	9	60
4	75	94	11	58
5	7	9	0,6	24
6	7	2	0,6	44
7	7	48	0,5	39

Kalkulierte jährliche Belichtung für alle vier Test-Beleuchtungskonfigurationen

	Konfig. 1	Konfig. 2	Konfig. 3	Konfig. 4
jährliche Belichtung (lx*Stunden/Jahr)	219.100	322.390	115.810	331.780

## 5. Versuchsablauf

Der Versuch wurde an zwei Tagen durchgeführt, einer pro Kunstwerk, und zwei unterschiedliche Betrachtergruppen bewerteten die Beleuchtungskonfigurationen. Der Test 1 an der Sacra Conversazione wurde mit 27 Betrachtern durchgeführt (15 Männer und 12 Frauen), die zwischen 21 und 74 Jahren alt waren (Durchschnittsalter 30 Jahre). Unter ihnen hatten 7 Personen Interesse an oder Fachkenntnisse über Lichtplanung, die anderen 20 hatten keine Vorkenntnisse über Lichtplanung oder Kunst. Der Test 2 an der Madonna del Latte wurde hingegen mit 35 Betrachtern durchgeführt (18 Männer und 17 Frauen), die zwischen 21 und 75 Jahren alt waren (Durchschnittsalter 33 Jahre). Unter ihnen hatten 7 Personen Interesse an oder Fachkenntnisse über Lichtplanung und 1 Person Fachkenntnisse über Lichtplanung und Kunst, die anderen 27 hatten keine Vorkenntnisse über Lichtplanung oder Kunst. Die Testbetrachter wurden gebeten, einen Fragebogen auszufüllen, der aus vier Fragen pro Beleuchtungskonfiguration sowie drei abschließenden Fragen bestand, die erst beantwortet werden sollten, nachdem alle Konfigurationen gezeigt worden waren. Die ersten drei Fragen wurden auf einer Skala von 1-6 bewertet und behandelten folgende Punkte:

- die **Kontrastwahrnehmung**: wie scharf oder weich der Kontrast zwischen dem Ausstellungsstück und dem Hintergrund empfunden wurde (1: sehr schwacher Kontrast und 6: sehr starker Kontrast);
- die **Betonung des Kunstwerks**: inwieweit die Beleuchtungskonfiguration die Merkmale des Kunstwerks betonte – Stil, Farben, Formen und Volumen (1: schlechte Betonung, 6: sehr gute Betonung);
- die **persönliche Präferenz**: wie sehr der individuelle Betrachter die jeweilige Konfiguration wertschätze (1: geringe Wertschätzung, 6: hohe Wertschätzung).

Danach mussten die Betrachter aus einer Liste mit Adjektiven, die zu den Beleuchtungskonfigurationen passenden auswählen und die Gefühle nennen, die sie in den Betrachtern hervorriefen. Die verschiedenen Adjektive waren in vier Gruppen eingeteilt:

- Positiv: angenehm, fesselnd, interessant und angemessen
- Negativ: unangenehm, langweilig, unangemessen und eintönig
- Neutral-entspannt: gleichmäßig, entspannend, einfach
- Neutral-lebendig: komplex, dynamisch, dramatisch

Die Betrachter wurden angewiesen, nicht auf die Antworten zu vorherigen Konfigurationen zu schauen (um direkte Vergleiche zu vermeiden), und sie durften die Bewertung der einzelnen Konfigurationen nicht noch einmal anschauen, bevor sie die drei Abschlussfragen beantworteten. Zuletzt ist festzustellen, dass die Reihenfolge der angezeigten Beleuchtungskonfigurationen immer zufällig gewählt wurde, um eine Verzerrung der Bewertungen zu vermeiden.

## 6. Testergebnisse

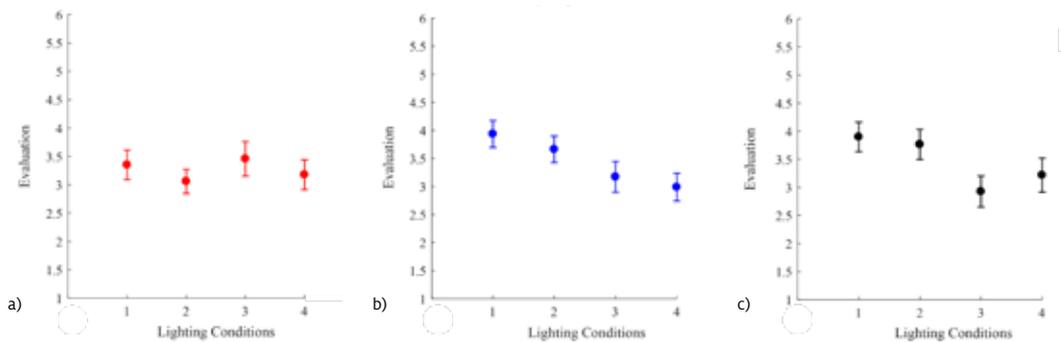
Die Tests wurden analysiert, indem die Ergebnisse des Durchschnittsbetrachters kalkuliert und die Antworten aller Betrachter analysiert wurden, um mögliche Einzeltrends zu erkennen. Der Durchschnittsbetrachter wurde ermittelt, indem für jeden bewerteten Parameter der geometrische Mittelwert kalkuliert wurde – Kontrastwahrnehmung, Betonung des Kunstwerks und Präferenz – sowie die Standardabweichung für alle Beleuchtungskonfigurationen. Der geometrische Mittelwert wurde gewählt, da er weniger von extremen Werten oder Fluktuationen der Stichproben beeinflusst wird. Die Trends dieser drei Parameter wurden für alle vier Konfigurationen gemeinsam aufgezeichnet, um zu verstehen, ob es deutliche Unterschiede bei der Bewertung der vier Beleuchtungskonfigurationen gab. Die verwendeten Adjektive hingegen wurden analysiert, indem die Häufigkeit der Antworten kalkuliert wurde.

Nach der Analyse der Daten durch die Aufzeichnung der geometrischen Mittelwerte für jede Beleuchtungskonfiguration wurden die Daten außerdem mit einem rmANOVA-Test statistisch analysiert (Varianzanalyse mit Messwiederholung). Nach der Analyse aller Datensätze wurden diese in zwei Gruppen eingeteilt, die Laien- und die Fachbetrachter. Mit dieser Analyse sollte festgestellt werden, ob es Ähnlichkeiten oder spezifische Trends bei den Bewertungen beider Gruppen gibt.

## 6.1 Sacra Conversazione

Die Ergebnisse des Durchschnittsbetrachters zeigen, dass die Kontrastbewertung immer zwischen 3 und 4 liegt, es wurde also im Durchschnitt der vier Beleuchtungskonfigurationen kein erheblicher Unterschied beim Kontrast zwischen Gemälde und Hintergrund festgestellt. Die Konfigurationen 1 und 3 scheinen den höchsten Kontrast zu haben, wohingegen die Konfigurationen 2 und 4 den niedrigsten Kontrast aufweisen. Letztere hatten in der Tat eine gleichmäßigere Wirkung auf das Gemälde und wiesen ein niedrigeres Kontrastverhältnis zwischen der Beleuchtungsstärke des Gemäldes und dessen Hintergrund auf, wohingegen die Konfigurationen 1 und 3 stärkere Akzentbeleuchtung auf dem Gemälde schufen. Im Hinblick auf die Betonung des Kunstwerks geht deutlich hervor, dass die Konfiguration 1 als beste Konfiguration zur Hervorhebung der Gemäldeigenschaften bewertet wurde, wohingegen die Bewertung der anderen Beleuchtungskonfigurationen abnimmt, so dass die Konfiguration 4 als für die Betonung des Gemäldes am wenigsten angemessen bewertet wird. Die Präferenzbewertung folgt der Bewertung zur Betonung des Kunstwerks, allerdings mit einem deutlichen Rückgang für die Konfiguration 3, die von den vier Beleuchtungskonfigurationen die unbeliebteste ist. Die Konfigurationen 1 und 2 wiederum sind gleichauf am beliebtesten, da der Unterschied der Bewertungen im Graf nicht signifikant erscheint.

Die Betrachter verwendeten insgesamt 251 Adjektive, um die Konfigurationen zu beschreiben, mit einem Durchschnitt von 9 Adjektiven pro Person (2 bis 3 Adjektive pro Konfiguration). Aus den Ergebnissen geht hervor, dass die Konfigurationen 1 und 2 mehrheitlich mit positiven und neutralen bis entspannenden Adjektiven beschrieben wurden, einige Betrachter empfanden sie aber auch als dynamisch. Nur wenige Probanden schätzten sie als unangenehm oder unangemessen für das Gemälde ein. Die Konfigurationen 3 und 4 hingegen wurden mit einer größeren Bandbreite an Adjektiven beschrieben; dennoch überwogen die positiven Adjektive. Jedoch wurden sie als dynamischer und weniger entspannend bewertet als die Konfigurationen 1 und 2, aber auch als weniger angenehm und unangemessener für die Beleuchtung des Gemäldes. Im Speziellen wurde die Konfiguration 1 mehrheitlich als „entspannend“ und die Konfiguration 2 als „gleichmäßig“, „einfach“ und „angemessen“ beschrieben, wohingegen die Konfigurationen 3 und 4 keine bestimmte Beschreibung erhielten.



Sacra Conversazione - Aufgezeichnete Ergebnisse der drei Parameter: Kontrastwahrnehmung (a), Verbesserung des Kunstwerks (b) und Präferenz (c).

Sacra Conversazione – Durchschnittliche Ergebnisse für die Sacra Conversazione

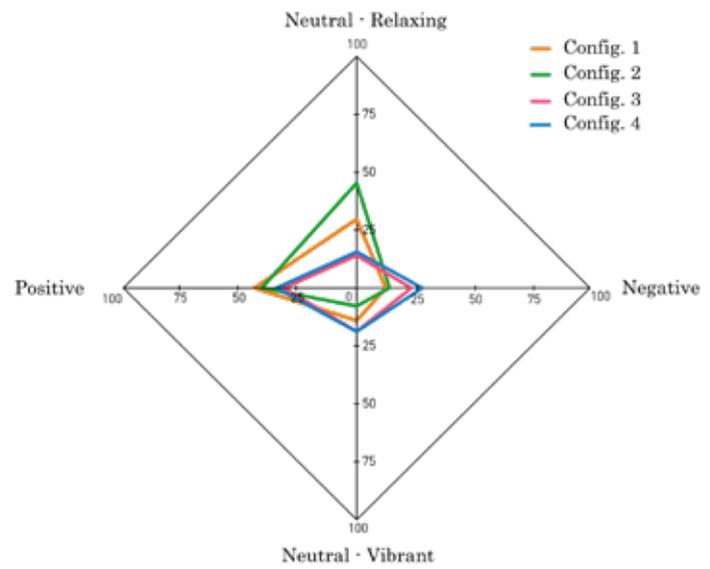
		Konfig. 1	Konfig. 2	Konfig. 3	Konfig. 4
<b>Kontrastwahrnehmung</b>	geometrischer Mittelwert	3,35	3,06	3,46	3,18
	Standardabweichung	0,26	0,21	0,31	0,26
	Median	3	3	4	3
<b>Betonung des Kunstwerks</b>	geometrischer Mittelwert	3,94	3,66	3,17	2,99
	Standardabweichung	0,26	0,27	0,28	0,30
	Median	4	4	4	3
<b>Präferenz</b>	geometrischer Mittelwert	3,90	3,76	2,93	3,22
	Standardabweichung	0,26	0,27	0,28	0,30
	Median	4	4	3	3

Sacra Conversazione – Verwendungshäufigkeit der verschiedenen Adjektive, um die vier getesteten Beleuchtungskonfigurationen zu beschreiben

Konfig. 1			Konfig. 2		
Angenehm	7	Unangenehm -	Angenehm	8	Unangenehm -
Angemessen	8	Unangemessen 1	Angemessen	12	Unangemessen 2
Interessant	8	Langweilig 1	Interessant	3	Langweilig 2
Fesselnd	5	Eintönig 6	Fesselnd	3	Eintönig 5
Gleichmäßig	5	Dynamisch 5	Gleichmäßig	12	Dynamisch 3
Entspannend	9	Dramatisch 1	Entspannend	7	Dramatisch 2
Einfach	5	Komplex 3	Einfach	10	Komplex -

Konfig. 3			Konfig. 4		
Angenehm	5	Unangenehm 4	Angenehm	5	Unangenehm 2
Angemessen	4	Unangemessen 5	Angemessen	4	Unangemessen 8
Interessant	4	Langweilig 1	Interessant	7	Langweilig 2
Fesselnd	7	Eintönig 5	Fesselnd	6	Eintönig 6
Gleichmäßig	1	Dynamisch 6	Gleichmäßig	2	Dynamisch 5
Entspannend	3	Dramatisch 4	Entspannend	3	Dramatisch 4
Einfach	5	Komplex 2	Einfach	5	Komplex 3

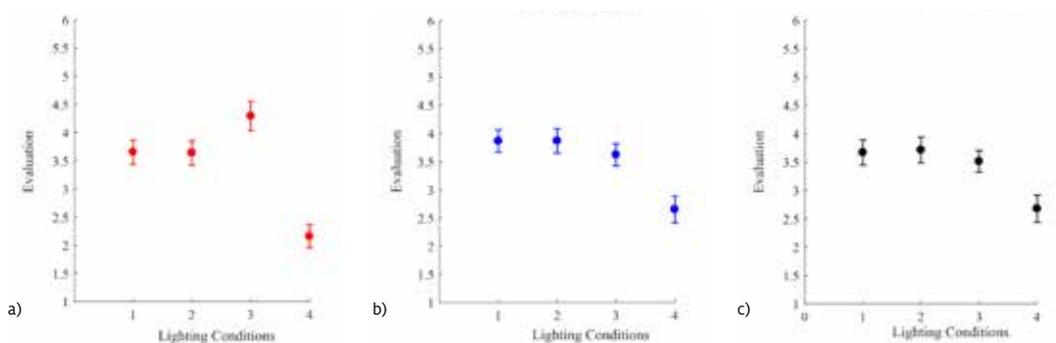


Sacra Conversazione - Radargraphen, die die Gebrauchsfrequenz der vier Gruppen an Adjektiven veranschaulicht, die herangeführt werden, um die vier Test-Beleuchtungskonfigurationen zu beschreiben

## 6.2 Madonna del Latte

Die Ergebnisse des Durchschnittsbetrachters zeigen, dass der Kontrast in den vier Beleuchtungskonfigurationen unterschiedlich bewertet wurde. Die Skulptur hat es in der Tat ermöglicht, sehr unterschiedliche Beleuchtungsszenarien zu erzeugen. So konnten sehr verschiedene Kontrastverhältniswerte anhand der Konfigurationen ermittelt werden. Jedoch wurden die Konfigurationen 1 und 2 hinsichtlich des Kontrasts gleichwertig wahrgenommen, wohingegen die Konfiguration 3 als jene mit dem höheren Kontrast und Konfiguration 4 als jene mit dem definitiv niedrigsten Kontrast bewertet wurde. Daher stimmen die Bewertungen mit den gemessenen Beleuchtungsstärken an der Skulptur und ihrem Hintergrund überein. Hinsichtlich der Betonung des Kunstwerks kann man feststellen, dass es keinen bemerkenswerten Unterschied zwischen den Bewertungen der Konfigurationen 1, 2 und 3 gibt, wohingegen es einen deutlichen Rückgang für die Konfiguration 4 gibt. Die Tendenz hinsichtlich der Präferenz ähnelt sehr der Tendenz hinsichtlich der Betonung, d. h. die Konfigurationen 1, 2 und 3 wurden fast gleichermaßen positiv wahrgenommen, wohingegen die Konfiguration 4 am unbeliebtesten war.

Die Betrachter verwendeten insgesamt 342 Adjektive, um die Konfigurationen zu beschreiben, mit einem Durchschnitt von 10 Adjektiven pro Person (2 bis 3 Adjektive pro Konfiguration). Man kann feststellen, dass für die Konfiguration 1 mehrheitlich positive und neutrale bis entspannende Adjektive verwendet wurden; wohingegen für die Konfigurationen 2 und 3 neben den positiven Adjektiven sowohl neutrale bis entspannende als auch neutrale bis dynamische Adjektive verwendet wurden. Nur wenige Probanden beschrieben diese drei Konfigurationen als unangemessen oder unangenehm. Für die Konfiguration 4 wurden hingegen vorwiegend negative und neutrale bis entspannende Adjektive verwendet. Im Speziellen wurde die Konfiguration 1 als „entspannend“ und „einfach“, die Konfiguration 2 als „interessant“ und „angenehm“, die Konfiguration 3 als „dynamisch“, „entspannend“ und „interessant“ beschrieben, wohingegen die Konfiguration 4 als „eintönig“, „langweilig“ und „gleichmäßig“ beschrieben wurde.



Madonna del Latte - Aufgezeichnete Ergebnisse der drei Parameter: Kontrastwahrnehmung (a), Verbesserung des Kunstwerks (b) und Präferenz (c).

Madonna del Latte – Durchschnittliche Ergebnisse für die Sacra Conversazione

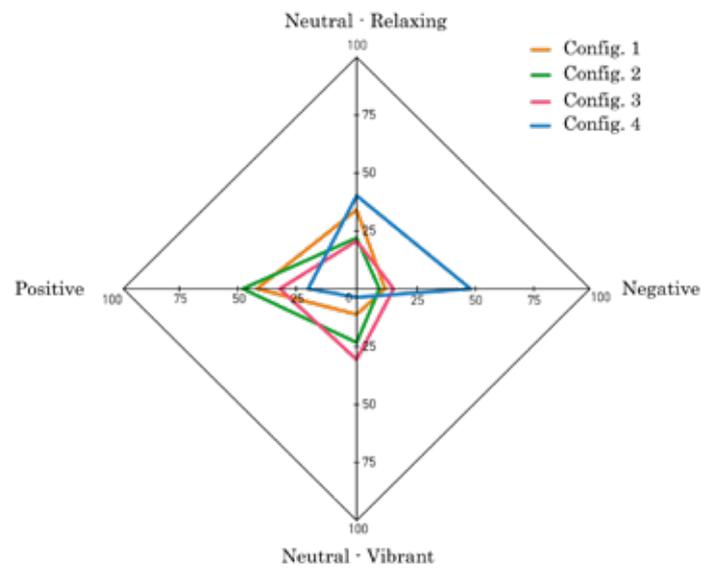
		Konfig. 1	Konfig. 2	Konfig. 3	Konfig. 4
<b>Kontrastwahrnehmung</b>	geometrischer Mittelwert	3,65	3,64	4,30	2,16
	Standardabweichung	0,21	0,21	0,26	0,21
	Median	4	4	5	2
<b>Betonung des Kunstwerks</b>	geometrischer Mittelwert	3,86	3,87	3,62	2,65
	Standardabweichung	0,20	0,22	0,20	0,24
	Median	4	4	4	3
<b>Präferenz</b>	geometrischer Mittelwert	3,67	3,71	3,51	2,68
	Standardabweichung	0,22	0,23	0,19	0
	Median	4	4	3	3

Madonna del Latte – Verwendungshäufigkeit der verschiedenen Adjektive, um die vier getesteten Beleuchtungskonfigurationen zu beschreiben

Konfig. 1				Konfig. 2			
Angenehm	13	Unangenehm	1	Angenehm	11	Unangenehm	1
Angemessen	11	Unangemessen	1	Angemessen	8	Unangemessen	1
Interessant	9	Langweilig	5	Interessant	12	Langweilig	2
Fesselnd	2	Eintönig	3	Fesselnd	9	Eintönig	4
Gleichmäßig	5	Dynamisch	3	Gleichmäßig	6	Dynamisch	9
Entspannend	13	Dramatisch	3	Entspannend	5	Dramatisch	7
Einfach	10	Komplex	3	Einfach	7	Komplex	3

Konfig. 3				Konfig. 4			
Angenehm	6	Unangenehm	1	Angenehm	6	Unangenehm	1
Angemessen	5	Unangemessen	4	Angemessen	4	Unangemessen	8
Interessant	10	Langweilig	4	Interessant	4	Langweilig	12
Fesselnd	6	Eintönig	4	Fesselnd	3	Eintönig	19
Gleichmäßig	1	Dynamisch	3	Gleichmäßig	16	Dynamisch	3
Entspannend	10	Dramatisch	14	Entspannend	4	Dramatisch	-
Einfach	6	Komplex	8	Einfach	13	Komplex	-



Sacra Conversazione - Radargraphen, die die Gebrauchsfrequenz der vier Gruppen an Adjektiven veranschaulicht, die herangeführt werden, um die vier Test-Beleuchtungskonfigurationen zu beschreiben

## 7. Statistische Analyse

Die möglichen Korrelationen und Interaktionen zwischen den drei untersuchten Parametern Kontrast, Betonung und Präferenz wurden anhand einer rmANOVA getestet, eine Varianzanalyse mit Messwiederholung (da die Bewertungen der verschiedenen Konfigurationen nicht unabhängig voneinander waren). Der Test wurde mithilfe der SPSS-Software durchgeführt und es wurden „multivariate Testergebnisse“ berücksichtigt. Zudem sollte der Test die Signifikanz der Unterschiede zwischen den Bewertungen der vier Beleuchtungskonfigurationen für jeden Parameter untersuchen. Das berücksichtigte Signifikanzniveau betrug  $p=0,05$ . Die Daten jedes Parameters wurden individuell analysiert, um die möglichen statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Bewertungen der vier getesteten Beleuchtungskonfigurationen zu untersuchen. Es wurden alle Daten analysiert, um mögliche Korrelationen oder Interaktionen zwischen den drei Parametern zu untersuchen.

### 7.1 Sacra Conversazione

Der rmANOVA-Test wurde für die Sacra Conversazione zunächst anhand der Daten der individuellen Parameter durchgeführt. Anschließend wurden die Interaktionen zwischen den Parametern ausgewertet. Der Test mit den Daten für den Kontrast zeigte keine statistische Signifikanz ( $p=0,54$ ). Es wurden auch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Bewertungen der vier Beleuchtungskonfigurationen gefunden. Deshalb können wir schlussfolgern, dass der Tendenz zum Kontrast zwischen dem Gemälde und seinem Hintergrund keine statistisch signifikante Tendenz zugrunde liegt.

Der Test mit den Daten für die Betonung des Kunstwerks zeigte eine statistische Signifikanz ( $p=0,02$ ). Insbesondere wurden signifikante Unterschiede zwischen den Bewertungen der Konfigurationen 2 und 3 ( $p=0,04$ ) und der Konfigurationen 3 und 4 ( $p=0,03$ ) gefunden. Deshalb kann geschlussfolgert werden, dass die ersten beiden Konfigurationen tatsächlich gleichermaßen für die Beleuchtung des Gemäldes geeignet sind.

Der Test für die Präferenz zeigte keine statistische Signifikanz ( $p=0,11$ ), obwohl ein signifikanter Unterschied zwischen den Bewertungen der Konfigurationen 2 und 3 ( $p=0,012$ ) gefunden wurde. Deshalb sind die Bewertungen der Konfigurationen 1 und 2 signifikant höher als die Bewertungen der Konfigurationen 3 und 4. Folglich können sie als die besten Beleuchtungsausrichtungen für das Gemälde betrachtet werden. Es ist jedoch nicht möglich, die beste Konfiguration zu bestimmen, da die Bewertungen dieser beiden Konfigurationen keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Zuletzt wurden die potentiellen Korrelationen zwischen den drei Parametern analysiert, aber der Test zeigte keine signifikanten Korrelationen ( $p=0,18$ ).

## 7.2 Madonna del Latte

Dieselben Tests wurden an den Daten jeden Parameters für die Madonna del Latte durchgeführt. In diesem Fall zeigten die Daten für den Kontrast eine statistische Signifikanz ( $p=0,001$ ). Folglich hatte der Kontrast einen signifikanten Einfluss auf die Bewertungen der Betrachter. Zudem wurden signifikante Unterschiede zwischen den Konfigurationen 2, 3 und 4 gefunden, jedoch kein signifikanter Unterschied zwischen den Konfigurationen 1 und 2, die den gleichen Kontrast zwischen der Skulptur und dem Hintergrund hatten.

Auch der Test mit den Daten für die Betonung des Kunstwerks zeigte eine statistische Signifikanz ( $p=0,02$ ). Insbesondere wurden signifikante Unterschiede nur zwischen den Bewertungen der Konfigurationen 3 und 4 ( $p=0,03$ ) gefunden. Deshalb kann man schlussfolgern, dass die ersten drei Konfigurationen tatsächlich als gleichermaßen geeignet für die Gemäldebeleuchtung bewertet wurden, wohingegen die Konfiguration 4 als am wenigsten angemessen bewertet wurde.

Der Test für die Präferenz zeigte keine statistische Signifikanz ( $p=0,09$ ), aber ein signifikanter Unterschied wurde zwischen den Beurteilungen der Konfigurationen 3 und 4 ( $p=0,02$ ) gefunden. Deshalb sind die Bewertungen der Konfigurationen 1, 2 und 3 statistisch höher als die Bewertungen der Konfiguration 4, die tatsächlich die unbeliebteste Konfiguration zu sein scheint. Es ist jedoch nicht möglich, die beste Konfiguration unter den Konfigurationen 1, 2 und 3 zu bestimmen, da die Bewertungen dieser Konfigurationen keine signifikanten Unterschiede aufweisen.

Die möglichen Korrelationen zwischen den drei Parametern wurden analysiert, aber der Test zeigte keine signifikanten Korrelationen ( $p=0,07$ ).

Ergebnisse der rmANOVA für die drei Kunstwerke

	Sacra Conversazione			Madonnada del Latte		
	Wert	F-Wert	p-Wert	Wert	F-Wert	p-Wert
<b>Kontrast-wahrnehmung</b>	0,09	0,75	0,54	0,54	12,67	0,00
<b>Betonung des Kunstwerks</b>	0,32	3,75	0,02	0,26	3,78	0,02
<b>Persönliche Präferenz</b>	0,22	2,28	0,11	0,19	2,42	0,09
<b>Interaktion</b>	0,32	1,68	0,18	0,31	2,19	0,07

## 8. Schlussfolgerungen

Die an den beiden Kunstwerken durchgeführten psychophysischen Tests haben eine Verbindung zwischen der Kontrastwahrnehmung, der Betonung des Kunstwerks und der allgemeinen persönlichen Präferenz aufgezeigt.

### 8.1 Kontrast

Anhand der gesamten erhobenen Daten kann man feststellen, dass die Betrachter, wenn sie sich auf den Kontrast zwischen dem Exponat und dessen Hintergrund konzentrieren, im Schnitt höhere Kontrastverhältnisse bevorzugen, sowohl beim Gemälde als auch der Skulptur. In der Tat können wir beim Analysieren der Adjektive feststellen, dass die Betrachter diese beiden Beleuchtungskonfigurationen (Konfigurationen 3 für beide Tests) „interessanter“, „anregender“ und auch „dramatischer“ fanden. Aus den Ergebnissen des Durchschnittsbetrachters geht klar hervor, dass der Kontrast insgesamt von den Betrachtern korrekt wahrgenommen wurde, da deren Beurteilungen über höhere oder niedrigere Kontrastverhältnisse mit den an den Kunstwerken und an deren Hintergründen gemessenen Beleuchtungsstärken übereinstimmen.

Jedoch lagen die Kontrastverhältnisse bei dem Gemälde näher aneinander, weshalb die Durchschnittsbewertungen sehr ähnlich waren (alle zwischen 3 und 4), obwohl man leichte Anstiege für die Konfiguration mit höheren Kontrasten, d. h. die Konfigurationen 1 und 3, sieht. Andererseits war der Kontrastunterschied der Beleuchtungskonfigurationen an der Skulptur höher und die Bewertungen sind breiter gestreut. Dies ist möglicherweise darauf zurückzuführen, dass den Betrachtern die Kontrastbewertung der vier Beleuchtungskonfigurationen hier leichter fiel. Schließlich wurden die als kontrastreicher bewerteten Beleuchtungskonfigurationen auch als die angenehmsten und besten in Bezug auf den Kontrast bewertet, insbesondere für die Skulptur. Die als kontrastärmer bewerteten Beleuchtungskonfigurationen wurden hingegen auch korrekt wahrgenommen, da sie tatsächlich die gleichmäßigste Wirkung zwischen der Beleuchtung des Kunstwerks und der Beleuchtung des Hintergrunds (Konfigurationen 4 für beide Tests) hervorriefen. Sie waren aber auch in beiden Tests am unbeliebtesten, insbesondere für die Skulptur. Die statistische Analyse hat hervorgehoben, dass der Kontrast für die Bewertungen der Betrachter im Test 1 am Gemälde statistisch nicht signifikant war, wohingegen er im Test 2 an der Skulptur statistisch signifikant war.

## 8.2 Betonung des Kunstwerks

Hinsichtlich der Betonung des Kunstwerks geht aus der Datenanalyse klar hervor, dass die Konfiguration 1 für das Gemälde am besten eingestuft wurde, wohingegen die Konfigurationen 1, 2 und 3 für die Skulptur als gleichwertig angemessen bewertet wurden. Daher war es nicht möglich, die uneingeschränkt beste Beleuchtungskonfiguration sowohl für die Skulptur als auch das Gemälde auszumachen, obwohl der Beleuchtungseffekt und die Kontrastverhältnisse der drei Konfigurationen sehr unterschiedlich waren. Jedoch wurden in beiden Tests die Konfiguration 4, d.h. diejenigen mit dem niedrigsten Kontrastverhältnis, im Schnitt als die unpassendsten Konfiguration zur Betonung des Kunstwerks beurteilt. Die Betrachter verwendeten Adjektive wie „eintönig“, „langweilig“ und „einfach“ zur Beschreibung der Konfiguration 4. Manche Betrachter fanden sie für die Kunstwerke unangebracht. Die statistische Analyse der Daten zur Betonung des Kunstwerks hat eine statistische Signifikanz der Parameter in den Tests an beiden Kunstwerken hervorgehoben. Es wurden statistisch signifikante Unterschiede gefunden, die die Annahmen anhand der Analysen der Grafen des Durchschnittsbetrachters bestätigen.

## 8.3 Persönliche Präferenz

Die Daten zur Präferenz zeigten, dass die Konfigurationen 1 und 2 im Schnitt in beiden Tests am besten bewertet wurden. Auch wurden in beiden Tests keine statistisch signifikanten Unterschiede zwischen den Bewertungen der beiden Beleuchtungskonfigurationen gefunden. Jedoch haben die Antworthäufigkeiten der Schlussfrage zur „besten Beleuchtungskonfiguration“ gezeigt, dass es keinen nennenswerten Unterschied zwischen den Häufigkeiten der vier Beleuchtungskonfigurationen beider Tests gibt. Im Gegensatz zu den Ergebnissen aus den Grafen des Durchschnittsbetrachters erlangt die Konfiguration 4 keine auffällig schlechte Beurteilung, trotz der während der Tests verwendeten Adjektive. Ferner hat die Konfiguration 4 bei der Madonna del Latte immer noch die niedrigsten Bewertungen, wohingegen sie bei der Sacra Conversazione ähnlich wie die Konfiguration 2 bewertet wurde. Die Konfiguration 1 hingegen wurde am seltensten als beste Beleuchtungskonfiguration beurteilt. Daraus kann man schlussfolgern, dass es keine besonderen Tendenzen bei den Präferenzbewertungen gibt und sie somit nicht signifikant für die statistische Analyse sind. Die statistische Analyse hat keine statistische Signifikanz bei der Präferenzbewertung hervorgehoben. Es wurden keine Korrelationen oder Interaktionen zwischen den Parametern gefunden, insbesondere zwischen der Betonung und der Präferenz, obwohl die insgesamt besten Beleuchtungskonfigurationen auch als die für die Kunstwerke passendsten Konfigurationen beurteilt wurden.

## 8.4 Präferenz gegen Neutralität

Die erste Schlussfolgerung, die wir aus den beiden Tests ziehen können, betrifft das Verhältnis zwischen dem Kontrast und der Präferenz. In der Tat waren die Beleuchtungskonfigurationen mit den höheren Kontrastverhältnissen nicht allgemein am beliebtesten, obwohl sie hinsichtlich des Verhältnisses zwischen dem Kunstwerk und dessen Hintergrund am besten abschnitten. Daher scheint der Kontrast keinen großen Einfluss auf die allgemeine Beleuchtungspräferenz zu haben, sowohl unter Berücksichtigung des Ausstellungsraums als auch der Besonderheit des ausgestellten Kunstwerks. Die Präferenzbewertungen scheinen vielmehr mit der Betonung des Kunstwerks im Zusammenhang zu stehen. Die Adjektive, die schließlich zur Beschreibung der bevorzugten Beleuchtungskonfigurationen (hauptsächlich die Konfigurationen 1 und 2) verwendet wurden, sind „entspannend“, „angenehm“, „einfach“ und „interessant“.

Dieses Ergebnis hebt hervor, dass die Probanden tatsächlich die gleichmäßigeren und entspannenderen Beleuchtungsszenarien, als einfach und dennoch interessant eingestuft, bevorzugten, obwohl sie die höheren Kontraste ansprechender und anregender fanden. Deshalb geht die endgültige Entscheidung in Richtung Beleuchtungskonfigurationen mit mittleren Kontrastniveaus zwischen dem Exponat und dessen Hintergrund. Im Gegensatz zu gleichmäßigen Konfigurationen, die als „eintönig“ und „langweilig“ beschrieben werden, werden diese Konfigurationen als einfach aber dennoch interessant, entspannend und einer korrekten Erscheinung des Gemäldes und der Skulptur angemessen beschrieben. Deshalb wurden bei der Bewertung hinsichtlich der Betonung des Kunstwerks die höchsten Kontrastverhältnisse nicht als beste Wahl beurteilt.

Ausschließlich anhand der vorangehenden Erörterungen ohne Bestätigung durch die statistische Analyse, erwecken die Testergebnisse den Eindruck, dass die Betrachter sich mehr zu den dramatischen und kontrastreichen Beleuchtungskonfigurationen hingezogen fühlten, da sie als anziehender und auffälliger beschrieben werden. Wenn es schließlich jedoch auch um die korrekte Erscheinung des Kunstwerks geht, dann haben sie ihre endgültige Entscheidung zugunsten einer entspannenderen und einfacheren Beleuchtungskonfiguration geändert. Präferenzen werden jedoch durch viele verschiedene Faktoren gesteuert, die nur schwer vereinheitlicht werden können, da die meisten mit subjektiven und emotionalen Empfindungen des Kunstwerks, ausgelöst durch bestimmte Beleuchtungskonfigurationen, zusammenhängen.

Schließlich haben die Tests hervorgehoben, dass die Mehrheit der Teilnehmer Beleuchtungskonfigurationen mit mittleren Kontrastniveaus zwischen den Exponaten und deren Hintergründen bevorzugten. Folglich bevorzugten sie entspannendere und gleichmäßigere Szenarien vor dramatischeren und kontrastreichereren Szenarien, obwohl Letztere als ansprechender, aber auch unangemessener für die Erscheinung der Kunstwerke bewertet wurden. Die Bewertung der Präferenz ergibt, dass es sich hierbei scheinbar um einen Kompromiss der Betrachter zwischen deren persönlichen Empfindungen und deren Abwägungen hinsichtlich dessen, was die Kunstwerke eigentlich ausstrahlen sollen, handelt.

**Anhang A**

*Die Freude an Farbe*

Analyse des farblichen Erscheinungsbilds von Gemälden  
unter verschiedenen Beleuchtungseinstellungen

Università di Pisa di Pisa - D.E.S.T.E.C. - Pisa, Italien  
KU Leuven - ESAT/Light & Lighting Laboratory - Gent, Belgien

Dott.ssa Francesca Feltrin  
Prof. Ing. Francesco Leccese  
Prof. Kevin Smet

# Einleitung

Diese Studie hatte zum Ziel, einige Parameter, die die Farbwahrnehmung ausgedellter Gemälde in Museen beeinflussen, zu analysieren und mittels einer Umfrage die bevorzugten Modelle der Betrachter zu ermitteln. Farbbezogene Parameter wie die korrelative Farbtemperatur (Correlated Color Temperature, CCT) und die Farbwiedergabe der Lichtquellen wie auch die Eigenschaften des Ausstellungsraums, d. h. der Hintergrund und die Umgebung, haben einen großen Einfluss auf die Wahrnehmung des Gemäldes und kann die visuelle Erfahrung der Museumsbesucher beeinflussen. Deshalb müssen diese Parameter sorgfältig geplant werden, um den gewünschten visuellen Eindruck des Kunstwerks zu erhalten und dem Besucher eine angenehme visuelle Erfahrung zu bieten.

## Untersuchte Parameter

Mit dem Ziel, die Beleuchtungspräferenzen der Betrachter zu verstehen, hat diese Studie drei Parameter untersucht. Diese drei Parameter sind:

- die Helligkeit des Hintergrunds,
- der Farbgehalt der Gemälde,
- die CCT der LED-Strahler zur Akzentbeleuchtung der Gemälde.

Der LED-Strahler hatte drei einstellbare Kanäle (rot, grün und blau) und einen festen Kanal (3200 K). Die drei einstellbaren Programme waren so optimiert, dass sie fünf spezifische CCTs erhielten: 3000 K, 3500 K, 4000 K, 5000 K und 6000 K. Bei dieser Optimierung blieb die durchschnittliche Beleuchtungsstärke durch die verschiedenen CCTs konstant bei 160 lx.

Der Farbgehalt der Gemälde wurde anhand fünf verschiedener Gemälde untersucht, die alle vom Künstler Leonid Afremov stammen: vier Gemälde mit jeweils einer vorherrschenden Farbe (rot, grün, blau und gelb) und ein Gemälde ohne vorherrschende Farbe (alle Farben).

Die Helligkeit des Hintergrunds wurde durch verschiedenfarbige Vorhänge (weiß, grau und schwarz) erzielt.

## Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau bestand darin, im Labor einen einfachen Museumsraum nachzubilden. Der Aufbau bestand aus einer Frontwand, an der die Gemälde aufgehängt wurden, und zwei schrägen Wänden, die das breitmöglichste Sichtfeld und somit ein Gefühl von Immersion schufen. Die Beobachungsposition wurde vor dem Gemälde, im Abstand von 1,40 m von der Wand, aufgebaut.

Die Beleuchtung bestand aus einer Akzentbeleuchtung durch einen LED-Strahler, der auf das Gemälde gerichtet wurde, und einer Raumbeleuchtung durch Leuchtstofflampen (5900 K). Die Raumbeleuchtung

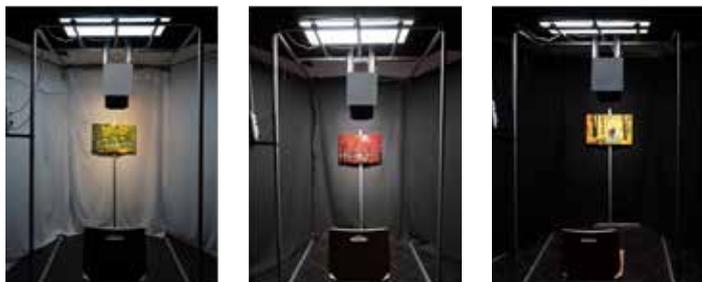
wurde über der Beobachtungsposition angebracht, um ausschließlich horizontale Beleuchtungsstärke zu erzeugen, die nicht die Beleuchtung des Gemäldes beeinflusst.

### Versuchsablauf

Die 3 Hintergründe, die 5 Gemälde und die 5 CCTs wurden kombiniert und ergaben 75 verschiedene Lichtdesigns. Diese unterschiedlichen Lichtgestaltungen wurden einer Gruppe aus 25 Betrachtern (14 Männer und 11 Frauen, Durchschnittsalter 29 Jahre) präsentiert. Sie sollten sechs Qualitätsfaktoren in Verbindung mit der Farbwahrnehmung der Gemälde und ihrer Wertschätzung der Gemälde anhand einer bipolaren 11-Punkte-Skala bewerten:

- Allgemeine Wertschätzung (hoch/ niedrig) der Konfiguration,
- Wertschätzung des Hintergrunds (hoch/ niedrig),
- die wahrgenommene Wärme (kalt/ warm) der Gemäldefarben,
- die wahrgenommene Helligkeit (dunkel/ hell) der Gemäldefarben,
- die wahrgenommene Lebhaftigkeit (eintönig/ lebhaft) der Gemäldefarben,
- die wahrgenommene Anziehungskraft (hoch/ niedrig) der Gemäldefarben.

Jeder Betrachter bewertete insgesamt 90 verschiedene Lichtdesigns: die 75 verschiedenen Lichtgestaltungen und 15 zusätzliche, wiederholte Lichtgestaltungen (zufällig ausgewählt), um die Einheitlichkeit der Aussagen der Betrachter zu prüfen. Der Test wurde in drei Abschnitte unterteilt, jeweils einer pro Hintergrund: nach dem Aufbau des Hintergrunds mussten sie jedes Gemälde nacheinander unter den fünf verschiedenen Beleuchtungskonfigurationen bewerten.



a)

b)

c)

Die Helligkeit des Hintergrunds: (a) weiß, (b) grau und (c) schwarz.



a)

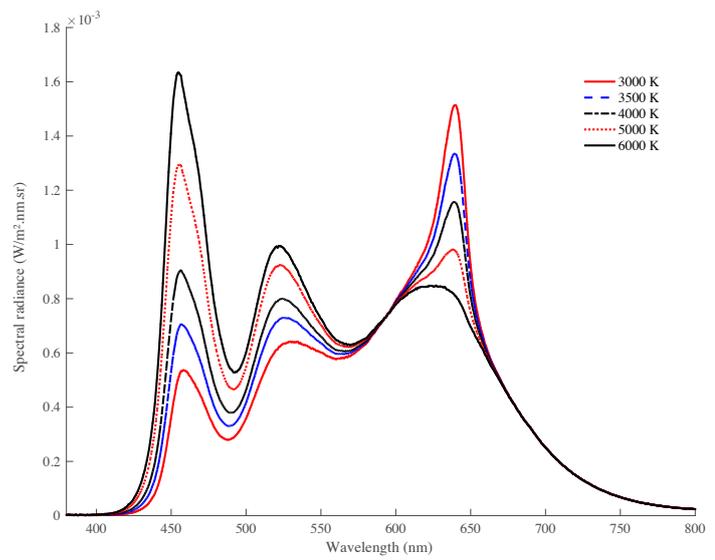
b)

c)

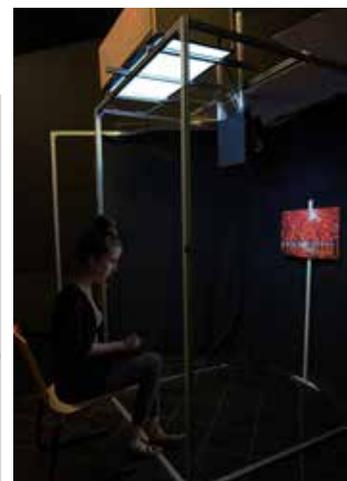
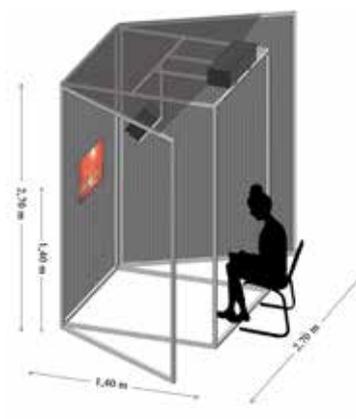
d)

e)

Leonid Afremovs Gemälde: (a) "Wenn Träume wahr werden", (b) "Geheimnis der Nacht", (c) "Sommerwald", (d) "Rosanebel" und (e) "Glückliches Paar".



Optimiertes Spektrum der LED-Strahler für die verschiedenen CCTs.



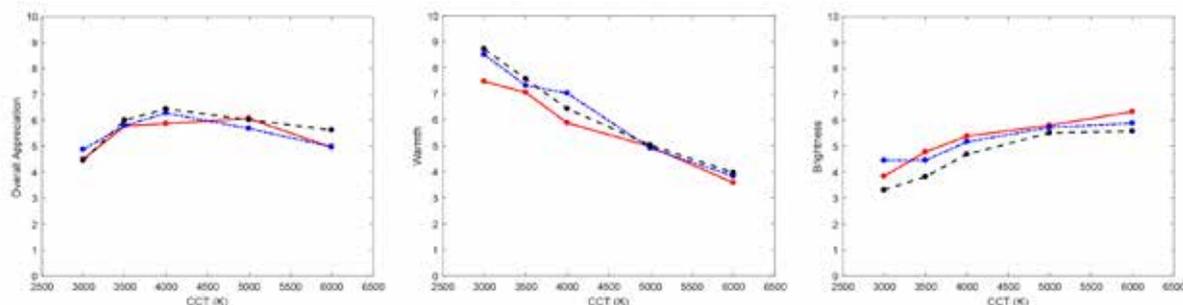
Skizze und Bild von dem Versuchsaufbau.



Bilder der drei ausgewählten Gemälde vor den drei Hintergründen gemäß der drei Beleuchtungskonfigurationen: (a) 3000 K, (b) 4000 K und (c) 6000 K.

## Ergebnisdiskussion

Die Ergebnisse psychophysischer Experimente werden anhand Berechnungsergebnisse des Durchschnittsbetrachters analysiert. Für jeden Qualitätsfaktor und jede Lichtgestaltung der 25 Bewertungen wurden der geometrische Mittelwert und die zugehörige Standardabweichung berechnet. Diese wurden in einer Funktion der CCT grafisch dargestellt, um mögliche Tendenzen einzeln hervorzuheben.



Beispiel der analysierten Grafik des roten Bildes - "Pink Fog"

### Die Auswirkung der CCT

Es hat sich herausgestellt, dass die CCT der Strahler der einzige Parameter war, der die Bewertungen der Betrachter beeinflusste. Aus den erhobenen Daten wird deutlich, dass sowohl die wärmste (3000 K) als auch die kälteste (6000 K) Konfiguration am wenigsten geschätzt wurden. Neutrale Konfigurationen (4000 – 5000 K) wurden hingegen bei allen Lichtgestaltungen am meisten geschätzt, unabhängig von den Gemädefarben und der Helligkeit des Hintergrunds.

### Die Auswirkung des Hintergrunds

Die Daten zu den verschiedenen Hintergründen weisen keine nennenswerten Unterschiede zueinander auf. Zur Bewertung dieses Parameters kann man deshalb sagen, dass die Veränderung der Helligkeit des Hintergrunds keine bemerkenswerte Auswirkung auf die Bewertung der Betrachter hatte. Dennoch kann man anhand der Daten zur „Wertschätzung des Hintergrunds“ eine leichte Präferenz für den schwarzen Hintergrund feststellen, die bei allen Gemälden wiederholt auftritt.

### Die Auswirkung des Farbgehalts des Gemäldes

Die beiden zuvor genannten Tendenzen wiederholen sich bei allen Gemälden, unabhängig vom vorherrschenden Farbton. Somit kann man schlussfolgern, dass der vorherrschende Farbton der Gemäldes keine Auswirkung auf die bevorzugte Lichtgestaltung hat.

## Schlussfolgerungen

In diesem Experiment konnte eine Präferenz zur Neutralität festgestellt werden. Kühlere und wärmere CCTs wurden von den Betrachtern weniger wertgeschätzt, unabhängig von der Hintergrundfarbe und der Gemäldefarben, wohingegen neutrale Konfigurationen als angenehmer empfunden wurden.

Zusammen mit den Ergebnissen aus der im Nationalmuseum San Mateo durchgeführten Studie deuten diese Ergebnisse darauf hin, dass Museumsbesucher neutrale Lichtgestaltungen bevorzugen, die weder zu kalt noch zu warm sind und so ein Kontrastniveau mit dem Hintergrund/ der Umgebung bilden, das weder zu hoch noch zu niedrig ist.

Beide Studien machen deshalb kenntlich, dass die beste visuelle Erfahrung für Museumsbesucher durch Beleuchtungskonfigurationen erreicht wird, die eine neutrale Erscheinung der Farben des Kunstwerks und ein allgemein einfacheres, entspannenderes Beleuchtungsszenario schaffen.

**Anhang B**

*Commission Internationale  
de l'Eclairage CIE 157:2004*

Begrenzung des Schadens an Museumsobjekten  
durch optische Strahlung

## *Empfehlungen für die Museumsbeleuchtung*

Die Objekte in Museumssammlungen können in zwei wesentliche Konservierungskategorien unterteilt werden: Materialien mineralischen oder anorganischen Ursprungs, so wie Stein, Metall und Glas, und organische Materialien, einschließlich Materialien pflanzlichen Ursprungs, so wie Papier, Papyrus, Holz, Naturtextilien, viele Pigmente und Farbstoffe usw., und Materialien tierischen Ursprungs, so wie Knochen, Elfenbein, Haut usw., wie auch einige Pigmente und Farbstoffe. Im Allgemeinen zeigen anorganische Materialien wenig oder gar keine Lichtempfindlichkeit, wohingegen organische Materialien mäßig bis stark empfindlich reagieren. Besondere Sorge bereiten Restauratoren insbesondere Pigmente, da das erste sichtbare Anzeichen für Beschädigung durch Belichtung oft der Rückgang der Farbpigmente ist, deren Belichtungsempfindlichkeit stark variiert.

Die Norm CIE 157:2004 suggeriert vier Hauptkategorien an Materialien und deren jeweiligen maximalen Beleuchtungsstärken und Belichtungszeiten. Die CIE 157/2004 schlägt ein Modell vor, das sogenannte Berliner Modell, das die Schäden eines Objekts, das dem Licht durch den DM-Faktor ausgesetzt wurde, als Funktion der spektralen Bestrahlungsstärke des einfallenden Lichts, der jeweiligen spektralen Empfindlichkeit jeden Materials und der Belichtungszeit definiert. Die spektrale Reflexion des Kunstwerks ist ein entscheidender Parameter, um den Erhaltungszustand kulturellen Erbes, insbesondere von Gemälden, auszuwerten. Die Kenntnis der spektralen Empfindlichkeit von Materialien kann den Lichtplanern dabei helfen, das Beleuchtungsniveau an den Objekten sorgfältig zu kalibrieren, um so die korrekten Umfeldbedingungen für deren Erhalt zu schaffen.

Unabhängig von der Empfindlichkeitsstufe eines Kunstwerks liegt das Ziel immer darin, die Zielsetzungen des Designers zur Darstellung des Objekts mit minimaler Belichtung zu erlangen. Der erste Aspekt, der untersucht werden sollte, ist die Belichtungsdauer. Es sollten Schaltregler angebracht werden, so dass die direkte Beleuchtung nur bei Bedarf eingeschaltet wird. Wenn die nötige Belichtungsdauer ermittelt wurde, besteht der nächste Schritt darin, die Bestrahlungsstärke zu minimieren und, noch wichtiger, die Objekte vor unsichtbaren UV- und IR-Strahlen zu schützen.

## Vier Empfindlichkeitskategorien an Materialien

<b>Materialkategorie</b>	<b>Beschreibung</b>	<b>Beispiele</b>
<b>nicht ansprechend</b>	Das Objekt ist vollständig zusammengesetzt aus Materialien, die permanent sind, insofern, dass sie auf Licht nicht reagieren.	Meiste Metalle, Stein, meiste Glasmaterialien, echtes Keramik, Emaille, meiste Mineralien.
<b>Niedrige Hellempfindlichkeit</b>	Das Objekt beinhaltet langlebige Materialien, die eine leichte Lichtempfindlichkeit haben.	Öl- und Temperamalerei, Fresko, ungefärbtes Leder und Holz, Horn, Knochen, Elfenbein, Lack, einige Kunststoffe.
<b>Mittlere Hellempfindlichkeit</b>	Das Objekt enthält flüchtige Materialien, die gemäßigt auf Licht reagieren.	Kostüme, Aquarelle, Pastelle, Wandteppiche, Drucke und Zeichnungen, Manuskripte, Miniaturen und die meisten naturhistorischen Objekte.

## Begrenzung der Helligkeit und Belichtungszeit für die vier Empfindlichkeitskategorien an Materialien

<b>Materialkategorie</b>	<b>Beleuchtungsstufe (lx)</b>	<b>Belichtungszeit (Stunden/Jahr)</b>
nicht ansprechend	kein Limit	kein Limit
Niedrige Hellempfindlichkeit	200	600.000
Mittlere Hellempfindlichkeit	50	150.000
Hohe Hellempfindlichkeit	50	15.000