

**Lichtechtheitstests an Kunstobjekten
mit der Microfadingmethode –
Anwendung, Überprüfung und Weiterentwicklung**

D I S S E R T A T I O N

**zur Erlangung des akademischen Grades
Doctor rerum naturalium
(Dr. rer. nat.)**

vorgelegt

**dem Bereich Mathematik und Naturwissenschaften
der Technischen Universität Dresden**

von

Dipl. phys. Thomas Prestel

geboren am 12.07.1985 in Kempten (Allgäu)

Datum der Einreichung: 05.02.2018

Datum der Verteidigung: 17.04.2018

1. Gutachter: Prof. Dr. Eike Brunner

2. Gutachter: Prof. Dr. Christoph Herm

Die Dissertation wurde in der Zeit von 02/2014 bis 01/2018 an der Professur für Bioanalytik der TU Dresden und im Labor für Archäometrie der HfBK Dresden angefertigt.

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung, und Forschung unter dem Förderkennzeichen 01UO1312B gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt beim Autor.

*Es ist besser, ein Licht zu entzünden,
als auf die Dunkelheit zu schimpfen.*

Konfuzius

Danksagung

Zuerst möchte ich Prof. Dr. Eike Brunner für die freundliche Bereitschaft danken die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit zu übernehmen.

Prof. Dr. Christoph Herm gilt mein herzlicher Dank dafür, dass er über den Entstehungsprozess dieser Arbeit bei vielen Diskussionen seinen Rat einbrachte und den Kontakt zu laufenden Restaurierungen herstellte, so dass sich für diese Arbeit viele praktische Untersuchungsmöglichkeiten boten.

Für die angenehme, kollegiale Atmosphäre im Labor und die Klärung fachlicher Fragen, sowie für die Arbeit manch inspirierendes Gespräch bedanke ich mich bei Annegret Fuhrmann, Dr. Sylvia Hoblyn und Dr. Elisavet Kanaki.

Dr. Stefan Röhrs vom Rathgen-Labor in Berlin war besonders zu Beginn beim Aufbau des *Microfading*-Testers eine wichtige Unterstützung.

Mein Dank gilt auch Prof. Marlies Giebe und Sabine Bendfeldt von der Restaurierungsabteilung der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden für die Unterstützung beim Langzeit-Farbmonitoring und die Ermöglichung der *Microfading*-Messungen im Albertinum. Ebenso gilt mein Dank Kai-Uwe Metzler vom Technischen Dienst der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden und Dr. Markus Rösler (TU Dresden, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung) für die Bereitstellung der Beleuchtungsstärke-Daten.

Untersuchungsobjekte für *Microfading*-Messungen wurden mir dankenswerterweise von Sarah Giering, Marie Harmsen, Wolfram Jaensch, Kerstin Küster, Christine Fiedler und Prof. Dr. Gerdi Maierbacher-Legl zur Verfügung gestellt.

Besonders danken möchte ich Katy Reimelt und Aline Pfannenschmidt vom Wilhelm Ostwald Park in Großbothen für die freundliche Bereitstellung ausgewählter Nachlassenschaften Wilhelm Ostwalds, die vor Ort eingehend mit dem *Microfadingtester* untersucht werden konnten.

Dank geht auch an Matthias Batzke vom Retsch Application Lab (Wuppertal), der die Mahlung der Blau-Woll-Textilien freundlicherweise übernahm.

Meinen Mitstreitern im Büro, Alexandra, Sefkan und Tim, ein herzliches Danke für die netten Stunden „gegenüber“.

Für Anmerkungen zu einer früheren Version der Arbeit danke ich Anne Hierholzer und Annegret Fuhrmann.

Danke für viel Verständnis, viel Zeit und die viele Freude an meine liebe Familie.

Kurzfassung

Die *Microfading*-Methode, die eine kontrollierte, aber extrem hohe Beleuchtungsstärke und gleichzeitige Farbmessung auf einer maximal 0,5 mm großen Testfläche verbindet, erlaubt den Test der Lichtechtheit direkt auf Kunstobjekten. Lichtechtheitsinformationen zu Kunstwerken sind ohne einen Test nicht verfügbar, es sei denn indirekt über die Kenntnis der Materialzusammensetzung und deren Eigenschaften. Lichtechtheitsinformationen bilden jedoch die Grundlage für ein objektangepasstes Lichtmanagement. Darum ist ein erhöhter Bedarf nach *Microfading*-Testern (MFT) im Bereich Konservierung und Restaurierung festzustellen, wenngleich die Lichtechtheitsklassifizierung beim MFT noch nicht standardisiert ist.

In dieser Arbeit wird ein mobiler *Microfading*-Tester zusammengestellt, aufgebaut, getestet und charakterisiert. In der Folge werden mehrere Studien vorgestellt, die dazu beitragen das Anwendungsfeld der Methode zu erweitern, die Qualität der Testaussagen zu optimieren und Farbveränderungsverläufe bei hohen Beleuchtungsstärken mit denen bei niedrigerer Beleuchtungsstärke zu vergleichen.

Neue Anwendungsfälle der MFT-Methode werden exemplarisch analysiert und diskutiert. Eine bisher nicht analysierte Objektgruppe mit dem MFT sind lose Pulver, an denen exemplarische Messungen in dieser Arbeit gezeigt werden. Als andere, wenig untersuchte Objektgruppe werden Gemälde mit dem MFT getestet. Für das Anwendungsfeld des MFT mit zusätzlicher UV-Strahlung im Beleuchtungsspektrum werden praktische Beispiele aus dem Bereich der Konservierungswissenschaften aufgezeigt, bei denen mittels Mehrfachtests mit und ohne UV-Anteil im Spektrum der Beleuchtung die Schadensursache bzw. das Schadenspotential von UV-Strahlung nachgewiesen werden konnte.

Erstmals ist in einem direkten Vergleich zwischen Galerie-Belichtung und MFT-Belichtung anhand von selbst hergestellten Mustertafeln und Messpunkten auf Gemälden die Frage analysiert worden, inwieweit die MFT-Ergebnisse bei hoher Beleuchtungsstärke auf die tatsächlichen Farbveränderungen bei niedriger Beleuchtungsstärke übertragbar sind. Im Ergebnis ist festzuhalten, dass die realen Veränderungen von Preußisch Blau bei Galerie-Belichtungsstärke auf den untersuchten Gemälden durch die MFT-Untersuchung überschätzt werden, während die Veränderungen des Lichtechtheitsstandards BW1 vom MFT im Vergleich zu Real-Bedingungen unterschätzt werden. Bei den Farbaufstrichen kam es ebenfalls zu großen Unterschieden zwischen MFT-Belichtung und Galerie-Belichtung, die auf Vergilbungen des Bindemittels zurückzuführen sind.

Der BW1-Lichtechtheitstyp ist für *Microfading* nicht ideal, trotzdem wird er mangels Alternativen zur relativen Bestimmung der Lichtechtheit eingesetzt. Als erster Schritt in die Richtung von MFT-spezifischen Lichtechtheitsstandards werden in dieser Arbeit neue Lichtechtheitsreferenzen auf Grundlage der bestehenden Referenzen durch Zerkleinerung und optional zusätzliche Pressung hergestellt und mit den Eigenschaften der ursprünglichen Standards verglichen. Die neuen Testkörper zeigen klare Vorteile (geringere Streuung der Messergebnisse, leichtere Handhabung) gegenüber den bisherigen Standards, weisen aber eine deutlich erhöhte Lichtempfindlichkeit im Test auf. Der weitere Forschungsbedarf in dieser Richtung wird aufgezeigt.

Die Auswertungsmethode bei *Microfading*-Tests sieht vor, absolute Farbveränderungen zum Ende der Testbelichtung zu vergleichen. Dadurch wird außer Acht gelassen, wie die Farbveränderungen ablaufen. In der Folge kann es bei ungewöhnlichen Farbveränderungen

(z. B. einem exponentiellen Anstieg der Veränderungen) aufgrund der Testergebnisse zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Veränderungen kommen. Es wird eine Erweiterung der bisherigen Auswertungsmethode vorgestellt, die die Farbveränderungsrate bei der Lichtechtheitsklassifizierung mit einbezieht und so die Ausbleich-Charakteristik im Test berücksichtigt wird.

Angewandt auf mehr als 40 Proben führt dies in ca. 30 % der Fälle zu einer anderen, meist niedrigeren Lichtechtheitsklassifizierung. Diese neue Auswertungsstrategie wird in dieser Arbeit genutzt, insofern es die Messergebnisse als notwendig erscheinen lassen.

Abstract

Microfading is a method that combines an extremely high illuminance and simultaneous color measurement on a tiny test area of about 0.5 mm diameter. These two features allow lightfastness tests directly on pieces of art.

Without such tests lightfastness data of artworks are barely available. The only knowledge of lightfastness of artworks raises from information about the used materials. Material analyses are often time consuming and elaborate, so microfading is an option to gain lightfastness data directly, which gets more and more interest from conservators. However, the test protocol of microfading tests is not yet standardized.

In this thesis a mobile Microfading-Tester (MFT) is composed, set up, tested and characterized. With the MFT a series of individual studies is shown, which have the aim to broaden the field of MFT applications, to optimize the quality of the test statements and to compare MFT results at high illuminance with real time exposure at low gallery illuminance. New applications of the MFT method are analyzed and discussed in case studies. First, the MFT method is applied to loose powders of pigments, a group of objects which were not tested with MFT so far. The other group includes easel paintings, where until now only a few case studies exist. Additionally microfading tests with near UV are conducted to tackle conservational questions concerning the cause of damage on artworks and the stability of materials used for retouching.

In this work a direct comparison between gallery exposure and microfading exposure is shown. The exposed samples are the ISO Blue-Wool-Standards, self-made color charts and paintings which were monitored at defined areas. The outcome of the comparison is that the fading of Prussian blue on the paintings is overestimated by the MFT compared to real time exposure. In contrast, the fading of the ISO Blue-Wool-Standard BW1 is underestimated by the MFT compared to real time exposure. The comparison of the sample charts at high and low illuminance showed that the yellowing phenomenon poses a difficulty in the interpretation of microfading results of materials containing oil or other binding media.

ISO Blue-Wool BW1 lightfastness standard seems not ideal for microfading, because the surface is not flat and its fading suffers reciprocity failure. Regardless, it is used as a reference for microfading in lack of alternatives. As a first step to specialized microfading lightfastness standards an approach for manufacturing flat powders and pellets from the existing Blue-Wool-Standards is shown. These new reference objects are tested and their properties and fading characteristics are analyzed and compared to the original Blue-Wool-Standards. The new reference powders and pellets are easy to use with MFT. The fading results are less scattered than with the original Blue-Wool-Standards.

Another topic in this work is the evaluation of microfading tests. Typically microfading results are compared by the color difference after exposure to the color difference of ISO Blue Wool standards after the same exposure. This strategy fails, if fading characteristics of samples and Blue-Wool-Standards differ from each other. For that reason a new evaluation strategy was developed which includes the fading rate in the evaluation of microfading tests. The approach is applied to 40 samples. In more than 30 % of the samples the lightfastness classification with the use of the fading rate differs from the classification with absolute color differences. The new strategy is used throughout the work, whenever fading characteristics different from the Blue-Wool-Standard were observed.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	3
Kurzfassung.....	4
Abstract	6
Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen	9
Publikationen	10
1 Einleitung.....	11
2 Theorie	13
2.1 Photochemie	13
2.2 Farbmessung.....	15
2.2.1 CIELab-Farbsystem	15
2.2.2 Farbabstände.....	17
2.3 Microfading.....	20
3 Zielstellung	26
4 Methoden: Aufbau und Eigenschaften	27
4.1 Farbmessgerät	27
4.2 Micro-Fading-Tester	28
4.2.1 Aufbau	28
4.2.2 Beleuchtungsspektren.....	31
4.2.3 Größe des Messpunkts.....	32
4.2.4 Einfluss auf Proben temperatur	33
4.2.5 Drift und Messfehler	34
4.2.6 Zusammenfassung und Festlegung der Standardeinstellungen	35
4.3 Vergleich Farb- und Farbabstandsmessung mit Spektralphotometer und MFT ...	36
5 Praktische Untersuchungen.....	40
5.1 Weiterentwicklung des MFT-Auswertungsverfahrens	40
5.1.1 Pulver- und Pellet-Präparation der Blau-Woll-Standards.....	41
5.1.2 Einführung der Farbveränderungsrate in die MFT-Auswertung	48
5.2 Microfading mit UV-Anteil in der Beleuchtung.....	57
5.2.1 Test auf UV-Strahlung als Schadensursache.....	58
5.2.2 Test auf Wirksamkeit von UV-Schutzlack.....	60
5.2.3 Fazit zu den Tests bei Beleuchtung mit UV-Anteil.....	63
5.3 Microfading an Farbpulvern	64
5.3.1 Pulver von Wilhelm Ostwald.....	65

5.3.2	Pulver von Wolfram Jaensch.....	70
5.4	Microfading an Gemälden.....	73
5.4.1	Gemälde von Fritz Tröger	73
5.4.2	Gemälde von Hans Stübner	76
5.4.3	Gemälde von Gerhard Richter	79
5.4.4	Fazit der MFT-Untersuchungen an Gemälden	81
5.5	Vergleich Langzeit-Monitoring und Microfading	82
5.5.1	Vorbereitung und Datenerhebung	83
5.5.2	Microfading an Mustertafeln	86
5.5.3	Monitoring an Mustertafeln.....	88
5.5.3.1	Farbveränderungen der Aufstriche.....	88
5.5.3.2	Farbveränderungen der belichteten Blau-Woll-Standards	92
5.5.4	Vergleich Microfading und Monitoring an Mustertafeln	94
5.5.5	Microfading auf Gemälde und Partikel	98
5.5.6	Monitoring auf Gemälden.....	101
5.5.7	Vergleich Microfading und Monitoring auf Gemälden	103
5.5.8	Fazit.....	105
6	Zusammenfassung und Ausblick	107
	Literaturverzeichnis.....	110
	Anhang	120
A	Einzelkomponenten MFT	120
B	CERAM Farbfliesen und Graumaßstab.....	121
C	Teilchengrößen der Blau-Woll-Pulver	123
D	Lackfarbstoffe – Übersicht und MFT-Messdaten.....	124
E	Dokumentation der MFT-Messpunkte auf Gal. Nr. 616	126
F	Beleuchtungssituation und Datenerhebung der Belichtung in der Gemäldegalerie ..	127

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

BWS	Blue-Wool-Standard (<i>dt.</i> Blau-Woll-Standard)
C.I.	Colour Index
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage Internationale Beleuchtungskommission
GAM	Gemäldegalerie Alte Meister Dresden
IR	Infrarot
JND	Just Noticeable Difference (<i>dt.</i> gerade noch erkennbarer Unterschied)
MCDM	Mean Colour Difference from the Mean (<i>dt.</i> Mittlerer Farbabstand vom Mittelwert)
MFT	Mircofading-Tester
MW	Mittelwert
PC	Perceptible Change (<i>dt.</i> Wahrnehmbare Veränderung)
PTFE	Polytetrafluorethylen
SKD	Staatliche Kunstsammlungen Dresden
UV	Ultra-Violett
VIS	Visible light (sichtbarer Teil des elektromagnetischen Spektrums, Licht)

Publikationen

In Verbindung mit dieser Arbeit

BENDFELDT, SABINE; PRESTEL, THOMAS; WERDIN, HEIKO: *Dunkle Aussichten für die Kunst. Kein Licht ist auch keine Lösung: Die Auswirkungen der momentanen Beleuchtungssituation in der Gemäldegalerie Alte Meister Dresden*. In: RESTAURO 2016;8:48–53

HERM, CHRISTOPH; ATAK, SEFKAN; BRIDAROLLI, ALEXANDRA; PRESTEL, THOMAS: *Wilhelm Ostwalds Farbsystem - Analytisch betrachtet*. In: METALLA Sonderheft 8, Archäometrie und Denkmalpflege 2016;112–115

PRESTEL, THOMAS: *A classification system to enhance light-fastness data interpretation based on microfading tests and rate of colour change*. In: Coloration Technology 2017;133(6):506–512

PRESTEL, THOMAS: *Prüfstand Lichtbeständigkeit - Bestimmung der Lichtempfindlichkeit von Kunstobjekten*. In: SCHEURMANN, K.; KARLICZEK, A. (Hrsg.): *GESPRÄCHSSTOFF FARBE*. Köln [u.a.] : Böhlau Verlag, 2017, 510–519

Vorträge in Verbindung mit dieser Arbeit

„A brief introduction into a non-destructive method to detect light sensitive objects“, Workshop, 2nd SEAHA Conference, Oxford, 21.05.2016

„Aktuelle Forschungsergebnisse zu Microfading und Farbmessung aus dem Verbundforschungsprojekt ‚Farbe als Akteur und Speicher‘“, wissenschaftliches Kolloquium der HfBK Dresden, Studiengang Restaurierung, 04.07.2016

„With or without UV – microfading with near ultra violet“, Microfading Workshop & Users Meeting, Rathgen-Labor, Berlin, 08.11.2016

„Alternative perspectives on Blue-Wool-Standards in Microfading“, Microfading Workshop & Users Meeting, Rathgen-Labor, Berlin, 08.11.2016

„Farbabstände und Lichtempfindlichkeit ausgewählter Objekte der Farbenlehre Wilhelm Ostwalds“, Wilhelm-Ostwald-Park, Großbothen, 07.12.2016

Andere

PRESTEL, THOMAS: *Farbabstände - Theorie versus Realität im Farbsystem von Wilhelm Ostwald*. In: SCHWARZ, A.; KARLICZEK, A. (Hrsg.): *Farre. Farbstandards in den frühen Wissenschaften*. Jena : SALANA, 2016, 191–213

1 Einleitung

Das Phänomen Farbe ist seit jeher für Menschen faszinierend, Farbe als Sinneseindruck erlaubt es dem Menschen mehr als 7,5 Millionen verschiedene Farbnuancen zu differenzieren [1]. Dabei gilt der visuelle Sinn als wichtigster Sinn des Menschen [2]. Obwohl Farbe heute als Sinneswahrnehmung verstanden wird, wird der Begriff Farbe auch in Zusammenhang mit Farbmitteln, also den farbgebenden Stoffen, verwendet. Ebenso geläufig ist die Benennung von Objekteigenschaften über Farbbezeichnungen („roter Ball“).

Um den Prozess der Farbwahrnehmung komplett zu beschreiben, sind mindestens physikalische, chemische, biologische, physiologische und psychologische Teilbeschreibungen nötig. Farbwahrnehmung und Farbbedeutung im Kontext der Kunst, der Sprache oder der Gesellschaft eröffnen weitere Diskursmöglichkeiten.

Das vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) geförderte, interdisziplinäre Forschungsprojekt *Farbe als Akteur und Speicher* (FARBAKS) [3] hatte zum Ziel, die komplexen Phänomene der Farbe im Fokus von Natur-, Gesellschafts- und Geisteswissenschaften zu verknüpfen und zu erforschen. Ein Teilprojekt an der Hochschule für Bildende Künste Dresden befasste sich mit der Vergänglichkeit von Farbigkeit.

Viele Farbmittel sind nicht dauerhaft beständig, sie werden meist durch äußere Einflüsse zerstört und verlieren dabei ihre Farbigkeit. Auf Kunstwerken ist Farbverlust besonders bedeutsam, da die Wahrnehmung und die Bedeutung von Kunstwerken durch deren Farbigkeit geprägt sind. Grundlage für den Farbverlust sind Materialveränderungen, die sich in vielen Fällen ursächlich auf elektromagnetische Strahlung, d. h. Licht und UV-Strahlung, zurückführen lassen. Dies ist spätestens seit dem frühen 19. Jahrhundert bekannt [4], die Grundsätze für einen angemessenen Schutz vor Farbveränderungen wurden daraufhin erforscht. Giles bekennt 1965 in seinem Review Artikel [5] zur Lichtechtheit von Farbstoffen: *“Little can be added to the recommendations by Russel & Abney 1888”*. In diesen Untersuchungen legten Russel & Abney [6] dar, dass zur Prävention von Farbveränderungen UV-Strahlung zu vermeiden ist und insgesamt so wenig Lichtintensität wie möglich für so kurze Zeit wie nötig auf die Farbflächen fallen soll.

Lichtschutzkonzepte wurden in der Folge entwickelt, um Kunstwerke trotz Ausstellung vor Veränderungen zu bewahren, bekannt ist vor allem das 50 lx Kriterium [7, 8]. In den Museen hat sich inzwischen ein Wandel vom reinen Lichtschutz zum Lichtmanagement vollzogen [8], da eine museale Präsentation immer Licht voraussetzt. Ein Kompromiss zwischen Bewahren und Präsentieren muss im Museum immer wieder neu gefunden bzw. gemanagt werden [8–10].

Die grundsätzliche Frage ist dabei, wie lichtempfindlich die Materialien auf den Kunstobjekten sind. Oft ist die Materialzusammensetzung nicht bekannt, zerstörungsfreie Analysemethoden ermöglichen zumindest Teile der Materialzusammensetzung zu identifizieren. Mit solchen Informationen ist es auf Basis von Erfahrungswerten und bekannten Lichtechtheitswerten möglich, den Objekten eine Lichtechtheitsstufe zuzuordnen und somit eine Datenbasis für das Lichtmanagement aufzustellen [11, 12].

In diesem Zusammenhang hat die Entwicklung der *Microfading*-Test-Methode [13] eine Möglichkeit geschaffen, ohne Kenntnis der Materialzusammensetzung direkt auf den Kunstwerken deren Lichtechtheit zu testen. Die Methode wird inzwischen von einigen Museen und Forschungseinrichtungen im Bereich Konservierung eingesetzt [14]. Eine

Standardisierung des MFT-Verfahrens ist bisher nicht erfolgt, was auch daran liegt, dass die Anwendung speziell ist und der Nutzerkreis klein.

Diese Arbeit knüpft an die bestehenden Forschungen auf dem Gebiet der *Microfading*-Untersuchungen an. Im theoretischen Teil werden die Grundkonzepte der Farbmessung vorgestellt und die Grundlagen und Hintergründe der *Microfading*-Methode dargestellt. Im Methoden-Teil wird der Aufbau des genutzten *Microfading*-Systems erläutert und dessen Eigenschaften und Messgenauigkeit im Vergleich zu einem konventionellen Farbmessgerät aufgezeigt. Im praktischen Teil werden Anwendungen von MFT-Messungen präsentiert, vor allem auf Gemälden und Objektgruppen, die bisher noch nicht mit MFT analysiert wurden. Außerdem wird im Rahmen einer Langzeit-Analyse auf Gemälden und Musteraufstrichen die Vorhersagequalität von *Microfading*-Tests bei hoher Beleuchtungsstärke für Galerie-Beleuchtungsbedingungen überprüft. Zusätzlich wird über den Einbezug der Farbveränderungsrate in die Auswertung von MFT-Untersuchungen und eine Vorstudie zu alternativen Lichteichtheitsreferenzen eine Weiterentwicklung der MFT-Methodik präsentiert.

2 Theorie

Die theoretischen Ausführungen behandeln die für die *Microfading*-Methode grundlegenden Themen Photochemie und Farbmessung. Im Anschluss folgt eine Einführung in die *Microfading*-Methode selbst, die eine Beschreibung des Verfahrens zur Auswertung und einen Überblick über bereits durchgeführte Forschungen mit dem MFT und den Lichtechtheitsreferenzen einschließt.

2.1 Photochemie

In der Photochemie werden die Wechselwirkungen zwischen Licht und Materie und die daraus resultierenden Prozesse untersucht. Beispiele für Prozesse, bei denen photochemische Reaktionen involviert sind, sind die Photosynthese und die analoge Fotografie. Auch im Bereich der Konservierungswissenschaften spielen photochemische Prozesse, v. a. bei der Veränderung von Farbstoffen und Pigmenten auf Kunstwerken, eine große Rolle.

Die folgenden Ausführungen sind in Anlehnung an die Einführung in die Photochemie von Wardle [15] und ein Standardwerk zu beschleunigten Alterungstests von Feller [16] verfasst. „Licht“ im engeren Sinne beschreibt den Teil der elektromagnetischen Strahlung, der für Menschen mit dem Auge wahrnehmbar ist. Neben Licht ist im Spektralbereich noch UV-Strahlung für die Anregung photochemischer Reaktionen von Bedeutung. Die Elementarteilchen der elektromagnetischen Strahlung sind Photonen, energiegeladene Teilchen mit einer definierten Frequenz bzw. Wellenlänge. Die Planck-Einstein Relation

$$E = h \cdot f = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

stellt den Zusammenhang zwischen Energie E und Frequenz f bzw. Wellenlänge λ her. Das Planck'sche Wirkungsquantum h und die Vakuumlichtgeschwindigkeit c sind Naturkonstanten.¹ Der für die Photochemie relevante Strahlungsbereich reicht von UV-C (100–280 nm), UV-B (280–315 nm) und UV-A (315–380 nm) bis zum Bereich des sichtbaren Lichts (380–780 nm) – entsprechend der Einteilung nach DIN 5031-7 [17].

Zwei Grundgesetze bilden das Fundament der Photochemie. Das Grotthus-Draper-Gesetz besagt, dass nur Strahlung, die von einer Substanz absorbiert wird, chemische Reaktionen verursachen kann.

Der zweite Grundsatz, als Stark-Einstein-Gesetz bekannt, statuiert, dass für jedes absorbierte Photon nur ein Teilchen angeregt werden kann (Quanten-Natur des Lichts).

Unter Berücksichtigung dieser beiden Gesetze ist der grundlegende Prozess der Photochemie die Erzeugung eines angeregten elektronischen Zustands durch Absorption eines Photons in einer chemischen Verbindung. Dieser angeregte Zustand ist meistens instabil, zur Abregung existieren verschiedene Möglichkeiten. Die Abregung kann einerseits durch physikalische Prozesse, wie Wärmeübertragung auf Nachbarpartikel oder die Emission von Strahlung, d. h. Fluoreszenz bzw. Phosphoreszenz, stattfinden. Andererseits bildet der angeregte Zustand oft auch den Ausgangspunkt für chemische Reaktionen.

¹ Planck'sches Wirkungsquantum $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Js;
Vakuumlichtgeschwindigkeit $c = 299\,792\,458$ m/s

Zum einen können chemische Verbindungen aufgebrochen werden (Photolyse), wofür allerdings hohe Anregungsenergien nötig sind, die erst durch UV-C Strahlung aufgebracht werden. Weitere, mögliche Reaktionen nach einer photochemischen Anregung sind Umlagerungen, Isomerisierungen und Redoxreaktionen. Redoxreaktionen spielen in der Photochemie der Farbmittel eine wichtige Rolle. Ausgehend vom angeregten Zustand stellen hier sekundäre Prozesse die eigentlichen Veränderungen aus stofflicher Sicht dar. Involviert sind dabei oft die Stoffe in der Umgebung der Farbmittel, d. h. Bestandteile des Bindemittels, Sauerstoff oder Wasser, die als Elektronendonator bzw. -akzeptor in den Redoxreaktionen mitwirken. In der Prozesskette können andersfarbige Zwischenprodukte entstehen, wie beim roten Krapplack, bei dem ein gelber Zwischenzustand beobachtet wurde, bevor der völlige Farbverlust einsetzt [18]. Oxidations- bzw. Reduktionsreaktionen von Farbmitteln sind in der Regel nicht umkehrbar. Eine bekannte Ausnahme im Bereich der Konservierungswissenschaften ist die Veränderung von Preußisch Blau, das bei Belichtung reduziert wird und dabei seine Farbigkeit verliert. In Dunkelheit können die reduzierte Anteile wieder zu Preußisch Blau oxidieren [19–21]. Auch die Vergilbung von ölhaltigen Bindemitteln oder von Firnissen im Dunkeln und das erneute Ausbleichen bei Belichtung ist ein weiteres Beispiel für (quasi) reversible Prozesse, die photochemische Reaktionen als Teilprozesse enthalten [22–24].

2.2 Farbmessung

Die Farbmessung hat das Ziel, Farben in Maßbeziehungen zueinander zu setzen. Dies ist nicht ohne weiteres möglich, da Farbe nicht als eine Eigenschaft von Körpern (wie z. B. Länge, Masse, etc.) aufgefasst wird, sondern als menschliche Sinnesempfindung (siehe DIN 5033 [25]). Die Grundlagen der Farbmessung wurden Anfang des 20. Jahrhunderts gelegt, unter anderem an der TU Dresden von Robert Luther [26]. Inzwischen liegen umfangreiche Standardwerke zur Farbmessung u. a. von Manfred Richter [27] und Wyszecki und Stiles [28] vor. Im Folgenden werden in aller Knappheit die wesentlichen Schritte aufgeführt, um das heute weit verbreitete CIELab-System einzuführen und die Farbabstandsberechnung vorzustellen.

Voraussetzung für die Wahrnehmung von Farbe ist Licht, genauer gesagt der für Menschen sichtbare Teil des elektromagnetischen Spektrums (380–780 nm). Von einer Lichtquelle wird eine Strahlungsverteilung $S(\lambda)$ ausgesendet (λ bezeichnet die Wellenlänge der Strahlung). Für die Strahlungsverteilungen verschiedener Lichtquellen sind Normlichtarten festgelegt [29]. Die wichtigste Normlichtart ist D65, die der spektralen Verteilung von Tageslicht sehr ähnlich ist.

Wie auch immer die Strahlung der Beleuchtung zusammengesetzt ist, sie trifft auf einen Körper und tritt mit dessen Oberfläche in Wechselwirkung. Die Folgen der Wechselwirkung können durch chemische oder physikalische Ursachen geprägt sein [30], d. h. die Wechselwirkung bestimmt, wie viel der einfallenden Strahlung reflektiert, transmittiert oder gestreut wird. Als Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ wird das Verhältnis zwischen einfallender und reflektierter Strahlung definiert. Je nach Geometrie, d. h. Richtung der Beleuchtung und Richtung der gemessenen Reflexion bestehen noch andere Bezeichnungen für den Remissionsgrad [31]. Nach Gall [32] werden diese verschiedenen Remissionsgrade verallgemeinernd als Remission R bezeichnet.

Das Produkt von Strahlungsverteilung und Remissionsgrad ist als Farbreizfunktion $\phi_\lambda(\lambda) = \beta(\lambda) \cdot S(\lambda)$ definiert. Die Farbreizfunktion beschreibt die spektrale Zusammensetzung der sichtbaren elektromagnetischen Strahlung, wie sie das menschliche Auge oder eine Messvorrichtung erreicht. Die Farbreizfunktion ist physikalisch messbar, jedoch enthält die Strahlung an sich keine Information über die Farbe. Dies wird erst über die Multiplikation mit sogenannten Spektralwertfunktionen erreicht, die die Empfindlichkeit der Farbrezeptoren im menschlichen Auge mathematisch abbilden.

2.2.1 CIELab-Farbsystem

Das CIELab System geht aus dem CIE XYZ System hervor, dem ersten Farbsystem für Farbmessungen auf Grundlage von Farbreizfunktionen. Die drei Farbwerte X, Y, Z ergeben sich durch Integration der Farbreizfunktion $\phi_\lambda(\lambda)$ und der entsprechenden Spektralwertfunktionen $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$, $\bar{z}(\lambda)$. Je nach Größe des Gesichtsfelds stehen zwei Sätze von Spektralwertfunktionen zur Verfügung, der CIE 1931 2°-Normbeobachter und der CIE 1964 10°-Normbeobachter [28]. Die Definition der Farbwerte im Detail lautet

$$X = k \int_{380nm}^{780nm} \Phi_\lambda(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda, \quad Y = k \int_{380nm}^{780nm} \Phi_\lambda(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda, \quad Z = k \int_{380nm}^{780nm} \Phi_\lambda(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

wobei der Normierungsfaktor k so gewählt wird, dass Y für $\beta(\lambda)=1$ auf 100 genormt ist:

$$k = \frac{100}{\int_{380nm}^{780nm} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda}$$

Die Koordinaten des CIE XYZ Systems haben keine qualitative Entsprechung in der menschlichen Farbwahrnehmung. Deswegen ist es zweckmäßig, das CIE XYZ System in ein System zu transformieren, dessen Koordinaten eine Entsprechung in der menschlichen Farbwahrnehmung aufweisen, das CIE Lab System [33], siehe Abbildung 1:

$$L^* = 116 f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - 16$$

$$a^* = 500 \left[f\left(\frac{X}{X_n}\right) - f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) \right]$$

$$b^* = 200 \left[f\left(\frac{Y}{Y_n}\right) - f\left(\frac{Z}{Z_n}\right) \right]$$

mit Bedingungen für die Funktion f , je nach Wert der Brüche:

$$f\left(\frac{A}{A_n}\right) = \left(\frac{A}{A_n}\right)^{1/3} \quad \text{wenn } \left(\frac{A}{A_n}\right) > \left(\frac{6}{29}\right)^3 \text{ und}$$

$$f\left(\frac{A}{A_n}\right) = \left(\frac{841}{108}\right) \cdot \left(\frac{A}{A_n}\right) + \frac{4}{29} \quad \text{wenn } \left(\frac{A}{A_n}\right) \leq \left(\frac{6}{29}\right)^3$$

Die Konstanten X_n , Y_n und Z_n sind Farbwerte eines ideal weißen Körpers im gleichen Licht wie die Probe. Deren Werte sind für jede Normlichtart festgelegt.

Die CIELab Koordinate L^* steht für die Helligkeit (mit Werten von 0 für ideales Schwarz bis 100 für ideales Weiß), a^* steht für den Grün-Rot Anteil und b^* für den Blau-Gelb-Anteil. Eine noch intuitivere Farbbezeichnung ermöglicht die Umrechnung der kartesischen Koordinaten a^* , b^* in Polarkoordinaten C^* (Buntheit, *engl.* chromaticity) und h (Buntton, *engl.* hue).

$$C^* = \sqrt{a^{*2} + b^{*2}}$$

$$h = \arctan(b^*/a^*)$$

h wird analog zur Gradeinteilung der Winkel mit Werten von 0 bis 360 bestimmt, $h=0$ wird auf den positiven Teil der a^* -Achse gelegt.

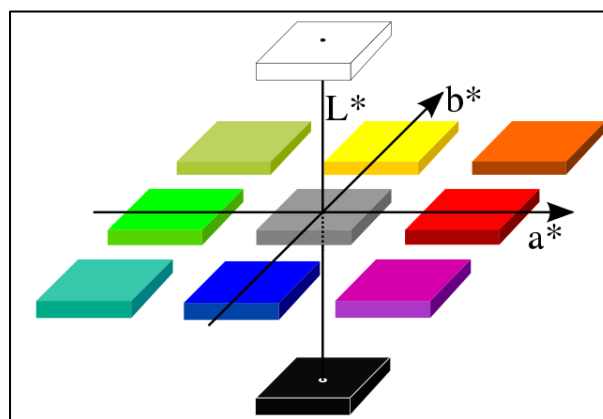


Abbildung 1: Schematische Darstellung des CIELab-Farbraums

2.2.2 Farbabstände

In dem dreidimensionalen, euklidischen CIELab-Farbraum ist der Abstand zwischen zwei Punkten (Farborten) P_0 und P_1 bestimmbar. Dieser sogenannte Farbabstand wird mit $\Delta E76$ [33] bezeichnet und ist die kürzeste Verbindung zwischen beiden Punkten

$$\Delta E76 = \sqrt{\Delta L^{*2} + \Delta a^{*2} + \Delta b^{*2}}.$$

Die einzelnen Teilabstände ΔX^* werden parallel zu den Achsen des CIELab-Farbraums gemessen. Bezugswert ist in der Regel der Ausgangswert, typischerweise der erste gemessene Farbwert. Die Farbwertunterschiede lauten im Detail:

Helligkeitsunterschied	$\Delta L^* = L_1^* - L_0^*$	
Unterschied a^* bzw. b^* Wert	$\Delta a^* = a_1^* - a_0^*$	bzw. $\Delta b^* = b_1^* - b_0^*$
Buntheitsunterschied	$\Delta C^* = C_1^* - C_0^*$	
Bunntonwinkelunterschied	$\Delta h = h_1 - h_0$	

Ist der Unterschied $\Delta X^* > 0$ wird eine Zunahme der entsprechenden Größe gemessen, im umgekehrten Falle ($\Delta X^* < 0$) wird eine Verkleinerung oder Abnahme der entsprechenden Größe gemessen. Da der Bunnton h auf 360 normiert ist, wird zusätzlich der Bunntonunterschied ΔH^* eingeführt, um Unterschiede der einzelnen Farbkomponenten in denselben Maßeinheiten (den CIELab-Einheiten) vergleichen zu können:

$$\Delta H^* = \sqrt{\Delta E76^2 - \Delta L^{*2} - \Delta C^{*2}}$$

Das Vorzeichen von ΔH^* richtet sich nach dem Vorzeichen von Δh , d. h. es ist bei einer Bunntonänderung im Uhrzeigersinn in der a^*/b^* -Ebene negativ, bei einer Änderung gegen den Uhrzeigersinn ist es positiv.

Die euklidische Farbabstandsformel $\Delta E76$ stellt eine erste Annäherung an das menschliche Farbabstandsempfinden dar. Die tatsächlichen Zusammenhänge zwischen empfundenen Farbabständen und Zahlenwerten für Farbabstände über den Farbraum hinweg sind komplex [34, 35]. Beispielsweise wird ein gemessener Farbabstand von $\Delta E76=5,0$ auf der Grauachse anders bewertet als im satten Blau. Diesem Umstand tragen neuere Farbabstandsformeln, wie die CMC [36], CIE94 [37], und DIN99 [38] Rechnung, die allesamt versuchen, Unterschiede zwischen wahrgenommenen Farbabständen und zahlenmäßiger Beschreibung zu minimieren.

Die bisher neueste Entwicklung ist die CIEDE2000 Formel [39] (im Folgenden mit $\Delta E00$ bezeichnet), die nach Schanda [40] alle bisherigen Formeln für Farbabstände ersetzen soll und als industrieller Standard durch DIN EN ISO 11664-7 [41] festgelegt ist. Teil der Formel ist eine Transformation der a^* -Achse (Streckung), sowie eine nach Bunnton differenzierte Gewichtung der Buntheit. Die Transformation versucht der Tatsache Rechnung zu stellen, dass Farbdifferenzen im Grau (nahe der L^* -Achse) wesentlich prägnanter wahrgenommen werden als im bunten Farbbereich. Details zu den zugrundeliegenden Bestimmungen und Berechnungsschritte der $\Delta E00$ -Formel finden sich in einschlägigen Publikationen [40, 42].

Farbabstand in Zahlenwerten

In der industriellen Farbprüfung besteht vorrangig die Frage, ob zwischen Bezug und Probe ein wahrnehmbarer Farbunterschied besteht. Bei der Konservierung von Kunstwerken ist die Frage ähnlich gelagert: Besteht eine wahrnehmbare Farbdifferenz zwischen Ausgangszustand und Ist-Zustand?

Die Zusammenhänge zwischen wahrgenommenen Farbabständen und berechneten Farbdifferenzen aus Farbmessungen sind nicht trivial (siehe oben). Zahlenwerte von Farbdifferenzen lassen sich mit qualitativ ausgedrückten Farbabstandsempfindungen in Verbindung bringen (Tabelle 1), die Werte müssen allerdings als Richtwerte aufgefasst werden. Entscheidender sind vielmehr Grenzwerte für einen gerade noch wahrnehmbaren Farbunterschied. Die Grenzwerte für einen gerade noch wahrnehmbaren Farbunterschied (im Englischen mit *Just Noticeable Difference* (JND) oder mit *Perceptible Change* (PC) bezeichnet) wurden bei idealen Beobachtungsbedingungen mit verschiedenen Verfahren abgeleitet. 1 JND wird mit einem Wert von $\Delta E_{76}=1,6$ angegeben [11], was annähernd dem Farbabstand der Stufe 4 des Graumaßstabs entspricht [43]. Pretzel wendet bei der Ermittlung des *Perceptible Change* bereits die Farbabstandsformel ΔE_{00} an und kommt für den gerade wahrnehmbaren Unterschied auf einen Zahlenwert von $\Delta E_{00}=1,5$ [44].

Tabelle 1: Bedeutung des Farbabstands ΔE_{76} (nach Schläpfer [45])

ΔE_{76}	Beschreibung
< 0,2	minimale, normalerweise für Menschen nicht sichtbare Abweichung
0,2 – 1,0	sehr geringe, nur mit geschultem Auge sichtbare Abweichung
1,0 – 3,0	geringe, auch für ungeübte Betrachter wahrnehmbare Abweichung
3,0 – 6,0	mittlere Abweichung
> 6,0	große Abweichung

Für Farbunterschiede sehr kleiner Farbflächen stellt sich die Frage nach der wahrnehmbaren Farbdifferenz auf neue Weise, da keine idealen Beobachtungsbedingungen herrschen – dadurch wird die Toleranz größer. Mikroskopische Untersuchungen von solch kleinen, punktförmigen Farbunterschieden auf üblichen Oberflächen von Kunstwerken ergaben, dass ein Farbabstand von $\Delta E_{76}=5,0$ nicht erkennbar ist [13]. Bei extrem gleichmäßigen und glatten Farbflächen konnten hingegen teilweise schon Farbunterschiede von $\Delta E_{76}=2-3$ registriert werden [46].

Fehlerbestimmung für Farbabstandsformeln

Die Fehlerbetrachtung bei der Bestimmung von Farbabständen ist durch die vektorielle Definition eines Farborts im CIELab-Raum komplexer als in einem eindimensionalen Fall. Die Farbwerte L^* , a^* , b^* sind als abhängige Variablen zu verstehen und Korrelationen zwischen den Werten müssen berücksichtigt werden [47], was in der Folge für die Fehlerbetrachtung des Farbabstands gilt. Eine einfachere Fehlerabschätzung erlaubt die Bestimmung der *Mean Colour Difference to the Mean* (MCDM) [15]. Die MCDM ist die Mittelung der Farbdifferenzen der Einzelmessungen zum Mittelwert der Einzelmessungen. Sie stellt ein Maß für die Streuung der Einzelmessungen in der jeweils genutzten Farbabstandsformel dar. Die Ermittlung der MCDM erfolgt bei N einzelnen Farbmessungen in zwei Schritten:

- 1) Bestimmung des mittleren Farborts (mittlere Farbwerte) im CIELab-Raum:

$$\bar{L}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N L_i^*; \quad \bar{a}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N a_i^*; \quad \bar{b}^* = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i^*$$

- 2) Summation und Mittelung der Farbabstände (in der jeweiligen Farbabstandsformel) der Einzelwerte zum mittleren Farbort (hier mit ΔE_{76}):

$$MCDM = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \sqrt{(L_i^* - \bar{L}^*)^2 + (a_i^* - \bar{a}^*)^2 + (b_i^* - \bar{b}^*)^2}$$

Wenn die Präzision der Einzelmessungen schlechter ist, wird die MCDM größer. Für Mittel- und Langzeitmessungen wird eine MCDM von 0,5 als akzeptabel angesehen, für Kurzzeitwiederholungen sollte sie kleiner als 0,1 sein [48].

Werden Farbdifferenzen zwischen zwei Farborten gebildet, ist es angemessen, die größere der einzelnen MCDMs der beiden Farborte als Fehlerabschätzung anzugeben (MAX MCDM) [49].

2.3 Microfading

Als *Micro-Fading-Tester* (MFT) bezeichnet man einen instrumentellen Aufbau, der es erlaubt die Lichtechtheit eines Objekts direkt auf dessen Oberfläche mit einem sehr kleinen Messpunkt zu testen. Seit der Erst-Veröffentlichung „Predicting the fading of objects“ [13] von Paul Whitmore et al. im Jahr 1999 nutzen zunehmend Museen und Forschungseinrichtungen zur Konservierung und Restaurierung diese Technik. Aktuell (Stand 01/2018) sind weltweit etwas mehr als 30 MFT im Einsatz [14]. Die zentralen Eigenschaften der Methode sind, dass Beleuchtung und Farbmessung simultan erfolgen und dass die Testfläche nur eine Größe von maximal 0,5 mm Durchmesser aufweist. Diese beiden Eigenschaften in Kombination erlauben den Einsatz des MFT als Analyseinstrument der Lichtechtheit von Kunst- und Kulturobjekten, da der Einfluss der Beleuchtung zu jeder Zeit kontrolliert wird und der Messpunkt selbst nur mikroskopisch klein ist.

Die Auswirkung einer MFT-Untersuchung auf eine Probe wird als nahezu zerstörungsfrei (engl. *virtually non-destructive*) angesehen [50, 51]. Als zerstörungsfrei im engen Sinne kann die Methode nicht bezeichnet werden, da im Falle von lichtempfindlichen Farbpartien im Test eine Lichtechtheitseinschätzung nur aufgrund von den tatsächlich herbeigeführten Farbveränderungen auf dem Untersuchungsobjekt abgeleitet werden kann. Diese Veränderungen werden in ihrem Ausmaß im Test kontrolliert und sind im Vergleich zu einer Probenahme für eine Materialanalyse, die als minimalinvasiv bezeichnet wird [52], äußerst gering. Ohne die MFT-Methode ist man bei der Bestimmung der Lichtechtheit von Kunstwerken auf die Information zur Materialzusammensetzung angewiesen. Im Abgleich mit bekannten Erfahrungswerten zur Lichtechtheit der verwendeten Materialien, wie sie beispielsweise vom *Light Damage Calculator* [53] des Canadian Conservation Institute bereitgestellt werden, kann die Lichtechtheit grob (unter Berücksichtigung der bereits erfolgten Veränderungen) abgeschätzt werden.

Für die Beleuchtung beim MFT werden meist Xenon-Lampen als Lichtquelle verwendet [13, 46, 54], vereinzelt auch LEDs [51, 55]. Für die Farbmessung wird das reflektierte Licht vom Messpunkt zu einem Spektrometer geleitet, das mindestens den Spektralbereich zwischen 400–700 nm erfasst und über eine ausreichend hohe Auslesegeschwindigkeit (im Millisekundenbereich oder schneller) verfügt.

Erwähnt sei, dass Pretzel mit Mitarbeitern am Victoria & Albert Museum in London parallel zu den Arbeiten von Whitmore ein Test- und Messsystem entwickelte, das in einem alternierenden Prozess aus Farbmessung und Belichtung ebenfalls auf kleiner Testfläche Untersuchungen der Lichtechtheit von textilen Kunstwerken ermöglicht [56].

Eine gute Übersicht zum Stand der Forschung am MFT bis zum Jahr 2013 bietet der Review Artikel von Ford und Druzik [50]. Die für die Methode wichtigen Forschungsarbeiten mit Relevanz für diese Arbeit werden im Folgenden dargelegt. Entscheidend ist, dass für den Einsatz des MFT keine Standards (Normen, etc.) bestehen, die Methode befindet sich nach wie vor in wissenschaftlicher Diskussion, wozu diese Arbeit einen Beitrag leisten will (siehe Abschnitt 3). Beim Einsatz des MFT orientieren sich Anwender und Forscher jedoch an den Standards, die aus den Bereichen der Farbmessung und der Lichtechtheitstests vorliegen.

Auswertung der MFT-Messungen

Mit Hilfe des Spektrometers erhält man bei der MFT-Messung als Rohdaten die Remissionskurven in zeitlicher Abfolge von Beginn bis Ende der Belichtung. Diese Daten können genutzt werden, um Veränderungen auf Basis von Remissionskurven zu charakterisieren, vereinzelt wurde dies z. B. mit der Änderung der Remission in definierten Wellenlängenbereichen versucht [57]. Es ist jedoch ein Verfahren, für das keine Standards aus den Normen zur Farbmessung und Lichtechtheitsprüfung existieren.

Als quasi Standard-Vorgehen etablierte sich ein Verfahren, das die Methoden der Farbmessung nutzt und auf den Vergleich mit der Veränderung von Lichtechtheitsreferenzen abzielt (siehe unten). Dazu werden die spektralen Remissionsdaten in CIELab-Farbwerte umgerechnet und der Farbabstand zu den Start-Farbwerten bestimmt. Offen ist jedoch die Frage, welche Farbabstandsformel Verwendung findet, je nach Formel erhält man unter Umständen verschiedene Ergebnisse [34, 55].

Obwohl schon verbesserte Formeln, wie die CIE94 [37], entwickelt waren, war ΔE_{76} als einfachste Farbabstandsformel die bevorzugte Wahl bei den frühen MFT-Veröffentlichungen [13, 58, 59]. Aufgrund der ungleichmäßigen Verbindung zwischen Zahlenwerten von ΔE_{76} und wahrgenommenen Farbabständen, wurde zunehmend die Verwendung von CIE94 empfohlen [55], ab dem Jahr 2010 auch ΔE_{00} . Diese neueste Farbabstandsformel ΔE_{00} führt v. a. beim Vergleich von Messergebnissen verschiedener MFTs zu besserer Übereinstimmung [55]. Eine alternative Strategie ist die parallele Verwendung von ΔE_{76} und ΔE_{00} [60, 61], die Sinn macht, wenn die Messergebnisse mit früheren Analysen nach ΔE_{76} verglichen werden sollen. Als internationaler Standard ist seit 2014 für Farbabstände in der Industrie ΔE_{00} vorgegeben [62].

Hilfreich für die Interpretation der Ergebnisse ist es zudem, wenn die Veränderungen der Farbwerte (ΔL^* , Δa^* , Δb^* bzw. ΔC^* , ΔH^*) mit analysiert werden, wie es in jüngeren Publikationen zu MFT-Untersuchungen zunehmend praktiziert wird [51, 61].

Lichtechtheitsstandards

Besonders Konservatoren und Restauratoren sind vor die Frage gestellt, wie die Lichtechtheit von Kunst- und Kulturgütern klassifiziert werden kann. Es verwundert nicht, dass die erste systematische Arbeit zur Lichtechtheit von Aquarellfarben aus dem Museumsumfeld stammt – der *Russel & Abney Report* von 1888 [6]. Belichtungsexperimente von Wasserfarben in Sonnenlicht wurden mit einer selbst hergestellten Referenz-Skala abgeglichen. Diese Skala enthielt acht Stufen unterschiedlich stark ausgewaschener Tinte und diente als Bezug für die Stärke der Ausbleichung, sie selbst wurde allerdings nicht dem Licht ausgesetzt.

Andere Forscher, wie Eibner in München, setzten auf einen visuellen Vergleich von belichteter und abgedeckter Probe und beschrieben die beobachteten Farbunterschiede mit Worten [63]. Wenig später wurden von der Echtheitskommission des Vereins deutscher Chemiker Referenzmaterialien entwickelt, die den gleichen Beleuchtungsbedingungen wie die zu untersuchenden Proben ausgesetzt wurden und ab 1914 als standardisierte Lichtechtheitstypen für unterschiedliche Textilien genutzt wurden [64]. Die acht Lichtechtheitstypen werden in einem definierten Verfahren mit bestimmten Farbstoffen in festgelegten Konzentrationen gefärbt. Entsprechende Verfahren zum Vergleich des Ausbleichens der Referenzen mit dem Ausbleichen von Proben wurden entwickelt und bilden heute die Grundlage für die normierten Lichtechtheitstests [65, 66].

In der Folge wurden in England Verbesserungen der Lichtechtheitstypen angestrebt (z. B. um Unabhängigkeit des Ausbleichens von Luftfeuchtigkeit zu gewährleisten) [67] und

schließlich wurden von der *American Association of Textile Chemists and Colorists* (AATCC) eigene Standards als L-Serie entwickelt und vermarktet [68]. Beide Lichtechtheitstypen sind heute in Verwendung, es bestehen neben den materiellen Unterschieden auch methodische Unterschiede beim Einsatz der Lichtechtheitsstandards.

Gewisse Abhängigkeiten (u. a. von der Luftfeuchtigkeit, von der spektralen Zusammensetzung der Lichtquelle, etc. [67]) machen eine allgemeine Verwendung der Standards schwierig, insgesamt ist die Genauigkeit bei der Klassifizierung wohl auf plus-minus eine Lichtechtheitsstufe bei der Bewertung beschränkt [69].

Sowohl die amerikanische L-Serie als auch die europäischen BWS zielen auf die industrielle Verwendung (v. a. in der Textilindustrie) ab. Für den Einsatz im Museum erweisen sie sich vielfach als zu stabil, da dort eine vergleichsweise niedrige Beleuchtungsstärke vorherrscht was lange Belichtungszeiten für messbare Veränderungen erforderlich macht. Das führte zur Entwicklung von alternativen Lichtechtheitsstandards für den Museumsgebrauch (*LightCheck Ultra* [70]) auf Basis von Pigmentaufstrichen. Die *LightCheck Ultra*-Teststreifen waren nur kurz am Markt verfügbar, die Produktion ist inzwischen eingestellt.

Für die MFT-Untersuchung ist eine Klassifizierung der Messergebnisse hinsichtlich der Lichtechtheit ein Test-Ziel [50]. Hintergrund ist die internationale Entwicklung von Beleuchtungsrichtlinien für Museen auf Basis der BWS-Lichtechtheitsstufen [12, 71], die als Grundlage eine Bewertung der Lichtempfindlichkeit der Kunstobjekte nach den BWS selbst erfordern. Die Daten dazu können entweder aus MFT-Analysen stammen oder durch Erfahrungswerte und makroskopische Lichtechtheitstests in Kombination mit Materialinformationen abgeleitet worden sein. Als erwiesen gilt, dass ein Test mit dem MFT im Ergebnis eine Unterscheidung zwischen sehr lichtempfindlichen und eher lichtbeständigen Materialien zulässt [51, 55]. Eine noch detailliertere Klassifizierung der MFT-Messergebnisse wird v. a. von Seiten der Konservatoren angestrebt.

Zu diesem Zweck werden die BWS für MFT-Untersuchungen verwendet, wenngleich dies mit gewissen Einschränkungen verbunden ist. Die Größe des MFT-Messpunkts (0,2–0,5 mm [46, 50]) liegt in der gleichen Größenordnung wie der Fadendurchmesser der Wollfäden, d. h. bei der Referenzmessung des *Microfading* ist die Messvoraussetzung einer ebenen Fläche nicht vollständig erfüllt. Weitere Einschränkungen liegen in der Genauigkeit der BWS, hier vorrangig die Abhängigkeit des Ausbleichens von der spektralen Zusammensetzung der Lichtquelle und die Abweichung von der Reziprozität, die der Standard BW1 wohl beim Vergleich zwischen MFT-Beleuchtungsstärke und konventionellen Lichtechtheits-tests erleidet [72]. In Ermangelung von Alternativen werden die BWS trotz dieser Einschränkungen für MFT-Untersuchungen genutzt.

Einsatzmöglichkeiten des MFT

Voraussetzung für eine Messung mit dem MFT ist, dass die zu testenden Oberflächen opak, also nicht transparent, sind. Das schließt beispielsweise MFT-Untersuchungen transparenter Polymere aus. Die Kenntnis der chemischen Zusammensetzung der Testfläche ist nicht erforderlich, was als Vorteil der Methode anzusehen ist [50]. Die zu testende Stelle muss eine ebene Fläche von der Größe des Messpunkts, also mindestens mit 0,5 mm Durchmesser, aufweisen sowie für den Messkopf senkrecht zur Messfläche zugänglich sein. Außerdem ist zu beachten, dass mit der hohen Beleuchtungsstärke ein Temperaturanstieg im Messpunkt verbunden ist, der durch den Einsatz von IR-Filter auf maximal 5 °C über Raumtemperatur beschränkt werden kann [46, 73]. Nur bei äußerst temperatursensiblen Materialien, wie Wachs etc., muss hier besondere Rücksicht genommen werden [13].

Diese Anforderungen werden von einer Vielzahl von musealen Objekten erfüllt, dementsprechend groß ist die Bandbreite der Objekte und Materialien, deren Lichtempfindlichkeit mit dem MFT getestet wurde. Angefangen von Untersuchungen selbst hergestellter Farbaufstriche [13], gefolgt von Schriftstücken mit Eisengallustinte [74] und gefärbten Textilien [75] reicht das Spektrum bis hin zu ungewöhnlichen Objekten wie Artefakten aus Alaska [54], insbesondere Quillstickereien [76]. Untersucht wurden ebenfalls Objekte tierischen Ursprungs, wie Vogel-Federn [77] oder Knochen [71] und pflanzlichen Ursprungs, wie Herbarien [78] oder Holz und Nüsse [71]. Das MFT ist außerdem für den Außen-Einsatz geeignet, dies wurde durch die Analyse der Lichtempfindlichkeit von Höhlenmalereien [79] und Felsmalereien [80] gezeigt, wobei in beiden Fällen noch Farbveränderungen durch die Testbelichtung gemessen wurden. Ebenfalls untersucht wurde die Lichtechtheit moderner Drucke [59, 81]. Von Untersuchungen direkt auf Gemälden wurde bisher vergleichsweise selten berichtet (siehe hierzu [61, 71]), da Firnisse ein Hindernis für die Messung darstellen und der Aufwand zur Vorbereitung der Messungen für größere Objekte recht hoch ist [61]. Neben der qualitativen und quantitativen Bewertung der Lichtechtheit von Kunstobjekten wird das MFT für wissenschaftliche Fragen zum Zusammenhang zwischen Lichteinwirkung und Reaktion eingesetzt. Dazu stehen inzwischen Aufbauten zur Verfügung, die es erlauben Lichtquellen zu nutzen, die im nahen UV Spektralanteile bereitstellen [82], tatsächliche Messungen hierzu sind abseits dieser Veröffentlichung nicht bekannt. Mit Hilfe von Bandpassfiltern im Strahlengang des MFT wurde die Abhängigkeit der Farbveränderungen von der Zusammensetzung der Wellenlänge des Beleuchtungsspektrums untersucht [83]. Im Ergebnis wurde hier festgestellt, dass Farbveränderungen bei den meisten Materialien dann auftreten, wenn das Beleuchtungsspektrum im Absorptionsbereich des Materials liegt [83]. Dies ist aus konventionellen Lichtechtheitstests bekannt [16, 84] und stellt zudem einen Grundsatz der Photochemie dar (Abschnitt 2.1).

Mit speziellen Zusatzkonstruktionen kann das MFT genutzt werden, um Farbveränderungen bei verschiedenen Gasatmosphären zu testen, exemplarisch durchgeführt u. a. an Preußisch Blau Proben [85].

Eine Frage, die wohl alle MFT-Nutzer beschäftigt, ist die Frage der Reziprozität. Allgemein gilt Reziprozität, wenn die Wirkung der Belichtung unabhängig von der Beleuchtungsstärke ist. Exemplarisch gilt Reziprozität also dann, wenn die photochemische Wirkung einer Belichtung von 1000 lx für 1 h gleich der Wirkung von 1 lx für 1000 h ist (Bunsen-Roscoe-Gesetz [86]). Gilt Reziprozität müssten sich die Ergebnisse, die aus MFT-Messungen bei hoher Beleuchtungsstärke gewonnen werden, ohne Einschränkung auf Galerie-Beleuchtungsstärke übertragen lassen. Dies ist im Allgemeinen nicht möglich, jedoch kann für eine Vielzahl von Materialien annähernd Reziprozität für weite Bereiche der Beleuchtungsstärke angenommen werden [87, 88]. Del Hoyo et al. [89] und Lerwill et al. [72] kommen bei den bisher einzigen beiden Reziprozitäts-Untersuchungen mit dem MFT zu dem Schluss, dass besonders bei den lichtempfindlichen Materialien Vorsicht bei der Übertragung der MFT-Ergebnisse auf Galerie-Beleuchtungsstärke geboten ist.

Für die Lichtechtheitstypen zeigen Forschungen, dass bei gleicher Belichtung im Bereich der hohen Beleuchtungsstärken des MFT der Lichtechtheitstyp BW1 eine stärkere Farbveränderung erleidet, wenn die Beleuchtungsstärke höher ist [89]. Im Gegensatz dazu wurde für den Vergleich zwischen niedrigen und hohen Beleuchtungsstärken bei insgesamt gleicher Belichtung festgestellt, dass BW1 bei niedrigeren Beleuchtungsstärken eine größere Veränderung erfährt [72]. D. h. bei BW1 kommt es je nach Beleuchtungsstärke bei gleicher Belichtung zu unterschiedlich großen Farbveränderungen. Die Ursachen für die

Abweichungen von der Reziprozität bei BW1 sind nicht identifiziert, mitwirken könnten die erhöhte Oberflächentemperatur einhergehend mit einer Verringerung der Luftfeuchtigkeit, Unterschiede in der spektralen Verteilung der Beleuchtungen oder mangelnde Sauerstoffzufuhr bei hoher Beleuchtungsstärke [72].

Eine Anwendung, die auf Grundlage der MFT-Messergebnisse, die Farbveränderungen veranschaulicht, wurde mit dem *Virtual Fading* [59] präsentiert. Dabei wird aus den einzelnen MFT-Messungen an allen Farbpartien eines Kunstwerks der Zusammenhang zwischen Farbveränderungen in Abhängigkeit der Belichtung bestimmt. So kann aufgrund der punktuellen Messungen das zukünftige Erscheinungsbild des Kunstwerks in Abhängigkeit der Belichtung dargestellt werden. Entscheidende Einschränkungen müssen allerdings berücksichtigt werden: Die Reziprozität muss für alle untersuchten Farbmittel erhalten sein, ebenso dürfen die Farbmittel auf dem Gesamtwerk nur in der Konzentration der untersuchten Messpunkte vorliegen. Insgesamt ist das *Virtual Fading* eine Möglichkeit MFT-Ergebnisse unter engen Rahmenbedingungen (eingehaltene Reziprozität aller Messpunkte, gleichmäßige Konzentration der Farbmittel) bildhaft zu veranschaulichen.

Zusammenfassung und Implikationen für diese Arbeit

Die *Microfading*-Methode ist geeignet um aufgrund der Testergebnisse eine Differenzierung zwischen lichtempfindlichen und eher lichtstabilen Materialien auf verschiedensten Objekten, v. a. Kunst- und Kulturgütern, vorzunehmen. Wie Ford und Druzik [50] festhalten, bestehen offene Forschungsfragen (v. a. zur Reziprozität [72, 87, 89], zu speziellen Abhängigkeiten der Ausbleichvorhänge z. B. in anderen Gasatmosphären [85, 90]) und Einschränkungen für die Interpretation der Ergebnisse der MFT-Lichtechtheitstests (Wahl der Farbabstandsformel bzw. allgemeiner des Vergleichskriteriums für Veränderungen [55, 57]) in gleicher Weise wie bei konventionellen Lichtechtheitstests.

Die Auswertung von *Microfading*-Tests zielt bisher auf den Vergleich von absoluten Farbveränderungen der Proben mit Lichtechtheitsreferenzen. Die Farbabstandsformel ΔE_{00} ist für die Berechnung der Farbabstände als quasi Standard anzusehen. Lediglich der Vergleich mit früheren Ergebnissen macht es ggf. nötig auf die Farbabstandsformeln ΔE_{76} bzw. CIE94 zurückzugreifen. Eine inhaltliche Erweiterung bzw. Optimierung der Auswertungsstrategie ist erstrebenswert, da das bisherige Verfahren mit der Farbveränderungen zum Ende der Tests eine gewisse Willkür nicht verleugnen kann und eine standardisierte Auswertung mit definiertem Testbericht, wie in den Normen der Lichtechtheitstests [66], für *Microfading*-Tests noch nicht abzusehen ist.

Die aktuellen Lichtechtheitsstandards scheinen nicht ideal für *Microfading*-Tests, am ehesten sind sie für den Vergleichstest mit Textilien geeignet, wie von der Norm vorgesehen [66] (auch hier sind Abweichungen von der Reziprozität von Bedeutung). Für MFT wünschenswert wären Lichtechtheitsmaterialien, die den Einsatzgebieten und Anforderungen der Methode (d. h. mit einer flachen Testfläche) entsprechen, mit den bisherigen Standards unter definierten Bedingungen vergleichbar sind und zudem zwischen 10 lx und 10 Mlx die Reziprozität einhalten.

Für die Abweichung von BW1 von der Reziprozität zwischen MFT-Beleuchtungsstärke und anderen beschleunigten Testverfahren bei niedrigerer Beleuchtungsstärke existieren Belege [72], ein Vergleich mit Galerie-Beleuchtungsbedingungen (niedrige Beleuchtungsstärke verbunden mit Wechsel Belichtung-Dunkelheit) steht bislang noch aus.

Das *Microfading*-Testverfahren wurde auf ein breites Spektrum von Objekten angewandt, trotzdem sind weitere Einsatzmöglichkeiten des MFT wünschenswert, nicht zuletzt um die Methode einem größeren Nutzerkreis zugänglich zu machen. Zu denken sind hier an Objektgruppen, zu denen bisher keine MFT-Erfahrungen vorliegen, beispielsweise lose Farbpulver. So gut wie keine Beachtung fand bisher die Möglichkeit, die die MFT-Analyse mit UV-Anteil im Spektrum der Beleuchtung bietet [82], obwohl gerade im Bereich der Konservierung hier anwendungsspezifische Einsatzmöglichkeiten bestehen.

3 Zielstellung

Diese Arbeit stellt ein kumulatives Werk dar. Im Mittelpunkt der Untersuchungen steht die *Microfading*-Methode, die es erlaubt Lichtechtheitstests auf Kunst- und Kulturobjekten bei extrem hoher Beleuchtungsstärke an einem kleinen Messpunkt durchzuführen.

Der Aufbau eines mobilen *Microfading*-Testers sowie die Bestimmung der Eigenschaften (Beleuchtungsspektren, Messpunktgröße, Einfluss auf die Oberflächentemperatur) stellen das erste Ziel der Arbeit dar. Die Messgenauigkeit der Farb- und Farbabstandsmessung des MFT soll im Vergleich mit den Messwerten eines konventionellen Spektralphotometers bestimmt werden. Die dann folgenden praktischen Untersuchungen verfolgen zwei Ziele:

Zum einen soll die *Microfading*-Methode auf weitere, bisher wenig oder gar nicht untersuchte Objektgruppen angewandt werden und erstmals die Möglichkeit von Untersuchungen mit UV-Anteil im Spektrum der Beleuchtung [82] in praxisrelevanten Fällen genutzt werden. Hintergrund dieser anwendungsorientierten Untersuchungen sind konservatorische Fragestellungen nach der Lichtechtheit der Materialien, aber auch nach der Ursachenforschung von Degradationserscheinungen.

Zum anderen werden kritische Aspekte der *Microfading*-Methode, die bisher wenig Beachtung fanden, aufgegriffen, die Schwierigkeiten konkretisiert und überprüft und teils Lösungsansätze vorgestellt.

Dies betrifft zuerst die Lichtechtheitsreferenzen selbst, deren empfindlichster Typ BW1 offenbar beim Ausbleichen eine komplexe Abhängigkeit von der Beleuchtungsstärke aufweist [72, 89]. In einem Reziprozitätsvergleich werden die Farbveränderungen der Lichtechtheitstypen bei Galerie-Belichtung (Tag/Nacht Wechsel und moderate Beleuchtungsstärke von 30–300 lx) und bei MFT-Belichtung (Beleuchtungsstärke ca. 10 Mlx) gegenübergestellt, um Konsequenzen für die Lichtechtheitsklassifizierung von MFT-Untersuchungen zu diskutieren.

In einer Vorstudie sollen die Möglichkeiten geprüft werden, die Blau-Woll-Standards, die aufgrund ihrer Materialität nicht ideale Voraussetzungen für MFT-Untersuchungen besitzen, durch Manipulation in geeignete Formen für *Microfading*-Tests zu bringen und ihr Farbveränderungsverhalten zu untersuchen.

Die Vorhersagequalität von MFT-Messungen soll mit dem Einbezug der Farbveränderungsrate in die Auswertungsmethodik optimiert werden, da dadurch insbesondere das Verhalten ungewöhnlicher Farbveränderungen genauer quantifiziert werden kann. Ein neues Klassifizierungsschema bestehend aus der bekannten MFT-Klassifizierung und dem ergänzenden Einbezug der Farbveränderungsrate wird vorgestellt und auf eine Reihe von Proben angewandt, um Implikationen des neuen Vorgehens auf die MFT-Auswertungsmethode zu diskutieren.

In einer Langzeituntersuchung in der Gemäldegalerie Alte Meister in Dresden werden die Farbveränderungen auf Gemälden und Musteraufstrichen erfasst und mit den vorab erfolgten *Microfading*-Tests abgeglichen, um in der Frage der Reziprozität erstmals Daten aus Galerie-Belichtungen mit MFT-Belichtungen zu vergleichen. Der Fokus liegt dabei auf den Blau-Woll-Standards (siehe oben) und Malschichten, die das Pigment Preußisch Blau enthalten.

4 Methoden: Aufbau und Eigenschaften

Die für diese Arbeit verwendeten Methoden und Geräte werden im folgenden Kapitel vorgestellt. Neben dem Spektralphotometer (Abschnitt 4.1), das als Farbmessgerät eingesetzt wird und für Referenzfarbmessungen und Farbmonitorings genutzt wird, liegt der Schwerpunkt auf dem *Micro-Fading-Tester* (Abschnitt 4.2). Der Aufbau des MFT wird erläutert und seine Eigenschaften werden eingehend beschrieben. Den Abschluss bildet ein Vergleich der Farbmessung und der Farbabstandsberechnung aus Messdaten mit dem Spektralphotometer und dem MFT (Abschnitt 4.3).

4.1 Farbmessgerät

Für die konventionellen Farbmessungen wird das Farbmessgerät CM-2600d von KonicaMinolta verwendet. Es verfügt über zwei verschiedene Messblenden mit 3 bzw. 8 mm Durchmesser.

Das Gerät ist nach der für Reflexionsmessungen empfohlenen Messgeometrie $d:8^\circ$ konstruiert (siehe DIN 5033-7 [91]). Die Probe wird diffus mit Hilfe einer Ulbricht-Kugel beleuchtet, die Remission wird unter einem Winkel von 8° senkrecht zur Oberfläche der Probe gemessen. Besonderheit ist die Möglichkeit zur gleichzeitigen Messung mit Glanzeinschluss ($di:8^\circ$) und mit Glanzausschluss ($de:8^\circ$). Ermöglicht wird dies durch eine Glanzfalle, die ebenfalls unter einem Winkel von 8° senkrecht zur Probe angeordnet ist, jedoch achsensymmetrisch zum Eingang der Remissionsmessung.

Der erfasste Wellenlängenbereich reicht von 360–740 nm, das eingebaute Silizium-Photodioden-Array hat eine Intervallbreite von 10 nm. Die für Farbmessungen üblichen Parameter, wie Lichtart, Normalbeobachter, etc. können per Bildschirmeingabe eingestellt werden. Ein kalibrierter Weißstandard ist vom Hersteller mit beigefügt. Die Inter-Instrument-Übereinstimmung liegt bei $\Delta E_{76} = \pm 0,2$ (gemittelt auf 12 BCRA Fliesen²).

Zur Messung wird das Gerät eben mit der Messblende auf der zu messenden Probe positioniert, per Knopfdruck kann die Farbmessung ausgelöst werden. Die Farbwerte (CIE Lab) werden sofort auf dem Bildschirm angezeigt, intern gespeichert und können nach der Messung mit der Software *SpectraMagic NX* (KonicaMinolta) über USB-Anschluss am PC ausgelesen werden.

² BCRA Fliesen werden als keramische Referenzen für Farbmessungen verwendet. Die Fliesen werden aktuell (01/2018) unter dem Namen CERAM von der Firma Lucideon Ltd. (Stoke-on-Trent, UK) vertrieben.

4.2 Micro-Fading-Tester

Der *Microfading-Tester* für die folgenden Untersuchungen wurde in Anlehnung an ein MFT-System der Firma Newport³ aufgebaut. Ein Komplett-Gerät war zu Beginn der Arbeit nicht kommerziell verfügbar, deswegen wurde ein eigener Aufbau auf Basis des Newport-Systems zusammengestellt.

4.2.1 Aufbau

Das MFT besteht aus drei wesentlichen Teilen, der Beleuchtung, dem Messkopf und der Auswertungseinheit (Abbildung 2). Eine Auflistung aller verwendeten Komponenten findet sich im Anhang A.

Zur Beleuchtung wird eine 75 W Xenon-Bogenlampe verwendet. Das Netzteil der Lampe steht in einem Schaltkreis mit einer Intensitäts-Regelung, die kontinuierlich über einen Sensor am Lampengehäuse die Intensität abfragt und die Lampenleistung ggf. nachregelt. So wird eine gleichmäßige Lampenleistung und damit konstante Beleuchtungsstärke am Messpunkt sichergestellt.

Durch einen Rückreflektor am Lampengehäuse wird die Strahlungsleistung um ca. 60 % erhöht [92]. Das zur Verfügung stehende Licht wird über einen Kondensator zu einem Filterhalter geleitet. Hier können mehrere Filter eingesetzt werden, um die spektrale Verteilung anzupassen. Beim genutzten Aufbau werden ein Wärmereflexionsfilter (IR3) und ein UV-Filter (GG395) verwendet, um Wärme- bzw. UV-Strahlung am Durchgang zu hindern. Weiterhin stehen verschiedene Neutralfilter zur Verfügung, um beim Einrichten der Messung die Beleuchtungsstärke ohne Änderung der Lampenleistung kurzzeitig zu verringern.

Nach dem Filterhalter wird das Licht in ein Glasfaserkabel fokussiert und zum Messkopf geleitet. Direkt am Anschluss des Glasfaserkabels befindet sich eine Blende, die es erlaubt den Strahlengang zum Messkopf kurzfristig zu öffnen und zu schließen. Dies ist insbesondere zum Start der Messung und bei vorzeitigem Abbruch wegen starker Farbveränderung notwendig.

Am Messpunkt trifft der Lichtstrahl unter 0° auf die Probe, das unter 45° gestreute Licht wird zum Spektrometer geleitet (Abbildung 3). Dies entspricht der Messgeometrie $0^\circ:45^\circ_x$, die für Farbmessungen in der Norm 5033 Teil 7 [91] aufgeführt ist. Durch diese Geometrie findet die Farbmessung explizit unter Glanzausschluss statt.

Für die Beleuchtung der Probe sind im Messkopf in einer Strahlsonde senkrecht zwei Linsen mit $f=19\text{ mm}$ so angeordnet, dass der Ausgang des Glasfaserkabels ($200\text{ }\mu\text{m}$) auf eine Kreisfläche mit $0,2\text{ mm}$ Durchmesser fokussiert wird (siehe Abbildung 3).

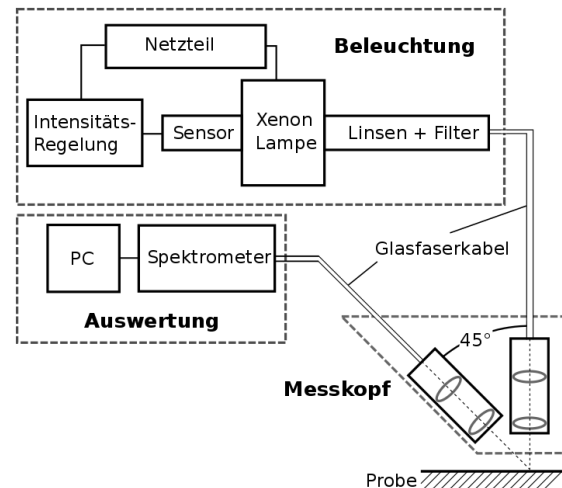


Abbildung 2: Schematischer Aufbau des *Micro-Fading-Testers*

³ Bei Newport Inc. (Irvine, California) war von 2008–2012 ein Micro-Fading-Tester kommerziell erhältlich.

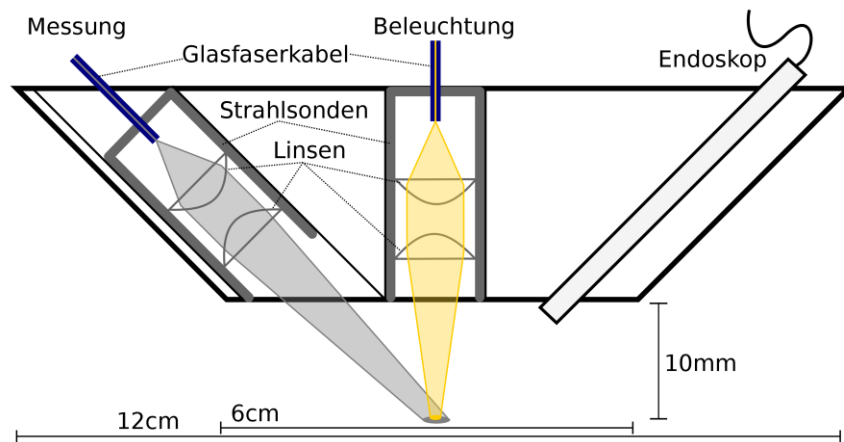


Abbildung 3: Detail vom Messkopf des MFT (nicht maßstabsgetreu)

Der Eingang des Spektrometers (Silicon-PDA 512, Control Development, siehe Anhang A) ist mit einem Glasfaserkabel mit 600 μm Durchmesser verbunden, das ebenfalls über eine Strahlsonde (Linse 1 mit $f=19\text{ mm}$, Linse 2 mit $f=25\text{ mm}$) auf den Messpunkt ausgerichtet ist. Alle Linsen im Strahlengang sind aus Quarzglas gefertigt, so dass prinzipiell UV-Durchlässigkeit gegeben ist. Zusätzlich steht in der Messebene eine Endoskopkamera zur Verfügung, um die Positionierung des Messpunktes per Livevideo verfolgen zu können. Insgesamt beträgt der Arbeitsabstand zwischen Messkopf und Fokuspunkt 10 mm.

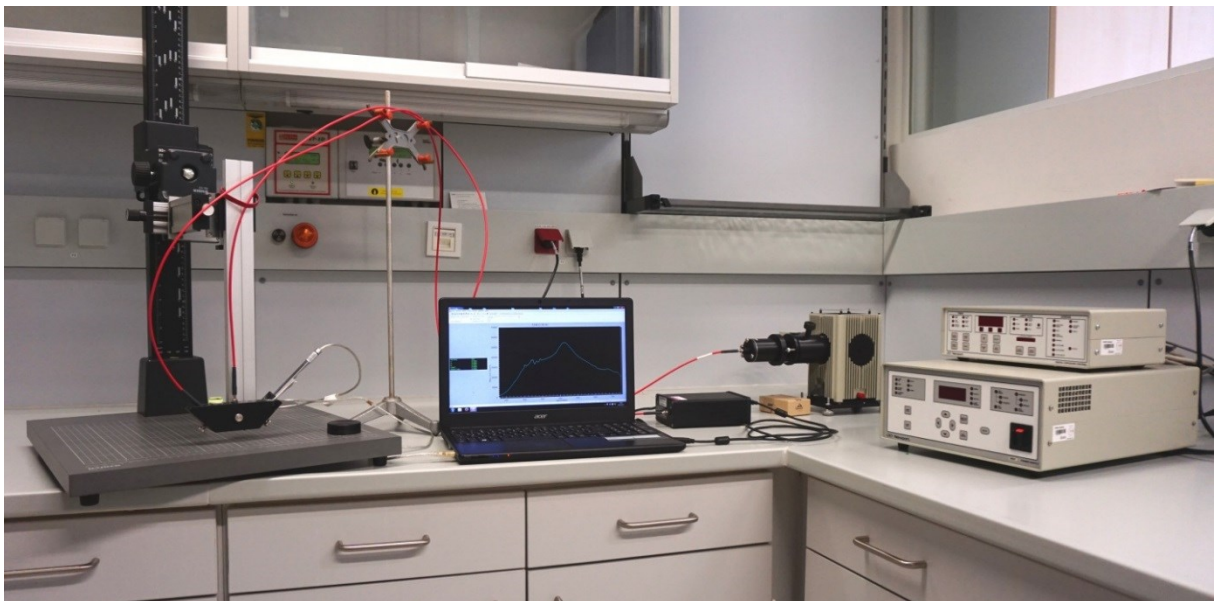


Abbildung 4: Laboraufbau des *Microfading-Testers* (v.l.n.r.): Stativ und Messkopf, PC, Spektrometer, Lampe und Stromversorgung

Die spektrale Information vom Messpunkt wird im Spektrometer ausgewertet. Es hat eine Bandbreite von 380–727 nm und löst diesen Spektralbereich mit 512 Dioden auf. Für die Farbmessung wird der Spektralbereich auf 380–720 nm beschränkt, womit der wesentliche

Teil aus der Definition der Normbeobachter [93] zur Bestimmung der Tristimuluswerte (siehe 2.2.1) spektral abgedeckt ist.⁴

Das Spektrometer wird mit Hilfe der Software CDI Spec32 (Control Development, siehe Anhang A) gesteuert. Die Software ermöglicht zudem die Anzeige der Remissionswerte je Wellenlänge (nach vorhergehender Definition der Weiß- und Schwarzwerte über entsprechende Kalibrierungen). Die Remissionswerte werden gemäß den normativen Vorgaben der Farbmessung [33] von der Software in CIE Lab-Farbwerte umgerechnet (siehe Abschnitt 2.2.1). Nach der Festlegung des Bezugs-Farborts vor Beginn der Belichtung werden über die Software automatisch die Farbabstände der aktuellen Farbwerte zum Bezugswert berechnet und angezeigt. In einer Ausgabedatei werden alle Remissionswerte, sowie die Farbwerte und der Farbabstand zum Ausgangsfarbot im ASCII-Format bereitgestellt, das Ausgabeintervall kann vom Benutzer vor dem Test festgelegt werden und liegt hier standardmäßig bei 5 Sekunden. D. h. die eigentlichen Messwerte liegen als Messreihe im Abstand von 5 Sekunden vor.

Für die Weißkalibrierung wird ein Weiß-Standard aus Polytetrafluorethylen (PTFE) mit einer matt-weißen Oberfläche verwendet. Zur Messung der Beleuchtungsstärke im Messpunkt wird eine Spezialanfertigung der Firma Indium Sensor GmbH (Neuenhagen) verwendet, die für hohe Beleuchtungsstärken konstruiert und kalibriert wurde (Typ FLA623 VL ohne Diffusor, 2 x 2,2 mm Si-Sensor, hinter V(λ)-Glas, Anschluss zu Almemo-Stecker).

Im Laboraufbau (Abbildung 4) wird ein Repröstativ zur Befestigung des Messkopfes verwendet, im mobilen Einsatz ein Dreibeinstativ.

⁴ Die CIE-Spektralwertfunktionen betragen bei Wellenlängen >720 nm weniger als 0,5 % des jeweiligen Maximalwerts, das gleiche gilt für die Werte bei Wellenlängen <380 nm. Der dadurch entstehende systematische Fehler ist wesentlich kleiner als die Unsicherheit durch den Instrument-Drift (siehe 4.2.5).

4.2.2 Beleuchtungsspektren

Zur Überprüfung der Beleuchtungsspektren des MFT wurde die spektrale Verteilung im Messpunkt mit einem Spektrometer⁵ einer Bandbreite von 190–880 nm erfasst. Anstelle der Probe wurde im MFT-Messpunkt der Eingang des Glasfaserkabels des Spektrometers positioniert und mit dem genannten Spektrometer verbunden. Untersucht wurden die spektralen Verteilungen ohne Filter, mit Wärmereflexionsfilter IR3 (IR) sowie die Kombination aus Wärmereflexionsfilter IR3 und UV-Filter GG395 im Strahlengang.

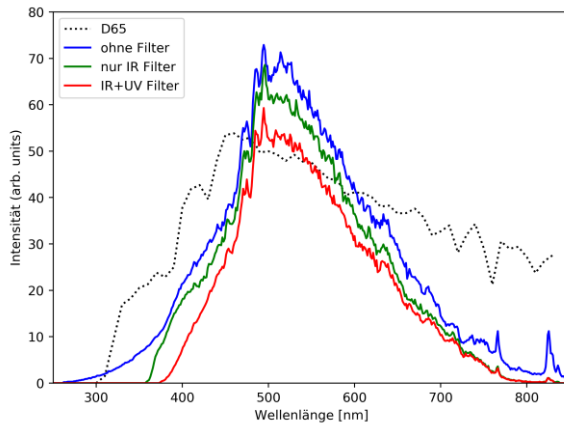


Abbildung 5: Beleuchtungsspektren bei verschiedenen Filterkombinationen im Vgl. zu Normlichtart D65 (normiert auf Spektrum IR+UV-Filter bei 560 nm)

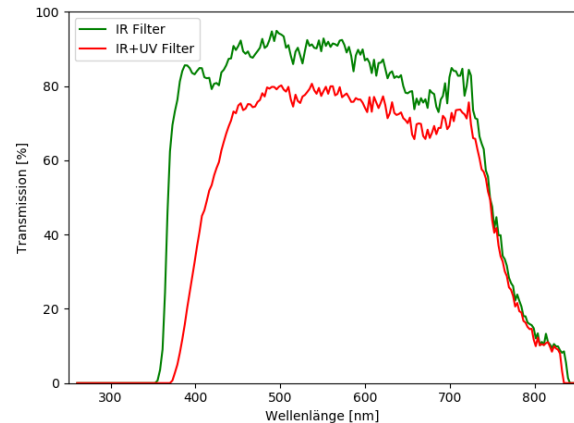


Abbildung 6: Transmissionskurven IR-Filter und IR+UV-Filter

Die Lampenleistung wurde nach einer Aufwärm- und Angleichphase von insgesamt 45 Minuten auf 73 W geregelt. Die gemessenen mittleren spektralen Verteilungen resultieren aus jeweils 20 Einzelmessungen, die als absolute Einzelzählungen (beliebige Einheiten, von Spektrometer vorgegeben) erhoben wurden (Abbildung 5). Im Vergleich mit Normlichtart D65 [29], die in etwa der spektralen Verteilung von Tageslicht entspricht, wird durch die MFT-Beleuchtungsspektren für die Bereiche im Blau und UV sowie im Rot und IR weniger Intensität bereit gestellt (je nach verwendeter Filterkombination). Die Spektren sind allesamt kontinuierlich und decken den Bereich des sichtbaren Lichts (380–780 nm) komplett ab.

Bei der folgenden Beschreibung der spektralen Breite wird der Bereich aufgeführt, in dem noch 1 % der Strahlungsintensität des jeweiligen Maximums vorhanden ist. Ohne Filter hat das Spektrum eine Breite von ca. 260–860 nm mit einem Maximum bei ca. 514 nm.

Tabelle 2: Kennwerte der MFT-Beleuchtungsspektren bei verschiedenen Filtern (Definition siehe Text)

Kennwert	ohne Filter	nur IR Filter	IR+UV-Filter
Schwerpunktwellenlänge	548,2 nm	543,8 nm	551,3 nm
Anteil UV/VIS	3,21 %	0,89 %	0,03 %

Durch das IR-Filter wird das Spektrum auf ca. 355–840 nm begrenzt. Bei zusätzlichem Einsatz des UV-Filters verschiebt sich die kurzwellige Grenze auf ca. 372 nm (Abbildung 5). Die Transmission des IR-Filters liegt im VIS gemittelt bei 85%, von IR und UV-Filter zusammen bei 72 % (Abbildung 6).

⁵ Verwendet wurde das Leybold Kompakt-Spektrometer 467 261.

Zur Beurteilung der Strahlungsverteilung ist die Relation des spektralen Gewichts von UV- zu VIS-Anteil sinnvoll. Die spektralen Anteile von UV (190–380 nm) und VIS (380–780 nm) wurden gemäß DIN 5031-7 [17] gewählt.

Aus den Integralsummen der Einzelzählung der Spektralverteilungen (siehe Abbildung 5) wurde das Verhältnis von UV/VIS gebildet (Tabelle 2). Ohne Filter liegt ein relativer UV-Anteil von 3,21 % vor, während mit IR + UV Filter im Strahlengang dieser Anteil nur noch 0,03 % beträgt. Die Schwerpunktwellenlänge gibt an, wo der Mittelpunkt des Spektrums liegt [94]. Dieser verschiebt sich bei Einsatz des UV-Filters in Richtung Rot und liegt mit 551,3 nm sehr nahe am Maximum der $V(\lambda)$ -Kurve (555 nm), der Empfindlichkeitskurve des menschlichen Auges [95].

4.2.3 Größe des Messpunkts

Die Größe des Messpunkts wird durch die optischen Eigenschaften des Fokussiersystems und den Durchmesser des Glasfaserkabels festgelegt – unter der Annahme, dass die Messung im Fokus abläuft. Die Größe des Messpunkts dieses Aufbaus liegt theoretisch bei 0,2 mm, da der Durchmesser des Glasfaserkabels 0,2 mm beträgt und die Vergrößerung des Fokussiersystems bei 1 liegt (was effektiv keiner Vergrößerung entspricht). Zur Prüfung der Größe des Messpunkts wurde ein Probeaufstrich einer lichtempfindlichen Gouache-Farbe⁶ auf Passepartoutkarton aufgetragen. Ein Testpunkt des Probeaufstrichs wurde mit dem MFT bis zu einer Farbveränderung von $\Delta E_{00}=18$ belichtet und anschließend mit einem Auflichtmikroskop untersucht.

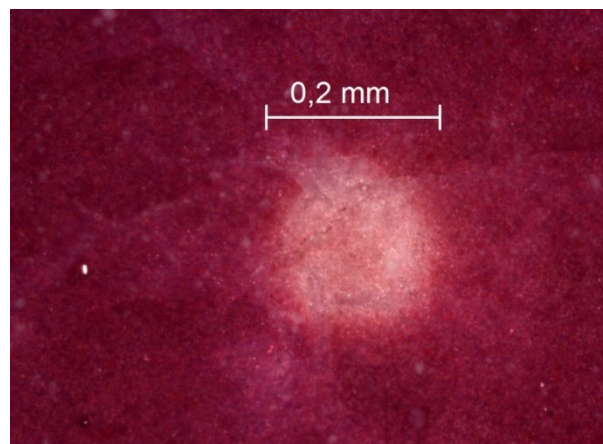


Abbildung 7: Mikroskopaufnahme (100x) eines ausgebleichten Punkts auf Gouache-Farbe

Auf dem Probeaufstrich (Abbildung 7) ist eine deutlich ausgebleichte, nahezu kreisrunde Fläche mit etwa 0,18 mm Durchmesser erkennbar. Diese Fläche wird von einem „Hof“ mit etwa 0,01 mm Breite umschlossen, der etwas weniger stark ausgebleicht ist. Streuung und chromatische Aberration (als Konsequenz der Verwendung von Quarzglaslinsen, siehe 4.2.1) sind als Ursachen für den Hof anzuführen. Insgesamt bestätigt sich die theoretisch erwartete Größe des Messpunktes von 0,2 mm Durchmesser.

⁶ Dazu wurde die Gouache-Farbe *Rose Tyrien* („Designers Gouache 593 C S2“, Winsor & Newton) mit etwas Wasser vermengt.

4.2.4 Einfluss auf Proben­temperatur

Der Einfluss der Messung auf die Temperatur der Probe ist beim MFT wegen der hohen Beleuchtungsstärke und des Einsatzes im Bereich Konservierung-/Restaurierung von besonderem Interesse. Bisherige Untersuchungen fanden im Messpunkt einen Temperaturanstieg von ca. 3–5 °C über Raumtemperatur [46, 73].

Zur Untersuchung des Einflusses der Beleuchtung auf die Proben­temperatur wurde ein ungeschütztes Sensor-Element⁷ mit schwarzer, glänzender Oberfläche verwendet, mit Klebstreifen fixiert und in den Fokus des MFT gebracht



Abbildung 8: Temperatursensor im Fokus des MFT

(Abbildung 8)⁸. Untersucht wurde die Temperaturänderung des Sensors bei MFT-Beleuchtung mit den zur Verfügung stehenden Filterkombinationen bei einer Lampenleistung von 79 W und einer Beleuchtungsstärke von ca. 10 Mlx. Die Messwerte des Fühlers ohne Belichtung T(0 s) (bei Umgebungstemperatur) und nach 30 s Belichtung T(30 s) sind in Tabelle 3 aufgeführt.

Tabelle 3: Temperaturänderung im Messpunkt bei verschiedenen Filtern

Filter	T(0 s) [°C]	T(30 s) [°C]	ΔT [°C]
ohne Filter	21,4	24,6	+3,2
IR3	21,5	23,0	+1,5
GG395	21,5	24,2	+2,7
IR3 + GG395	21,5	22,8	+1,3

Zu beobachten war nach Öffnung der Blende, d. h. nach Start der Belichtung, ein relativ rascher Temperaturanstieg, der nach 20–25 s zum Erliegen kam. In der Folge war die Temperatur auf einem höheren Niveau konstant bei geringfügigen Schwankungen ($\pm 0,2$ °C). Der Temperaturanstieg fällt je nach Filter im Strahlengang unterschiedlich hoch aus (Tabelle 3). Ohne Filter ist der Anstieg an höchsten mit 3,2 °C, mit IR + UV Filter ist der Anstieg am geringsten mit nur 1,3 °C.

Die gemessenen Werte entsprechen der Erwartung aus den bisherigen Untersuchungen [46, 73]. Demzufolge stellt der hier gewählte Aufbau, insbesondere bei Verwendung des IR Filter, eine geeignete Abschirmung der Wärmestrahlung zur Verfügung. Der Einfluss der MFT-Messung auf die Proben­temperatur kann bei Einsatz von IR- und UV-Filter bei den meisten Materialien als gering angesehen werden, insbesondere da bei photochemischen Veränderungen die Temperatur als untergeordneter Einflussfaktor angesehen wird [16].

⁷ Verwendet wurde der Almemo NTC-Fühler FN 0001 K.

⁸ Auf der Abbildung erscheint der Punkt der Beleuchtung deutlich größer als der Temperatursensor. Das Gegenteil ist der Fall. Die hohe Intensität der Beleuchtung führt dazu, dass der Kamera-Sensor überblendet – auch in den Bereichen des gestreuten Lichts um den Messkopf herum.

4.2.5 Drift und Messfehler

Bei Einsatz einer Xenon-Bogen-Lampe stellt sich die Frage, wie gleichmäßig und konstant die Intensität und die spektrale Verteilung über die Belichtungsdauer gehalten werden können. Um diese Frage zu beantworten wurde die Farbveränderung einer lichtechten Oberfläche während der Belichtung gemessen, in dem Fall des Weiß-Standards, der zur Weiß-Kalibrierung verwendet wird. Nach 20 Minuten Aufwärmphase der Lampe und 20minütiger Angleichphase bei eingeschalteter Intensitäts-Regelung wurden bei einer Lampenleistung von 77 W mit IR+UV Filter die Farbwerte des Weißstandards über 60 Minuten im Abstand von 30 s protokolliert.

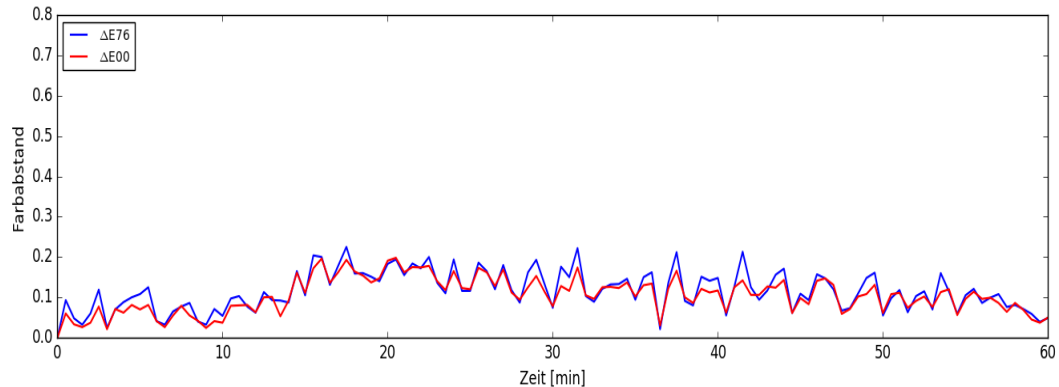


Abbildung 9: Instrument-Drift über 60 Minuten gemessen auf Weiß-Standard in Farbabstandsformel ΔE_{76} und ΔE_{00}

Im Ergebnis zeigte sich, dass die Schwankungen in der Farbmessung innerhalb einer Stunde unterhalb von $\Delta E_{76}=0,25$ bzw. $\Delta E_{00}=0,2$ bleiben. Der Unterschied zwischen den Formeln ist aufgrund der Definition der Farbabstandsberechnung nachvollziehbar. Bei Formel ΔE_{00} werden v. a. kleine Farbunterschiede anders gewichtet was in der Regel zu niedrigeren Werten führt als bei der Farbabstandsberechnung nach ΔE_{76} . Die Werte für das Drift-Niveau innerhalb einer Stunde liegen im Bereich bereits veröffentlichter Werte ähnlicher Aufbauten [46, 73] und bilden den Rahmen der Messgenauigkeit für die folgenden Untersuchungen.

4.2.6 Zusammenfassung und Festlegung der Standardeinstellungen

Die instrumentellen Eigenschaften des aufgebauten *Microfading-Testers* wurden eingehend untersucht. Der Beleuchtungspunkt ist im Fokus annähernd kreisrund und hat einen Durchmesser von 0,2 mm. Im Messpunkt kommt es bei Verwendung der typischen Filterkombination mit UV- und IR-Filter zu einem Anstieg der Temperatur um 1,3 °C über Raumtemperatur, der UV-Anteil liegt dabei bei 0,03 % des Licht-Anteils. Bei Entfernung des UV-Filters hat das Spektrum der Beleuchtung einen UV-Anteil von 0,89 % bzw. 3,21 % ohne IR- und ohne UV-Filter. Das instrumentelle Drift-Level übersteigt bei fortlaufender Messung über eine Stunde ein $\Delta E_{76}=0,25$ bzw. ein $\Delta E_{00}=0,2$ nicht.

Zusammenfassend können die Eigenschaften des genutzten MFT und die Auswirkungen der Messung auf zu testende Oberflächen als umfassend dokumentiert angesehen werden. Daraus folgt, dass der zusammengestellte MFT-Aufbau für die Untersuchung von Kunst- und Kulturgütern geeignet ist, da der Einfluss abgesehen von der reinen Beleuchtung als gering anzusehen ist. Die Beleuchtung wird indirekt über die simultane Farbmessung kontrolliert.

Die Parameter für die Farbmessung mit dem MFT wurden aufgrund der Vergleichbarkeit mit anderen Messungen (siehe Abschnitt 2.3) festgelegt. Die Integrationszeit des Spektrometers wurde so gewählt, dass bei Beleuchtung des Weißstandards mit einer Lampenleistung von 75 W das Signal bei etwa 65 % vom Sättigungsniveau des Spektrometers liegt. Dieses Vorgehen führt in Kombination mit der Mittelwertbildung aus zehn aufeinanderfolgenden Einzelspektren zu einem optimierten Signal-Rausch-Verhältnis. Die folgenden Standardeinstellungen wurden bei den meisten Untersuchungen in dieser Arbeit verwendet:

Normlichtart	D65
Normbeobachter	2°
Integrationszeit	0,02 s
Messwert	Mittelwert aus 10 aufeinanderfolgenden Einzelspektren
Messintervall	5 s
Messdauer	15 Minuten
Filter	IR + UV Filter
Spektralbereich	380–720 nm [Intervallbreite 1 nm]

Wenn andere Einstellungen verwendet wurden, wird darauf explizit im Text verwiesen. Vor jeder Messung wird eine Aufwärmphase von 20 Minuten für die Lampe eingehalten, danach folgt eine 20minütige Angleichphase mit aktivierter Intensitäts-Regelung, nach der die Weiß- und Schwarzkalibrierung für die Farbmessung durchgeführt werden.

4.3 Vergleich Farb- und Farbabstandsmessung mit Spektralphotometer und MFT

Die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Farbwerte und Farbabstände aus Messungen mit dem Spektralphotometer und dem MFT wurden anhand von zwei Farbvorlagen analysiert. Die *CERAM* Farbfliesen stellen für absolute Farbwerte eine stabile Referenz dar, für Farbabstände ist der genormte Graumaßstab [43] eine zweckmäßige Referenz.

Das *CERAM* Farbfliesen-Set besteht aus 12 einzelnen Fliesen mit unterschiedlicher Farbe (siehe Anhang B Abbildung B.1). Da einzelne Fliesen eine leichte Neigung zu Thermochromie aufweisen, fanden die Messungen bei derselben Raumtemperatur statt.

Der Graustandard besteht aus neun Paaren grauer Flächen, deren Kontrast bzw. Farbabstand mit abnehmender Graumaßstabszahl zunimmt (siehe Anhang B Abbildung B.2). D. h. Graumaßstab Stufe 5 besteht aus zwei gleichen Farbflächen, Stufe 1 besteht aus zwei Flächen mit sehr deutlichem Unterschied, für Details siehe DIN EN ISO 105-A02 [43].

Die Messeinstellungen beim Spektralphotometer CM2600-d waren Lichtart D65, 2° Normalbeobachter, 100 % UV-Anteil, 3 mm Blende, Messmodus SCI (Glanzeinschluss). Beim MFT wurden die Farbmessungen mit den Standardeinstellungen (siehe 4.2.6) durchgeführt. Bei jeder Messreihe wurden auf den Farbflächen an je fünf unterschiedlichen Stellen Farbwerte aufgenommen, in der Folge wurden Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet und die MCDM bestimmt. Vor jeder Messreihe wurde eine Weißkalibrierung durchgeführt.

Reproduzierbarkeit Farbmessungen mit Spektralphotometer

Die *CERAM* Farbfliesen wurden im Abstand von 14 Monaten bei gleicher Raumtemperatur (21 °C) mit dem Spektralphotometer bei den oben genannten Einstellungen gemessen. In der Zeit dazwischen befand sich das Gerät in reger Nutzung; mehr als 5000 Einzelmessungen wurden durchgeführt. Die gemittelten Werte der ersten Messung vom 09.06.2015 sind im Anhang in Tabelle B.1 aufgeführt, die entsprechenden Werte der zweiten Messung vom 02.08.2016 in Tabelle B.2.

Die Werte der $MCDM_{\Delta E76}$ liegen gemittelt über alle zwölf Fliesen bei 0,09 für die erste Messreihe und bei 0,13 für die zweite Messreihe. Für die Farbabstandsformel $\Delta E00$ betragen die entsprechenden Werte der $MCDM_{\Delta E00}$ 0,06 respektive 0,09. Dies stellt für Kurzzeitwiederholungsmessungen eine akzeptable Streuung dar, in der gleichen Größenordnungen wie bei anderen Labormessungen, die auf Werte von $MCDM \leq 0,1$ kommen [48].

Der Vergleich beider Messreihen führt zu dem Ergebnis, dass die berechnete Farbdifferenz bei 10 von 12 Fliesen nach über einem Jahr kleiner als $\Delta E76=0,20$ ist, bei den übrigen zwei Fliesen liegen Differenzen bis zu $\Delta E76=0,26$ vor (Tabelle 4). Für $\Delta E00$ bleiben die Werte allesamt kleiner als 0,16. Nach diesen Messungen ist die Langzeit-Reproduzierbarkeit des Spektralphotometers im Messmodus SCI mit Messblende 3 mm auf eine mittlere Farbabweichung von $\Delta E76=0,12$ bzw. $\Delta E00=0,08$ beschränkt.

Tabelle 4: Farbdifferenzen aus Spektralphotometermessung 1 (09.06.15) und 2 (02.08.16) der Farbfliesen

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MW
$\Delta E76$	0,14	0,01	0,05	0,14	0,14	0,26	0,18	0,20	0,15	0,05	0,04	0,06	0,12
$\Delta E00$	0,11	0,01	0,05	0,14	0,10	0,16	0,08	0,11	0,08	0,05	0,03	0,06	0,08

Reproduzierbarkeit Farbmessung MFT

Für das MFT wurde die Reproduzierbarkeit der Farbmessung an den CERAM Fliesen im Abstand von einer Woche untersucht. Umgebungstemperatur war bei beiden Messreihen 21 °C, die Lampenleistung lag bei 80 W. Die Ergebnisse der Messung an den CERAM Farbfliesen von 09.06.2015 sind im Anhang in Tabelle B.3, die vom 17.06.2015 in Tabelle B.4 aufgeführt. Für die Streuung der Einzelwerte (MCDM) liegen bei Messreihe 1 Werte bis zu $\Delta E_{76}=1,45$ ($\Delta E_{00}=0,85$) vor und bei Messreihe 2 Werte bis zu $\Delta E_{76}=2,08$ ($\Delta E_{00}=1,25$). Die mittlere MCDM beträgt 0,63 (ΔE_{76}) bzw. 0,38 (ΔE_{00}) für Messreihe 1 und 0,81 (ΔE_{76}) bzw. 0,53 (ΔE_{00}) für Messreihe 2. Die gemessenen Farbdifferenzen zwischen Messung 1 und 2 liegen nach ΔE_{76} zwischen 0,02 und 1,49 bzw. nach ΔE_{00} zwischen 0,01 und 0,84, gemittelt bei $\Delta E_{76}=0,59$ bzw. $\Delta E_{00}=0,35$ (siehe Tabelle 5). Diese Werte liegen deutlich höher als die Vergleichswerte mit dem Spektralphotometer. Zwei Gründe sind für die erhöhte Ungenauigkeit der Farbmessung beim MFT zu identifizieren. Der kleine MFT-Messpunkt mit 0,2 mm Durchmesser ist anfälliger für mikroskopische Farbunterschiede auf einer makroskopisch gleichmäßigen Oberfläche. Mikroskop-Untersuchungen der Farbfliesen zeigten, dass die Oberfläche von Fliese 12 mit verschiedenen, kleingliedrigen Farbflächen durchsetzt ist. Zudem beeinflussen Kurzzeitschwankungen der Lampenleistung die Farbmessung. Dazu kommen ein gewisser Spielraum beim Fokussieren des Messpunkts [46] und die Nutzung nicht kalibrierter Weiß-Standards, wofür bisher keine Alternative gefunden wurde.

Im Fazit bleibt festzuhalten, dass für Kurzzeit-Wiederholung von Farbmessungen mit dem MFT bei ansonsten gleichen Messbedingungen die Reproduzierbarkeit auf $\Delta E_{76}=0,6$ bzw. $\Delta E_{00}=0,4$ beschränkt ist.

Tabelle 5: Farbdifferenzen zwischen MFT-Farbmessung 1 (09.06.15) und 2 (17.06.16) der Farbfliesen

#	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	MW
ΔE_{76}	0,41	0,49	0,95	0,23	0,02	0,66	1,49	0,74	0,48	0,37	0,21	0,99	0,59
ΔE_{00}	0,38	0,45	0,84	0,19	0,01	0,26	0,48	0,21	0,44	0,29	0,12	0,35	0,35

Ergebnisse Farbabstände CERAM Fliesen

Die Farbfliesen 2 und 3 sowie 9 und 10 sind für den Vergleich von Farbabständen vorgesehen. Aus den Daten in Tabelle B.1 – Tabelle B.4 (siehe Anhang B) wurden die Farbabstände nach ΔE_{76} und ΔE_{00} zwischen den entsprechend Fliesen bestimmt (siehe Tabelle 6).

Die Übereinstimmung der Absolutwerte aus den je zwei Vergleichsmessungen ist sehr gut, mit dem Spektralphotometer liegen die Abweichungen bei der Farbabstandsberechnung kleiner als 0,1 und beim MFT kleiner als 0,2 CIELab-Einheiten. Insgesamt werden die Farbabstände mit dem MFT etwas größer bewertet als mit dem Spektralphotometer. Die Streuung der Einzelwerte (MAX MCDM) liegt bei den MFT-Messungen bei Werten bis zu $\Delta E_{76}=1,42$ bzw. $\Delta E_{00}=1,25$. Für die Messungen mit dem Spektralphotometer fallen die entsprechenden Werte mit $\Delta E_{76}=0,21$ und $\Delta E_{00}=0,12$ deutlich niedriger aus.

4.3 Vergleich Farb- und Farbabstandsmessung mit Spektralphotometer und MFT

Tabelle 6: Vergleich der Farbabstände der Farbfliesenpaare 2–3 und 9–10 mit MFT und Spektralphotometer zu unterschiedlichen Zeitpunkten

Messung	Farbabstand 2-3				Farbabstand 9-10			
	ΔE_{76}	MAX MCDM	ΔE_{00}	MAX MCDM	ΔE_{76}	MAX MCDM	ΔE_{00}	MAX MCDM
MFT 09.06.15	3,92	0,78	4,97	0,70	3,40	1,42	2,04	1,25
MFT 17.06.15	3,92	0,55	5,05	0,31	3,60	0,90	2,21	0,57
CM 09.06.15	3,46	0,12	4,52	0,11	3,20	0,11	1,95	0,07
CM 02.08.16	3,46	0,14	4,53	0,12	3,09	0,21	1,90	0,12

Ergebnisse Farbabstände Graumaßstab

Für die Grauleiter liegen die Referenzwerte für die Farbabstände nur für Formel ΔE_{76} vor, dementsprechend beschränkt sich die Auswertung auf diese Farbabstandsberechnung. Der Vergleich der Referenzwerte aus der Norm mit den gemessenen Abständen ist in Tabelle 7 dargestellt. Die gemittelte MCDM bei der Messung mit dem Spektralphotometer beträgt 0,07, für das MFT liegt die aus allen Einzelmessungen gemittelte MCDM bei 0,28. In der Tabelle aufgeführt ist jeweils die maximalen Streuung (MAX MCDM) aus den beiden Mittelwerten, die für die Berechnung des Farbabstands herangezogen wurden.

Die Toleranzen der Norm für den Graumaßstab (DIN EN ISO 105-A02 [43]) werden mit den Messungen des Spektralphotometers nahezu alle eingehalten – bis auf Stufe 5 und Stufe 3-4, wo die Abstände knapp außerhalb der Toleranz liegen. Die Farbabstände aus den Werten der MFT-Farbmessungen erfüllen die Toleranz der Norm nur zum Teil (Stufe 5, 4, 2-3, 2, 1). Die übrigen Farbabstände sind in je zwei Fällen kleiner bzw. größer als die Norm. Beim direkten Vergleich zwischen den Farbabständen mit den MFT-Messungen und aus den Spektralphotometermessungen treten Differenzen bis zu einem $\Delta E_{76}=1,46$ auf. Eine mögliche Ursache liegt in der Definition des Graumaßstabs begründet, die explizit Glanz für die Farbmessung einschließt [43]. Die Geometrie am Messkopf des MFT ($0^\circ:45^\circ \times$) schließt Glanz konstruktionsbedingt bei der Messung aus.

Insgesamt betrachtet sind die gemessenen Farbabstände mit den Referenzwerten bis auf eine Ungenauigkeit von einem gemittelten $\Delta E_{76}=0,51$ vergleichbar.

Tabelle 7: Farbabstände der Grauleiter nach Norm und aus Messung mit Spektralphotometer und MFT

Stufe	ISO 105-A02		Spektralphotometer		MFT	
	ΔE_{76}	Toleranz	ΔE_{76}	MAX MCDM	ΔE_{76}	MAX MCDM
5	0,0	0,20	0,34	0,14	0,17	0,34
4-5	0,8	0,20	0,90	0,05	0,23	0,35
4	1,7	0,30	1,57	0,07	1,62	0,27
3-4	2,5	0,35	2,14	0,13	1,89	0,31
3	3,4	0,40	3,38	0,14	3,94	0,33
2-3	4,8	0,50	4,56	0,07	4,46	0,38
2	6,8	0,60	6,35	0,06	6,44	0,26
1-2	9,6	0,70	9,32	0,06	10,59	0,36
1	13,6	1,00	12,69	0,07	14,15	0,28

Fazit

Die Vergleichbarkeit und die Reproduzierbarkeit von Farbmessungen und Farbabständen sind für die folgenden Untersuchungen von entscheidender Bedeutung. Die Vergleichbarkeit der absoluten Farbwerte zwischen zwei Messinstrumenten mit verschiedener Messgeometrie ist von geringer Aussagekraft, da sich die Werte deutlich unterscheiden. Die Ursache liegt in der verschiedenen Messgeometrie beider Methoden, die einen direkten Vergleich der absoluten Farbwerte nicht gestattet [96]. Farbabstände hingegen lassen sich besser vergleichen, da diese als relative Größe zwischen zwei Farbwerttripeln bestimmt werden. Zusammengefasst lässt sich aus dem Vergleich der Farbabstände des Graumaßstabs und der ausgewählten Farbfliesen der Schluss ziehen, dass Farbabstandsbestimmungen mit MFT und Spektralphotometer auf ein gemitteltes $\Delta E_{76}=0,5$ übereinstimmen.

Jedoch ist die Streuung der einzelnen Farbwerte bei den MFT-Messungen deutlicher größer ($MCDM_{\Delta E_{00}}=0,4$) als bei den Messungen mit dem Spektralphotometer ($MCDM_{\Delta E_{00}}=0,1$).

Die Langzeitwiederholbarkeit für Messungen mit dem Spektralphotometer ist mit einer Streuung von $MCDM_{\Delta E_{00}}=0,1$ verbunden. Für das MFT sind solche Messungen nicht vorgesehen, daher wurden hier keine Werte ermittelt.

Da mit dem MFT in erster Linie Farbveränderungen, also Farbabstände, gemessen werden, ist die im Vergleich zum Spektralphotometer weniger genaue, absolute Farbmessung hinzunehmen.

5 Praktische Untersuchungen

In diesem praktischen Teil der Arbeit werden die zentralen Untersuchungen präsentiert. Den Anfang bilden die Studien zur Weiterentwicklung des MFT-Auswertungsverfahrens (5.1) mit Ansätzen für MFT-geeignete Lichtechtheitsstandards (5.1.1) und einer um die Farbveränderungsrate erweiterten Auswertungsmethode (5.1.2). Daran schließen sich die Anwendungen der MFT-Methode an, zuerst mit UV-Anteil im Spektrum der MFT-Beleuchtung (5.2), gefolgt von MFT-Messungen an Pigmentpulvern (5.3) und Messungen auf Gemälden (5.4). Im letzten Teil werden die umfangreichen Reziprozitätstests an Gemälden und Mustertafeln mit Blauwoll-Lichtechtheitstypen und selbst hergestellten Farbaufstrichen präsentiert (5.5).

5.1 Weiterentwicklung des MFT-Auswertungsverfahrens

In konventionellen Lichtechtheitstests werden Blau-Woll-Standards (BWS) [66] genutzt, um die Lichtechtheit von Proben anhand einer achtstufigen Skala zu klassifizieren. Die acht Echtheitstypen reichen von BW1, dem lichtempfindlichsten Standard, bis zu BW8, dem lichtstabilsten Standard. Sie wurden 1914 nach längerer Forschungsarbeit vom Verein Deutscher Chemiker präsentiert [64] und sind seitdem de facto die Referenz für Lichtechtheitstests. Ein ähnliches System von Lichtechtheitsreferenzen wurde später in den USA entwickelt [68] (die Standards sind mit L2–L9 durchnummeriert), beide Systeme unterscheiden sich bei Herstellung und Anwendung [66].

Die Klassifizierung der Lichtechtheit einer Probe erfolgt mit Hilfe eines definierten Graumaßstabs [43], der verschiedene große Farbkontraste darstellt. Wenn eine belichtete Probe zur identischen, aber lichtgeschützten Referenzprobe einen Farbkontrast wie Graumaßstab Stufe 4 aufweist, wird die Probe dem Blau-Woll-Standard zugeordnet, der bei gleichen Bedingungen ebenfalls ähnlich wie Graumaßstab Stufe 4 ausgebleicht ist [66].

Bei MFT-Lichtechtheitstests ist ein visueller Abgleich zwischen belichteter und geschützter Probe wegen des keinen Messpunkts nicht möglich. Alternativ werden daher beim MFT zuerst die Veränderungen der BWS getestet, bevor Proben auf ihre Lichtechtheit hin getestet werden und mit den Veränderungen der BWS verglichen werden. Vergleichskriterium ist die absolute Farbveränderung zum Ende der Tests. Allerdings sind die BWS aufgrund ihrer Beschaffenheit und ihren Eigenschaften für die MFT-Messung nicht ideal (siehe Abschnitt 2.3).

In einer ersten Studie wurden aus den bestehenden BW-Lichtechtheitstypen Pulver- bzw. Pelletpräparationen hergestellt, die sich besser für die MFT-Messung eignen als die textilen Lichtechtheitstypen. Die Eigenschaften der neuen Präparationen wurden untersucht, diskutiert und der weitere Forschungsbedarf wurde aufgezeigt, um potentiell Weiterentwicklungen dieser Präparationen als Lichtechtheitsreferenz in MFT-Untersuchungen zu nutzen.

In der zweiten Studie wird eine Möglichkeit der Erweiterung für die MFT-Auswertung durch Einbezug der Farbveränderungsrate präsentiert. Dadurch finden v. a. ungewöhnliche Farbveränderungen eine zahlenmäßige Berücksichtigung bei der Klassifizierung. Das erweiterte Auswertungsverfahren wird vorgestellt, auf eine Reihe von Proben angewandt und mit dem bisherigen Auswertungsverfahren verglichen [97].

5.1.1 Pulver- und Pellet-Präparation der Blau-Woll-Standards

Die Blau-Woll-Standards wurden zur Klassifizierung der Lichtechtheit von Textilien entwickelt und werden nach wie vor auf diesem Gebiet eingesetzt. Aus Mangel an Alternativen nutzt man die BWS auch als Lichtechtheits-Referenz für *Microfading*-Untersuchungen. Dabei weisen die BWS einige Eigenschaften auf, die den Einsatz für MFT-Messungen erschweren. Als Textil ist die Oberfläche der BWS stark texturiert, d. h. es existiert praktisch kein flacher, homogener Messpunkt, da die Fäden des Textils einen Durchmesser von ca. 0,5 mm aufweisen, was der Größenordnung des MFT-Messpunkts (0,2–0,5 mm) entspricht. Zudem ist die Remission bei Textilien stark abhängig von der Orientierung zwischen Oberfläche und Messebene [98]. Um trotzdem eine MFT-Messung durchführen zu können, behilft man sich der Strategie auf dem Gewebe den *Twinkle-Spot* zu suchen [99], einen Messpunkt, der eine besonders hohe Remission aufweist. Dieser Messpunkt ist typischerweise auf einem „lokalen Maximum“ eines Gewebeabschnitts.

Eine weitere ungünstige Eigenschaft der BWS für MFT-Untersuchungen liegt darin, dass BW1 und BW2 die Reziprozität nicht einhalten. Zum einen wurde gefunden, dass bei MFT-Beleuchtungsstärke (größer als 0,1 Mlx) BW1 bei höheren Beleuchtungsstärken größere Veränderungen zeigt [89] – bei gleicher Belichtung. Im Vergleich von MFT-Analysen bei hoher Beleuchtungsstärke und Belichtungstests bei 200 lx zeigte sich für BW1 und BW2, dass bei gleicher Gesamtbelichtung die Veränderungen bei 200 lx größer sind als die Veränderungen durch die MFT-Belichtung [72] (siehe hierzu auch Abschnitt 5.5.4). Diese nicht triviale Abhängigkeit des Ausbleichens der BWS von der Beleuchtungsstärke macht es schwierig MFT-Ergebnisse als Grundlage für Beleuchtungsrichtlinien bei einer Beleuchtungsstärke von 200 lx oder weniger zu übertragen.

Eine weitere Schwierigkeit beim Einsatz der BWS als Referenz ist die Abhängigkeit des Ausbleichens von der spektralen Verteilung der Lichtquelle [100], insbesondere wenn UV-Anteile in der Beleuchtung vorhanden sind [101, 102]. Hinzu kommt, dass das Ausbleichen der BWS vom Sauerstoffanteil in der umgebenden Atmosphäre beeinflusst wird [49].

Alles in allem wirkt es so, dass bei MFT-Messungen die Blau-Woll-Standards nur mit einigen Kompromissen als „Standard“ eingesetzt werden können. Jedoch erfüllen sie für konventionelle Lichtechtheitstests unter den Norm-Bedingungen [66] für Textilien ihren Zweck und es wird bisweilen akzeptiert, dass eine Abweichung von einer halben BW-Stufe hinzunehmen ist [103]. Bei der Lichtechtheits-Klassifizierung können je nach Beleuchtungsart sogar Abweichungen bis zu einer Stufe auf der Blau-Woll-Skala auftreten [69].

Ideale Standards für MFT-Lichtechtheitstests sollten eine glatte und homogene Oberfläche aufweisen, reproduzierbare Farbveränderungen für verschiedene Beleuchtungsszenarien liefern und über den Größenordnungsbereich von 50 lx bis 10 Mlx die Reziprozität einhalten. Ein Teststreifen, der zumindest die erste Eigenschaft erfüllt, wurde im Jahr 2008 unter dem Namen *LightCheck Ultra* [70] präsentiert, speziell für den Einsatz im Museum. Diese Teststreifen sind jedoch deutlich empfindlicher als BW1 und werden zudem nicht mehr hergestellt, was eine Anwendung aktuell ausschließt.

Ein Ansatz zur Entwicklung von MFT-geeigneten Lichtechtheitsreferenzen liegt darin, die Farbstoffe, mit denen die BWS gefärbt sind [66], zu verlacken und Aufstriche anzufertigen – eine Idee, die bisher noch keine Umsetzung fand. Ein weiterer Ansatz besteht darin, die vorhandenen BWS zu manipulieren und in eine Form zu bringen, die für MFT-Untersuchungen geeignet ist. Im Folgenden wird dazu eine erste Testreihe präsentiert, bei der die BWS gemahlen wurden, um in Form von Pulvern und gepressten Pellets als

Lichtechtheitsreferenz zu dienen. Untersucht wird, inwieweit sich die neuen Formen als Lichtechtheitsreferenz eignen und mit den Eigenschaften der originalen BWS vergleichen lassen.

Probenherstellung

Quadratische Stücke (5 x 5 cm) der Blau-Woll-Standards wurden mit einer Retsch Schwingmühle MM400 im Retsch Application Lab (Wuppertal) zu Pulvern gemahlen. Die Partikelgröße der Pulver wurde mithilfe des HORIBA LA-960 Laser Particle Size Analyzer ermittelt (siehe Anhang C). Für die Pulver-Präparation wurde ein Teil der jeweiligen BW-Pulver auf einem Objektträger mit 1,20–1,50 mm Vertiefung glatt gestrichen (siehe Abbildung 10). Für die Pellet-Präparation wurden 0,3 g der Pulver abgewogen und mit einer Tablettenpresse bei einer Belastung von 5 t zu Pellets mit 13 mm Durchmesser und ca. 1,5 mm Höhe gepresst (siehe Abbildung 11). Die Pellet-Präparationen waren in sich stabil und transportfähig.

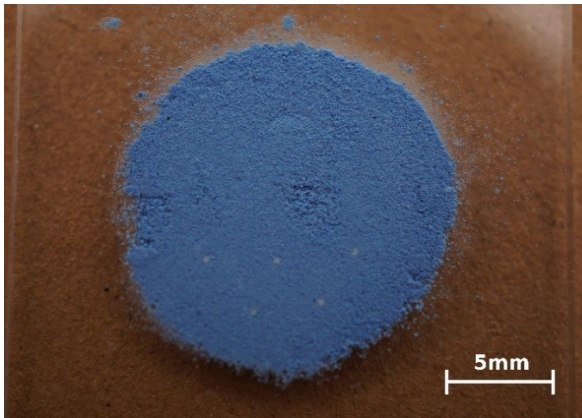


Abbildung 10: Pulver-Präparation von BW1

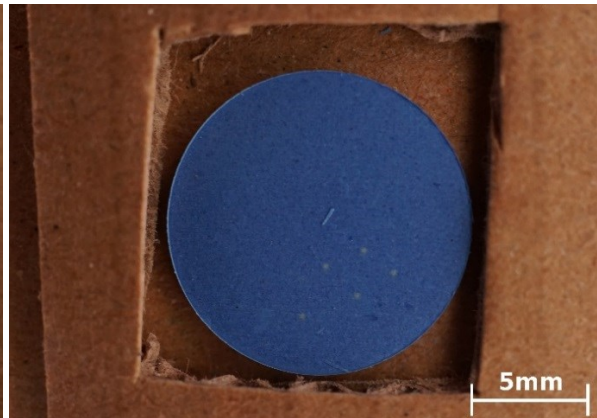


Abbildung 11: Pellet-Präparation von BW1

Vorgehen bei den Messungen

Die Messungen wurden bei den Standardeinstellungen des MFT (Abschnitt 4.2.6) durchgeführt. Im Messpunkt wurde während der Einzelmessungen eine Beleuchtungsstärke von 10,6–11,1 Mlx festgestellt. Dazu wurde jeweils das Remissionssignal maximiert, was bei den Pulvern und Pellets an jedem beliebigen Punkt möglich war, bei den Textilien musste jedoch ein *Twinkle-Spot* gesucht werden.

An jeder Probe wurden fünf Einzelmessungen an verschiedenen Messpunkten durchgeführt. Die Grobfokussierung fand mit einem Filter der optischen Dichte 5 (OD5) im Strahlengang statt, d. h. bei einem Transmissionsgrad von 0,00001. Die Feinfokussierung wurde mit einem OD3 Filter bei einem Transmissionsgrad von 0,001 durchgeführt. Der Fokussiervorgang dauerte insgesamt weniger als 10 Sekunden, so dass die Vor-Belichtung beim Fokussieren bei einer Gesamt-Belichtungszeit von 15 Minuten als vernachlässigbar angesehen werden kann.

5.1 Weiterentwicklung des MFT-Auswertungsverfahrens

Tabelle 8: Farbwerte der BWS-Präparationen vor dem Test und Farbveränderungen nach der Belichtung

BWS	Präparation	t = 0 min			t = 15 min			
		L* (σ)	a* (σ)	b* (σ)	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{00} (σ)
BW1	Textil	56,17 (3,60)	-2,45 (1,53)	-41,02 (1,46)	3,87	-2,85	10,11	4,35 (0,47)
	Pulver	69,57 (0,76)	-6,76 (0,21)	-25,84 (0,36)	8,42	-0,12	14,83	10,11 (0,23)
	Pellet	58,60 (0,85)	-4,98 (0,28)	-27,23 (0,80)	7,11	-2,18	12,39	8,79 (0,02)
BW2	Textil	55,82 (2,93)	-4,44 (1,42)	-39,06 (1,80)	1,40	0,24	4,97	2,31 (0,28)
	Pulver	65,80 (0,42)	-8,46 (0,09)	-22,79 (0,63)	3,86	1,54	5,41	4,18 (0,20)
	Pellet	51,65 (0,45)	-7,28 (0,07)	-25,64 (0,29)	2,93	0,78	3,39	3,27 (0,17)
BW3	Textil	53,84 (1,93)	6,74 (0,46)	-44,08 (2,13)	0,84	-0,35	1,64	1,02 (0,40)
	Pulver	71,44 (0,88)	-1,19 (0,20)	-26,85 (0,63)	2,98	-0,82	3,76	2,65 (0,10)
	Pellet	58,90 (0,73)	0,20 (0,09)	-31,70 (0,45)	2,24	-0,65	1,57	2,01 (0,18)

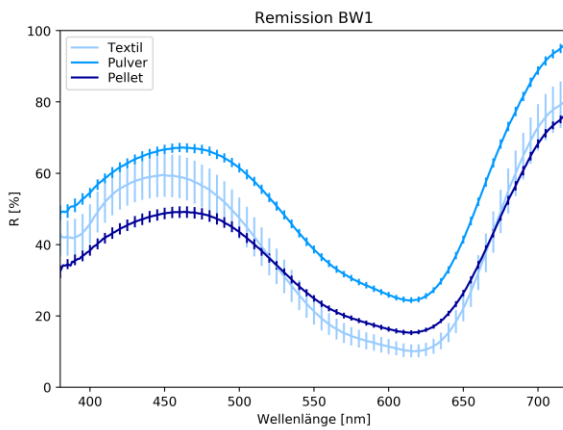


Abbildung 12: Remissionskurven der BW1-Präparationen

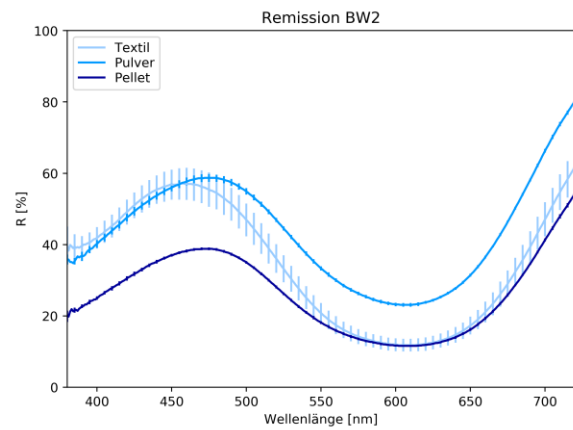


Abbildung 13: Remissionskurven der BW2-Präparationen

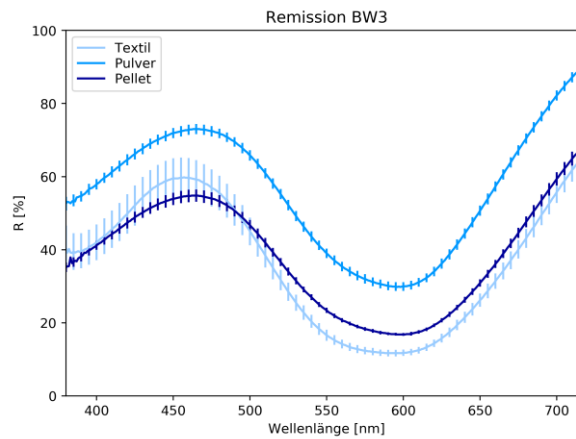


Abbildung 14: Remissionskurven der BW3-Präparationen

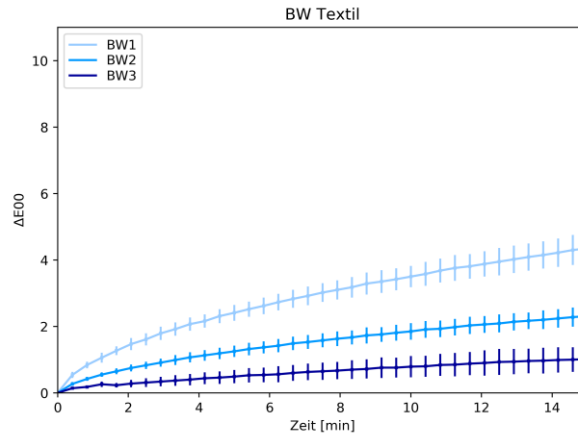


Abbildung 15: Veränderung der originalen BW1–BW3 Textilien im Test

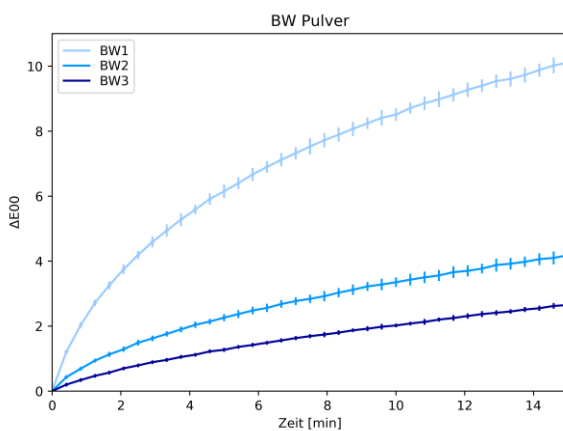


Abbildung 16: Veränderung der BW1–BW3 Pulver im Test

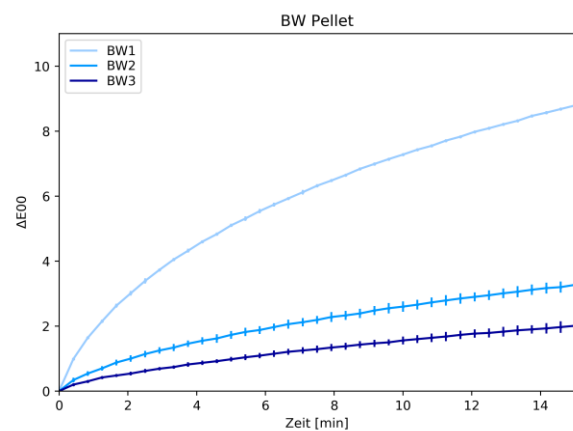


Abbildung 17: Veränderung der BW1–BW3 Pellets im Test

Ergebnisse

Die Pulver- und Pellet-Präparationen weisen eine flache und einheitliche Oberfläche auf. Nach 15 Minuten Belichtungszeit mit dem MFT können die Messpunkte mit bloßem Auge auf den Pellets und den Pulvern von BW1 (siehe je fünf Messpunkte auf Abbildung 10 und 11) und von BW2 erkannt werden. Das ist bei den Textilien nicht der Fall, obwohl die gemessenen Farbveränderungen auf dem BW1-Textil zum Ende der Tests ähnlich groß sind wie beim BW2-Pellet bzw. BW2-Pulver.

Die Remissions-Maxima (bei ca. 450 nm) der originalen BW-Textilien werden durch die Pulver- und Pellet-Präparation um ca. 10 nm rotverschoben (Abbildung 12–14). Die Absorptionsmaxima (Minima der Remission) liegen hingegen für Textil, Pulver und Pellet etwa bei der gleichen Wellenlänge.

Weiter zeigt sich, dass die Remission von BW1–BW3 für die Messungen an den Textilien im Maximum höher ist als für die entsprechenden Pellets. Das Absorptionsmaximum liegt hingegen niedriger (BW1 und BW3) oder gleichauf (BW2). Die Spektren der Remissionskurven der Pulver- und Pellet-Präparation verlaufen sehr ähnlich, jedoch liegen die Remissionswerte der Pulverpräparationen durchweg höher als die der Pellet-Präparationen. Außerdem ist die Standardabweichung der Remissionswerte der Pulver- und Pellet-Präparationen deutlich kleiner als bei den originalen Textilien – eine direkte Folge der homogenen Oberflächen. Die unterschiedlichen Remissionskurven bedingen unterschiedliche Farbwerte. Die CIELab-Werte von Pulver- und Pellet-Präparationen unterscheiden sich

von denen der BW-Textilien, v. a. der b^* -Wert ist deutlich kleiner als bei den Textilien (Tabelle 8). Die Helligkeit L^* der Pulver-Präparationen ist für alle drei BW-Standards im Vergleich mit den anderen Präparationen die jeweils höchste. Pulver- und Pellet-Präparationen unterscheiden sich vor allem in der Helligkeit L^* , weniger in den Buntkomponenten a^* bzw. b^* .

Die Farbveränderungen der BW-Standards im *Microfading*-Test verlaufen bei jeder Präparation qualitativ in ähnlicher Weise. Die Belichtung führt zu einer Aufhellung (Zunahme L^*), verbunden mit einer Abnahme der Blauheit (Zunahme b^*) und einer geringfügigen Änderung in a^* (Tabelle 8).

Quantitativ betrachtet ist nach den Tests die gemittelte Veränderung der Pulver am größten ($\Delta E_{00}=10,1$ bei BW1, Abbildung 16) gefolgt von der Veränderung auf den Pellet-Präparationen ($\Delta E_{00}=8,8$ bei BW1, Abbildung 17). Das originale BW1-Textil erfährt hingegen nur eine mittlere Veränderung von $\Delta E_{00}=4,4$ (Abbildung 15). Die Abweichungen der Einzelmessungen untereinander fallen bei den Pulver- bzw. Pellet-Präparationen teils deutlich niedriger aus als bei den originalen Textilien.

Vergleichsdaten für das Ausbleichen der BWS bei konventionellen Lichtechtheitstests liefert die CIE 157 [11]. Vergleichswert ist die Belichtung zum Erreichen einer Farbveränderung von $\Delta E_{00}=1,5$ (1 JND). Die nötige Belichtung für 1 JND ist für die BW1–BW3 Pulver und Pellets beim *Microfading* kleiner als bei den originalen Textilien bzw. bei den Referenzwerten aus der CIE 157 (siehe Tabelle 9). Für das BW3-Textil wurde 1 JND im Test nicht erreicht.

Tabelle 9: Belichtung [klxh] zum Erreichen der JND ($\Delta E_{00}=1,5$)

Material	BW1	BW2	BW3
Textil	390	1230	>2700
Pulver	105	465	1155
Pellet	135	735	1710
CIE 157	300	1000	3000

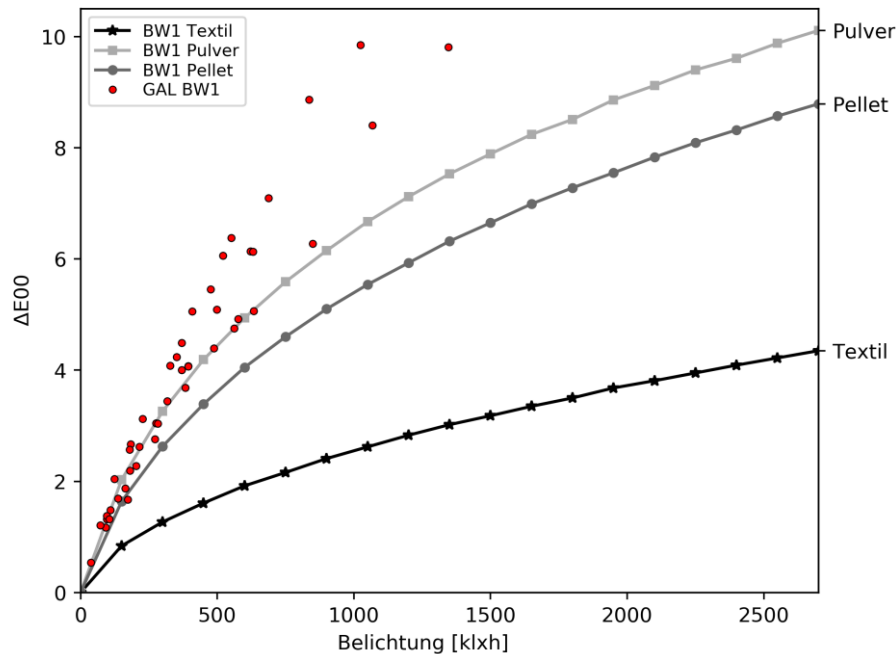


Abbildung 18: Veränderungen der BW1-Textilien bei 30–300 lx (GAL) und bei 10 Mlx mit dem MFT zusammen mit den Veränderungen der BW1 Pulver- und Pelletpräparation

Der Vergleich der Farbveränderungen der Pulver und Pellets beim *Microfading* mit den Veränderungen von BW1 bei Galerie-Beleuchtungsstärke (30–300 lx) zeigt, dass die Farbveränderungen von BW1-Pulver und BW1-Pellet bis zu einer Belichtung von ca. 500 klxh beim *Microfading* deutlich näher an den Farbveränderungen des BW1-Textils bei Galerie-Bedingungen liegen (Abbildung 18). Ab ca. 500 klxh fällt die Farbveränderungsrate der Pulver- und Pelletpräparationen beim *Microfading* im Vergleich zur Rate bei Galeriebelichtung auf dem originalen Textil ab, so dass auch hier Unterschiede auftreten. Die Veränderung des BW1-Textils im *Microfading* fällt insgesamt deutlich niedriger als bei Galerie-Belichtung aus, was im Fazit eine deutliche Abweichung von der Reziprozität darstellt (siehe Abschnitt 5.5.4).

Diskussion und Fazit

Mehrfachmessungen an den Pulver- und Pelletpräparationen führen zu einer deutlich geringeren Streuung der Einzelwerte als bei den originalen BW-Textilien, wodurch eine bessere Reproduzierbarkeit der Messergebnisse erreicht wird. Der Grund für diesen Vorteil liegt in der flachen und sehr gleichmäßigen Oberfläche der Pellets, aber auch der Pulver. Damit geht einher, dass das Fokussieren beim Vorbereiten der Messung leichter und schneller zu bewerkstelligen ist als bei den textilen Referenzen, da die Suche nach dem *Twinkle-Spot* mit maximaler Remission wegfällt. Ein weiterer Vorteil gegenüber dem originalen Textil ist, dass nach dem Test für 15 Minuten an den BW1 und BW2 Pulvern und Pellets die Farbveränderungen mit bloßem Auge sichtbar sind, wodurch eine Sichtkontrolle des Farbverlusts möglich wird.

Die Unterschiede im Remissionsverhalten zwischen den Pellet- und den Pulver-Präparationen sind vorrangig auf Differenzen der Oberflächenbeschaffenheit der Testkörper zurückzuführen. Die Pulver weisen eine größere Texturierung der Oberfläche auf als die Pellets, was insgesamt zu einer erhöhten Streuung führt und die höhere Remission erklärt. Durch den Pressvorgang beim Herstellen der Pellets erhöht sich die Volumenkonzentration der Farbstoffe – die Ursache für die größeren Buntheitswerte der Pellets.

Für alle drei BWS ist die Farbveränderung der Pulver-Präparation beim *Microfading*-Test am größten, gefolgt von der Veränderung der Pellet-Präparation. Da Farbveränderungen im Wesentlichen an der Oberfläche stattfinden [104], beeinflusst die Struktur der Oberfläche maßgeblich die Geschwindigkeit, mit der die Prozesse, die zur Farbveränderung führen, stattfinden. Sauerstoff spielt eine Rolle bei den Farbveränderungen der BWS [49]. Bei losen Pulvern ist eine höhere Sauerstoffzufuhr aus der Umgebung gewährleistet als bei flachen Pellets, was die größeren Farbveränderungen erklären könnte. Allerdings können bei der Pellet-Herstellung Agglomerations-Prozesse die Teilchen-Größe verändert haben und der Einfluss der Teilchengröße auf die Lichteinheit dominiert [105].

Dieser Einfluss der Teilchengröße auf das Farbveränderungsverhalten [106] sollte eingehend untersucht werden, da die Pulver nach Herstellung leicht unterschiedliche Teilchengrößenverteilungen aufwiesen (Anhang C).

Bei entsprechender Laborausstattung lassen sich sowohl die Pulver als auch die Pellets mit relativ geringem Aufwand in einer Stückzahl herstellen, die für MFT-Anwender ausreichend ist. Die Pellets mit 13 mm Durchmesser haben eine ausreichende Größe um an ihnen konventionelle Farbmessungen, z. B. für Reziprozitätstests, durchzuführen.

Die Pulver und Pellets erfüllen den Teil der Anforderungen an Lichtechtheitsreferenzen für MFT, der die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse und die Handhabbarkeit der Referenzen betrifft. In Bezug auf die Vergleichbarkeit mit bestehenden BWS-Referenzen wurden bei MFT-Beleuchtungsstärke die Unterschiede aufgezeigt.

Bevor jedoch eine genauere Aussage darüber getroffen werden kann, inwieweit die Blau-Woll-Pulver oder -Pellets als Lichtechtheitsreferenz für *Microfading*-Tests und ggf. andere Testverfahren herangezogen werden können, muss der Einfluss der Teilchengröße auf die Lichtechtheit untersucht werden. Zudem sind die Präparationen auf ihr Reziprozitätsverhalten hin zu analysieren und die Abhängigkeit der Farbveränderungen von weiteren Einflüssen, wie dem Präparationsverfahren und dem Sauerstoffanteil in der Umgebung, zu klären.

Dazu war im Rahmen dieser Studie keine Gelegenheit, trotzdem liefern die Untersuchungen erste Ansatzpunkte für die Entwicklung MFT-angepasster Lichtechtheitsreferenzen. Solange dies nicht erfolgt ist, gibt es für MFT-Untersuchungen kaum praktische Alternativen zu den textilen BWS, um eine Differenzierung der Lichtechtheit, die detaillierter als „relativ lichtstabil“ und „lichtempfindlich“ ist, vorzunehmen.

In diesem Zusammenhang sollte das Farbveränderungsverhalten von BW1 bei MFT-Untersuchungen einer eingehenderen Prüfung unterzogen werden und geklärt werden, in welchem Material oder in welchen Umgebungsbedingungen die Ursachen für die nicht triviale Abweichung von der Reziprozität bei BW1 [72, 89] liegen.

Im Fazit bilden die BW-Pulver bzw. BW-Pellets einen neuen Ansatzpunkt für MFT-spezifische Lichtechtheitstypen, deren Vorteile in der besseren Handhabbarkeit und erhöhten Reproduzierbarkeit der Messergebnisse im Vergleich zu den klassischen BW-Textilien liegen.

5.1.2 Einführung der Farbveränderungsrate in die MFT-Auswertung

Im Standard-Verfahren zur Klassifizierung der Lichtechtheit einer Probe werden absolute Farbveränderungen nach einer definierten Belichtung mit Lichtechtheitsreferenzen verglichen [66]. Bei der Auswertung von MFT-Untersuchungen, mit deren Hilfe die Lichtechtheit von Kunst- und Kulturgütern bestimmt wird [50], wird das Verfahren der konventionellen Lichtechtheits-Klassifizierung auf die Auswertungsmöglichkeiten des MFT angepasst und die absolute Farbveränderung einer Probe mit den Farbveränderungen der BWS unter denselben Messbedingungen verglichen.

Dieses Verfahren lässt außer Acht, dass bestimmte Materialien besondere Eigenheiten im Ausbleichverhalten haben, d. h. beispielsweise eine exponentielle Zunahme der Farbveränderungen über die Belichtungszeit aufweisen, wie es bei einzelnen Azofarbstoffen auf Zellulose beobachtet wurde [73, 107]. Das führt dazu, dass beim Vergleich von absoluten Farbveränderungen solche Materialien in ihrer Lichtechtheit unterschätzt werden.

Im Folgenden wird ein Verfahren zur Klassifizierung der Lichtechtheit vorgestellt, das unter Einbezug der Farbveränderungsrate eine Verbesserung der bisherigen Klassifizierung in MFT-Untersuchungen zur Folge hat. Zur Ermittlung der Farbveränderungsrate wird eine Potenzfunktion zum empirischen Fitting der Messdaten genutzt. Das erweiterte Lichtechtheits-Klassifizierungsverfahren wird auf eine Testreihe von 44 Mustern angewandt, um die praktische Relevanz zu demonstrieren. Ein entscheidender Vorteil der Methode ist, dass das Farbveränderungsverhalten mit quantitativen Zahlenwerten erfasst wird und mit der Farbveränderungsrate das Potential von Farbverlust detaillierter prognostiziert werden kann als durch die alleinige Klassifizierung nach absoluten Farbveränderungen, wie in der Publikation zum Verfahren dargestellt [97].

Klassifizierung der Proben

Für die Zuordnung der Messergebnisse aus den MFT-Untersuchungen zu den Lichtechtheitskategorien aus den BWS wurde bisher kein einheitliches Schema entwickelt. Einigkeit herrscht bei den MFT-Nutzern über das grundsätzliche Vorgehen, dass die gemessenen Farbveränderungen in Bezug zu den Farbveränderungen der auf gleicher Weise getesteten BWS gesetzt werden. D. h. wenn bei einer Probe eine Farbveränderung auftritt, die am Ende der Testbelichtung so groß ist wie die von BW1 unter gleichen Bedingungen, wird der Probe eine Lichtechtheit wie BW1 zugeschrieben.

Zur Zuordnung der Messergebnisse zu den BW-Lichtechtheitstypen wird ein Klassifizierungsschema benötigt. Eine Variante besteht in einer linearen Approximation zwischen den Farbveränderungen aufeinanderfolgender BWS, z. B. zwischen BW1 und BW2. Die Farbveränderungen zum Ende der Tests werden als Grenzen für die Approximation gesetzt, der Bereich dazwischen wird interpoliert und die Messergebnisse werden auf eine Kommastelle genau zugeordnet [61, 71]. Das führt zu neuen, hypothetischen Kategorien (beispielsweise BW1,3), die keinen realen Lichtechtheitstyp als Entsprechung haben.

Oft wird dieses Schema vereinfacht und lediglich jeweils eine Zwischenkategorien, wie BW1,5 (oder BW1-2), eingeführt [49, 54, 55]. Im System von Druzik [55] werden Mittelwerte zwischen den Farbveränderungen der BWS gebildet, um die Zwischenkategorien zu ermitteln. Die Grenze einer Zwischenkategorie wird wiederum aus einer Mittelung der Farbveränderungen der BWS und der Zwischenkategorie errechnet. Del Hoyo-Melendez et. al. [54] nutzen relativ scharfe Grenzen für die BWS selbst, die um den letzten gemessenen Wert der Farbveränderung gezogen werden. Der Bereich zwischen der Farbveränderung von BW1 und BW2 wird dann komplett der Kategorie BW1-2 zugeordnet.

Welches System Anwendung findet, ist letztlich eine Frage konservativer Belange. Für die weiteren Ausführungen wird hier das Schema von Druzik [55] verwendet, d. h. Mittelwerte der Farbveränderungen zwischen zwei aufeinanderfolgenden BWS bilden die Grenzen für die Stufen der Lichtecktheitsklassifizierung.

Mathematisches Modell und Fitting der Kurve

Ein allgemeines, mathematisches Modell zur Beschreibung von Farbveränderungen durch Licht bzw. allgemeiner durch elektromagnetische Strahlung existiert nicht. Nach Giles [5] können die auftretenden Veränderungen in fünf Typen eingeteilt werden. Diese Einteilung wurde auf Grundlage von Konzentrationsänderungen der Farbstoffe abgeleitet. Die fünf Ausbleich-Typen (*Fading characteristics* [5]) wurden von Cristea & Vilarem [108] auf die Perspektive der Farbveränderung übertragen (siehe Abbildung 19). Bei normalen Beleuchtungsbedingungen ist für Farbstoffe häufig *Type II* zu finden, für Pigmente eher *Type III* [5].

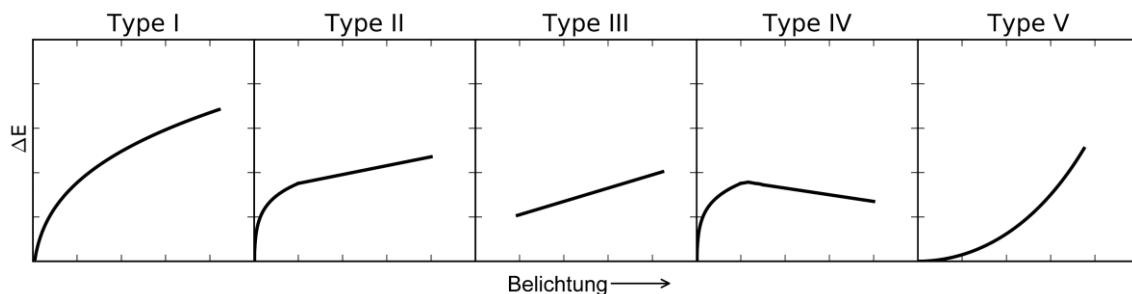


Abbildung 19: Fünf charakteristische Farbveränderungs-Typen nach Giles [5] in Anlehnung an Cristea & Vilarem [108]

Diese gemessenen Farbveränderungen können mathematisch beschrieben werden. Eine dafür geeignete Funktion bildet in Annäherung die Potenzfunktion [109]. Eine allgemeine Potenzfunktion wie

$$\Delta E(t) = a \cdot t^b$$

beschreibt die Farbveränderung $\Delta E(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t (oder der Belichtung). Die Parameter a und b ermöglichen eine Anpassung der Kurve an die Messwerte. Mit dieser Funktion können typische Farbveränderungen nach Giles *Type I–III* beschrieben werden. Im Falle einer linearen Farbveränderung, wie bei Giles *Type III*, reduziert sich die Potenzfunktion auf ein lineares Modell. Die Potenzfunktion erlaubt in Annäherung eine Beschreibung von exponentiellen Farbveränderungen (Giles *Type V*).

Ist eine Reihe von Messwerten mit der obigen Potenzfunktion gefittet, kann mithilfe der Fit-Parameter die Ableitung der Potenzfunktion gebildet werden, die die Farbveränderungsrate $\Delta E'(t)$ in Abhängigkeit der Zeit t (oder der Belichtung) beschreibt:

$$\Delta E'(t) = a \cdot b \cdot t^{b-1}.$$

Die Farbveränderungsrate zu einem bestimmten Zeitpunkt (z. B. zum Ende der Testbelichtung) ergibt sich durch Einsetzen der entsprechenden Werte in die Fit-Funktion.

Fitting der Blauwoll-Standards

Die mathematischen Fittings wurden mit Hilfe der *python scipy* Routine *curve_fit* [110] durchgeführt. Diese Routine optimiert die Eingabefunktion mit Hilfe eines *Least-Squares*-Algorithmus. Für die Messungen an den BWS und den Proben wurden die Standard-einstellungen des MFT (siehe 4.2.6) verwendet, mit UV- und IR-Filter im Strahlengang. Während eines einzelnen Tests wurden die Proben mit ca. 3,5 Mlxh bei einer Beleuchtungsstärke von 14 Mlx und einer Testdauer von 15 Minuten belichtet.

Vor den MFT-Untersuchungen an den BWS wurde die Weiß-Referenz (PTFE) dreimal getestet, um den instrumentellen Drift (siehe Abschnitt 4.2.5) zu bestimmen. Die Blauwollstandards wurde ebenfalls dreimal getestet und Mittelwerte sowie Standardabweichungen gebildet.

Der instrumentelle Drift blieb während der Belichtungsdauer von 15 Minuten im Mittel unter dem Wert von $\Delta E_{00}=0,1$ (siehe Abbildung 20). Die minimalen Veränderungen stellen ein Schwanken um die Ausgangsfarbwerte dar.

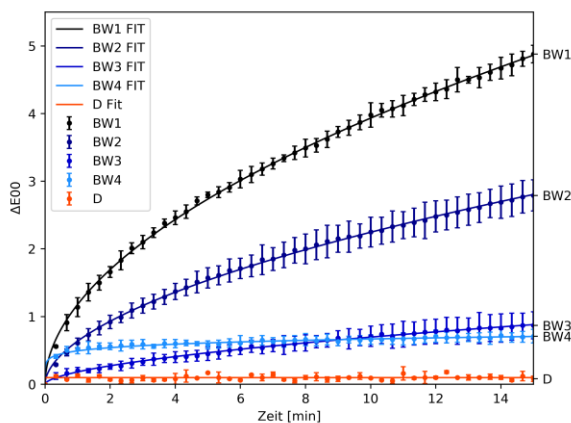


Abbildung 20: Messwerte und gefittete Kurven von BW1–BW4 und Drift-Level D

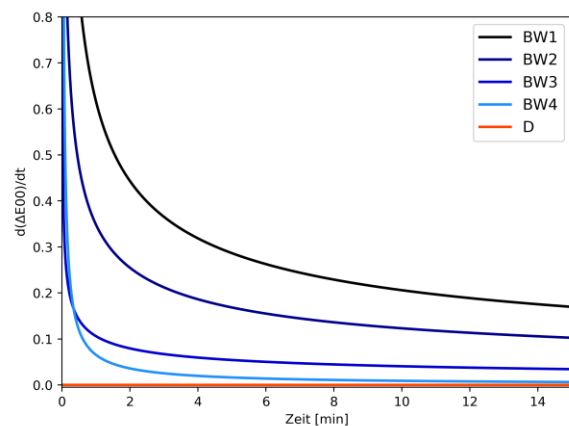


Abbildung 21: Farbveränderungsrate für BW1–BW4 über die Zeit (Fitting)

Während der Messungen an den BWS sind qualitative Unterschiede im Farbveränderungsverhalten zwischen BW1–BW3 einerseits und BW4 andererseits festzustellen. BW1–BW3 entsprechen nach ihren *Fading Characteristics* [5] eher einem *Type I* während BW4 ein *Type III* zeigt. Es fällt zudem auf, dass bei BW4 zu Beginn der Testbelichtung ein schneller Anstieg um etwa $\Delta E_{00}=0,5$ registriert wird, gefolgt von einem linearen, aber geringen Anstieg der Farbveränderung. Dadurch ist die Farbveränderung von BW4 in den ersten neun Minuten des Tests größer als die Veränderung von BW3. Beide bleiben aber bis zum Ende des Tests unterhalb des Werts von $\Delta E_{00}=1,5$ (1 JND). Der Zeitpunkt, wann die Veränderung von BW3 größer ist als die Veränderung von BW4 ist abhängig von der Wahl der Farbabstandsformel.⁹ Der sprunghafte Anstieg der Farbveränderung von BW4 bei *Microfading*-Tests wurde bereits bei anderen Messungen festgestellt [61, 73]; eine Erklärung fehlt bislang [73].

Die gemessenen absoluten Farbveränderungen für BW1–BW3 lassen sich über die gesamte Testdauer von 15 Minuten klar unterscheiden (Abbildung 20).

⁹ Der Einfluss der Farbabstandsformel auf die relativen Zusammenhänge zwischen den Farbveränderungen wird hier nicht weiter diskutiert. Da gegenwärtig ΔE_{00} als Standard angesehen wird, werden, wie in Abschnitt 2.3 diskutiert, andere Farbabstandsformeln nicht berücksichtigt, weiterführende Diskussionen finden sich in der Literatur [34, 55].

Die Farbveränderung durch die Belichtung im Test erreicht bei BW1 ein $\Delta E_{00}=4,9$, bei BW2 ein $\Delta E_{00}=2,8$, bei BW3 ein $\Delta E_{00}=0,9$ und bei BW4 ein $\Delta E_{00}=0,7$. Alle Farbveränderungen der BWS sind derart, dass die Helligkeit L^* zunimmt, während die Buntheit C^* abnimmt.

Die gefitteten Kurven für die Farbveränderungen liegen nahe bei den Messwerten (Abbildung 20). Die Fehler der Fit-Parameter sind klein im Vergleich zu den Parametern selbst (siehe Tabelle 10). Bei den Fit-Parametern wird der qualitative Unterschied im Ausbleich-Verhalten ebenfalls abgebildet. Für BW1–BW3 liegt Parameter b für den Exponenten bei ca. 0,5, was das quadratwurzelförmige Verhalten der Farbveränderungen widerspiegelt. Für BW4 nimmt der Exponent im Fitting einen deutlich kleineren Wert an ($b=0,13$).

Mit den gefitteten Kurven und deren Parametern lassen sich die Ableitungen bestimmen und so die Raten der Farbveränderung berechnen und darstellen (siehe Abbildung 21). Die aus den Fittings abgeleiteten Farbveränderungsraten sind zu Beginn groß und fallen dann ab. Bei der Betrachtung der gefitteten Rate der Farbveränderung lassen sich die Standards BW1–BW4 ab $t=1$ min klar voneinander unterscheiden.

Tabelle 10: Fitting-Parameter für die BWS und die Detektionsgrenze D sowie die Farbveränderungsrate zum Ende der Tests

BWS	a (σ)	b (σ)	$\Delta E'$ [15min] (σ)
BW1	1,1784 (0,0038)	0,5234 (0,0014)	0,1697 (0,0010)
BW2	0,6361 (0,0025)	0,5479 (0,0017)	0,1024 (0,0007)
BW3	0,1819 (0,0022)	0,5826 (0,0052)	0,0342 (0,0007)
BW4	0,4927 (0,0038)	0,1327 (0,0037)	0,0062 (0,0002)
D	0,0973 (0,0046)	0,0000 (0,0240)	0,0000 (0,0002)

Schema der BW-Klassifizierung mit Einbezug der Farbveränderungsrate

Aus den Messergebnissen werden die Intervallgrenzen für die BW-Kategorien abgeleitet, so dass ein Klassifizierungssystem für Messwerte von Proben vorliegt (Tabelle 11). Angewandt wird das System von Druzik et. al. [55], das die Mittelwerte zum Ende der Test zwischen den BW-Messkurven als Grenzen der Kategorien vorsieht (siehe Tabelle 11). Die Kategorie für BW1 wird symmetrisch um den Messwert von BW1 gewählt. Als Grund hierfür werden konservatorische Belange angeführt, denn eine breite Wahl des BW1-Intervalls würde Testergebnisse als BW1 klassifizieren, die von der Empfindlichkeit weit darüber liegen¹⁰ – unbeachtet sei für diesen Zweck die Reziprozitätsabweichung von BW1 (siehe Abschnitt 5.5.4 und [111]). Für BW4 liegt die untere Intervallgrenze beim Mittelwert aus dem Detektionsgrenze D und der Farbveränderung von BW4.

Nach dem gleichen Schema werden die Intervallgrenzen für die Zuordnung nach der Farbveränderungsrate zum Ende der Tests ermittelt, die aus Fitting und Ableitung bestimmt werden (siehe Tabelle 11). Die Auswertung zum Ende der Tests hat den Vorteil, dass die größte Menge erhobener Daten für die Klassifizierung mit berücksichtigt wird. Eine vorzeitige Auswertung (z. B. bei Abbruch der Tests) ist nach dem gleichen Verfahren zum Zeitpunkt des Abbruchs möglich.

¹⁰ Eine Objekt, bei dem lichtempfindliche Stoffe der Lichtechtheit BW3 - BW1 oder noch empfindlicher festgestellt wurden, gilt nach CIE 157 [11] als hoch lichtempfindlich. Ist die Lichtechtheit geringer als BW1 ist bei direkter Sonneneinstrahlung innerhalb von wenigen Stunden mit Farbveränderungen zu rechnen. Beleuchtungsrichtlinien raten von einer dauerhaften Ausstellung von Objekten mit BW1-Klassifizierung dringend ab [12, 71].

Tabelle 11: Intervalle zur BWS-Klassifizierung nach absoluten Farbdifferenzen (ABS) und nach der Farbveränderungsrate (RATE) - jeweils zum Testende nach 15 Minuten MFT-Belichtung

BWS	ABS [ΔE]	RATE [$\Delta E'$]
<BW1	$5,92 \leq \Delta E$	$0,2033 \leq \Delta E'$
BW1	$3,83 \leq \Delta E < 5,92$	$0,1361 \leq \Delta E' < 0,2033$
BW2	$1,83 \leq \Delta E < 3,83$	$0,0683 \leq \Delta E' < 0,1361$
BW3	$0,79 \leq \Delta E < 1,83$	$0,0202 \leq \Delta E' < 0,0683$
BW4	$0,41 \leq \Delta E < 0,79$	$0,0031 \leq \Delta E' < 0,0202$
>BW4	$\Delta E < 0,41$	$\Delta E' < 0,0031$

Für die Klassifizierung der Lichteinheit eines Musters ist folgendes Auswerteschema vorgesehen: Zuerst wird die Lichteinheit aus den Messwerten nach der herkömmlichen Weise durch den Vergleich der absoluten Farbveränderung mit den BWS bestimmt. Als neuer, zweiter Schritt wird die aus dem Fit abgeleitete Farbveränderungsrate mit den Farbveränderungsraten der BWS verglichen, was zu einer zweiten Klassifizierung führt. Beide Klassifizierungen werden als Ergebnis der Messung dokumentiert, im Falle von Abweichungen gilt diejenige Klassifizierung, die eine geringere Lichteinheit zuweist.

Anwendung der Klassifizierung über die Farbveränderungsrate

Zur Anwendung der Klassifizierung über die Farbveränderungsrate wurden 44 Muster aus dem Buch „Lackfarbstoffe“ der IG Farben [112] aus dem Bestand der Historischen Farbstoffsammlung der TU Dresden herangezogen. Diese Muster wurden als Beispiel ausgewählt, da sie in einer historischen Lichteinheits-Klassifizierung¹¹ als „sehr lichtempfindlich“ bzw. „lichtempfindlich“ beschrieben wurden und in der MFT-Untersuchung ein breites Spektrum an Farbveränderungsverhalten zeigten.

Jedes Muster wurde einmal bei den gleichen Bedingungen wie die BWS auf Lichteinheit hin getestet (Messkurven siehe Anhang D). In der Folge wurden wie oben die Farbveränderungen über die Zeit gefittet, die Ableitungen gebildet und die Farbveränderungsraten bestimmt.

Die Muster zeigten bei Klassifizierung nach den absoluten Farbveränderungen im Test Lichteinheiten, die von stabiler als BW4 (>BW4) bis zu empfindlicher als BW1 (<BW1) reichten. Bei Klassifizierung nach der Farbveränderungsrate reichte das Spektrum der zugeordneten Lichteinheiten von BW4 bis <BW1. Die Verteilung war in beiden Fällen unterschiedlich.

Beim Vergleich mit der Klassifizierung nach absoluten Farbabständen wurden bei der Klassifizierung nach der Farbveränderungsrate insgesamt 12 Muster eine BW-Kategorie lichtempfindlicher eingestuft. Muster #31 wurde sogar zwei BW-Stufen lichtempfindlicher eingestuft, Muster #26 wurde eine Stufe lichtstabiler eingestuft (siehe Abbildung 22 und die folgende Diskussion).

Bei genauer Analyse der Farbveränderungskurven stellt man fest, dass Unterschiede in der BW-Klassifizierung vor allem dann auftreten, wenn die Muster ein Farbveränderungsverhalten zeigen, das sich vom Verhalten der BWS unterscheidet. Dies sind Veränderungen nach Giles *Type III* (lineare Farbveränderungen, v. a. Muster #5, #7, #8, #32, Anhang D) sowie nach Giles *Type V* (exponentielle Farbveränderungen, v. a. Muster #9, #31, Anhang D).

¹¹ Eine Recherche nach der Definition der historischen Lichteinheitsklassifizierungen im Buch lieferte kein Ergebnis.

Diskussion

Das Drift-Level für die MFT-Messungen war mit $\Delta E_{00}=0,1$ klein im Vergleich zu anderen Untersuchungen [13, 60] und auch kleiner als bei der Bestimmung in Kapitel 4.2.5. Dies kann an der geringfügig geänderten Lampenkonfiguration liegen, die über die Vielzahl an Messreihen durchgenommen wurde. Unabhängig davon besteht jedoch kein Zweifel, dass bei einer lichtechten Probe wie dem Weiß-Standard kein Drift auftreten sollte – insbesondere wenn die Lampe ausreichend vorgewärmt wurde und das Diodenarray im Spektrometer ausreichend gekühlt wird. Beides war während der Tests der Fall.

Die Farbveränderungen der Lichtechtheitstypen BW1–BW3 lassen sich nach der absoluten Veränderung durch die MFT-Untersuchung klar unterscheiden, was durch mehrere Arbeiten belegt ist [13, 50]. Zusätzlich wurde BW4 gemessen, trotz fehlender UV-Anteile im Spektrum der Beleuchtung [102] wurden Farbveränderungen bis zu $\Delta E_{00}=0,7$ gemessen. Der sprunghafte Anstieg der Farbveränderung beim Test an BW4 wirft Fragen nach den Ursachen auf, die in den verwendeten Farbstoffen und Textilien [66] zu suchen sind, aber nach wie vor unklar sind [61, 73].

Im Test erfahren BW3 und BW4 nur Farbveränderungen kleiner als die *Just Noticeable Difference* (JND) von $\Delta E_{00}=1,5$. Dies ist nach CIE-Empfehlung [11] in etwa die Größenordnung, die für die konventionelle Bestimmung der Lichtechtheit [66] nötig ist und der Grund warum bei den meisten MFT-Untersuchungen nur Klassifizierungen bis BW3 vorgenommen werden.

Tabelle 12: Übersicht der absoluten Farbveränderungen ΔE und der Farbveränderungsraten $\Delta E'$ aus den Fittings zum Testende mit den jeweils resultierenden BWS-Klassifizierungen

#	ΔE	$\Delta E'$	ABS	RATE	#	ΔE	$\Delta E'$	ABS	RATE
BW1	4,88	0,1697	1	1	21	1,19	0,0210	3	3
BW2	2,79	0,1024	2	2	22	1,05	0,0376	3	3
BW3	0,87	0,0342	3	3	23	1,52	0,0482	3	3
BW4	0,71	0,0062	4	4	24	0,34	0,0091	>4	4
1	2,22	0,0919	2	2	25	2,51	0,1090	2	2
2	1,16	0,0545	3	3	26	0,92	0,0196	3	4
3	0,72	0,0129	4	4	27	1,47	0,0609	3	3
4	0,68	0,0165	4	4	28	2,05	0,0823	2	2
5	3,37	0,1746	2	1	29	0,63	0,0226	4	3
6	2,73	0,0794	2	2	30	0,65	0,0245	4	3
7	3,05	0,1691	2	1	31	0,71	0,0726	4	2
8	3,93	0,2336	1	<1	32	3,86	0,2101	1	<1
9	1,92	0,1560	2	1	33	5,16	0,3108	1	<1
10	1,45	0,0556	3	3	34	1,95	0,1064	2	2
11	0,45	0,0076	4	4	35	0,33	0,0039	>4	4
12	0,98	0,0268	3	3	36	6,50	0,7454	<1	<1
13	0,94	0,0364	3	3	37	1,33	0,0645	3	3
14	0,63	0,0161	4	4	38	2,46	0,1065	2	2
15	0,55	0,0166	4	4	39	4,15	0,1549	1	1
16	0,40	0,0090	>4	4	40	2,36	0,0750	2	2
17	0,46	0,0069	4	4	41	4,30	0,1747	1	1
18	0,79	0,0281	3	3	42	1,66	0,0506	3	3
19	0,69	0,0304	4	3	43	1,65	0,0634	3	3
20	0,61	0,0126	4	4	44	1,58	0,0456	3	3

Für das Schema der Klassifizierung wurden hier die typischen vier Lichtecktheitskategorien BW1–BW4 gewählt, ergänzt um die Kategorien „empfindlicher als BW1“ (<BW1) und „stabiler als BW4“ (>BW4). BW1 und BW2 lassen sich sowohl hinsichtlich absoluter Farbveränderung als auch hinsichtlich Farbveränderungsrate klar unterscheiden. Der Unterschied zwischen BW3 und BW4 fällt nach absoluter Farbveränderung in der Testbelichtung sehr gering aus, während er nach der Rate der Farbveränderung deutlich ist (Tabelle 12).

Die Unsicherheiten der Fittings unter Berücksichtigung der Messfehler sind für BW1–BW4 klein im Vergleich zu den ermittelten Fit-Parametern (Tabelle 10), d. h. die Potenz-Funktion ist für die Beschreibung der Farbveränderungskurven von BW1–BW4 bei den Messbedingungen gut geeignet.

Die Berücksichtigung der Farbveränderungsrate für die Lichtecktheits-Klassifizierung der Proben führt in 14 von 44 untersuchten Fällen zu anderen, fast ausschließlich lichtempfindlicheren Klassifizierungen. Dies betrifft v. a. Proben, die ein anderes Ausbleich-Verhalten im Test zeigen als die Blau-Woll-Lichtecktheitsstypen. Bei diesen Proben unterschätzt die herkömmliche Auswertungsmethode mit absoluten Farbveränderungen das zukünftige Veränderungsverhalten, da die Rate der Veränderung höher liegt als bei den BWS und dementsprechend größere Veränderungen bei zukünftiger Belichtung zu erwarten sind. Für die Übertragung der Ergebnisse auf Beleuchtungsszenarien mit niedrigerer Beleuchtungsstärke als im MFT ist jedoch Voraussetzung, dass die Reziprozität erhalten ist (was nicht ohne Weiteres angenommen werden kann).

Wählt man ein anderes Schema zur Klassifizierung der Lichtecktheit als hier, beispielsweise mit den Zwischenstufen wie BW1-2, so werden bei den 44 Testproben sieben Proben einer höheren Lichtecktheitsstufe zugeordnet. Wie viele Sub-Kategorien oder welche Interpolationsarten zwischen den BW-Farbveränderungsstufen gewählt werden ist letztlich eine Frage von konservatorischen Belangen.

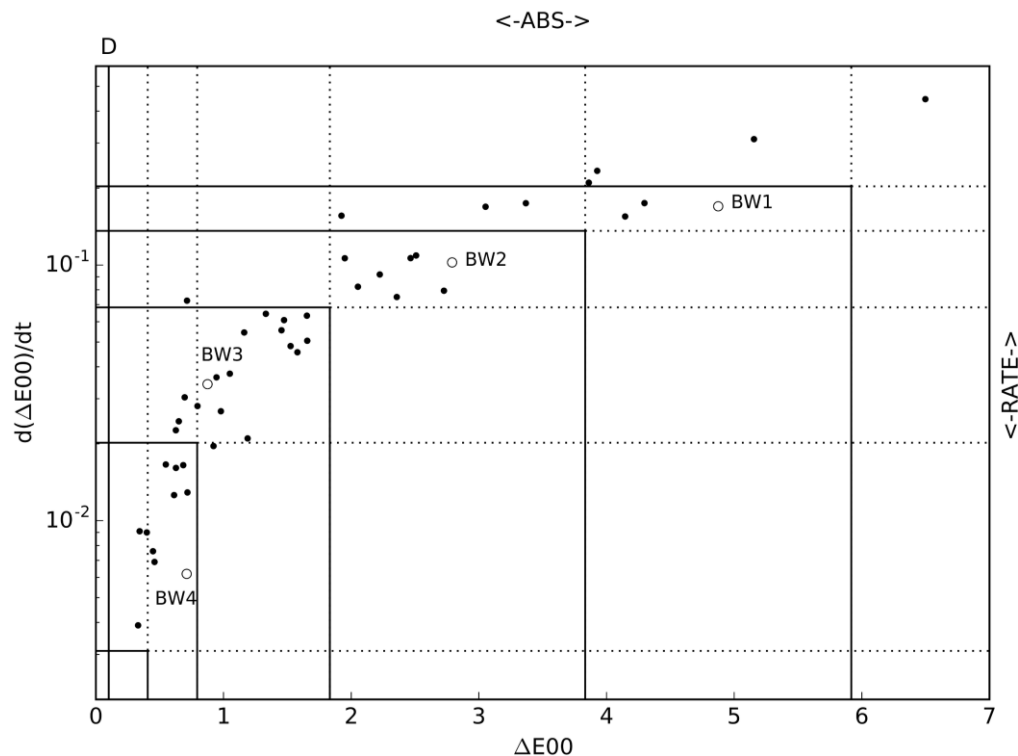


Abbildung 22: Farbveränderungsrate und absolute Farbveränderung der 44 Proben im Vergleich zu den BWS und dem Drift-Level D. Grenzen der BW-Kategorien sind durch vertikale (ABS) bzw. horizontale Linien (RATE) dargestellt.

Der mathematische Aufwand zur Bestimmung der Fittings ist gering, die nötigen Routinen werden von vielen Software-Bibliotheken zur Verfügung gestellt. Eine Vereinfachung wäre möglich, indem man auf ein Fitting der Kurven verzichtet und lediglich die Farbveränderungsrate aus den letzten beiden Messpunkten bestimmt. Dabei verliert man die Information über das Farbveränderungsverhalten, das im Exponenten der Potenzfunktion steckt und zusätzlich müssen die Messungen auf Messfehler überprüft werden. Alternativ kann das Farbveränderungsverhalten im *Microfading*-Test auch mit Worten beschrieben werden [113], was aber nicht die Prägnanz eines numerischen Wertes hat.

In dem Zusammenhang sei erwähnt, dass die Wahl eines Vergleichspunkts für die Auswertung der Messergebnisse letztlich willkürlich ist. Das Ende der Messung als Vergleichspunkt hat den Vorteil, dass man auf den maximal verfügbaren Satz an Messwerten zurückgreifen kann. Ein alternativer Vergleichspunkt ist das Erreichen einer Farbveränderung von 1 JND. So ein Vorgehen orientiert sich näher an den Normen zu Lichteinheitstests mit den BWS [65, 66], schöpft allerdings die Möglichkeiten des MFT nicht aus und erfordert für Lichteinheiten ab BW3 sehr lange Testzeiten.

Fazit

Das vorgestellte Verfahren erweitert das bisherige Auswertungsverfahren von MFT-Untersuchungen durch Einbezug der Farbveränderungsrate. Der Aufwand zur Bestimmung der Farbveränderungsrate durch Fitting und Ableitung ist gering. Neben der Klassifizierung nach absoluten Farbveränderungen stellt die Klassifizierung nach Farbveränderungsraten einen wesentlichen Informationszuwachs bei der Auswertung der Tests dar, da die Geschwindigkeit, mit der Farbveränderungen zunehmen, bestimmt wird. Dies resultiert vor allem bei Materialien, die ein lineares oder exponentielles Farbveränderungsverhalten (also Giles *Type III* bzw. *V*) zeigen, in einer lichtempfindlicheren Klassifizierung als bei Klassifizierung nach absoluten Farbveränderungen. Die Klassifizierung nach der Farbveränderungsrate ist insbesondere für konservatorische Fragestellungen von Bedeutung, da mit der Farbveränderungsrate v. a. die zukünftige Belichtung stärker bei der Lichtecktheitsklassifizierung gewichtet wird als bei der Klassifizierung nach absoluten Farbveränderungen.

Weiterer Forschungsbedarf ergibt sich durch den Einbezug von Blau-Woll-Standard BW4. Die Datenlage erlaubt einen Einbezug in die Klassifizierung, allerdings ist das Ausbleichverhalten bei BW4 mit dem rapiden Anstieg am Anfang bei MFT-Messungen ungewöhnlich und bedarf einer Ursachenforschung. Hier sollte ein Abgleich mit BW4-klassifizierten Materialien unter Einbezug von Reziprozitätstests vorgenommen werden.

Weiterhin bleibt in zukünftigen Forschungen zu prüfen, inwieweit sich die Berücksichtigung der Farbveränderungsrate auf die nötige Testzeit bei MFT-Experimenten auswirkt. Denn die Genauigkeit der Fittings steigt mit der Anzahl der verfügbaren Messpunkte und damit der Testdauer. Beim Vergleich der Farbveränderungsrate ist die Unterscheidungsmöglichkeit der BWS ist jedoch schon nach kurzer Testzeit gegeben (bei den hier verwendeten Messparametern in etwa nach 4–5 Minuten). Bei einer längeren Testzeit von 10–15 Minuten werden insgesamt mehr Informationen erhoben und bei einzelnen Materialien Ausbleich-Eigenheiten registriert, die in kurzer Testzeit nicht erfasst werden (siehe die Farbveränderungen von Muster #9 und #36, Anhang D).

Die Analyse der Farbveränderungsrate ist nicht auf *Microfading*-Tests beschränkt. Dieses Vorgehen kann bei ausreichender Datenbasis auf konventionelle Lichtecktheits tests [66, 102] ebenso angewandt werden wie auf Verfahren zur Bestimmung der Lichtecktheit von photochromen Textilien [114].

5.2 Microfading mit UV-Anteil in der Beleuchtung

Die MFT-Methode erlaubt grundsätzlich die Beleuchtung mit UV-Anteil im Spektrum [82]. Die nötigen Voraussetzungen auf instrumenteller Seite betreffen die optischen Komponenten, d. h. Linsen, Glasfaserkabel etc. müssen UV-Strahlung transmittieren und die Lichtquelle muss im UV-Bereich Strahlung emittieren. Dies ist beim hier genutzten Aufbau der Fall (siehe 4.2.1).

Für MFT sind bisher kaum Fallstudien oder Untersuchungsreihen mit UV-Anteil im Spektrum veröffentlicht. Grund liegt wohl in der Anwendung des MFT im musealen Bereich, wo oft durch entsprechende Lichtschutzmaßnahmen UV-Strahlung eliminiert ist und in der Folge bei Tests mit dem MFT nicht berücksichtigt werden soll.

Es existieren aber Anwendungsfelder im Bereich der Restaurierung/Konservierung, bei denen der UV-Anteil bei der Beleuchtung von Bedeutung ist. Dies betrifft zum einen die Ursachenforschung für Schadensphänomene. Ein Beispiel sind Objekte, die inzwischen im Museumsbestand aufgenommen sind, zuvor aber im Freien exponiert waren. Zum anderen sind nicht alle Kunstobjekte vor UV-Strahlung geschützt (z. B. in Privatsammlungen und Kirchen). In dem Fall sind MFT-Analysen mit UV-Anteil sinnvoll, um die örtlichen Beleuchtungsbedingungen möglichst spektral identisch nachzubilden. Ein weiterer Anwendungsfall ist das Testen von Materialien für die Restaurierung von Objekten, die UV-Strahlung ausgesetzt sind. Hier kann mit dem verwendeten Aufbau zwischen Beleuchtungssituationen mit Licht (VIS) einerseits und zusätzlich mit UV-Anteil im nahen UV-Bereich bis ca. 355 nm (siehe Abschnitt 4.2.2) unterschieden werden.

Innerhalb dieser Arbeit konnten zwei der hier genannten Anwendungen durchgeführt werden. Die Schadensursache für das Ausbleichen wurde an einem Partikel der Skulptur *Checking Aids (I)* von Zephania Tshuma¹² analysiert und für ein Restaurierungsprojekt des Tobsdorfer Chorgestühls wurde mit den MFT-Messungen die Materialauswahl für die Restaurierung unterstützt.

¹² Zephania Tshuma (1932–2000) war ein bildender Künstler aus Zimbabwe.

5.2.1 Test auf UV-Strahlung als Schadensursache

Im Rahmen der Seminararbeit von Marie Harmsen [115] ergab sich eine Fragestellung hinsichtlich der Ursachenforschung für die starken Degradationserscheinungen an den roten Farbpartien der Skulptur *Checking Aids (I)* (1988) von Zephania Tshuma aus dem Bestand des Deutschen Hygiene Museums Dresden (Inv. Nr. DHMD 2012/81). Auf der Skulptur wurde rote Schuhcreme als Malfarbe verwendet, die in weiten Teilen völlig verblasst war und nur noch in Resten vorhanden war [115]. Eine der verbliebenen Farbpartien wurde für Materialanalysen beprobt und stand zudem für die Untersuchung mit dem MFT zur Verfügung. Mit der MFT-Untersuchung konnte als Ursache für den Farbverlust eindeutig UV-Strahlung nachgewiesen werden.

Vorgehen

Das Probestück war größer als der MFT-Messpunkt und lag auf einem Objektträger. Zuerst wurde das Partikel mit den Standardeinstellungen (siehe 4.2.6) (ohne UV Anteil im Spektrum) bei einer Beleuchtungsstärke von ca. 9,9 Mlx getestet. In der Folge wurde nach Entfernung des UV-Filters und erneuter Aufwärmphase der Lampe inklusive Weißkalibrierung das Partikel an einer anderen Stelle wieder fokussiert und diesmal mit UV-Anteil bei einer Beleuchtungsstärke von 10,6 Mlx getestet. Die Testdauer betrug in beiden Fällen 10 Minuten, was einer Belichtung von 1,65 Mlxh bzw. 1,76 Mlxh entspricht.

Ergebnisse

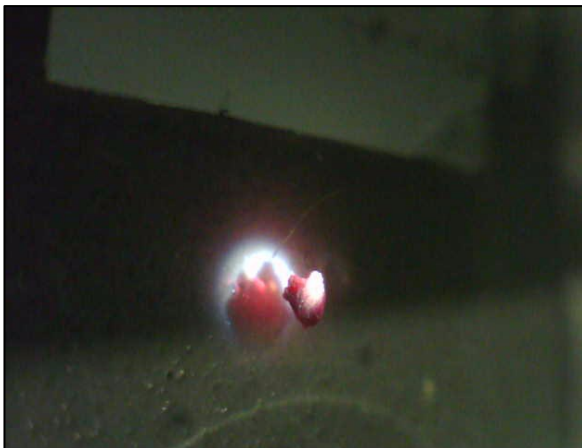


Abbildung 23: Probestück im Fokus vor der Messung ohne UV-Anteil

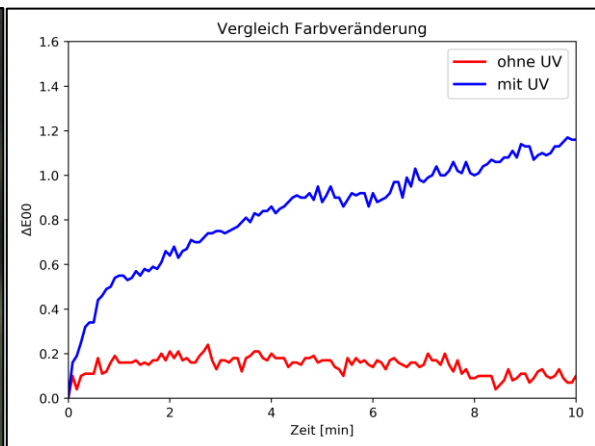


Abbildung 24: Farbveränderung des Partikels bei Belichtung ohne und mit UV-Anteil

Bei den üblichen Messbedingungen mit UV-Filter im Strahlengang zeigte sich keine nennenswerte Farbveränderung ($\Delta E_{00}=0,10$ nach 10 Minuten Belichtungsdauer). Mit UV-Anteil im Spektrum war zum Ende des Tests eine Farbveränderung ähnlich wie BW3 messbar ($\Delta E_{00}=1,16$).

Bei Belichtung mit UV-Anteil im Spektrum kam es nach den Ausgangsfarbwerten $L^*=25,9$, $a^*=20,6$ und $b^*=6,1$ zu einer Zunahme der Helligkeit ($\Delta L^*=1,1$), einer Abnahme der Buntheit ($\Delta C^*=-0,9$, zusammengesetzt aus $\Delta a^*=-0,7$ und $\Delta b^*=-1,1$) sowie einer geringfügigen Verschiebung des Bunttons ($\Delta H^*=-0,9$) hin zum Violett.

Fazit

Der Test weist auf eine UV-Empfindlichkeit des Probestückchens ähnlich wie BW3 hin. Die bei Belichtung auftretende Farbveränderung entspricht einem typischen Ausbleichen, der rote Farbton verliert an Sättigung und wird dabei heller. Die Ergebnisse aus dem Test lassen sich sehr gut mit den Beobachtungen an der Skulptur in Verbindung bringen. Wenige Wochen Belichtung bei direkter Sonneneinstrahlung führen bei BW3 zu einem völligen Farbverlust [11]. Aufgrund der Testergebnisse lässt sich annehmen, dass die Skulptur vor der Aufnahme in den Museumsbestand des Deutschen Hygiene Museums für längere Zeit UV-Strahlung ausgesetzt war, was zum vollständigen Ausbleichen eines Großteils der farbigen Oberflächen führte. Zurück blieb der gefundene glänzende, transparente Schuhcremerest [115]. Besonderer Schutz vor UV-Strahlung ist bei zukünftiger Ausstellung des Werks notwendig, um weitere Farbveränderungen der noch vorhandenen roten Farbigkeit zu verhindern.

5.2.2 Test auf Wirksamkeit von UV-Schutzlack

Im Rahmen des Restaurierungsprojekts am Tobsdorfer Chorgestühl der Fakultät Bauen und Erhalten der HAWK Hildesheim Göttingen Holzminden wurden unter der Leitung von Prof. Dr. Maierbacher-Legl geeignete Materialien für den Ersatz einer großflächigen Fehlstelle gesucht. Geplant war, die fehlende Intarsie mit Hilfe einer auf Papier ausgedruckten, digitalen Rekonstruktion zu ersetzen. Zusätzlich wurde die Applikation eines UV-Schutzlackes diskutiert, um eine langfristige Farbstabilität der Drucke zu gewährleisten. MFT-Untersuchungen halfen, die Frage zu klären, welche Lichtechtheit die Pigmenttinten aufweisen und ob die Kombination mit dem Schutzlack die Haltbarkeit der für die Rekonstruktion verwendeten Ausdrücke verlängert.

Materialien

Die Pigmenttinten wurden in Form eines Test-Ausdrucks auf Fotopapier zur Verfügung gestellt (Abbildung 25). Es handelte sich um *Vivera*-Tinten der Marke *Hewlett-Packard*.¹³ Diese wurden von Christine Fiedler (HAWK Hildesheim) als einfarbige Flächen mit einem *Hewlett-Packard Designjet Z6100* Drucker auf *Epson Enhanced Matte* Papier (192 g/m²) zusammen mit einem Teil der Rekonstruktion gedruckt. Ein Ausdruck wurde mit UV-Schutzlack (*Ambrosia satin* [116]) übersprüht, ein zweiter, identischer Ausdruck blieb unbedruckt (ohne Schutzlack). Die acht Pigmenttinten waren namentlich *Cyan* (C), *Magenta* (M), *Yellow* (Y), *Photo Black* (PB), *Matte Black* (MB), *Light Cyan* (LC), *Light Magenta* (LM), *Light Grey* (LG). Die Teil-Rekonstruktion wird mit (S) bezeichnet. Das unbedruckte Papier (P) selbst wurde zur Kontrolle in den Test mit einbezogen.



Abbildung 25: Ausdruck mit acht Pigmenttinten und der Testrekonstruktion

¹³ Die Typennummern der acht Pigmenttinten lauteten im Detail: C9464A HP 91, C9465A HP 91, C9466A HP 91, C9467A HP 91, C9468A HP 91, C9469A HP 91, C9470A HP 91 und C9471A HP 91.

Vorgehen MFT-Messung

Die erste Testreihe wurde mit zusätzlichem UV-Anteil im Spektrum der Beleuchtung durchgeführt, d. h. das UV-Filter wurde aus dem Strahlengang des MFT entfernt. Die Probedrucke (mit und ohne UV-Schutzlack) wurden je dreimal gemessen und die Mittelwerte sowie Standardabweichungen berechnet.

Zur Kontrolle wurde eine zweite Testreihe durchgeführt, bei der die Standardeinstellungen (Abschnitt 4.2.6) mit UV-Filter im Strahlengang wiederhergestellt wurden. Vor Testreihe 2 war eine Nachregelung der Lampe nötig, was zu einer leicht höheren Beleuchtungsstärke führte.

Beide Testreihen wurden bei der gleichen, maximal möglichen Belichtung verglichen, d. h. bei der Gesamt-Belichtung von Testreihe 2 mit 3,6 Mlxh, die bei Testreihe 1 nach 1270 s Belichtungsdauer erreicht wurde (Tabelle 13).

Tabelle 13: Übersicht der Messgrößen der Testreihen mit und ohne UV-Filter

Größe	Testreihe 1 ohne UV Filter	Testreihe 2 mit UV Filter
Beleuchtungsstärke	10,3 Mlx	10,9 Mlx
Anteil UV/VIS	0,89 %	0,03 %
Belichtungsdauer	1500 s = 25 min	1200 s = 20 min
Belichtung	4,3 Mlxh	3,6 Mlxh

Ergebnisse

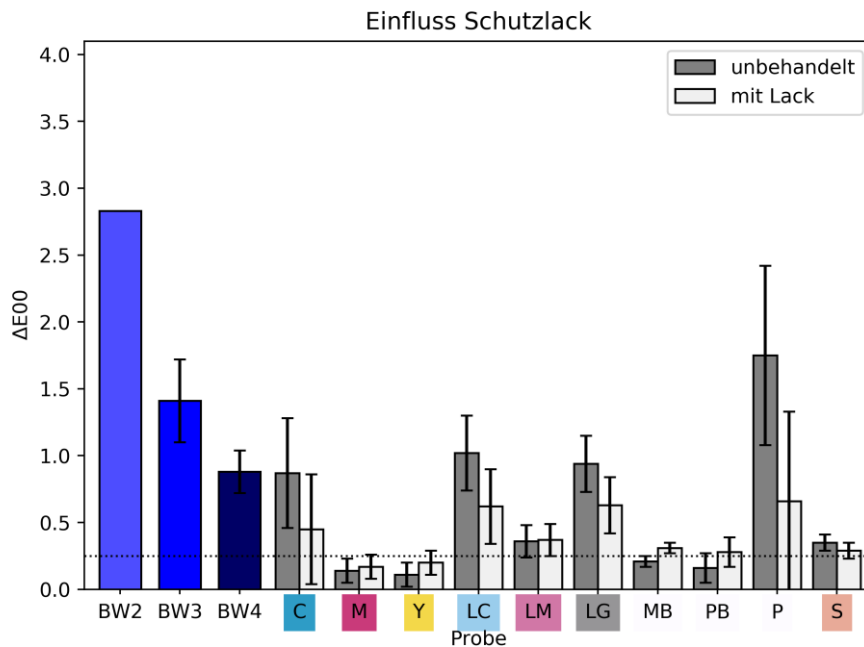


Abbildung 26: Vergleich der Farbveränderungen der unbehandelten Ausdrücke und der Ausdrücke mit Schutzlack bei Belichtung mit UV-Anteil im Spektrum (Testreihe 1)

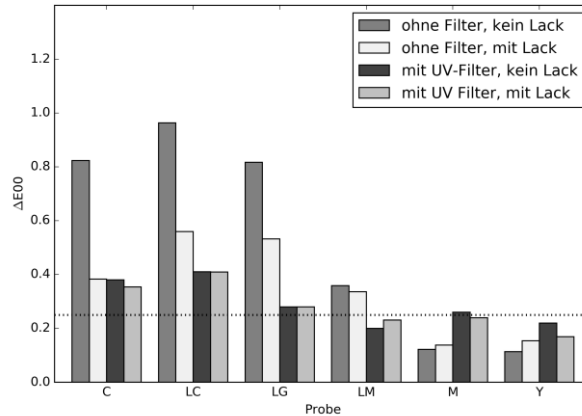


Abbildung 27: Vergleich der Farbveränderungen aus Testreihe 1 und 2 bei gleicher Belichtung, jeweils für die Ausdrücke mit und ohne UV-Schutzlack

Die Tinten *Cyan*, *Light Cyan* und *Light Grey* zeigten im Test Farbveränderungen ähnlich wie BW4 (siehe Abbildung 26). Bei diesen Tinten traten mit Schutzlack geringere Farbveränderungen auf als bei den gleichen Tinten ohne Lack. *Magenta*, *Yellow* und die Schwarz-tinten können als „stabiler als BW4“ (>BW4) eingestuft werden. *Light Magenta* (LM) und die Ergänzung (S) erfuhren Farbveränderungen geringfügig oberhalb der Messunsicherheit (Instrument-Drift bei $\Delta E_{00}=0,2$), waren aber insgesamt stabiler als BW4. Auffällig war die verhältnismäßig große Farbveränderung des unbedruckten Papiers, hier kam es durch die Testbelichtung zu einem Rückgang der Buntheit (Tabelle 14). Die Farbveränderung des Papiers mit UV-Schutzlack fällt im Vergleich dazu geringer aus.

Nennenswerte Änderungen der Helligkeit sind bei *Cyan* (C) und *Light Grey* (LG) – jeweils als leichter Rückgang – zu verzeichnen, jedoch ist hier die Streuung der Einzelwerte recht hoch (siehe Tabelle 14). Überwiegend zeigten die Proben im Test einen Rückgang der Buntheit, dieser war beim unbedruckten Papier (P) sogar am größten. Bunttonveränderungen waren bei den Proben C, LC, LM, LG sowie P zu messen.

Tabelle 14: Veränderung der Farbwerte der Proben ohne Schutzlack bei Testreihe 1

	C	M	Y	LC	LM	LG	MB	PB	P	S
ΔL^*	-0,47±0,82	0,02±0,17	0,04±0,12	0,04±0,06	0,11±0,14	-0,21±0,42	0,13±0,04	-0,06±0,11	-0,25±0,11	0,07±0,17
ΔC^*	-0,53±0,18	-0,06±0,12	0,11±0,15	-0,87±0,27	-0,47±0,16	-0,59±0,23	0,05±0,13	0,10±0,09	-1,49±0,44	0,17±0,22
ΔH^*	-1,05±0,20	0,17±0,07	0,14±0,14	-1,17±0,35	0,52±0,31	0,57±0,29	0,12±0,01	0,10±0,08	0,79±0,88	0,35±0,07

Bei den Tests auf den bunten Pigmenttinten mit Beleuchtung ohne UV-Anteil zeigten sich quasi keine Unterschiede zwischen den Farbveränderung der Drucke mit übersprühtem UV-Schutzlack und ohne UV-Schutzlack (siehe Abbildung 27).

Diskussion und Fazit

Nach den Herstellerinformationen [117] war bei den verwendeten Materialien eine hohe Lichteichtheit zu erwarten. Drei Pigmenttinten zeigen jedoch im Test bei Belichtung mit UV-Anteil im Spektrum Farbveränderungen ähnlich wie BW4. Dies kann an der beim Test verwendeten hohen Beleuchtungsstärke liegen. Im Produktdatenblatt wird von einer „deutlichen Verkürzung“ der Lebensdauer bei Beleuchtungsstärken größer als 450 lx gesprochen. Der Schutzlack führt im Test zu einer Verringerung der Farbveränderungen der vergleichsweise empfindlichen Tinten. Der Effekt des Schutzlacks bleibt aus, wenn keine UV-Anteile im Spektrum der Beleuchtung vorhanden sind. In dieser Hinsicht erfüllt der

Schutzlack für den bei der Messung einwirkenden Spektralbereich (bis 355 nm, siehe Abschnitt 4.2.2) die Erwartung. Untersuchungen zur Haltbarkeit des Schutzlacks konnten nicht erfolgen, da der Schutzlack nur in Anwendung auf dem Papier zur Verfügung gestellt wurde. Die Farbveränderungen des unbedruckten Papiers sind als Rückgang der bereits bestehenden Vergilbung zu interpretieren. Für die konservatorischen Fragestellungen zur Materialqualität folgen aus den Messungen die folgenden Aussagen:

- Die Materialkombination aus Pigmenttinten und Schutzlack weist im *Microfading*-Test (mit im Vergleich zu Innenräumen extrem hoher Beleuchtungsstärke) eine Lichtbeständigkeit von BW4 oder stabiler auf.
- Die Pigmenttinten reagieren dabei unterschiedlich auf UV-Strahlung, eine leicht erhöhte Lichtempfindlichkeit bei Belichtung einschließlich UV zeigt sich bei den Tinten *Cyan*, *Light Cyan* und *Light Grey*.
- Dem UV-Schutzlack kann eine positive Wirkung auf die Haltbarkeit der (empfindlicheren) Tinten zugesprochen werden.

5.2.3 Fazit zu den Tests bei Beleuchtung mit UV-Anteil

Grundsätzlich trägt UV-Strahlung besonders zur Schädigung von Kunstobjekten bei [6, 11]. Für eine detaillierte Aufklärung von materialspezifischen Zusammenhängen der Schadensursachen bei UV-Bestrahlung neben der reinen Belichtung sind weitere Analysen nötig. MFT-Untersuchungen bieten hier Ansatzpunkte, doch wurden *Microfading*-Tests bei Beleuchtung mit UV-Anteil bisher nicht publiziert, wenngleich die Einsatzmöglichkeiten eines UV-MFT seit 2010 bekannt sind [82].

Zwei Fallbeispiele aus der Restaurierung/Konservierung, die nur mit Hilfe von UV-MFT-Untersuchungen geklärt werden können, sind hier vorgestellt worden. Wenn Restbestände von Originalmaterial vorhanden sind, kann eine MFT-Analyse mit UV-Anteil neben der Lichtechtheitsklassifizierung naturwissenschaftlich fundierte Hinweise zur Ursachenaufklärung der Schadensphänomene liefern, wie exemplarisch an der Probe der Skulptur *Checking Aids (I)* gezeigt (siehe Abschnitt 5.2.1).

Bei der Materialauswahl für Restaurierungsprojekte ist die MFT-Untersuchung eine Methode, um Fragen zur Lichtechtheit (auch bei vorhandenen Herstellerangaben) wissenschaftlich abzusichern. Insbesondere wenn verschiedene Materialien kombiniert werden, insgesamt aber nur wenige Materialien zur Auswahl stehen und konventionelle Lichtechtheitstests nicht verfügbar sind, ist der Einsatz der MFT-Methode eine sinnvolle Option zur Echtheitsprüfung.

Um den UV-Einfluss auf Farbveränderungen zu untersuchen, müssen allerdings aufwendige Mehrfachmessungen mit und ohne UV-Filter durchgeführt werden. Zusätzlich ist der Einsatz von Bandfiltern für bestimmte (UV-) Spektralbereiche möglich [60], was bei den Untersuchungen in dieser Arbeit allerdings nicht genutzt wurde.

Ein weiteres Anwendungsbeispiel für ein UV-MFT ist der Test von Objekten, die dauerhafter Beleuchtung mit UV ausgesetzt sind (z. B. in Museen ohne UV-Schutz). MFT-Untersuchungen mit UV-Anteil bieten die Möglichkeit, die Lichtechtheitstests spektral angepasst an die Ausstellungssituation durchzuführen.

5.3 Microfading an Farbpulvern

Eine Objektgattung, die bisher nicht mit dem MFT untersucht wurde, sind Sammlungen von Farbpulvern. Solche Farbpulversammlungen werden als Farborgeln bezeichnet und wurden und werden von Künstlern, Farbforschern, etc. zusammengestellt. Diese Farborgeln bilden die materielle Grundlage für die spätere Anwendung (wie wissenschaftliche, künstlerische und gestalterische Zwecke, etc.) und sind demnach besonders sorgfältig ausgewählt. Die Lichteichtheit spielt bei der Wahl der Farbmittel eine Rolle, wenngleich nicht immer mit der höchsten Priorität, da oft Aspekte wie Farbbrillanz und Buntton wichtiger sind [118].

Drei Farborgeln konnten exemplarisch untersucht werden. Zum einen wurden Pulver der *Wissenschaftlichen Orgel* und der *Technischen Orgel* von Wilhelm Ostwald¹⁴ (1853–1932, Chemie-Nobelpreisträger und Farbforscher) untersucht. Zusätzlich zu den MFT-Untersuchungen konnte im Rahmen von Abschlussarbeiten weiterer Projektmitarbeiter die materielle Zusammensetzung der Ostwaldschen Pulver mittels einer Kombination von Analysemethoden größtenteils aufgeschlüsselt werden.¹⁵

Zum anderen wurden ausgewählte Pigmentpulver aus dem *Farbklavier* des Künstlers Wolfram Jaensch (siehe Homepage des Künstlers [119]) auf Lichteichtheit hin getestet. Für die Interpretation der Ergebnisse erwies sich die Tatsache als günstig, dass der Künstler noch am Leben ist und die Rezepturen seiner Farbpulver in Auszügen bekannt gab.

Um die Lichteichtheit von Pulverproben mit dem MFT analysieren zu können, wurde ein Vorgehen für die Farbmessung an Pulvern in Anlehnung an bestehende Systeme¹⁶ entwickelt. Dazu wurden die Pulver auf einen Objektträger mit Vertiefung gestreut und anschließend glatt gestrichen. Die kompakte Pulvermasse hat eine ebene Oberfläche und lässt Farbmessungen mit dem Spektralphotometer bzw. Lichteichtheitsmessungen mit dem MFT zu. Im Folgenden werden die Messungen an den genannten Objekten dargestellt und die Ergebnisse diskutiert.

¹⁴ Wilhelm Ostwald (1853–1932) war ein deutscher Chemiker, Philosoph und Farbforscher. Er erhielt 1909 den Nobelpreis für Chemie in Würdigung seiner Arbeit an der Katalyse und seiner Untersuchungen zu den Grundlagen chemischer Gleichgewichte und Reaktionsraten.

¹⁵ Siehe die Masterarbeiten von A. Bridarolli [153] und S. Atak [154] und die gemeinsame Publikation [121].

¹⁶ Beispielsweise stellt die Firma KonicaMinolta Farbmessgeräte zur Messung von Pulvern her (Spektralphotometer CM-5).

5.3.1 Pulver von Wilhelm Ostwald

Die Pulverorgeln von Wilhelm Ostwald stellen in ihrer Gesamtheit die Ausgangsform seines Farbsystems dar. Das Ostwaldsche Farbsystem besitzt eine klare Ordnung, die über eine Zahl und zwei Buchstaben festgelegt ist. Die Zahl steht für den Farbton. Die 24 Farbtöne sind im Kreis geordnet, beginnend mit „1“ für Gelb, über „7“ für Rot bis zu „24“ für Gelbgrün. Die als Vollfarben bezeichneten Farbtöne mit der maximalen Remission im betreffenden Spektralbereich werden für das vollständige Farbsystem weiter mit Weiß- und Schwarzanteil untergliedert. Der Weißanteil wird durch den ersten Buchstaben beschrieben, der Schwarzanteil durch den zweiten Buchstaben (Beispiel: *1pa*).

Eine ideale Vollfarbe (mit Remission gleich 100 % im relevanten Spektralbereich) existiert in der Realität nicht. Die bestmöglichen real herstellbaren Farben sind im Farbkreis *pa* angeordnet. Die zunehmende Erhöhung des Weißanteils eines Musters *pa* führt nach einander zu den Farbmustern *na*, *la*, *ia*, *ea*, *ca* – die sogenannte *hellklare Reihe*. Die Ausgestaltung des Systems beruht auf dem Weber-Fechnerschen-Gesetz und verspricht empfindungsgemäße Gleichabständigkeit der Farbmuster. Dies konnte in den realen Ausführungen nicht eingehalten werden [120].

Die gesamte Ausmischung des Farbkreises führt zu insgesamt 680 Mustern, die zusammen eine vollständige Pulverorgel bilden. Für die bestmögliche Farbgebung wählte Ostwald Pigmente auf Basis von Teerfarbstoffen aus, die, wie er selbst erkannte, teils lichtempfindlich waren [118].

Die Lichtecktheit der Pigmentpulver wurde bisher nicht untersucht und ist Gegenstand der folgenden Tests. Zwei Pulverorgeln aus dem Bestand des Wilhelm Ostwald Parks in Großbothen wurden untersucht – die Farbkreise *pa* und *ea* der *Wissenschaftlichen Orgel* (1925) und der Farbkreis *pa* der *Technischen Orgel* (1931). Die Pulver beider Orgeln werden in Kunststoffbehältern aufbewahrt (Abbildung 28). Diese befinden sich vor Licht geschützt im Depotbereich. Wie die Lagerung vor Übernahme des Museums durch die Gerda und Klaus Tschira Stiftung im Jahr 2009 geregelt war ist nicht bekannt. Es ist anzunehmen, dass die Pulver aufgrund Ostwalds eigener Aussage zur Lichtempfindlichkeit der Materialien [118] seit ihrer Zusammenstellung im Dunkeln gelagert waren. Farbveränderungen (z. B. hinter einem Etikett) waren an keinem Pulver zu erkennen.

Neben der MFT-Messungen standen die Ergebnisse von Pigment-Analysen an den Proben der *Wissenschaftlichen Orgel* zur Verfügung [121, 122].



Abbildung 28: Die 24 Pulver des Farbkreises *pa* der *Technischen Orgel* aus dem Bestand des Wilhelm Ostwald Parks in Großbothen

Messbedingungen

Im Museum sind an den Fenstern keine UV-Schutzmaßnahmen installiert, wengleich Lichtschutz bei der Lagerung der Museumsobjekte im Allgemeinen sehr ernst genommen wird.¹⁷ Demzufolge erschien es zweckmäßig, die Pulverproben mit UV-Anteil im Spektrum der Beleuchtung zu testen, die übrigen Messeinstellungen wurden analog zu den Standard-einstellungen (4.2.6) gewählt. Während der 10minütigen Messung herrschte bei den Pulvern der *Wissenschaftlichen Orgel* eine Beleuchtungsstärke von 9,7 Mlx und bei den Pulvern der *Technischen Orgel* eine Beleuchtungsstärke von 10,3 Mlx.

Die höhere Beleuchtungsstärke bei den Messungen an der *Technischen Orgel* war durch eine Nachregelung der Lampenleistung bedingt. Die Belichtung von 1617 klxh zum Ende der Messung an den Pulvern der *Wissenschaftlichen Orgel* wurde bei den Tests an den Pulvern der *Technischen Orgel* nach 9,4 min Belichtungszeit aufgetragen.

Ergebnisse

Bei den Farbtönen 1–19 der *Wissenschaftlichen Orgel* waren bei den Pulvermischungen *ea* mit hohem Weiß-Anteil deutlich größere Farbveränderungen zum Ende der Tests festzustellen als bei den Pulvern des Farbkreises *pa* (Abbildung 29). Bei den Farbtönen 21–24 waren die gemessenen Farbveränderungen beider Farbpulverkreise *ea* und *pa* von ähnlichem Umfang. Die Pulver der Farbtöne 1–5, 13, 22–24 erwiesen sich als deutlich lichtstabiler als die Pulver der Farbtöne 7–12 und 14–19. Es waren die Pulver der Farbtöne im Violett- und im Blau-Grün-Bereich, die als äußerst lichtempfindlich zu klassifizieren sind. Die Pulver *9ea*, *10ea* und *11ea* der *Wissenschaftlichen Orgel* zeigten im Test eine extrem hohe Lichtempfindlichkeit, die deutlich über der gemessenen Empfindlichkeit von BW1 liegt. Im Vergleich der Lichtecktheit der Pulver beider Orgeln zeigte sich, dass die Pulver der *Wissenschaftlichen Orgel* durchwegs empfindlicher auf Licht reagieren als die Pulver der *Technischen Orgel* (Abbildung 30), ausgenommen davon die Pulver *5pa* und *13pa*, die allerdings nur geringe Veränderungen erfuhren. Die Farbton-Bereiche mit besonders empfindlichen Pulvern sind bei beiden Orgel gleich (Ostwald Nr. 7–12 und 14–22). Die Pulver *15pa* und *16pa* der *Wissenschaftlichen Orgel* waren im Vergleich zu den entsprechenden Pulvern der *Technischen Orgel* deutlich empfindlicher gegenüber Licht. Bei den Farbwertveränderungen durch die Belichtung (Tabelle 15) war bei allen Pulvern ein Rückgang der Buntheit ($\Delta C^* < 0$) zu messen (Ausnahme *3pa* der *Wissenschaftlichen Orgel*), oft verbunden mit einer Zunahme der Helligkeit ($\Delta L^* > 0$). Die Veränderungen des Bunttons (ΔH^*) waren in ihrer Ausprägung heterogen und lassen keine allgemeine Aussage zu.

¹⁷ Aussage der Museumsmitarbeiterin Aline Pfannenschmidt im Wilhelm Ostwald Park, Großbothen.

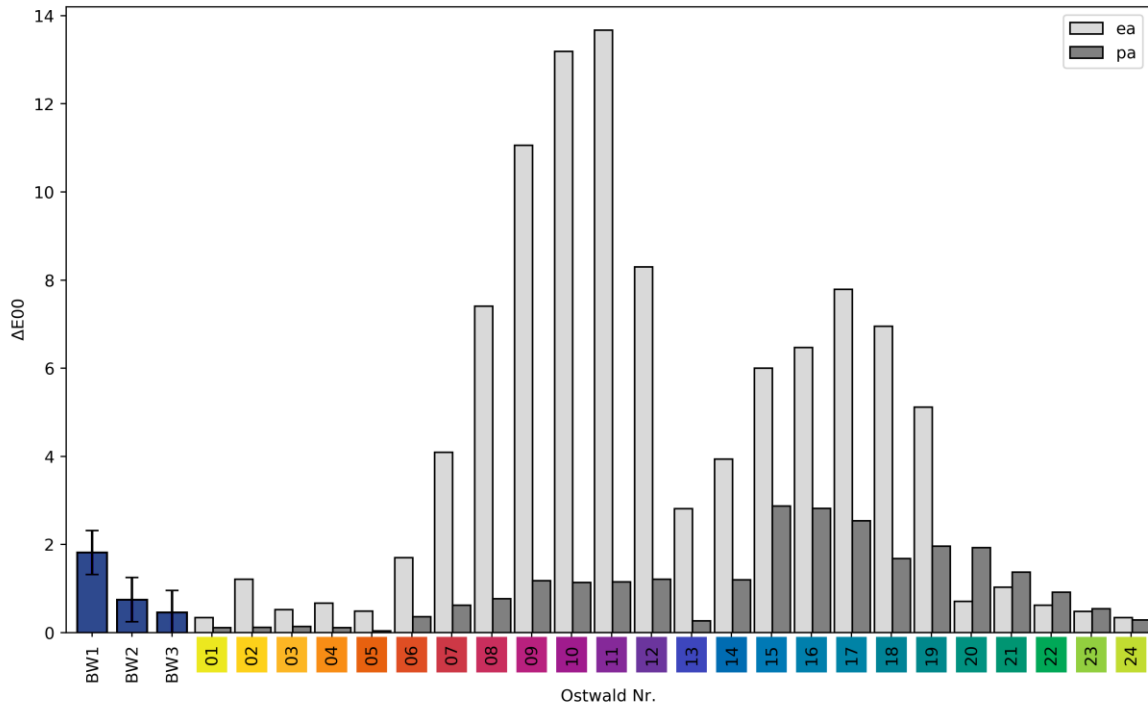


Abbildung 29: Farbveränderung der Pulver ea und pa der *Wissenschaftlichen Orgel* nach 120 s MFT-Belichtungszeit (RGB Hintergrundfarbe ist eine Veranschaulichung der Farbigkeit der unbelichteten Pulver pa)

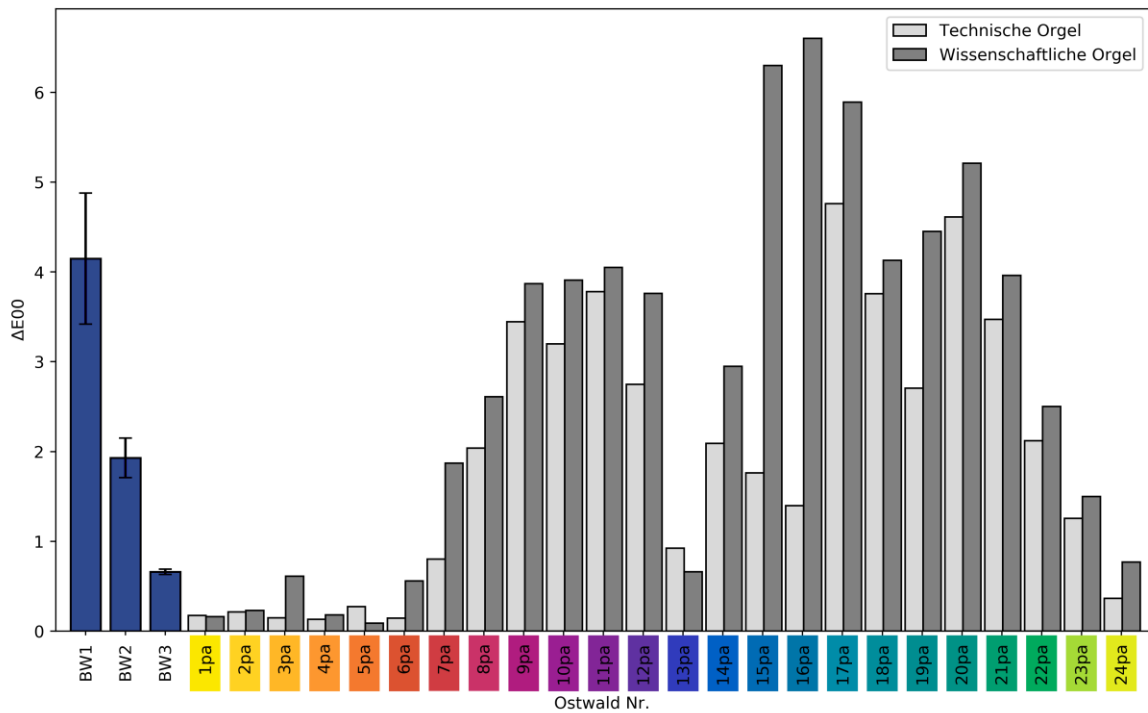


Abbildung 30: Farbveränderung der Pulver der *Wissenschaftlichen Orgel* und der *Technischen Orgel* nach einer Belichtung von 1617 klxh (RGB Hintergrundfarbe ist eine Veranschaulichung der Farbigkeit der unbelichteten Pulver der *Wissenschaftlichen Orgel*)

Tabelle 15: Farbwertveränderungen der Pulver im Test bis zur angegebenen Belichtung

Nr.	Wissenschaftliche Orgel ea - 120 s bzw. 323 klxh			Wissenschaftliche Orgel pa - 600 s bzw. 1617 klxh			Technische Orgel pa - 565 s bzw. 1617 klxh		
	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
1	0,52	-0,27	0,30	-0,09	-0,24	-0,30	-0,21	-0,33	0,22
2	1,00	-0,04	2,32	-0,03	-0,20	0,41	-0,28	-0,27	0,21
3	0,54	-0,33	0,86	0,01	0,48	1,04	-0,21	-0,02	0,09
4	0,71	-0,73	0,91	-0,16	-0,43	0,18	0,02	-0,27	0,20
5	0,67	-0,57	0,14	0,04	-0,17	0,13	-0,21	-0,49	-0,33
6	1,19	-2,09	3,78	0,41	-0,45	0,74	0,14	-0,32	0,02
7	2,56	-5,00	7,80	0,92	-1,70	2,94	0,56	-1,07	0,98
8	4,88	-9,07	15,26	1,34	-2,96	4,43	0,90	-3,18	3,55
9	7,76	-20,14	12,46	1,81	-6,77	7,30	1,95	-6,41	5,91
10	10,59	-24,03	12,13	1,97	-9,39	6,17	1,57	-8,28	4,88
11	9,82	-23,10	0,32	1,94	-11,15	4,81	1,98	-10,35	4,74
12	5,28	-11,58	-18,92	1,91	-12,02	1,98	1,52	-9,64	0,46
13	1,40	-2,80	-6,84	0,25	-1,78	-1,01	0,30	-3,16	-1,38
14	1,48	-2,78	8,28	0,36	-11,73	-2,85	1,20	-9,49	-4,47
15	4,30	-9,41	3,43	1,07	-15,12	-6,27	1,35	-3,06	-2,64
16	5,01	-11,15	-6,39	1,00	-14,22	-6,51	1,03	-2,01	-1,63
17	5,62	-12,53	-9,21	0,52	-13,51	-5,12	0,32	-11,91	-2,80
18	5,11	-9,91	-13,01	0,11	-10,47	-1,89	-0,37	-10,33	-0,87
19	2,62	-4,50	-18,97	-0,27	-12,17	0,42	-0,41	-5,30	2,95
20	1,12	-0,31	-0,33	0,29	-12,73	4,42	-1,38	-11,98	3,44
21	0,99	-1,10	-1,49	0,55	-12,61	-0,48	-1,58	-11,19	-0,68
22	0,90	-0,25	-0,85	-0,21	-6,56	-4,12	-1,12	-6,53	-2,22
23	0,81	-0,31	0,05	0,00	-1,69	-3,37	-0,48	-1,71	-2,69
24	0,45	-0,54	0,04	-0,29	-0,18	-1,60	-0,40	-0,48	-0,55

Diskussion und Fazit

Große Teile der untersuchten Pigment-Pulver weisen beim *Microfading*-Test eine sehr geringe, teils extrem geringe Lichteichtheit auf. Bei den Pulvern *9ea*, *10ea* und *11ea* kann man bereits nach zwei Minuten Testbelichtung nahezu von Totalverlust der Buntheit sprechen ($\Delta E_{00} > 10$). Zum Vergleich: Der empfindlichste Blauwooll-Standard BW1 erfährt im Test nach zwei Minuten eine Farbveränderung von $\Delta E_{00} = 1,5$, nach 10 Minuten eine Veränderung von $\Delta E_{00} = 3,7$.

Die Ursache der geringen Lichteichtheit liegt im Material der Pulver. Für die *Wissenschaftliche Orgel* ergab die Analyse [121, 122], dass im Violett-Bereich des Farbkreises das lichtempfindliche C.I. Pigment Violet 2 (Phenylxanthen) und im Blau-Grün nicht näher klassifizierte Pigmente aus der Klasse der Triarylmethanfarbstoffe verwendet wurden. Die Pulver des Farbtons 13 enthalten das anorganische C.I. Pigment Blue 29 (Ultramarinblau), das an sich als lichtstabil gilt [123]. Dass trotzdem Veränderungen durch Licht im Test auftreten, kann an weiteren Bestandteilen im Pulver liegen, die nicht identifiziert wurden.

Für die *Technische Orgel* bestand bisher die Annahme, dass Ostwald hier auf lichtstabilere, anorganische Pigmente zurückgriff [118]. Die hier durchgeführten Tests deuten allerdings darauf hin, dass er auch für die *Technische Orgel* synthetisch-organische Pigmente mit teils sehr geringer Lichteichtheit verwendete. Eine Analyse der stofflichen Zusammensetzung der Pulver der *Technischen Orgel* steht noch aus.

Der große Einfluss des Weiß-Anteils in den Pulvermischungen auf die Lichtechtheit entspricht den Erwartungen. Die Weiß-Anteile in den Mischungen bestehen nach Analyse aus Lithopone [121], das wie andere in Frage kommende Weiß-Pigmente (Zinkweiß, Titanweiß) anorganisch und lichtstabil ist. Die Weiß-Pigmente streuen nahezu 100 % des auftreffenden Lichts innerhalb der Pulvermischungen, die Buntpigmente absorbieren hingegen einen Teil des Lichts und streuen den anderen Teil. Je mehr Weiß-Pigmente in der Pulvermischung vorhanden sind, desto größer wird die effektive Beleuchtungsstärke für die Bunt-Pigmente innerhalb der Mischungen. Dies führt zu rascheren Veränderungen der Buntpigmente, falls diese nicht stabil gegenüber Licht sind. Bei konventionellen Lichtechtheitstests mit Preußisch-Blau-Ausmischungen wurde dies beobachtet [124]. Ein weiterer Effekt, der den größeren Farbverlust bei Mischungen mit höherem Weißanteil im Test begünstigt, ist der nicht-lineare Zusammenhang zwischen Farbwerten (v. a. Sättigung) und Konzentration des Farbmittels, beispielhaft untersucht für Alizarin-Mischungen [18]. Änderungen der Konzentration wirken sich bei geringen Konzentrationen stärker auf Farbwertveränderungen aus als bei hohen Konzentrationen. Hinzu kommt, dass Farbunterschiede nahe der Grauachse größer bewertet werden als im „Vollton“-Bereich. Eine konservatorische Empfehlung für die Lagerung der Pulver auszusprechen fällt leicht: Lichteinstrahlung auf die Pulver ist zu vermeiden. Besonders bei den violetten und blaugrünen Pulvern ist zu erwarten, dass durch Belichtung in kurzer Zeit Farbveränderungen auftreten werden.

5.3.2 Pulver von Wolfram Jaensch

Die *Erste Polychromie* (1985) von Wolfram Jaensch ist ein großflächiges Wandrelief, das im Congress Centrum Würzburg dauerhaft gezeigt wird. Im Zuge der Restaurierung (ausgeführt von Dipl. Rest. Markus Eiden, abgeschlossen 08/2015) wurden starke Ausbleichungen von Farbflächen v. a. gelber und roter Farbigkeit festgestellt. Dies warf die Frage einer eingehenden Bestimmung der Lichtechtheit der verwendeten Pigmente auf. Der Künstler stellte eine Auswahl von Pigmentpulvermischungen seiner Farbregel für die MFT-Untersuchung zur Verfügung. Seine Farbbezeichnungen orientieren sich am System von Wilhelm Ostwald. Die Bunttöne werden mit Zahlen bezeichnet, geordnet in 24 Stufen von Gelb über Orange, Rot, Violett, Blau und Grün, beginnend mit „1“ für Gelb. Der Zahl folgen zwei Buchstaben, die für den Weiß- und Schwarzanteil stehen (z. B. *1za* bezeichnet ein Gelb mit einem Weißanteil *z* und einem Schwarzanteil *a*)¹⁸. Die untersuchten Pulver sind reine Pigmentmischungen ohne Bindemittel (Tabelle 16).

Für die MFT-Messung wurden die Standardeinstellungen (siehe 4.2.6) gewählt. Der Test wurde jeweils für 12 Minuten bei einer Beleuchtungsstärke von 9,5 Mlx durchgeführt. Dabei erhielten die Pulver eine Belichtung von ca. 1,9 Mlxh, was unter Annahme der Reziprozität bei 200 lx einer Belichtungsdauer von ca. 2 Jahren entspricht (12 h/d).

Tabelle 16: Untersuchte Pigmentpulver des Farbklauiers von Wolfram Jaensch

Buntton	Pulverbezeichnungen				
1 (Gelb)	<i>1na</i>	<i>1ng</i>	<i>1tg</i>	<i>1zn</i>	<i>1za</i>
3 (Orange)	<i>3na</i>	<i>3ng</i>	<i>3tg</i>	<i>3zn</i>	
5 (Rotorange)	<i>5na</i>	<i>5ng</i>	<i>5tg</i>	<i>5zn</i>	
7 (Rot)	<i>7na</i>	<i>7ng</i>	<i>7tg</i>	<i>7zn</i>	

Ergebnisse

Vier Pulver zeigten im Test Farbveränderungen oberhalb des Signifikanzniveaus von $\Delta E_{00}=0,2$ (siehe Abbildung 31), die Farbveränderungen der restlichen 13 Pulvern blieben darunter. Die signifikanten Veränderungen der vier Pulver *1na*, *7na*, *7ng* und *7tg* liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Veränderung von BW3.

Der Hauptbeitrag der Farbveränderungen im Test kommt jeweils durch eine Verringerung der Buntheit C^* zustande. Bei den Pulvern des Bunttons 7 kommt es zudem zu einer Aufhellung (siehe Tabelle 17). Hier aufgeführt sind zusätzlich die Raten der Farbveränderungen zum Ende der Messung, ermittelt analog wie in Abschnitt 5.1.2 über Fitting, Ableitung und Bestimmung der Werte zum Ende der Tests nach 12 Minuten.

Tabelle 17: Farbwertveränderung der vier lichtempfindlichen Pulver zum Ende der Tests

Pulver	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*	$d(\Delta E_{00})/dt$ (12min)
<i>1na</i>	-0,13	-1,29	0,42	0,0377
<i>7na</i>	0,92	-1,77	0,37	0,0599
<i>7ng</i>	0,89	-1,30	0,50	0,0849
<i>7tg</i>	0,19	-0,88	0,09	0,0241

¹⁸ Die Weiß- und Schwarzanteile sind optische Anteile, die durch Kreiselmischung bestimmt werden. Diese Anteile sind nicht mit den Pigmentanteilen in Masseprozent zu verwechseln.

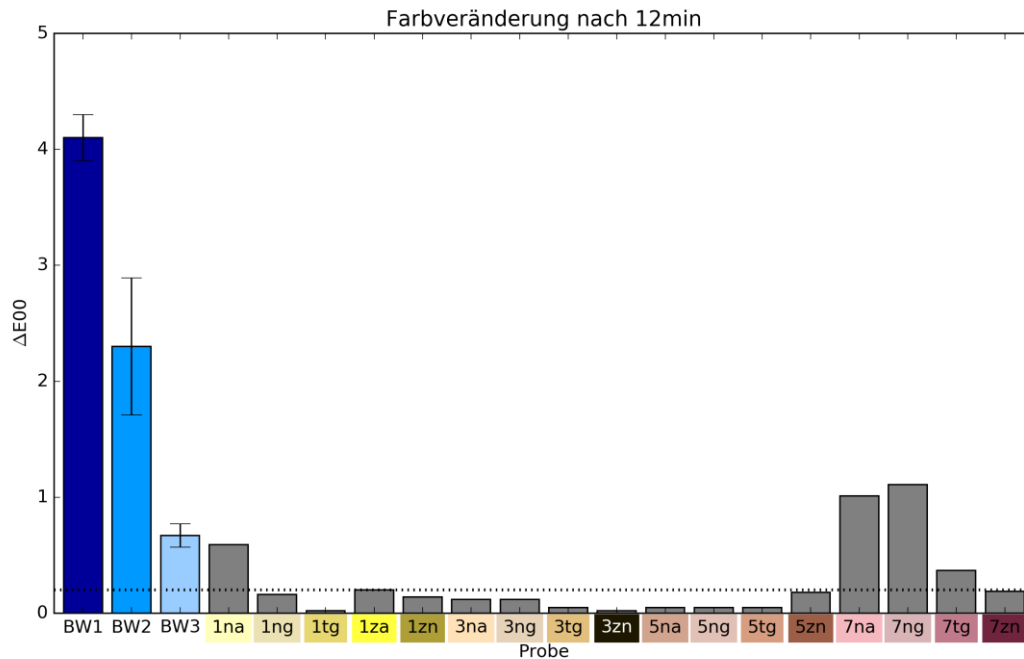


Abbildung 31: Farbveränderung der 17 Pulverproben nach 12 Minuten MFT-Belichtung (RGB Hintergrundfarbe veranschaulicht Farbigkeit der Pulver)

Diskussion

Die Pulver des Bunttons 7 zeigten im Test eine Lichtechtheit ähnlich wie BW3. Bei der Klassifizierung nach der Farbveränderungsrate (wie in Abschnitt 5.1.2) ergaben sich qualitativ keine Unterschiede zur Klassifizierung der Ergebnisse nach den absoluten Farbveränderungen.

Die Quantität der absoluten Farbveränderung im Test lässt sich mit den Angaben zu den Pulverzusammensetzungen vom Künstler selbst in Verbindung bringen.¹⁹ Für den Buntton 7 verwendete er *Kadmium Rot* (Hoechst). Die prozentualen Masseanteile von *Kadmium Rot* in den Pulvern betragen nach Künstlerangaben für *7na* 0,0257, für *7ng* 0,0198 und für *7tg* 0,1406. Die übrigen Bestandteile sind jeweils Lithopone (Weißpigment), Schwarzpigmente und ein graues Pulver (hier nicht näher quantifiziert). Unter der Annahme, dass nur das Buntpigment eine Veränderung durch Licht erfährt bestätigen die Messungen hier die theoretische Annahme, je höher die Pigmentkonzentration, desto geringer die Farbveränderung [5, 103].

Für *1na* und die übrigen Gelbtöne mit der Nr. 1 verwendete Jaensch nach eigener Auskunft *Sicotherm Gelb K 100* (C.I. Pigment Yellow 35). Unklar bleibt hier, wieso nur Pulver *1na* im Test eine messbare Veränderung zeigt, die anderen Pulvermischungen dieses Bunttons jedoch nicht. Zu diesem Buntton konnten vom Künstler leider keine weiteren Informationen in Erfahrung gebracht werden. Andere Faktoren, wie Füllstoffe etc., können hier eine Rolle spielen.

¹⁹ Private Kommunikation mit Wolfram Jaensch (04.12.2016).

Fazit

Die Farbveränderungen auf der *Ersten Polychromie* (1985) können zum Teil durch die MFT-Messungen auf die geringe Lichteinheit der Pulvermischungen zurückgeführt werden, die im Test bei einem gelben und einigen roten Pulver gemessen wurden. Bei den Pulvern des Bunttons 7 (rot) wurden Farbveränderungen gemessen, die umso größer ausfallen, je weniger Buntpigment in der jeweiligen Mischung vorhanden ist. Die übrigen Pulver erwiesen sich im Test stabiler als BW3 (mit Ausnahme von Pulver *1na*).

5.4 Microfading an Gemälden

Das MFT wurde entwickelt, um explizit dem großen Bedarf nach Lichtechtheitsinformationen zu Kunstwerken, insbesondere Gemälden, eine messtechnische Lösung entgegenzusetzen [13]. Doch bisher sind kaum Untersuchungsergebnisse von MFT-Messungen auf Gemälden veröffentlicht worden (Abschnitt 2.3). Lediglich Townsend berichtet von einzelnen Fallstudien, die mit hohem Aufwand an ungefirnissten Leinwandgemälden durchgeführt wurden [61].

Gerade bei Werken, die lange Zeit in Dunkelheit im Depot lagern und denen eine Ausstellung bevorsteht, kann eine MFT-Messung entscheidende Hinweise für die Planung der Ausstellungssituation, insbesondere der Beleuchtung, liefern. Dies betrifft auch Werke in laufenden, restauratorischen Maßnahmen oder Neuerwerbungen.

Die folgenden Einzelfallstudien verdeutlichen den Einsatzzweck des MFT für Gemälde. Bei den MFT-Messungen an stehenden bzw. hängenden Gemälden erwies es sich als hilfreich ein Dreibeinstativ für die Halterung des Messkopfs zu nutzen. So ein Stativ ist allerdings anfällig für Erschütterungen, besondere Sorgfalt und ein abgeschlossener Raum sind obligatorisch, um verwertbare Resultate zu generieren. Die untersuchten Gemälde stammen aus dem Besitz der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden (SKD) bzw. aus Privatbesitz und hatten keinen Firnis.

5.4.1 Gemälde von Fritz Tröger

Das Gemälde *Fanfarenbäser* (1929) von Fritz Tröger²⁰ (SKD, Gal. Nr. FB513) wurde im Rahmen einer Seminararbeit [125] an der HfBK Dresden restauratorisch und konservatorisch untersucht. Dabei wurden unter UV-Strahlung fluoreszierende Farbpartien entdeckt, die auf eine Verwendung von lichtempfindlichen, synthetisch-organischen Pigmenten hindeuten. Daraus ergab sich der Anlass für die Untersuchung der tatsächlichen Lichtechtheit. Die Messung sollte aus konservatorischen Gründen im Depot des Albertinums Dresden erfolgen.

Nach senkrechter Positionierung des Gemäldes wurden vier Messpunkte ausgewählt und mit den Standard-Einstellungen (Abschnitt 4.2.6) des MFT bei einer Beleuchtungsstärke von ca. 9,6 Mlx für 15 Minuten (Belichtung von 2400 klxh) untersucht.

Zwei Messpunkte lagen auf der stark orange fluoreszierenden Farbfläche (siehe Abbildung 33), die anderen zwei Messpunkte lagen innerhalb der roten Fläche im äußeren, schwächer fluoreszierenden Kreis der Fahne (Abbildung 33). Vor den Tests am Objekt wurden die Lichtechtheitstypen BW1–BW3 vor Ort jeweils dreimal gemessen und Mittelwerte gebildet.

²⁰ Fritz Tröger (1894–1978) war ein deutscher Maler und Grafiker und wirkte in Dresden.



Abbildung 32: *Fanfarenbläser* (1929) von Fritz Tröger
(Foto: Staatliche Kunstsammlungen Dresden)



Abbildung 33: *Fanfarenbläser* (1929) unter UV-Strahlung
(Foto: Anna Siegel)

Die Messung an MP1 wurde nach 870 s bei einem $\Delta E_{76} > 5,0$ gestoppt, die übrigen drei Messungen liefen die volle Messdauer von 900 s. Die Farbwerte der vier Messpunkte unterscheiden sich vorrangig nach ihrem Bunttonwinkel (Tabelle 18). MP3 und MP4 sind etwas mehr im Orange angesiedelt als MP1 und MP2, ansonsten sind die CIELab-Werte recht ähnlich.

Im Lichtechtheitstest mit dem MFT ergeben sich auf MP1, MP3 und MP4 Veränderungen vom Umfang ähnlich wie BW2, die Veränderung von MP2 ist jedoch eher wie BW3 (Abbildung 34).

Bei Analyse der Farbveränderungen im Detail fällt auf, dass die Veränderung hinsichtlich Helligkeit ΔL^* und Buntheit ΔC^* aller Messpunkte relativ ähnlich ist, es kommt durch die Belichtung zu einer Aufhellung und einem Rückgang der Sättigung (Tabelle 18). Bei der Veränderung des Bunttonwinkels unterscheiden sich die beiden Gruppen der Messpunkte. MP1 und MP2 ändern ihren Buntton durch die Belichtung in Richtung Rot, während MP3 und MP4 den Buntton in Richtung Gelb ändern. Im Detail ist die Bunttonänderung bei MP1 und MP2 am Anfang rasch und dann relativ gleichbleibend, während sich die Bunttöne von MP3 und 4 relativ kontinuierlich über die Belichtung in Richtung Gelb bewegen (siehe Abbildung 35).

Tabelle 18: Farbwerte zum Start der Tests und Farbunterschiede zum Ende der Tests nach 15 Minuten (bei MP1 nach 14,5 Minuten)

Messpunkt	L*	a*	b*	C*	h	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE_{76}	ΔE_{00}
MP1	66,54	44,47	17,78	47,89	21,80	1,30	-4,31	-2,31	-4,85	-0,57	5,06	1,91
MP2	68,45	42,02	16,90	45,29	21,91	0,85	-2,73	-1,51	-3,09	-0,39	3,23	1,26
MP3	70,26	37,72	19,00	42,24	26,73	1,68	-3,66	-0,37	-3,41	1,38	4,04	1,99
MP4	63,66	46,38	21,52	51,12	24,89	1,40	-3,65	0,70	-2,96	2,24	3,97	2,01

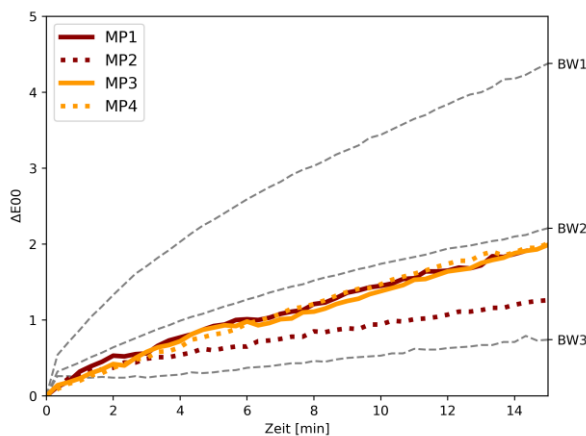


Abbildung 34: Farbveränderung der Messpunkte während der Belichtung im Vergleich zu den BWS

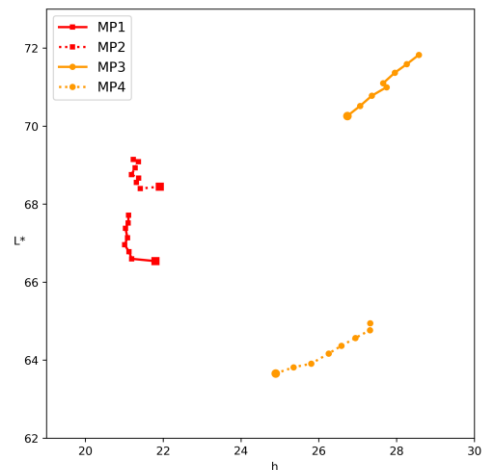


Abbildung 35: Zusammenhang der Veränderung von Helligkeit L* und Bunttonwinkel h über die Testbelichtung. Startwerte sind hervorgehoben, Marker sind im Abstand von je 2 min gesetzt.

Fazit

Die Farbveränderungen der vier Messpunkte an den zwei Farbflächen sind ähnlich wie BW2, d. h. es liegt eine hohe Lichtempfindlichkeit vor. Dies deutet auf die Verwendung von synthetisch-organischen Pigmenten hin, wie aus den Fluoreszenz-Erscheinungen zu vermuten war.

Materialanalysen konnten mangels Proben nicht durchgeführt werden. Die Details der Farbveränderungen deuten auf unterschiedliche Materialzusammensetzungen an den beiden Stellen hin, wenngleich die Farbwerte und die absoluten Farbveränderungen im Test ähnlich waren.

Die festgestellte, geringe Lichteichtheit an den Messpunkten macht es bei einer längerfristigen Präsentation des Werks erforderlich die Belichtung einzuschränken, um Farbveränderungen zu verhindern.

5.4.2 Gemälde von Hans Stübner

Zwei Gemälde von Hans Stübner wurden im Rahmen der Diplomarbeit von Sarah Giering an der HfBK Dresden umfassend untersucht [126]. MFT-Analysen konnten Hintergrundinformationen zu den Malmaterialien liefern. Untersucht wurden die beiden Werke *Stillleben mit Krug und Früchten* (vor 1944, Werk Nr. D131-C, siehe Abbildung 36) und *Gesellschaft unter Bäumen* (ca. 1960, Werk Nr. D131-D, siehe Abbildung 38). Aufgrund des Entstehungszeitraums der Werke und erkennbarer Fluoreszenz unter UV-Strahlung (siehe Abbildung 37 und 39) lag die Vermutung vor, dass synthetisch-organische Pigmente verwendet worden sein könnten.

Es wurden sieben Messpunkte (siehe Abbildung 37 und 39) an Stellen auf fluoreszierenden Flächen ausgewählt, drei auf D131-C und vier auf D131-D. Raman-Analysen lieferten aufgrund von Fluoreszenz (durch Raman-Laser angeregt) an den betreffenden Stellen kein Ergebnis.²¹

MFT-Messbedingungen

Die Tests wurden bei den Standardeinstellungen des MFT (4.2.6) mit UV- und IR-Filter im Strahlengang durchgeführt. Dabei herrschte eine Beleuchtungsstärke von ca. 12,5 Mlx, was bei 15 Minuten Testdauer einer Belichtung von ca. 3,1 Mlxh entspricht.

Ergebnisse

Der Test auf Messpunkt 2 (MP2, rote Malschicht) auf D131-C wurde nach 8 min 40 s gestoppt, da eine Farbveränderung $\Delta E_{76}=6,0$ erreicht wurde. Alle anderen Messungen wurden bis zum geplanten Ende nach 15 Minuten Belichtungsdauer durchgeführt.

Der Hauptbeitrag der Farbveränderungen kam meist durch einen Rückgang in der Buntheit C^* zustande. Bei den Ocker-Tönen (D131-C MP1 und D131-D MP2) lieferte die Verschiebung des Bunttons ΔH^* den Hauptanteil, jeweils in Richtung Gelb-Grün. Einen Sonderfall bildete die blaue Farbfläche bei MP4 auf D131-D, bei der eine geringfügige Zunahme der Buntheit um den Betrag 1,49 im Test zu verzeichnen war. Ursache ist hier eine kontinuierliche, leichte Zunahme der Remission im Blau (ca. 380–500 nm) während der Belichtung.

Tabelle 19: Farbveränderungsdetails zum Ende der Tests (15 min)

Messpunkt	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE_{76}	ΔE_{00}	$d(\Delta E_{00})/dt$ [1/min]
D131-C MP1	0,16	-0,99	-0,03	-0,24	0,96	1,00	0,68	0,0155
D131-C MP2*	-1,89	-4,56	-3,35	-5,65	-0,16	5,96	2,28	0,2513
D131-C MP3	-1,73	-1,00	-2,65	-2,55	1,21	3,31	1,43	0,0721
D131-D MP1	-0,12	-3,07	1,41	-3,38	0,05	3,38	0,97	0,0358
D131-D MP2	0,42	-1,11	0,38	-0,04	1,18	1,25	0,98	0,0488
D131-D MP3	1,38	-2,50	1,33	-2,82	0,30	3,15	1,76	0,0986
D131-D MP4	-0,15	1,07	-1,70	1,49	1,35	2,01	0,95	0,0311

* Werte von D131-C MP2 sind vom Zeitpunkt des Abbruchs nach 8:40 min.

²¹ Interner Bericht des naturwissenschaftlichen Labors der HfBK Dresden von Sefkan Atak (31.08.2016)



Abbildung 36: Hans Stübner - *Stilleben mit Krug und Früchten* [D131-C] (Foto: Kerstin Riße)



Abbildung 37: Hans Stübner - *Stilleben mit Krug und Früchten* [D131-C] unter UV-Strahlung mit den Messpunkten (Foto: Kerstin Riße)



Abbildung 38: Hans Stübner - *Gesellschaft unter Bäumen* [D131-D] (Foto: Kerstin Riße)



Abbildung 39: Hans Stübner - *Gesellschaft unter Bäumen* [D131-D] unter UV-Strahlung mit den Messpunkten (Foto: Kerstin Riße)

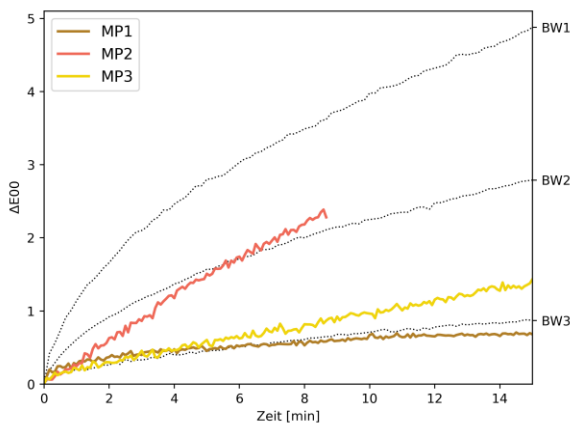


Abbildung 40: Farbveränderung der Messpunkte auf D131-C im Vergleich zu BW1–BW3

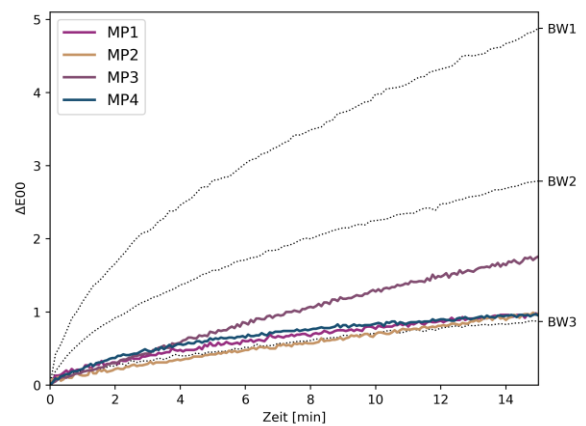


Abbildung 41: Farbveränderung der Messpunkte auf D131-D im Vergleich zu BW1–BW3

Die Helligkeit nahm teils durch die Belichtung zu (MP2 und MP3 auf D131-D), teils blieb die Helligkeit während der Belichtung relativ konstant (MP1 D131-C, MP1 und MP4 D131-D) und teils ging die Helligkeit zurück, wie im Falle von MP2 und MP3 auf D131-C.

Im Vergleich mit den BWS zeigten die meisten Messpunkte zum Ende der Tests Farbveränderungen ähnlich wie BW3 (MP1 und MP3 auf D131-C und MP1, MP2 und MP4 auf D131-D, siehe Tabelle 19 und Abbildung 40, 41). MP2 auf D131-C hingegen zeigte bereits nach 8,6 min eine Veränderung größer als BW2.

Nach der Farbveränderungsrate (siehe Abschnitt 5.1.2) sind die Veränderungen von MP3 auf D131-C und von MP2 und MP3 auf D131-D wie BW2 einzuordnen, sie zeigten relativ lineare Farbveränderungen im Test. Die Farbveränderungsrate von MP2 auf D131-C liegt zum Abbruch des Tests auf dem Niveau wie BW1.

Fazit

Auf den beiden untersuchten Gemälden von Hans Stübner wurden insgesamt sieben Farbflächen auf Lichtechtheit hin getestet. Bei allen Farbflächen sind messbare Veränderungen aufgetreten, nach absoluten Farbveränderungen im Lichtechtheitsbereich von BW2 bis BW3, nach der Farbveränderungsrate im Bereich zwischen BW1 und BW3. Aus diesen Ergebnissen folgt, dass ohne besondere Lichtschutzmaßnahmen bei dauerhafter Beleuchtung mit Farbveränderungen auf den Gemälden zu rechnen ist.

5.4.3 Gemälde von Gerhard Richter

Das Werk *Strip* (Werkverzeichnis 927-9, 2012) von Gerhard Richter²² wurde 2013 für die Galerie Neue Meister der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden erworben. In diesem Zusammenhang konnte die Lichtechtheit der Farbausdrucke mittels *Microfading*-Test überprüft werden. Gerhard Richter selbst machte sich zur Frage der Lichtechtheit dieser Drucke bisher keine Gedanken, war aber an den Ergebnissen der Untersuchung interessiert.²³ Für den Test stand ein Probeausdruck aus dem privaten Archiv Gerhard Richters zur Verfügung (Abbildung 42), so dass das Original in der Ausstellung verbleiben konnte.

Eine Herausforderung für die Untersuchung stellten die feingliedrigen, teils sehr dünnen Farbstreifen dar. Insgesamt waren auf dem Probeausdruck in etwa 500 einzelne Farbstreifen vorhanden mit einer Breite von ca.

0,25–2,50 mm. Bei einem Messpunktdurchmesser des MFT von 0,2 mm waren die Voraussetzungen für einen Test bei allen Streifen erfüllt.

Den Untersuchungen vorangestellt wurde eine mikroskopische Begutachtung und Dokumentation des Probeausdrucks (siehe Abbildung 43). Auswahlkriterien für die Messpunkte bei der MFT-Untersuchung waren eine möglichst gleichmäßige Bedruckung sowie das Vorhandensein eindeutiger Druckfarben ohne Überlagerungen von anderen Druckfarben.

Insgesamt wurden zwölf einzelne Streifen für die Tests ausgewählt. Diese Stellen erhielten Labels entsprechend der Position in mm auf dem Streifen und der Farbe des Streifens. Die verwendeten Farbezeichnungen waren *M-Magenta*, *C-Cyan*, *Y-Yellow*, *LC-LightCyan*, *G-Green*, *B-Black* (Beispiel: 29_M – Magenta-farbener Streifen bei 29 mm).

Vor der Messung am Probeausdruck wurden die Lichtechtheitstypen BW1–BW3 bei den gleichen Einstellungen und Bedingungen getestet.

Messbedingungen

Filter	UV+IR Filter
Beleuchtungsstärke	11,0 Mlx
Belichtungsdauer	15 Minuten
Belichtung	2,75 Mlxh
Weitere Einstellungen	Standardeinstellungen (4.2.6)



Abbildung 42: Probeausdruck zu Gerhard Richter – *Strip* (2012)

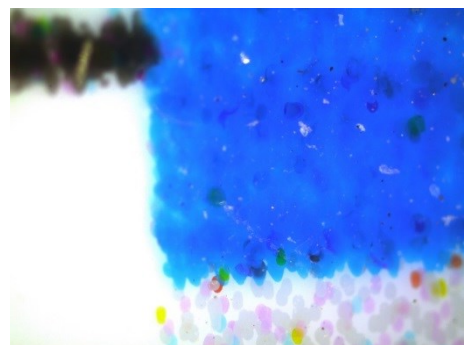


Abbildung 43: Mikroskopaufnahme des cyanfarbenen Streifens bei 4,8 mm

²² Gerhard Richter (geb. 1932 in Dresden) ist ein bedeutender deutscher Künstler.

²³ Private Kommunikation mit Kerstin Küster, Gerhard Richter Archiv (19.09.2016).

Ergebnisse

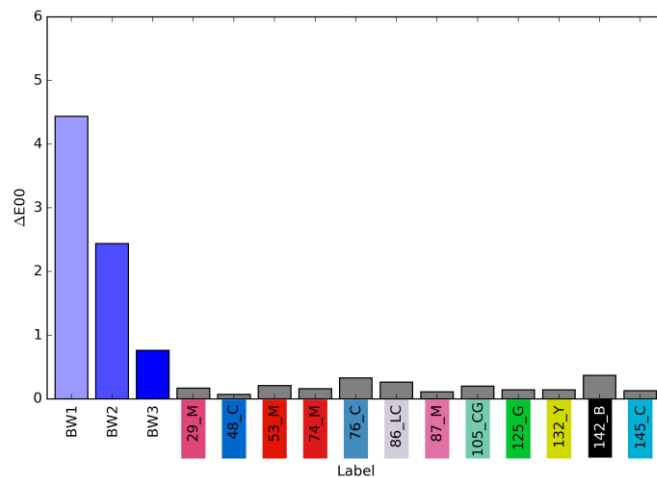


Abbildung 44: Farbveränderung der 12 Messpunkte auf dem Probeausdruck zu *Strip* nach Testende im Vergleich zu BW1–BW3 (RGB Hintergrundfarbe veranschaulicht die Farbigkeit der Messpunkte)

Die Farbveränderungen der zwölf Probestreifen zeigen zum Ende der Tests Werte zwischen $\Delta E_{00}=0,07$ und $\Delta E_{00}=0,37$. Diese Werte liegen deutlich unter dem Wert $\Delta E_{00}=0,76$ für BW3 nach 15 Minuten Belichtung, überwiegend sogar im Bereich unter dem Drift-Level (Abschnitt 4.2.5) von $\Delta E_{00}=0,20$.

Fazit

Alle untersuchten Stellen des Probeausdrucks weisen im Test mit dem MFT eine Lichteinheit besser als BW3 auf. Eine hohe Lichtempfindlichkeit nach CIE 157:2004 [11], d. h. wie BW1–BW3, ist auf den Messpunkten nicht festzustellen.

5.4.4 Fazit der MFT-Untersuchungen an Gemälden

Die MFT-Methode zur Untersuchung der Lichtecktheit auf Gemälden (und anderen Kunstobjekten) ist seit bald 20 Jahren bekannt, trotzdem sind nur von zwei Institutionen Untersuchungen an Gemälden publiziert [61, 111].

In der vorliegenden Arbeit wurde anhand von vier Kunstwerken demonstriert, dass die MFT-Methode sowohl im Labor als auch vor Ort im Museum als Lichtecktheitstest auf Gemälden angewandt werden kann.

Der Erkenntnisgewinn derartiger *Microfading*-Tests besteht zuerst in der Klärung der Frage, ob die Messpunkte aufgrund von Lichteinwirkung Veränderungen zeigen. Eine detailliertere Auswertung dieser Veränderungen mit Einbezug der Farbwertveränderungen ΔL^* , Δa^* , Δb^* bzw. ΔC^* , ΔH^* sollte stets vorgenommen werden, hilfreich ist auch der Einbezug der Farbveränderungsrate. Um Fehlinterpretationen der Messergebnisse, z. B. durch Rückgang der Vergilbung eines Firnisses bei der Messung [61], zu vermeiden, sollte vor der MFT-Untersuchung die Zusammensetzung der Malschicht unter Einbezug restauratorischer Fachexpertise geklärt werden.

Einschränkungen in der Interpretation (beispielsweise bei der Frage, ob die Reziprozität erhalten ist, d. h. wie sich die Ergebnisse auf Belichtungen bei geringer Beleuchtungsstärke übertragen lassen) sind nicht als Fehler der Methode anzusehen, sondern haben ihre Ursache im Material der Messpunkte [13, 111]. Deswegen ist die Verknüpfung von Materialuntersuchungen und *Microfading* vorteilhaft, wenn höchster Wert auf Langzeit-Aussagen gelegt wird. Für Sammlungen von Werken ab Mitte des 19. Jahrhunderts (nach Aufkommen der synthetisch-organischen Farbstoffe und Pigmente) ist die MFT-Untersuchung besonders ratsam (siehe Abschnitte 5.4.1 und 5.4.2) [111].

Die Methode ist nahezu zerstörungsfrei bzw. minimalinvasiv und bei dem gesetzten Grenzwert für Farbveränderungen von $\Delta E_{76}=5,0$ konnten weder mit bloßem Auge noch mit dem Mikroskop Veränderungen der Messpunkte beobachtet werden.²⁴

Der Aufwand für eine Messung vor Ort beträgt in etwa einen halben Arbeitstag für Aufbau und Vorbereitungen inklusive der Messung der Lichteckheitstypen. Die Messungen an den Kunstwerken können mit insgesamt 30 Minuten pro Messpunkt (inklusive der reinen Messzeit von 10–15 Minuten) veranschlagt werden. Einzuplanen ist zusätzlich der Zeitbedarf für die Vorauswahl der Messpunkte unter Einbezug von Restauratoren.

²⁴ Aussage von Sabine Bendfeldt nach den Untersuchungen an *Fanfarenbläser* (1929) von Fritz Tröger.

5.5 Vergleich Langzeit-Monitoring und Microfading

Farbveränderungen auf Gemälden sind als Schadensphänomene allgegenwärtig, sie sind jedoch nur in Ausnahmefällen tatsächlich zu beobachten, z. B. wenn lichtgeschützte Stellen unter einem Rahmen vorhanden sind und mit belichteten Stellen verglichen werden können [127]. Mithilfe von Messtechnik, insbesondere der Farbmessung, lassen sich Farbwerte potentiell lichtempfindlicher Objekte über einen längeren Zeitraum erfassen und so Veränderungsprozesse dokumentieren. Solche Farbmonitorings wurden bereits vereinzelt in Museen durchgeführt, z. B. auf Textilien [128], auf Gemälden bisher jedoch kaum.

In der Gemäldegalerie Alte Meister (GAM) in Dresden (Teilmuseum der Staatlichen Kunstsammlungen Dresden - SKD) befinden sich Gemälde von Bernardo Bellotto²⁵, auf denen Farbveränderungen von Preußisch Blau festgestellt wurden [129, 130]. Während der Sanierung der GAM bot sich die Möglichkeit, die Methoden Farbmonitoring und *Microfading* auf Bellottos Gemälde anzuwenden, die Ergebnisse zu vergleichen und parallel Mustertafeln mit verschiedenen Farbaufstrichen und Blau-Woll-Standards in die Untersuchung mit einzubeziehen. Zugleich wurde von der Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung der TU Dresden unter Leitung von Markus Rösler eine Analyse der Raumlufströmungen in der GAM vorgenommen, wobei gleichzeitig Daten der Beleuchtungsstärke erfasst wurden, die in die Auswertung hier mit einfließen.

Ziel war es einen Vergleich der Veränderungen bei verschiedenen Lichtsituationen bei Galerie-Beleuchtungsstärke (nach Regelungsvorgabe 50–200 lx) mit den Testergebnissen aus *Microfading*-Untersuchungen bei 10 Mlx vorzunehmen. Dazu wurde eine breite Datenbasis von Farbwerten an Messpunkten auf Gemälden und auf Musteraufstrichen sowie auf den BWS in verschiedenen musealen Beleuchtungssituationen über einen Messzeitraum von gut 1,5 Jahren erhoben.

Reziprozitätstest beim *Microfading* sind bisher nur im Vergleich mit Veränderungen in Lichtschränken durchgeführt worden [72], Vergleichsanalysen mit realer Museumsbeleuchtung stehen noch aus. Gerade in Bezug auf das Reziprozitäts-Verhalten der Blau-Woll-Standards besteht weiterer Klärungsbedarf [72, 89], um die Vorhersagequalität der MFT-Untersuchungen bei realer Belichtung im Museum zu evaluieren. Daher ist die Erfassung der Belichtung (Beleuchtungsstärke multipliziert mit Belichtungszeit) von zentraler Bedeutung [131], so dass die Ergebnisse der beiden Methoden *Microfading* und Farbmonitoring bei gleicher Belichtung in Relation gebracht werden können. Besonders berücksichtigt wird das auf den Werken Bellottos nachgewiesene Preußisch Blau [129], das die Eigenheiten hat, je nach Herstellungsverfahren und Weißausmischung verschieden lichtempfindlich zu sein [19, 132], verlorene Farbigkeit im Dunkeln zurückzugewinnen [21, 60] und ohne Sauerstoff in der Umgebung auszubleichen [49]. Teilergebnisse der Untersuchungen wurden vorab veröffentlicht [133].

²⁵ Bernardo Bellotto (gen. Canaletto) (1721/22 - 1780) war ein italienischer Maler, der v. a. für Stadtansichten von Venedig, Wien, Dresden und Warschau berühmt ist.

5.5.1 Vorbereitung und Datenerhebung

Die Vorbereitungen für das Messprogramm werden im Folgenden beschrieben. Im Einzelnen wird die Herstellung der Tafeln dargelegt, gefolgt von einer Charakterisierung der Standorte der Tafeln und abschließend einer Beschreibung der Methodik bei der Farbmessung und der Datenerhebung der Beleuchtungsstärke.

Herstellung der Tafeln

Insgesamt wurden 12 Mustertafeln unter der Leitung von Sabine Bendfeldt (SKD) und Marlies Giebe (SKD) angefertigt. Die Tafeln 1 bis 11 wurden einheitlich hergestellt, jeweils mit drei Farbaufstrichen und einem Streifen der acht Blau-Woll-Lichtecheitstypen. Die Flächen für die Farbaufstriche wurden mit klassischem Kreidegrund 3x vorgrundiert und geschliffen.

Die Materialien für die drei Aufstriche (siehe Abbildung 45) wurden in Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse der Malschichtzusammensetzung bei Bellottos Werken gewählt.

Der erste Aufstrich besteht aus Preußisch-Blau („45202 Miloriblaue LUX“, Kremer Pigmente) gemischt mit Bleiweiß („Bleiweiß, rein, bleihaltig, lichtecht, Kremserweiß“, Deffner & Johann), eine qualitative Zusammensetzung wie sie in Bellottos Werk am Himmel nachgewiesen wurde [129], allerdings mit der modernen Miloriblaue-Variante von Preußisch Blau.

Der zweite Aufstrich besteht aus Krapplack („372141 Krapplack aus Wurzeln, HOFF, eigene Herstellung“, Kremer Pigmente) und dem genannten Bleiweiß. Krapplack wurde gewählt, da es sich um ein lichtempfindliches Pigment handelt, was gerne von Künstlern verwendet wurde. Der dritte Aufstrich, der nur aus dem erwähnten Bleiweiß besteht, dient als Referenz, da Bleiweiß als lichtstabil gilt [134]. Für alle Aufstriche wurde Mohnöl („73600 Mohnöl raffiniert“, Kremer Pigmente) als Bindemittel verwendet, da es vergleichsweise wenig zu Vergilbungen neigt [24]. Zudem wurde etwas Spiköl („73800 Spiköl“, Kremer Pigmente) zur besseren Verstreichbarkeit beigemischt. Die Ausmischung der Aufstriche erfolgte ohne genaue Dokumentation der Gewichtsanteile. Die Aufstriche wurden von Franziska Rapp (SKD) nach Bereitstellung der Materialien unter Aufsicht von Sabine Bendfeldt hergestellt. Die vier Flächen (drei Aufstriche und der BWS-Streifen) sind mit schwarzem Karton zur Hälfte abgedeckt. Belichtete Flächen werden durchgängig mit Ziffer „1“ gekennzeichnet, abgedeckte Flächen mit Ziffer „0“.

Mustertafel 12 wurde speziell für das „Pastellkabinett“ mit sehr geringer Beleuchtungsstärke angefertigt. Hier sind nur eine Fläche mit Miloriblaue und die Blau-Woll-Lichtecheitstypen angebracht. Auf eine Vorgrundierung wurde verzichtet, der Träger auf Tafel 12 ist weißer Pappkarton.



Abbildung 45: Tafel 7 ohne Abdeckung (links), mit Abdeckung (rechts)

Charakterisierung der Standorte der Tafeln

Die Auswahl der Standorte der 12 Tafeln richtete sich nach den Lichtsituationen vor Ort. Ziel war es, die verschiedenen Beleuchtungssituationen im 1. und 2. OG der Gemäldegalerie abzudecken (Tabelle 20). Zusätzlich wurden an besonders interessanten Stellen (wie neben der Canaletto-Ansicht und im Pastellkabinett) Tafeln positioniert.

Tabelle 20: Standorte der Mustertafeln und vorherrschende Lichtsituation

Nr.	Ort	Beschreibung	Lichtsituation
1	Atelier	Dunkel-Referenz	Dunkelheit
2	GAM, 1.OG, 1-10	am „Zinsgroschen“	LED (ca. 3500K)
3	GAM, 1.OG, 1-31	Nordseite	LED (ca. 3500K)
4	GAM, 1.OG, 1-04	Canaletto-Ansicht	Tageslicht hinter Glas und Kronleuchter (ca. 2800 K)
5	GAM, 1.OG, 1-04	Bellottosaal (Ostseite)	Tageslicht hinter Glas und Kronleuchter (ca. 2800 K)
6	Atelier	Nordseite	Tageslicht hinter Schutzglas
7	GAM, 2.OG, 2-12	Rauminformation	Oberlicht und/oder LED (ca. 3800K)
8	GAM, 1.OG, 1-04	Bellottosaal (Nordseite)	Tageslicht hinter Glas und Kronleuchter (ca. 2800 K)
9	Atelier	Dunkel-Referenz	Dunkelheit
10	GAM, 1.OG, 1-14	Thiele-Saal	Oberlicht und/oder LED (ca. 3800K)
11	privat	Südseite hinter Fenster	Tageslicht hinter Glas, ohne direkte Sonneneinstrahlung
12	GAM, 2.OG, 2-10	Pastellkabinett	Oberlicht und/oder LED (ca. 3800K)

Im Verlauf der Untersuchungen kam es zu Umstrukturierungen in der Galerie, die nach einem Wechsel in der Museumsleitung initiiert wurden. Dies hatte zur Folge, dass einige Gemälde und Tafeln neu positioniert wurden. Im Detail betraf das die folgenden Objekte:

- Tafel 3 wurde wenige Tage nach Beginn der Belichtung von der Position direkt bei der Informationstafel am Ende der Osthalle in die Mitte der Osthalle gehängt. Die räumliche Ausrichtung der Tafel (Richtung Nordost) blieb erhalten.
- Tafel 4 und 5 wurden am 18.10.2016 mit den beiden Gemälden, neben denen sie angebracht waren, in den Thiele-Saal (1-14) umgehängt.
- Tafel 8 wurde ab dem 28.11.2016 in Dunkelheit gelagert und war ab dem 08.05.2017 wieder in Raum 1-04 bei neuer Beleuchtungssituation exponiert.

Für Tafel 3 wurde keine gesonderte Berücksichtigung der Neupositionierung vorgenommen, da näherungsweise die gleiche Beleuchtungsstärke an beiden Positionen herrschte. Für die Tafeln 4, 5 und 8 wurde die Änderung der Beleuchtungssituation bei der Bestimmung der Belichtung taggenau berücksichtigt.

Messmethodik

Die Farbwerte der belichteten und der geschützten Testflächen wurden einmal direkt vor Beginn der Belichtung am 29.02.2016 erhoben. Wiederholungsmessungen wurden in der Folge in Rhythmus von drei Monaten durchgeführt:

Messung I	29.02.2016	Messung V	27.02.2017
Messung II	30.05.2016	Messung VI	22.05.2017
Messung III	29.08.2016	Messung VII	04.09.2017
Messung IV	28.11.2016		

Die Tafeln wurden zur Messung mit dem Spektralphotometer (Abschnitt 4.1) aus der Galerie ins Labor der HfBK Dresden gebracht. Dabei waren die folgenden Einstellungen in Verwendung: Lichtart D65, 2° Normalbeobachter, SCI (Glanzeinschluss), 100 % UV, 3 mm

Messblende. Von jeder Fläche (geschützt und belichtet) wurden fünf unabhängige Einzelmessungen aufgenommen, die zu einem Mittelwert verrechnet wurden. Die Abweichungen der Einzelmessungen (*Mean Colour Difference to the Mean* [48]) wurden ebenfalls bestimmt.

Datenerhebung Beleuchtungsstärke

Die Details der Beleuchtungssituation in der Galerie und das Vorgehen bei der Ermittlung der Belichtungswerte sind in Anhang F beschrieben.

Für die Messung der Beleuchtungsstärke standen drei Systeme zur Verfügung. Erstens, die internen Raumlichtsensoren des Museums, zweitens mobile Luxmeter der TU Dresden (Institut für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung), und drittens ein Handmessgerät²⁶.

Die internen Raumlichtsensoren werden zur Steuerung des Raumlichts genutzt. Daten der Beleuchtungsstärke werden bei jeder Änderung gespeichert, die Bereitstellung der Daten erfolgte durch Kai-Uwe Metzler (SKD).

Die mobilen Luxmeter protokollierten die Beleuchtungsstärke im Abstand von 1 Minute. Die Betreuung der Messstationen und Bereitstellung der Daten wurde von Markus Rösler (TU Dresden) übernommen.

Bei den Freihandmessungen des Autors mit dem Handmessgerät wurden nur Einzelwerte protokolliert.

Die mobilen Luxmeter waren neben Tafel 2, 3 und 4 angebracht. Die Raumlichtsensoren des Museums lieferten die Daten der Beleuchtungsstärke an Tafel 7, 10 und 12. Für Tafel 5 und 8 wurden die Werte über eine Korrelation zwischen den Messdaten der mobilen Luxmeter und Handmessungen an den Tafeln bestimmt (Anhang F). Für Tafel 6 und 11 konnten nur kurze Messungen der Beleuchtungsstärke über eine Woche bei einem Messintervall von 5 Minuten mit dem Handmessgerät vorgenommen werden.



Abbildung 46: Standorte von Tafel 3 (oben) mit mobilem Luxmeter und Tafel 7 (unten) neben dem Raumlichtsensor der Gemäldegalerie

²⁶ Als Handmessgerät wurde das Luxmeter VOLT-CRAFT BI-10L verwendet.

5.5.2 Microfading an Mustertafeln

Die Musteraufstriche und Blau-Woll-Lichtechtheitstypen auf Tafel 11 wurden nach Herstellung und Trocknung direkt vor Start der Belichtung mit dem MFT untersucht. Auf jeder Fläche wurden drei Einzelmessungen durchgeführt und deren Mittelwert bestimmt.

Bei den Tests mit den Standardeinstellungen (siehe Abschnitt 4.2.6) herrschten ca. 10,3 Mlx im Messpunkt, was bei 25 Minuten Testdauer einer Belichtung von ca. 4,3 Mlxh entspricht.

Ergebnisse

Für die Lichtechtheitstypen BW1–BW4 wurde eine Zunahme der Helligkeit verbunden mit einem Rückgang der Blauheit (Zunahme Gelbheit b^*) gemessen (Abbildung 47 und Tabelle 21). Nicht dargestellt werden die Messreihen der Lichtechtheitstypen BW5–BW8, die nur geringe Veränderungen im Test erfuhren ($\Delta E_{00} < 0,5$) und für die weitere Interpretation nicht relevant sind.

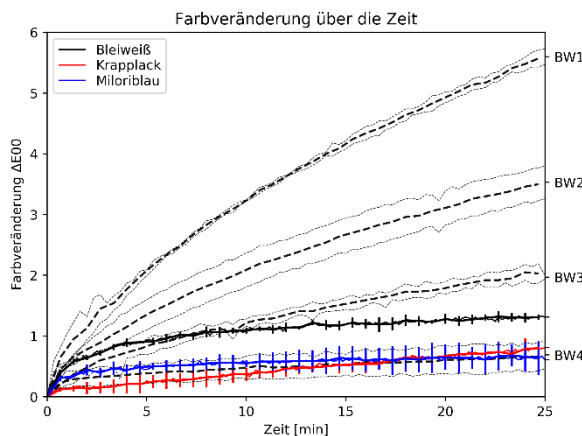


Abbildung 47: Farbveränderungen der drei Probeaufstriche über MFT-Belichtungszeit

Muster	ΔL^* (σ)	Δa^* (σ)	Δb^* (σ)	$d(\Delta E)/dt$ [1/min]
BW1	4,6 (0,1)	-3,1 (0,6)	12,1 (1,3)	0,140
BW2	2,8 (0,4)	0,6 (0,2)	7,2 (0,2)	0,084
BW3	1,9 (0,2)	-1,4 (0,3)	3,6 (0,5)	0,046
BW4	0,4 (0,5)	0,7 (0,1)	0,2 (0,2)	0,008
Bleiw.	0,2 (0,1)	0,4 (0,1)	-1,3 (0,1)	0,014
Krapp	0,8 (0,2)	-0,5 (0,2)	0,1 (0,3)	0,024
Milori	0,6 (0,1)	0,3 (0,1)	-0,6 (0,7)	0,006

Tabelle 21: Farbwertänderungen und Farbveränderungsraten zum Ende der Tests

Die Farbveränderungen der Aufstriche fielen im Test allesamt gering aus, nach absoluten Farbabständen zeigten die Miloriblau- und Krapplackaufstriche Veränderungen wie BW4, der Bleiweißaufstrich hingegen Veränderungen wie BW3-4 (siehe Abbildung 47). Bei Einbezug der Farbveränderungsrate nach Abschnitt 5.1.2 wird der Krapplackaufstrich wie BW3-4 klassifiziert, die Bleiweiß- und Miloriblaaufstriche wie BW4 (siehe Tabelle 21).

Beim Bleiweiß- und Miloriblaaufstrich wurden zu Beginn der Tests (bis ca. 3 Minuten) rasche Veränderungen registriert, danach blieben die Farbwerte relativ konstant. Beim Bleiweißaufstrich lag der Hauptbeitrag zur Veränderung in einem Rückgang von b^* (eine geringe Gelbheit von durchschnittlich $b^*=3,0$ wurde zu Beginn festgestellt). Beim Krapplackaufstrich wurde eine relativ lineare Zunahme der Farbveränderung über die Zeit gemessen, dabei nahm die Helligkeit L^* zu, die Buntheit C^* (v. a. der Rotwert a^*) ging geringfügig zurück.

Die Messwerte der Miloriblau-Testaufstriche wiesen im Vergleich mit den anderen beiden Aufstrichen die größte Streuung innerhalb der drei Testreihen auf. Hier wurden eine Helligkeitszunahme und eine Zunahme der Buntheit (in dem Fall der Blauheit) festgestellt.

Diskussion und Fazit

Die Blau-Woll-Standards verhalten sich entsprechen der Erwartung, es wird das typische Ausbleichen, das mit einer Helligkeitszunahme und einem Buntheitsrückgang einhergeht, gemessen. Zudem entsprechen die gemessenen Farbveränderungen anderen Messreihen (siehe Abschnitt 5.1.2). Die Aufstriche zeigen nur vergleichsweise geringe Farbveränderungen, am größten ist dabei die Veränderung des Bleiweißaufstrichs, auf dem Krapplackaufstrich ist hingegen die größte Farbveränderungsrate bei einer relativ linearen Veränderung zu verzeichnen.

Bei den Bleiweiß- und den Miloriblaaufstrichen sind die gemessenen Veränderungen nicht auf das Pigment, sondern auf das Bindemittel zurückzuführen. Bleiweiß, ein anorganisches Pigment (Bleihydroxidcarbonat), gilt als lichtstabil wie BW8 [134], ebenso wie Miloriblau, das nach Herstellerangaben eine Lichteichtheit von BW8 aufweist [135]. Andere Bestandteile der Malschicht, in dem Fall das Bindemittel, müssen für die Veränderungen verantwortlich sein. Die anfänglichen Veränderungen der Farbwerte (bei Bleiweiß eine Zunahme der Helligkeit L^* und ein Rückgang Gelbheit b^* ; bei Miloriblau eine Erhöhung der Blauheit (Rückgang Gelbheit) sowie eine geringe Aufhellung) sind mit einem Rückgang der Vergilbung in Verbindung zu bringen. Wie unten gezeigt (siehe Abschnitt 5.5.3), treten auf den Tafeln während der Langzeitbelichtung bei geringer Beleuchtungsstärke oder in Dunkelheit starke Vergilbungen auf.

Vergilbungsprodukte sind bei harzhaltigen Bindemittel schon innerhalb von Stunden nach Herstellung nachzuweisen [136], bei ölhaltigen Bindemittel ist das auch zu erwarten [137]. Die MFT-Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass solche Vergilbungsprodukte zum Messzeitpunkt bereits vorhanden waren und durch die Belichtung zerstört, d. h. ausgebleicht, wurden.

In der Konsequenz stellt sich die Miloriblau-Ausmischung als lichtstabil heraus und die Verwendung eines lichtempfindlicheren Preußisch-Blau-Typs [19, 129] wäre von Vorteil gewesen.

Beim Krapplackaufstrich sollte der Effekt des Rückgangs der Vergilbung auch Teil der Messergebnisse sein, jedoch treten Vergilbungerscheinungen bei roter Farbigkeit im Vergleich zu weißen oder blauen Farbaufstrichen kaum hervor [136]. Die Farbveränderung beim Krapplack im Test unterscheidet sich qualitativ von den Ergebnissen der beiden anderen Aufstriche. Die gemessene lineare Farbveränderung deutet auf eine Veränderung der Pigmentanteile des Krapplacks durch die Belichtung hin, bei Klassifizierung nach der Veränderungsrate ähnlich wie BW3-4, bei Klassifizierung nach absoluten Farbveränderungen eher wie BW4. In der Literatur wird Krapplack je nach Konzentration eine Lichteichtheit zwischen BW5 und BW7 zugeschrieben [12]. D. h. der hier verwendete Aufstrich scheint eine leicht erhöhte Lichtempfindlichkeit aufzuweisen, womöglich bedingt durch den Herstellungsprozess, beispielsweise eine vergleichsweise geringe Teilchengröße.

5.5.3 Monitoring an Mustertafeln

Die Darstellung der Ergebnisse des Farbmonitorings über die sieben Messzeitpunkte im Abstand von ca. drei Monaten ist nach Art der Muster gegliedert: Zuerst werden die Veränderungen der Aufstriche präsentiert und diskutiert, gefolgt von der Auswertung der Veränderungen der Blau-Woll-Standards. Die Lichtsteuerung in der Galerie sieht Regelwerte zwischen 50–200 lx vor, an den Standorten der Mustertafeln herrschten über den Großteil des Untersuchungszeitraums durchschnittliche Beleuchtungsstärken zwischen 30–300 lx (siehe Anhang F).

5.5.3.1 Farbveränderungen der Aufstriche

Die Details der Farbwertveränderungen werden hier mit den Werten der Buntheitsänderung ΔC^* und der Bunttonänderung ΔH^* diskutiert, da so die wesentlichen Aspekte der Veränderungen ohne Erläuterung der Ausgangsfarbwerte erfassbar sind.

Von den drei Aufstrichen erfuhren die Bleiweißaufstriche über den Messzeitraum von gut 1,5 Jahren die größten Veränderungen (mit bis zu $\Delta E_{00}=7,3$ auf Tafel 9, siehe Abbildung 48). Dies gilt sowohl für die im Dunkeln gelagerten Referenztafeln (Tafel 1 und 9) als auch für die belichteten Tafeln bei geringer Beleuchtungsstärke (hier Tafel 4, 5 und 8 bis zum Messzeitpunkt III am 29.08.2016). Die Veränderungen der Bleiweißaufstriche waren mit Ausnahme von Tafel 6 und 11 derart, dass eine Zunahme der Buntheit C^* den Hauptbeitrag zur Farbveränderung lieferte (Tabelle 22), die vor allem durch einen Anstieg in b^* begründet ist („Vergilbung“). Auf Tafel 6 – bei hoher Beleuchtungsstärke außerhalb der Galerie – war ein Rückgang der (Anfangs-) Gelbheit zu messen, der Bleiweißaufstrich auf Tafel 11 blieb farblich nahezu konstant.

Auf Tafel 4 und 5 erhöhte sich durch die Umpositionierung ab dem 18.10.2016 die durchschnittliche Beleuchtungsstärke am Tag um gut 20 % von unter 90 lx auf über 105 lx (bei Tafel 8 ab dem 08.05.2017 auf ca. 700 lx²⁷) – siehe Anhang Tabelle F.1. In diesen drei Fällen führte die Erhöhung der täglichen Belichtung zu einem Rückgang der Vergilbungen auf den Bleiweißaufstrichen.

Tabelle 22: Farbwertänderungen der belichteten Musteraufstriche zum Zeitpunkt VII (04.09.2017)

Tafel	Bleiweiß_1			Krapplack_1			Miloriblau_1		
	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
1	-1,53	9,12	-0,74	-0,54	0,22	0,45	-0,76	-3,14	-5,13
2	-0,65	4,14	-0,42	-0,17	1,04	0,26	-1,10	-0,80	-1,11
3	-0,67	4,44	-0,55	0,79	1,01	0,39	-0,88	-0,76	-0,90
4	-0,13	2,49	-0,29	0,16	0,95	0,16	-0,85	-0,46	-0,32
5	-0,28	1,91	-0,05	1,14	0,82	0,27	-1,02	-0,42	-0,41
6	-0,13	-1,35	-0,27	3,35	1,84	0,80	0,35	-0,33	-0,20
7	-0,28	1,68	-0,29	1,44	0,96	0,29	-0,74	-0,16	0,12
8	-0,36	0,42	-0,24	1,30	1,17	0,41	-0,88	0,41	0,58
9	-0,60	9,60	-0,16	-0,55	0,13	0,47	-0,33	-3,25	-5,19
10	-0,35	1,76	-0,29	1,37	1,19	0,40	-0,76	-0,22	0,03
11	-0,11	0,08	-0,13	3,40	1,68	0,81	0,48	-1,42	-0,98
12	-	-	-	-	-	-	0,55	-0,38	-0,77

²⁷ Grund für diesen extremen Anstieg war die dauerhafte Entfernung der Lichtschutzpaneele, da im Raum keine Gemälde mehr gezeigt wurden. So stellt das Außenlicht den Hauptbeitrag zur Beleuchtungsstärke in Raum 1-04 dar.

Für die Krapplack-Aufstriche wurde ein moderater, relativ linearer Anstieg der Farbveränderung über den Messzeitraum festgestellt (Abbildung 49). Groß waren die Veränderungen besonders an den Tafeln mit hoher Belichtung: Bei den Krapplackaufstrichen auf Tafel 6 und 11 außerhalb der Galerie und auf Tafel 7 und 10, sowie auf Tafel 8 ab dem 08.05.17 in der Galerie (siehe Abbildung 49).

Im Detail setzten sich die Farbveränderungen der belichteten Krapplackflächen v. a. aus einer Zunahme der Helligkeit und einer Zunahme der Buntheit zusammen. Auf den Dunkelreferenzen (Tafel 1 und 9) wurden für den Krapplackaufstrich nur geringe Veränderungen bis zu $\Delta E_{00}=0,5$ festgestellt.

Für Miloriblau wurden die größten Veränderungen bei den dunkel gelagerten Aufstrichen registriert (Tafel 1 und 9, siehe Abbildung 50). Diese Veränderungen nahmen kontinuierlich zu und sind vor allem durch eine Verschiebung des Bunttons hin zu Grün bestimmt ($\Delta H^* < 0$). Die Farbwerte der Miloriblaaufstriche auf den Tafeln in der Galerie erfuhren nur geringfügige Veränderungen, meist zusammengesetzt aus einem Rückgang in Helligkeit und Buntheit, verknüpft mit einer Verschiebung des Bunttons Richtung Grün (Tabelle 22). Auf den Tafeln 6, 11 und 12 wurde hingegen eine geringe Helligkeitszunahme erfasst, ebenfalls mit einer geringfügigen Verschiebung des Bunttons zum Grün. Aufgrund dieser Farbwertveränderungen sind wie auf den Bleiweißaufstrichen die Veränderungen auf den Miloriblaaufstrichen als Vergilbungen anzusehen. Ähnlich wie bei den Bleiweißaufstrichen gingen die Veränderungen der Miloriblaaufstriche auf den Tafeln 4, 5 und 8 durch die Umpositionierung in Räume höherer Beleuchtungsstärke zurück.

Die Veränderungen der Miloriblau- und Bleiweißaufstriche auf den Tafeln 2, 3, 7, 10 und 12 traten vor allem innerhalb des ersten Messzeitraums bis zum 30.05.16 in Erscheinung und blieben bis zum Ende des Monitorings annähernd auf diesem Niveau.

Diskussion und Fazit

Auf allen Bleiweißaufstrichen in der Galerie wurden Vergilbungen festgestellt, die umso stärker ausgeprägt waren, je geringer die Belichtung war. Bleiweiß als anorganisches Pigment ist äußerst lichtecht [134] und gemessene Veränderungen sind demzufolge auf andere Bestandteile der Malschicht, also das Bindemittel, zurückzuführen. Zudem sind Vergilbungsprozesse auf weißen Malschichten besonders deutlich zu identifizieren [136].

Der Miloriblaaufstrich erwies sich bei großer Belichtung (Tafel 6) als stabil, das Datenblatt des Herstellers gibt BW8 für die Lichtechtheit an [135]. In Weiß-Ausmischungen kann für Preußisch-Blau Typen nach historischem Herstellungsprozess die Lichtechtheit deutlich geringer ausfallen [19, 138], was sich bei den Aufstrichen im Untersuchungszeitraum allerdings nicht zeigte. Die gemessenen Farbveränderungen sind auch bei den Miloriblaaufstrichen als Vergilbungen zu identifizieren und es besteht eine große Ähnlichkeit zu den Veränderungserscheinungen der Bleiweißaufstriche.

5.5 Vergleich Langzeit-Monitoring und Microfading

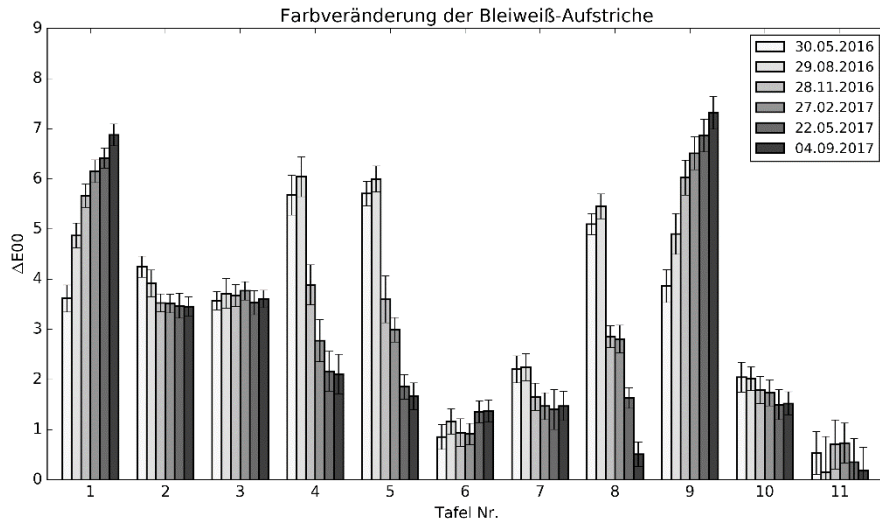


Abbildung 48: Farbveränderungen der Bleiweiß-Aufstriche im Verlauf des Monitorings

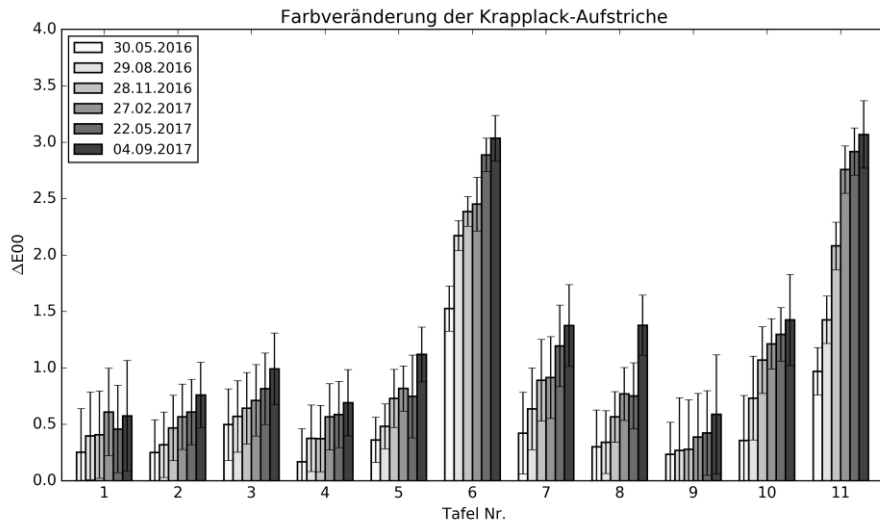


Abbildung 49: Farbveränderungen der Krapplack-Aufstriche im Verlauf des Monitorings

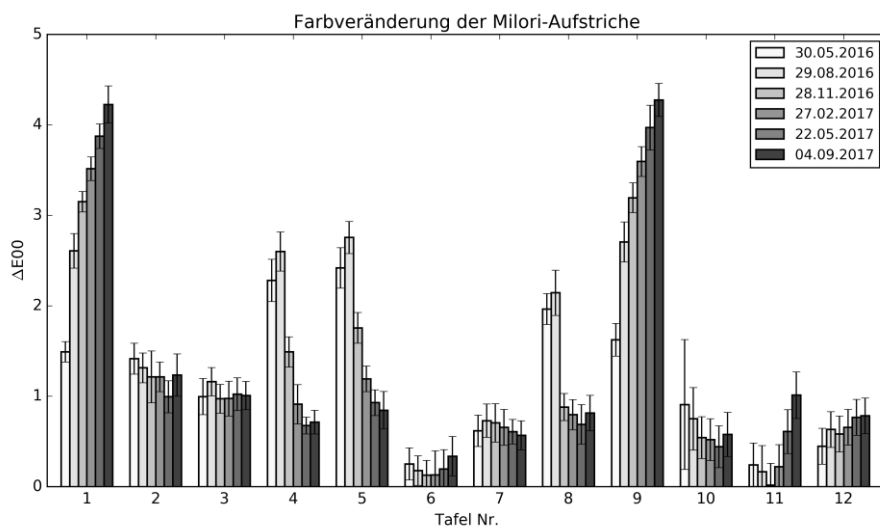


Abbildung 50: Farbveränderungen der Miloriblauf-Aufstriche im Verlauf des Monitorings

Insgesamt lassen sich die festgestellten Erscheinungen auf den Bleiweiß- und Miloriblauaufstrichen in vier Gruppen zusammenfassen:

- 1) In konstanter Dunkelheit nimmt die Vergilbung mit der Zeit zu, die Zunahme wird aber mit der Zeit geringer (Tafel 1 und 9) [139].
- 2) Bei geringer Beleuchtungsstärke (tagsüber < 90 lx und nachts in Dunkelheit) kommt es ebenfalls zu starker Vergilbung (Tafel 4, 5, 8 bis zum 29.08.16). Bei Erhöhung der tagsüber einwirkenden Beleuchtungsstärke auf Werte größer 105 lx wird ein Rückgang der Vergilbung eingeleitet.
- 3) Bei mittlerer Beleuchtungsstärke (100–300 lx, Tag-Nacht Zyklus), ist eine Anfangsvergilbung festzustellen, die dann relativ konstant bleibt (Tafel 2, 3, 7, 10), auch wenn die durchschnittliche Beleuchtungsstärke bei den Tafeln 2 und 3 ab dem 29.11.16 auf 60–80 lx abfällt.
- 4) Bei hoher Beleuchtungsstärke (tagsüber > 1000 lx) sind Vergilbungserscheinungen kaum ausgeprägt (Tafel 6 und 11).

Diese Ergebnisse lassen sich so verstehen, dass ein Wettstreit zwischen Erzeugung von Vergilbungsprodukten und deren Zerstörung stattfindet. Ist die Beleuchtungsstärke niedrig oder herrscht Dunkelheit werden nur wenige bzw. gar keine Vergilbungsprodukte durch Licht zerstört und die Vergilbung nimmt zu. Dieser Effekt wurde bei verschiedensten ölhaltigen Bindemitteln im Wechsel von Belichtung und Dunkelheit mehrfach aufgezeigt [22–24].

Ab einem Schwellenwert für die Beleuchtungsstärke, der nach diesen Messungen für Mohnöl zwischen 90 und 105 lx liegt, werden mehr Vergilbungsprodukte zerstört als gebildet werden können und die Vergilbung geht zurück bzw. wird nicht ausgeprägt. Ein ganz ähnlicher Schwellenwert zwischen 50 und 150 lx Beleuchtungsstärke wurde bei Untersuchungen zur Vergilbung von Acryl-Bindemitteln gefunden [140].

Der in Gruppe 3) genannte Effekt, dass die Anfangsvergilbung trotz Verringerung der Beleuchtungsstärke ab dem 29.11.16 nicht weiter zunimmt, kann an der fortgeschrittenen Trocknung des Mohnöls liegen [137].

Die Messungen verdeutlichen einen Unterschied zwischen den Bleiweiß- und Miloriblauaufstrichen auf der einen Seite und den Krapplackaufstrichen auf der anderen Seite. Auf ersteren treten Farbveränderungen in Form von Vergilbungen auf während bei den Krapplackaufstrichen die Farbveränderungen im Sinne eines Ausbleichens in Abhängigkeit der Belichtung zu verstehen sind, deutlich v. a. bei den Tafeln 6 und 11 außerhalb der Galerie. Dies drückt sich in einem Unterschied der Qualität der Farbwertveränderungen zwischen den Dunkelreferenzen und den belichteten Farbflächen aus, der bei den Krapplackaufstrichen existent ist, jedoch nicht bei den Bleiweiß- und Miloriblauaufstrichen. Die Zunahme der Helligkeit bei Belichtung ist bei Krapplack zu erwarten, die Zunahme der Buntheit entspricht nicht direkt der Erwartung, trat aber schon bei anderen Untersuchungen gerade zu Beginn der Belichtung auf [18, 141].

Die Veränderungen der Krapplackaufstriche nehmen bei den belichteten Tafeln über die Zeit hinweg zu. Krapplack hat einen vergleichsweise hohen Bindemittelbedarf [142], demzufolge sind die Ausgangsstoffe für Vergilbungen vorhanden. Dass hier scheinbar keine oder nur untergeordnete Vergilbungen gemessen werden, muss vorrangig an der Farbigkeit, also dem Remissions- und Absorptionsverhalten, von Krapplack liegen. Dass auf roten Farbmitteln kaum Vergilbungen sichtbar werden, ist bereits bekannt [136].

Der Vergleich der Ergebnisse des Monitorings mit den vorangegangenen *Microfading*-Tests an den Tafeln erfolgt im Abschnitt 5.5.4.

5.5.3.2 Farbveränderungen der belichteten Blau-Woll-Standards

Die Verknüpfung der Daten für die Belichtung mit den Daten der Farbveränderungen ist für BW1 und BW2 in Abbildungen 51 bzw. 52 dargestellt. Die Unsicherheiten für die Messwerte der Farbveränderungen (MCDM) sind deutlich größer als die Unsicherheit der Belichtungs-werte. Dies betrifft allerdings nicht die Messungen an Tafel 6 und 11. Die Unsicherheit der Belichtung ist bei diesen beiden Tafeln so groß, dass deren Farbveränderungen nicht dargestellt werden.

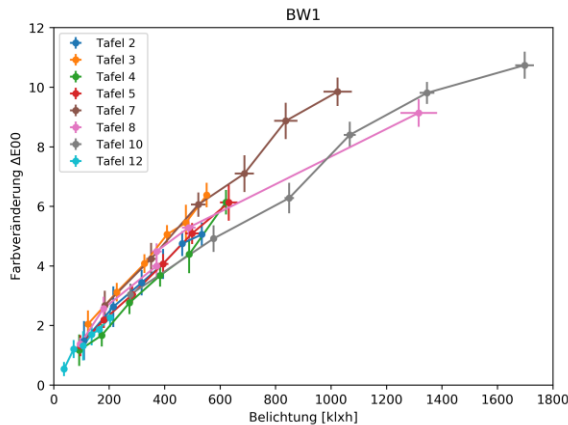


Abbildung 51: Farbveränderungen der BW1-Standards in Abhängigkeit der Belichtung (relevanter Ausschnitt der Tafeln in der Galerie)

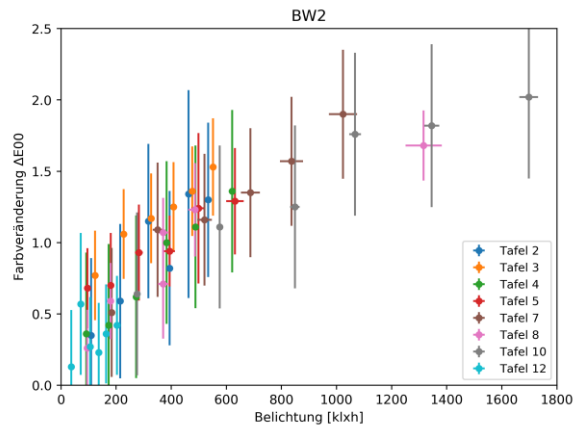


Abbildung 52: Farbveränderungen der BW2-Standards in Abhängigkeit der Belichtung (relevanter Ausschnitt der Tafeln in der Galerie)

Im Messzeitraum wurden auf allen BW1-Flächen Farbveränderungen größer als $\Delta E_{00}=1,5$ (Größenordnung von 1 JND [12, 44]) registriert (Abbildung 51). Die Veränderungen auf BW1 nahmen mit zunehmender Belichtung kontinuierlich zu. Außerhalb der Galerie wurden Veränderungen bis zu $\Delta E_{00}=19,5$ (Tafel 6) festgestellt. In der Galerie wurde die größte Veränderung von BW1 zum Ende des Monitorings auf Tafel 10 (R1-14) mit $\Delta E_{00}=10,7$ gemessen, die kleinste Veränderung auf Tafel 12 (Pastellkabinett) mit $\Delta E_{00}=2,2$.

Auf den BW2 Flächen in der Galerie wurde im Messzeitraum auf den Tafeln 3, 7, 8 und 10 ein Wert von $\Delta E_{00}>1,5$ erreicht (Abbildung 52).

Auffällig ist das Verhalten von BW1 und BW2 auf Tafel 8, welche nach dem Messzeitpunkt IV in Dunkelheit gelagert wurde. Bis zum nächsten Messzeitpunkt sind auf beiden Lichtechtheitstypen weitere Farbveränderungen zu verzeichnen (Zunahme bei BW1 um ca. $\Delta E_{00}=0,5$, BW2 um ca. $\Delta E_{00}=0,4$). Nach erneuter Belichtung ab dem 08.05.2017 nahmen die Farbveränderungen weiter zu.

Für die übrigen Lichtechtheitstypen BW3–BW8 sind die gemessenen Veränderungen in Tabelle 23 gezeigt. Auf den Tafeln 6 und 11 außerhalb der Galerie kam es für BW3 zum Ende der Messungen zu Veränderungen größer als $\Delta E_{00}=1,5$. Alle übrigen Testflächen erfuhren Veränderungen kleiner als 1 JND, die teils aber signifikant sind, d. h. $\Delta E_{00}>2 \cdot \text{MCDM}$.

Tabelle 23: Farbveränderungen der BWS 3–8 bis zum Zeitpunkt VII (1,5 Jahre Belichtungszeit)

BWS	BW3_1		BW4_1		BW5_1		BW6_1		BW7_1		BW8_1							
	Tafel	ΔE_{00}	MAX	MCDM	ΔE_{00}	MAX	MCDM	ΔE_{00}	MAX	MCDM	ΔE_{00}	MAX	MCDM					
1		0,55	0,36		0,69	0,18		0,42	0,25		0,39	0,18		0,23	0,13		0,11	0,25
2		0,87	0,58		0,29	0,39		0,52	0,23		0,44	0,30		0,36	0,23		0,36	0,17
3		0,86	0,40		0,25	0,19		0,30	0,20		0,23	0,24		0,13	0,29		0,49	0,24
4		0,61	0,55		0,25	0,22		0,21	0,42		0,30	0,47		0,33	0,18		0,42	0,25
5		1,61	0,36		0,50	0,31		0,44	0,23		0,27	0,20		0,25	0,18		0,35	0,25
6		2,69	0,37		0,83	0,28		0,78	0,19		0,87	0,21		0,83	0,16		0,70	0,37
7		0,92	0,35		0,43	0,26		0,29	0,22		0,33	0,21		0,31	0,17		0,63	0,24
8		0,88	0,23		0,41	0,38		0,44	0,34		0,26	0,25		0,34	0,34		0,52	0,27
9		0,87	0,35		0,28	0,24		0,55	0,31		0,48	0,22		0,06	0,38		0,24	0,31
10		1,03	0,64		0,47	0,22		0,39	0,23		0,26	0,26		0,27	0,30		0,50	0,24
11		3,38	0,37		1,19	0,17		1,11	0,21		0,56	0,20		0,63	0,23		0,29	0,32
12		0,36	0,30		0,18	0,29		0,20	0,35		0,36	0,33		0,18	0,22		0,15	0,31

Diskussion und Fazit

Die größte Belichtung in der Galerie erfuhr Tafel 10 mit knapp 1,8 Mlxh (Anhang F). Nach CIE 157 [11], die Werte von Farbveränderungen der BWS mit Belichtungswerten verknüpft, waren v. a. Veränderungen von BW1 und BW2 zu erwarten, die übrigen Standards sollten nur Veränderungen kleiner als 1 JND ($\Delta E_{00}=1,5$) aufweisen. Die Messdaten spiegeln im Wesentlichen dieses Bild wider, die Lichtechtheitstypen BW1 und BW2 erfuhren signifikante Farbveränderungen größer als $\Delta E_{00}=0,5$, für BW1 allesamt größer als 1 JND.

Auf BW3 und allen stabileren Lichtechtheitstypen wurden in der Galerie nur Veränderungen kleiner als die JND gemessen (Ausnahme BW3 auf Tafel 5). Die gemessenen signifikanten Veränderungen von geringem Ausmaß auf den stabileren Lichtechtheitstypen sind als beginnende Veränderungen zu interpretieren.

Für BW1 und BW2 lässt sich das Ausbleichverhalten in klarem Zusammenhang zur aufgetragenen Belichtung bringen. Die durchschnittlichen Belichtungswerte für das Erreichen der JND von BW1 liegen bei ca. 0,16 Mlxh und damit niedriger als der von der CIE veröffentlichten Wert von 0,3 Mlxh [11]. Diese Abweichung wurde kürzlich auch von anderen Institutionen festgestellt [111].

Eine Abhängigkeit des Ausbleichverhaltens von der spektralen Zusammensetzung der Beleuchtungsquelle lässt sich aus dem vorliegenden Datensatz nicht ableiten. Exemplarischen sei auf die Veränderungskurven für BW1 auf Tafel 2 (bei ca. 3500 K Farbtemperatur) und Tafel 5 (bei ca. 2800 K) verwiesen (siehe Abbildung 51), die nahezu gleichauf verlaufen. Die Intervallbreite für die Veränderungen von BW1 liegt zu Beginn der Messreihe bei $\Delta E_{00}=0,5$ und wächst mit zunehmender Belichtung an. Insgesamt bleiben die Abweichungen aber kleiner als der halbe Farbabstandswert zwischen BW1 und BW2, der als intrinsische Ungenauigkeit der BWS aufgefasst wird [69]. Die Frage, ob UV-Anteile in der Beleuchtung vorhanden sind oder nicht, ist für das Ausbleichen der BWS wohl von entscheidenderem Einfluss als die spektrale Zusammensetzung der Lichtquelle allein [102]. Für Kurzzeituntersuchungen bei geringer Beleuchtungsstärke (50 lx oder weniger) sind die BWS nicht geeignet, in dem Fall müsste auf empfindlichere Materialien zurückgegriffen werden, beispielsweise Restbestände von *LightCheck Ultra* [70].

5.5.4 Vergleich Microfading und Monitoring an Mustertafeln

Der Vergleich zwischen den MFT-Ergebnissen bei extrem hoher Beleuchtungsstärke und den Ergebnissen des Farbmonitorings bei moderater Beleuchtungsstärke (Galerie-Niveau von 30–300 lx) ist besonders interessant, da die MFT-Ergebnisse ausschließlich für Ausstellungsentscheidungen bei wesentlich niedrigerer Beleuchtungsstärke als beim MFT genutzt werden. Dieser Vergleich wurde für *Microfading*-Tests bisher nur mit Belichtungen in Lichtschränken vorgenommen [72]. Es stellte sich heraus, dass beim *Microfading* empfindliche Materialien unterschätzt werden können, d. h. die Farbveränderungen durch die MFT-Belichtung fallen geringer aus als bei deutlich niedriger Beleuchtungsstärke im Lichtschrank mit insgesamt gleicher Belichtung.

Diesen Ergebnissen werden nun weitere Erkenntnisse aus den vorliegenden Messreihen bei realer Galerie-Belichtung, d. h. mit täglichem Wechsel von Belichtung bei Beleuchtungsstärken von 30–300 lx und Dunkelheit, hinzugefügt. Grundlage für den Datenvergleich in dieser Arbeit sind die Mittelwerte aus den MFT-Messungen (Abschnitt 5.5.2) und die Ergebnisse aus dem Farbmonitoring an den Tafeln (Abschnitt 5.5.3). Für den Vergleich wurden nur die in der Galerie belichteten Tafeln berücksichtigt.

Auswertung

Die Farbveränderungen des Lichtecheitstyps BW1 sind für die gleiche Belichtung bei Galerie-Belichtung um einen Faktor 3 bis 4 größer als bei MFT-Belichtung (Abbildung 53). Die Details der Farbveränderungen sind in beiden Fällen qualitativ gleich, Helligkeitszunahme, Buntheitsabnahme und Bunttonverschiebung in Richtung Grün werden beim *Microfading* und beim Farbmonitoring gemessen (Tabelle 24). Für BW2 bestehen im Untersuchungszeitraum nur geringe Abweichungen zwischen den Werten beider Belichtungsverfahren.

Bei den Farbaufstrichen sind die Unterschiede der Farbveränderungen zwischen beiden Belichtungsverfahren sehr ausgeprägt (Abbildung 54). Die Miloriblauf- und Bleiweißaufstriche erfahren große Veränderungen bei geringer Belichtung (Galerie-Belichtungsstärke) während die gleichen Aufstriche bei MFT-Belichtung nur kleine Veränderungen bei hoher Beleuchtungsstärke erfahren. Die Farbwerte ändern sich für diese beiden Aufstriche bei beiden Belichtungsverfahren gegensätzlich (Tabelle 24: Zunahme vs. Abnahme der Helligkeit bzw. Abnahme vs. Zunahme der Buntheit).

Für den Krapplackaufstrich lässt sich aus den Galerie-Daten eine lineare Farbveränderung über die Zeit der Belichtung ableiten, die ähnlich, aber in geringerem Umfang im *Microfading* gemessen wurde. Nach den Galerie-Daten der BWS liegt die Lichtecheit von Krapplack zwischen BW2 und BW3, während beim *Microfading* nach absoluten Farbveränderungen die Klassifizierung bei BW4 liegt, nach Farbveränderungsrate aber bei BW3-4 (siehe Abschnitt 5.5.2).

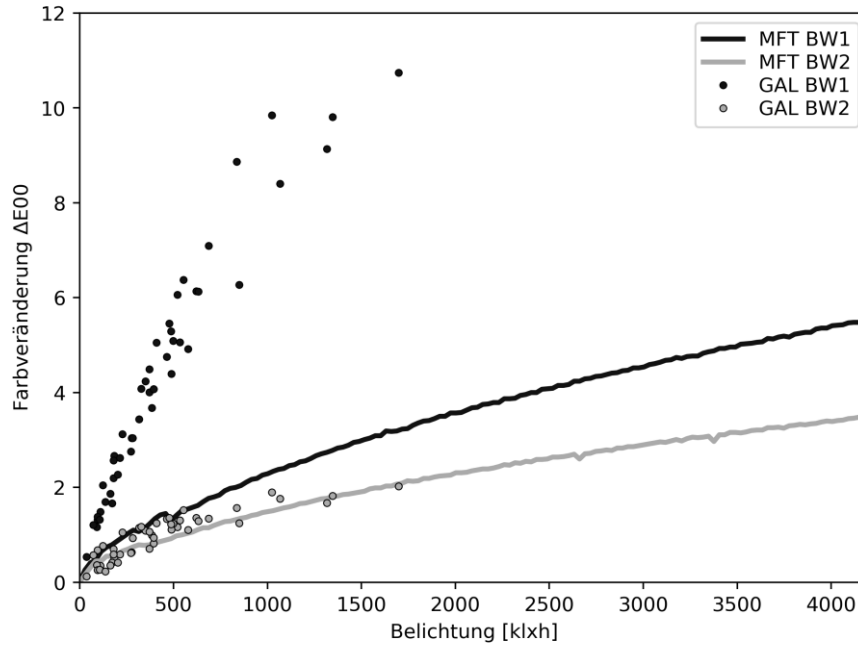


Abbildung 53: Farbveränderung von BW1 und BW2 bei MFT- und Galerie-Belichtung (GAL)

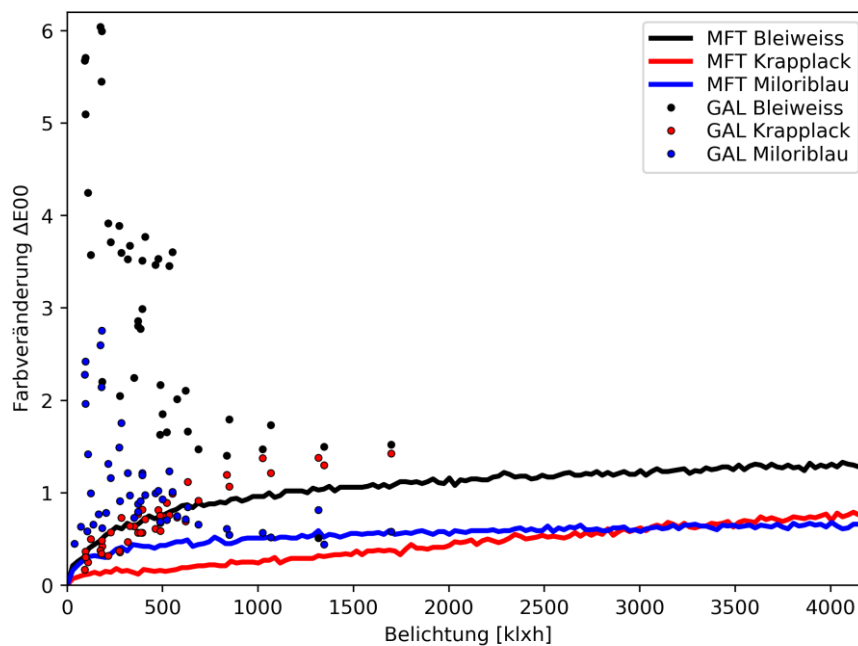


Abbildung 54: Farbveränderung der Aufstriche bei MFT- und Galerie-Belichtung (GAL)

Diskussion

Bei gleicher Belichtung erfährt BW1 bei MFT-Belichtungsstärke eine deutlich geringere Farbveränderung als bei Galerie-Belichtungsstärke, d. h. es kommt zu einer großen Reziprozitätsabweichung. Die tatsächliche Farbveränderung von BW1 bei Galerie-Belichtungsstärke wird mit dem MFT unterschätzt. Das wirkt sich bei kleinen Belichtungen (<250 klxh) weniger stark aus als bei großen Belichtungen (siehe Abbildung 53 und Tabelle 24). Auf BW1 wird 1 JND beim *Microfading* nach einer Belichtung von ca. 0,5 Mlxh erreicht, während 1 JND bei Galerie-Belichtung schon nach ca. 0,1 Mlxh erreicht wird (Tabelle 25).

Tabelle 24: Vergleich der Farbveränderungen auf Tafel 4 (GAL 80 lx), Tafel 7 (GAL 165 lx) und aus dem *Microfading*-Test an Tafel 11 bei unterschiedlichen Belichtungen

	Beleuchtung	Belichtung	ΔE_{00} (σ)	ΔL^*	ΔC^*	ΔH^*
BW1	GAL ~80 lx	383 klxh	3,68 (0,10)	2,73	-11,99	-6,61
	GAL ~165 lx	687 klxh	7,10 (0,09)	5,72	-17,69	-10,52
	MFT ~10 Mlx	686 klxh	1,77 (0,10)	1,30	-4,86	-1,80
	MFT ~10 Mlx	4290 klxh	5,60 (0,13)	4,58	-11,69	-4,53
BW2	GAL ~80 lx	383 klxh	1,00 (0,57)	0,94	-2,73	-0,77
	GAL ~165 lx	687 klxh	1,35 (0,34)	1,18	-4,26	-1,16
	MFT ~10 Mlx	686 klxh	1,15 (0,23)	0,65	-3,19	-0,01
	MFT ~10 Mlx	4290 klxh	3,53 (0,27)	2,80	-7,19	-0,61
Bleiweiß	GAL ~80 lx	383 klxh	2,78 (0,15)	-0,34	3,33	-0,29
	GAL ~165 lx	687 klxh	1,47 (0,18)	-0,29	1,68	-0,24
	MFT ~10 Mlx	686 klxh	0,89 (0,07)	0,07	-0,86	-0,35
	MFT ~10 Mlx	4290 klxh	1,31 (0,07)	0,18	-1,23	-0,55
Krapplack	GAL ~80 lx	383 klxh	0,57 (0,52)	0,54	0,49	0,14
	GAL ~165 lx	687 klxh	0,92 (0,40)	0,79	0,88	0,27
	MFT ~10 Mlx	686 klxh	0,21 (0,15)	0,16	-0,21	0,09
	MFT ~10 Mlx	4290 klxh	0,81 (0,10)	0,84	-0,44	0,35
Miloriblau	GAL ~80 lx	383 klxh	0,91 (0,24)	-0,76	-0,74	-0,84
	GAL ~165 lx	687 klxh	0,66 (0,30)	-0,86	-0,06	0,12
	MFT ~10 Mlx	686 klxh	0,44 (0,09)	0,53	0,37	0,26
	MFT ~10 Mlx	4290 klxh	0,61 (0,25)	0,58	0,47	0,65

Der Referenzwert der CIE 157 [11] liegt mit 0,3 Mlxh dazwischen. Kürzlich bekannt gewordene Messungen deuten ebenfalls wie die hier gewonnenen Resultate darauf hin, dass für niedrige Beleuchtungsstärken (50–200 lx) bei BW1 eher ein Wert von 0,1 Mlxh für das Erreichen der JND anzusetzen ist [111].

Erklärungen für die deutlichen Unterschiede können zum einen an den unterschiedlichen spektralen Verteilungen der Lichtquellen liegen [83, 102], wahrscheinlicher ist aber das Vorhandensein eines geschwindigkeitsbestimmenden Schrittes in der Reaktionskette [50], die zum Ausbleichen führt, z. B. eine unzureichende Sauerstoffzufuhr bei der extremen Beleuchtungsstärke des MFT [49].

Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, um die Ursache der Reziprozitätsabweichung von BW1 zu identifizieren.

Wie auch immer, die Unterschätzung der Veränderungen von BW1 beim MFT im Vergleich zu Galerie-Beleuchtung führt in der Konsequenz zu einer Überschätzung der Lichtempfindlichkeit von Proben, die mittels MFT nach BW1 klassifiziert werden. Bei diesen wären folglich bei eingehaltener Reziprozität bei Galerie-Beleuchtungsbedingungen eher Farbveränderungen wie BW1-2 oder sogar nur wie BW2 zu erwarten. Dies ist eine bisher wenig beachtete Interpretationsschwierigkeit bei MFT-Untersuchungen. Alternative Referenzen (wie die Pulver- und Pellet-Präparationen (Abschnitt 5.1.1), wären eine Option, wenn diese bis zur MFT-Beleuchtungsstärke die Reziprozität einhalten.

Tabelle 25: Belichtungswerte für eine Farbveränderung von ca. $\Delta E_{00}=1,5$ auf BW1 und BW2 bei unterschiedlicher Beleuchtungsstärke

BWS	Situation	ΔE_{00}	Mlxh / ΔE_{00}
BW1	GAL (~80 lx)	1,67	0,17
	GAL (~165 lx)	1,49	0,11
	MFT (~10 Mlx)	1,51	0,54
	CIE 157	1,5	0,3
BW2	GAL (~80 lx)	1,35	0,69
	GAL (~165 lx)	1,76	1,07
	MFT (~10 Mlx)	1,50	1,02
	CIE 157	1,5	1,0

Bei BW2 sind die Unterschiede im Ausbleichverhalten zwischen MFT- und Galerie-Belichtung weniger ausgeprägt als bei BW1. Insgesamt liegen die Farbveränderungen bei unterschiedlichen Beleuchtungsbedingungen hier viel näher beisammen. BW2 scheint, wenn überhaupt, nur eine geringfügige Reziprozitätsabweichung zu erfahren [72]. Für eine abschließende Bewertung liegen zum Abschluss der Messungen nicht genügend Datenpunkte vor.

Beim Vergleich der Farbveränderungen der Aufstriche bei MFT- und bei Galerie-Belichtung wurde ein grundsätzliches Phänomen von Malschichten mit Bindemitteln, die Vergilbungserscheinungen zeigen, deutlich. Durch das *Microfading* mit hoher Beleuchtungsstärke werden Vergilbungsprodukte zerstört, wie bei anderen beschleunigten Belichtungsverfahren [22, 23, 143]. Dies wird als Farbveränderung erfasst, ist aber je nach Buntton von Farbmittelveränderungen (dem typischen Ausbleichen) nicht einfach zu unterscheiden. Ohne Kenntnis der Zusammensetzung der Malschicht ist dies nur schwer aufgrund der Details der Farbveränderungen möglich. Merkmale zur Identifizierung des Phänomens „Rückgang der Vergilbung durch *Microfading*“, die bei den vorliegenden Einzeluntersuchungen festgestellt wurden, waren eine rasche Farbveränderung zu Beginn der Test-Belichtung, die sich dann abschwächte und in der Folge relativ konstant blieb. Dies war verbunden mit einer Aufhellung und einer Verringerung des b^* -Werts (je nach Buntton kann dieser Rückgang unterschiedlich stark ausgeprägt sein). Diese Erscheinungen wurden bei frisch hergestellten Aufstrichen beobachtet, bei schon lange getrockneten Malschichten könnten die Effekte eine andere Ausprägung zeigen, da Vergilbungsprozesse bei ölhaltigen Bindemitteln abhängig vom Trocknungszustand der Ölschicht sind [137]. Falls zusätzlich zum Rückgang der Vergilbung Veränderungen der Farbmittel durch die Belichtung hervorgerufen werden, dürfte eine Identifikation des Phänomens schwierig werden.

Neben den Vergilbungserscheinungen bei den Bleiweiß- und Miloriblaaufstrichen wurden beim Krapplackaufstrich lineare Farbverluste der Pigmente (im *Microfading* und im Monitoring) registriert. Der Umfang der Farbveränderungen bei Galeriebelichtung ist größer als beim *Microfading*, d. h. eine geringfügige Reziprozitätsabweichung ist beim untersuchten Krapplack festzuhalten und die MFT-Messung unterschätzt die tatsächliche Veränderung bei Galerie-Bedingungen (wie bei BW1). Der Einbezug der Farbveränderungsrate in die Lichtecktheitsklassifizierung von Krapplack verringerte allerdings die Abweichung zwischen MFT- und Galerie-Klassifizierung.

5.5.5 Microfading auf Gemälde und Partikel

Bernardo Bellottos Stadtansichten von Dresden prägen bis heute das Bild Dresdens zur Mitte des 18. Jahrhunderts [144]. Die 14 Stadtansichten, die er in der *Königs-Serie* [145] für August III. anfertigte, werden seit 2010 nach und nach restauriert. In diesem Zusammenhang wurden Farbveränderungen im blau-grauen Bereich der Himmelspartien festgestellt [129, 130], an Proben aus zwei Werken wurde Preußisch Blau und Bleiweiß in Mischung nachgewiesen [129].

Bei Planung des Farbmonitorings an den Mustertafeln (Abschnitt 5.5.3) wurde Bellottos *Die ehemalige Kreuzkirche in Dresden (1751)* (Gal. Nr. 616) restauriert und dabei unter anderem ein neuer Firnis aufgebracht. Bevor dies geschah, wurden am Gemälde ohne Firnis *Microfading*-Tests durchgeführt, um die gegenwärtige Lichtempfindlichkeit der Farbpartien im Himmel zu testen. Die Erwartung einer erhöhten Lichtempfindlichkeit aufgrund der festgestellten Farbveränderungen und der Tatsache, dass historisches Preußisch-Blau v. a. in Mischung mit Bleiweiß lichtempfindlich ist [19, 132], sollten mittels MFT überprüft werden. Vorab konnte ein *Microfading*-Test an einer Materialprobe vom Himmelsbereich des Gemäldes durchgeführt werden.

Vortest an Probepartikel

Ein Probepartikel aus einem Farblecks auf Gal. Nr. 616, der wohl unbeabsichtigt vom Künstler hinterlassen wurde, wurde mit dem MFT untersucht. Es wies eine Größe von ca. 0,5 x 0,35 mm auf, so dass der Test möglich war. Der Zustand des Partikels wurde vor und direkt nach der Messung mit Hilfe von Mikroskopaufnahmen fotografisch festgehalten (Abbildung 55). Für die Messung wurde die Probe auf einem Objektträger aus Glas über weißem Papier in den Fokus des MFT gebracht. Es wurde dabei die Rückseite des Partikels, d. h. die Seite, die ursprünglich ins Innere der Malschicht zeigte, getestet. Der Test wurde bei einer Beleuchtungsstärke von 9,8 Mlx für 15 Minuten mit den Standardeinstellungen (4.2.6) durchgeführt, die Lichtechtheitstypen BW1–BW3 wurden vorab bei den gleichen Bedingungen getestet.

Ergebnisse Vortest

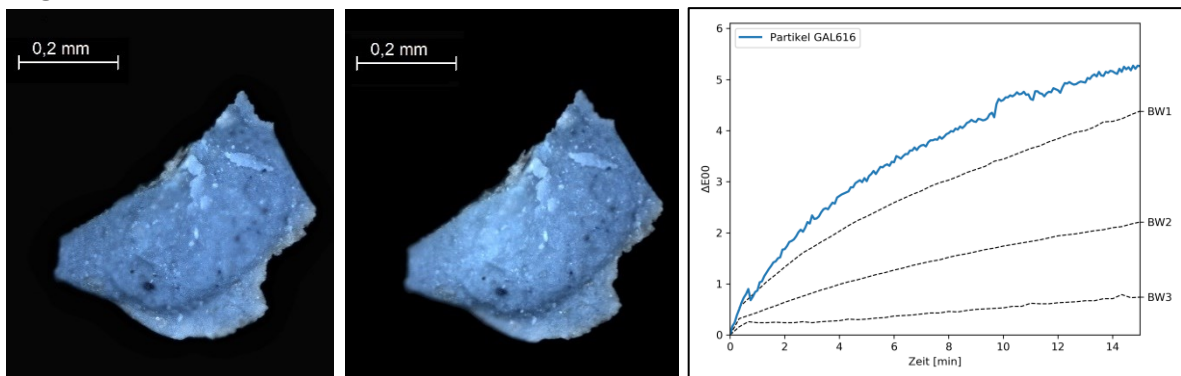


Abbildung 55: Vergrößerte Abbildung des Probepartikels (Gal. Nr. 616) vor (links) und nach (Mitte) der MFT-Belichtung, (rechts) Farbveränderung ΔE_{00} des Probepartikels über der Zeit im Vergleich zu den BWS

Im Test wurde eine Farbveränderung des Partikels in etwas größerem Umfang wie von BW1 festgestellt. Ausgehend vom Farborg $L^*=60,8$, $a^*=-6,3$, $b^*=-14,7$ kam es während des Tests zu einer Zunahme der Helligkeit $\Delta L^*=5,2$ verbunden mit einer Bunttonveränderung $\Delta H^*=-3,2$ in Richtung Grün und einem leichten Rückgang der Buntheit $\Delta C^*=-1,0$. Im

Vergleich der beiden Mikroskopaufnahmen (siehe Abbildung 55) ist eine Aufhellung an der Stelle des Messpunkts nach dem Test zu erkennen.

Fazit Vortest

Für das Probestück wurde eine Lichtechtheit ähnlich wie BW1 festgestellt. Die Qualität der Farbveränderung entspricht einem typischem Ausbleichverhalten, d. h. einem Rückgang der Buntheit und einer Aufhellung. Einschränkend ist zu beachten, dass bei Preußisch Blau eine Reversion des Ausbleichens im Dunkeln unter Sauerstoffeinfluss möglich ist [16, 113], direkt nach der Messung waren die Auswirkungen des Tests auf der Probe allerdings (noch) zu beobachten. Die Tatsache, dass die Rückseite des Probestücks gemessen wurde, lässt vermuten, dass sich auf den Messpunkten am Gemälde selbst geringere Farbveränderungen zeigen, da die Vorderseite bereits durch lange Belichtung gealtert ist.

Microfading am Gemälde Gal. Nr. 616

Für die MFT-Messung auf dem Gemälde Gal. Nr. 616 (ohne Firnis) wurden vorher die Messpunkte in Abstimmung mit der verantwortlichen Restauratorin festgelegt (siehe Anhang E). Auswahlkriterium für die Messpunkte war, dass diese frei von Retuschen sind. Die MFT-Untersuchungen fanden mit den Standardeinstellungen (4.2.6) bei einer Beleuchtungsstärke von ca. 9,6 Mlx im Messpunkt statt. Während der fünfzehnminütigen Testdauer wurden die Messpunkte mit ca. 2,4 Mlxh belichtet. Sollte während der MFT-Belichtung eine Farbveränderung größer als $\Delta E_{76}=5,0$ erreicht werden, wurde der Abbruch des Tests aus konservatorischen Gründen vereinbart.

Ergebnisse Microfading an Gal. Nr. 616

Vor dem Test am Gemälde wurden die Lichtechtheitstypen BW1–BW3 bei gleichen Bedingungen getestet. Die darauffolgenden Tests am Gemälde wurden in drei Fällen vorzeitig gestoppt, da ein $\Delta E_{76}>5,0$ erreicht wurde (Abbildung 56, MP1 nach 660 s, MP3 nach 655 s und MP4 nach 720 s). Die Unstetigkeit in den Daten von MP3 nach ca. 13,5 min trat in Folge eines unbeabsichtigten Stoßes am Stativ auf. Bei dieser Messreihe fällt außerdem auf, dass die Farbveränderung nach ΔE_{00} größer ist als bei den Messpunkten MP1 und MP4, die aufgrund der Veränderung nach ΔE_{76} schon vorzeitig gestoppt wurden. Die Farbveränderung der fünf Messpunkte auf der Fläche des Himmels über die Zeit ist ähnlich wie BW1 bzw. BW2. Hier kam es in allen Fällen durch die Belichtung zu einer Zunahme der Helligkeit. Diese Helligkeitszunahme war für MP1, MP2 und MP4 verbunden mit einem Rückgang der Buntheit (C^*) – siehe Tabelle 26.

Tabelle 26: Farbwerte vor und nach 11 Minuten MFT-Belichtung an Gal. Nr. 616

t=0s	L*	a*	b*	t=660s	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔC^*	ΔH^*	ΔE_{76}	ΔE_{00}
MP1	58,6	-4,8	-17,2	MP1	4,3	-1,6	2,0	-1,4	-2,2	5,0	4,3
MP2	55,7	-4,3	-9,4	MP2	2,3	-0,9	3,6	-2,5	-2,7	4,3	3,7
MP3	58,3	-5,0	-1,5	MP3	4,9	-0,6	1,3	0,4	-1,3	5,1	4,5
MP4	64,8	-4,9	-8,4	MP4	3,1	0,1	3,5	-2,8	-2,0	4,7	3,7
MP5	38,1	11,4	15,3	MP5	0,1	-0,1	-0,4	-0,4	-0,1	0,4	0,3
MP6	55,0	-2,8	3,1	MP6	1,5	0,1	1,2	0,9	-0,8	1,9	1,8

Alle Messpunkte erfuhren eine negative Bunttonveränderung, der Buntton verschob sich durch Belichtung in Richtung Gelb. Auf MP3 und MP6 war hingegen eine leichte Zunahme der Buntheit während der Tests zu verzeichnen. Diese Messpunkte waren im Vergleich zu den anderen drei Messpunkten relativ „unbunt“.

Die rote Testfläche (MP5) war demgegenüber als „stabiler als BW3“ zu klassifizieren.

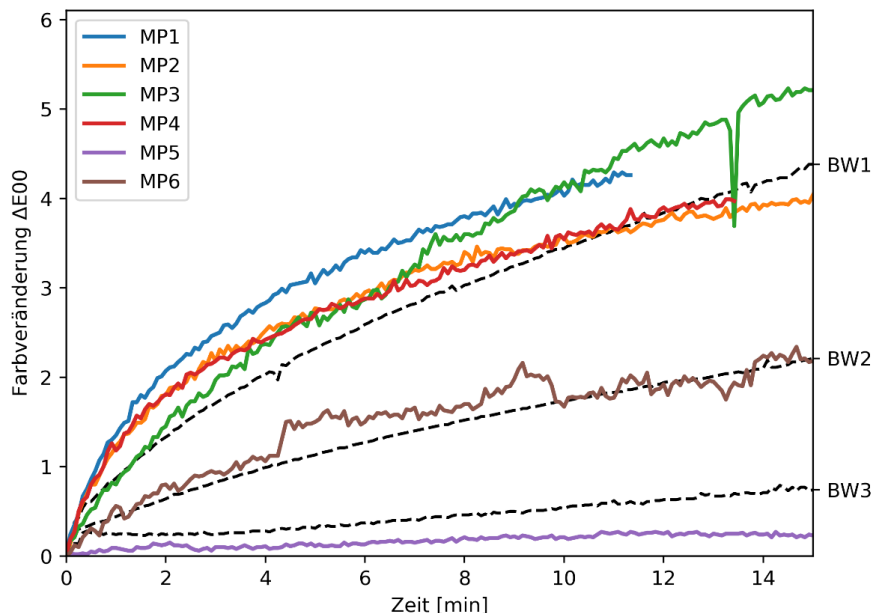


Abbildung 56: Farbveränderung der Messpunkte auf Gal. Nr. 616 im Vergleich zu den BWS

Fazit

Die Messpunkte am Himmel von Gal. Nr. 616, die vermutlich Preußisch Blau enthalten, zeigten im MFT eine Lichtechtheit ähnlich wie BW1 bzw. BW2. Die gemessenen Veränderungen waren alle von ähnlichem Umfang, die Qualität der Farbveränderung war jedoch abhängig von den Ausgangs-Farbwerten [109]. Die rote Farbfläche von MP5 erwies sich im Test hingegen stabiler als BW3.

Bei Vorhandensein von Preußisch Blau auf den Testflächen des Gemäldes ist nicht auszuschließen, dass es im Dunkeln unter Einfluss von Sauerstoff zu einer Reversion der Farbwerte kommt, was bei Preußisch Blau bereits nachgewiesen wurde [21, 60, 113].

Die Messung am Probestück und an den Messpunkten am Himmel des Gemäldes führten zu sehr ähnlichen Ergebnissen – sowohl beim Umfang der Farbveränderungen als auch bei den Veränderungen der Farbwerte durch die Belichtung (v. a. MP1 direkt neben der Entnahmestelle der Probe).

Bei ausreichend großen Probestücken ist davon auszugehen, dass *Microfading*-Messungen an Objekt und Probe vergleichbare Ergebnisse liefern. Voraussetzung ist, dass zwischen Probenahme und Messung keine Degradationen auftreten und die Umgebungs- und Lagerungsbedingungen für Probe und Objekt gleich sind.

Im Fazit bleibt festzuhalten, dass beim *Microfading* auf dem Probestück und dem Gemälde gleichermaßen die Messstellen mit vermutetem Preußisch Blau große Veränderungen zeigten. Daraus folgt die Empfehlung für erhöhten Lichtschutz (möglichst geringe Belichtung) bei der Ausstellung der Gemälde in Kombination mit einer Überwachung der Farbwerte durch ein Farbmonitoring. Der Vergleich der MFT-Ergebnisse mit den Ergebnissen des Farbmonitorings erfolgt unter Berücksichtigung des vermuteten Preußisch Blau in Abschnitt 5.5.7.

5.5.6 Monitoring auf Gemälden

An drei Gemälden von Bernardo Bellotto aus der sogenannten *Königs-Serie* [145] für Kurfürst August III. wurde über einen Zeitraum von 21 Monaten ein Farbmonitoring im Museum durchgeführt, ähnlich wie anderswo ein Monitoring für Textilien durchgeführt wurde [128]. Die drei Gemälde aus dem Bestand der Gemäldegalerie Alte Meister waren:

- Bernardo Bellotto, gen. Canaletto, *Dresden vom rechten Elbufer unterhalb der Augustusbrücke* (1748), Gal. Nr. 606
- Bernardo Bellotto, gen. Canaletto, *Der Altmarkt in Dresden von der Schlossgasse aus* (um 1750), Gal. Nr. 614
- Bernardo Bellotto, gen. Canaletto, *Der Zwingerhof in Dresden* (1751/52), Gal. Nr. 629

Die Gemälde wurden vor Beginn des Monitorings restauriert und erhielten dabei einen neuen Firnis auf Naturharzbasis.²⁸ Die Messpunkte wurden in Abstimmung mit der verantwortlichen Restauratorin ausgewählt. Auswahlkriterium war das Vorhandensein eines gleichmäßigen Farbauftrags auf einer Fläche von mindestens 3 mm Durchmesser, was der Größe der Messblende des Spektralphotometers entspricht. Außerdem mussten die Stellen frei von Retuschen sein. Für die Dokumentation der Messpunkte wurden die Maße von den Rahmenkanten der Gemälde genommen und zusätzlich fotografische Detailaufnahmen angefertigt.

Auf allen Gemälden wurden Stellen aus dem Bereich des Himmels ausgewählt, wo Preußisch Blau und Bleiweiß nachgewiesen wurde (Messpunkte 606_P1–P5) [129] bzw. vermutet wird (Messpunkte 614_P1–P4, 629_P1–P4). Ergänzend wurden Stellen mit offensichtlich anderen Farbmitteln ausgewählt (629_P5 dunkelgrüne Fläche; 629_P6 hellweiße Fläche).

Die Messungen erfolgten mit demselben Spektralphotometer und denselben Einstellungen wie beim Monitoring der Tafeln (Abschnitt 5.5.3). Zur Mittelwertbildung wurden an jedem Messpunkt fünf Einzelmessungen aufgenommen, wobei das Spektralphotometer für jede Einzelmessung neu aufgesetzt wurde, um unabhängige Messwerte zu gewährleisten.

Insgesamt wurden von den 15 Messpunkten zu drei Zeitpunkten Daten erhoben:

- I) 02.02.2016
- II) 17.10.2016
- III) 06.11.2017

Die Gesamtbelichtung wurde durch ein Luxmeter erfasst, das direkt neben Gal. Nr. 606 installiert war. Die Beleuchtungsstärke an dieser Stelle ist der Referenzwert für die Beleuchtungsstärke auf den anderen beiden Gemälden, da diese im gleichen Raum einer nahezu identischen Beleuchtungssituation ausgesetzt waren und die Werte für die Beleuchtungsstärke beim Vergleich mit dem Handmessgerät weniger als 5 % Abweichung von einander zeigten. Zwischen Start der Belichtung (I) und Messzeitpunkt II erhielten die Gemälde in Annäherung eine Belichtung von 247 klxh (siehe Anhang F). Nach Messzeitpunkt II wurden Gal. Nr. 606 und 614 zu neuen Standorten mit durchschnittlich höherer Beleuchtungsstärke gebracht. Dort wurden die Beleuchtungsstärkedaten über den Museumssensor bzw. die mobilen Luxmeter erhoben. Die beiden Gemälde wurden in der Folge zwischen Messzeitpunkt II und III mit weiteren 473 klxh belichtet, was für Gal. Nr. 606

²⁸ Information der ausführenden Restauratorin Sabine Bendfeldt, sowie [130].

und 614 zu einer Gesamtbelichtung von ca. 720 klxh bis zum Abschluss des Monitorings führte. Gal. Nr. 629 wurde nach Messzeitpunkt II für eine Ausleihe vorbereitet. Seit der Rückkehr des Werks am 20.03.2017 wurde es im Depot gelagert, d. h. Belichtungswerte liegen für Gal. Nr. 629 nur bis zum Messzeitpunkt II vor.

Tabelle 27: Messpunkte der drei Gemälde mit Start-Farbwerten und Farbveränderungen durch die Belichtung

Messpunkt	Messung I) 02.02.2016			Veränderung bis Messung II) 17.10.2016				Veränderung bis Messung III) 06.11.2017			
	L*	a*	b*	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{00} (σ)	ΔL^*	Δa^*	Δb^*	ΔE_{00} (σ)
606_P1	64,28	-5,65	0,14	-1,29	0,07	0,72	1,26 (0,20)	-1,13	0,00	0,36	1,00 (0,29)
606_P2	62,67	-6,00	-1,49	0,08	-0,02	0,13	0,14 (0,18)	0,20	-0,05	0,27	0,30 (0,15)
606_P3	64,38	-5,78	-0,55	0,36	0,07	-0,05	0,31 (0,58)	0,00	0,07	-0,02	0,08 (0,28)
606_P4	51,68	-4,33	0,94	-1,21	-0,12	-0,23	1,23 (0,56)	-1,53	-0,27	-0,81	1,73 (0,56)
606_P5	46,00	-6,06	4,79	-0,13	0,03	0,03	0,14 (0,22)	0,30	-0,03	0,10	0,30 (0,22)
614_P1	63,60	-3,21	0,56	0,21	0,05	0,29	0,33 (0,17)	-0,16	-0,15	0,13	0,26 (0,19)
614_P2	65,05	-2,74	1,47	0,15	0,07	0,28	0,30 (0,33)	0,39	0,14	0,38	0,51 (0,19)
614_P3	65,10	-2,44	1,12	-0,08	0,09	0,25	0,27 (0,11)	0,37	-0,19	-0,09	0,40 (0,33)
614_P4	77,20	-2,08	5,14	-0,66	-0,07	-0,02	0,48 (0,19)	-0,92	0,05	0,00	0,67 (0,59)
629_P1	57,58	-4,18	-0,56	-0,11	-0,01	0,35	0,34 (0,23)	-0,16	-0,05	0,52	0,51 (0,27)
629_P2	58,33	-3,50	1,84	-0,32	-0,05	0,22	0,35 (0,07)	0,51	0,13	0,67	0,78 (0,32)
629_P3	56,70	-4,00	0,93	-0,24	-0,07	0,01	0,23 (0,21)	0,17	0,05	0,28	0,31 (0,15)
629_P4	42,20	-3,43	0,72	0,22	-0,08	0,48	0,49 (0,17)	0,30	-0,07	0,51	0,54 (0,22)
629_P5	33,81	-2,81	3,28	-0,39	-0,05	-0,05	0,32 (0,51)	0,45	0,21	0,35	0,57 (0,19)
629_P6	74,56	-0,71	7,76	0,00	-0,03	0,21	0,16 (0,16)	0,00	-0,12	0,56	0,44 (0,12)

Ergebnisse

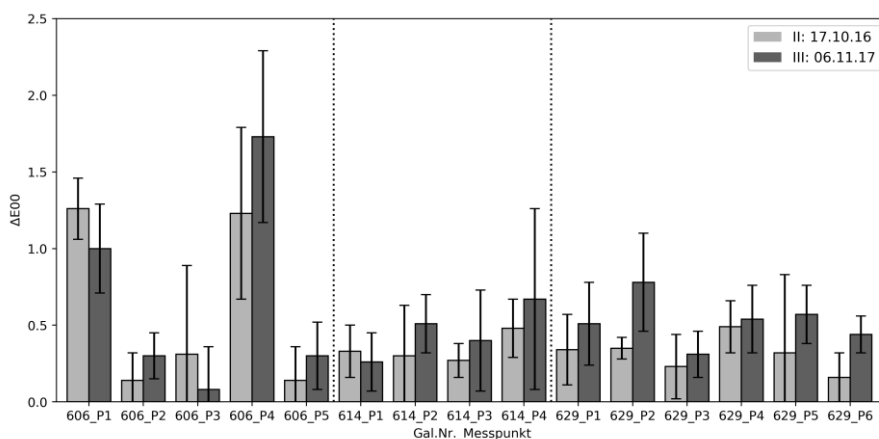


Abbildung 57: Farbveränderung der Messpunkte auf den Gemälden zu den Zeitpunkten II und III

Die Farbwerte der Messpunkte ähneln einander in der Buntheit und im Buntton, in der Helligkeit unterscheiden sie sich jedoch deutlich ($L^*=33,8$ bis $L=77,2$). Die gemessenen Farbveränderungen sind bis auf 606_P3 alle größer als die Messgenauigkeit des Spektralphotometers bei homogenen Farbfliesen, d. h. $\Delta E_{00} > 0,1$ (Abschnitt 4.3).

Auf Gal. Nr. 606 wurden nach den ersten 8,5 Monaten zwei signifikante²⁹ Farbunterschiede gemessen (P1 und P4, siehe Abbildung 57). Hauptbeitrag der Farbunterschiede lag im Rückgang der Helligkeit (siehe Tabelle 27). Nach weiteren 12,5 Monaten änderte sich die Qualität der Unterschiede geringfügig.

Auf Gal. Nr. 614 und Gal. Nr. 629 wurden zum Messzeitpunkt II nur geringfügige Farbunterschiede unterhalb des Werts von $\Delta E_{00}=0,5$ registriert. Zum Messzeitpunkt III wurde auf Gal. Nr. 614 eine signifikante Veränderung bei P2 gemessen.

An allen Messpunkten auf Gal. Nr. 629 wurde zwischen Zeitpunkt II und III eine geringfügige, nicht signifikante Zunahme der Farbunterschiede registriert. Diese setzte sich vor allem aus einer Zunahme der Gelb-Komponente b^* und der Helligkeit L^* zusammen. Im Vergleich mit den Startwerten sind vier Farbveränderungen auf Gal. Nr. 629 zum Zeitpunkt III signifikant.

Im Detail änderten sich für vier Messpunkte alle drei Farbwerte über die drei Messzeitpunkte kontinuierlich: 606_P2, 606_P4, 614_P2, 629_P1. Für die anderen elf Messpunkte wurden Schwankungen registriert (z. B. an 606_P1 eine Zunahme in b^* bis Messzeitpunkt II, gefolgt von einer Verringerung in b^* bis Messzeitpunkt III).

5.5.7 Vergleich Microfading und Monitoring auf Gemälden

Bei der Planung eines Farbmonitorings auf Gemälden ist es wichtig, mit Hilfe restauratorischer Fachexpertise geeignete Messpunkte auszuwählen und inhomogene Farbflächen zu meiden. Um Vergilbungserscheinungen zu messen sind v. a. weiße und blaue Farbflächen geeignet [136]. Größte Sorgfalt ist auf die Dokumentation der Messpunkte zu legen (neben der Abmessung der Messpunkte vom Gemälderand ist eine fotografische Dokumentation ggf. verbunden mit der Anfertigung von Messschablonen angebracht).

Das Monitoring bildet die tatsächlichen Farbveränderungen ab, dementsprechend sind die Messpunkte auf den Gemälden als relativ stabil einzuschätzen (Tabelle 27). Allerdings bestanden für keines der Werke über den Untersuchungszeitraum gleichmäßige Beleuchtungsbedingungen.

Die relativ einheitliche, aber nicht signifikante Zunahme der Farbveränderungen auf Gal. Nr. 629 nach der Überführung ins Depot kann gesondert betrachtet werden. Vor Beginn der Belichtung erhielt Gal. Nr. 629 einen neuen Firnis auf Naturharz-Basis.³⁰ Die Veränderungen auf Gal. Nr. 629 können unter diesem Umstand als Anzeichen einer einsetzenden Vergilbung des Firnisses im Dunkeln interpretiert werden.

Bevor der Vergleich zwischen *Microfading*-Tests und Monitoring vorgenommen wird, sei explizit darauf hingewiesen, dass das Monitoring an den drei Gemälden Gal. Nr. 606, 614, 629 durchgeführt wurde, während die *Microfading*-Tests an Gal. Nr. 616, einem anderen Werk aus der gleichen Serie [145], erfolgten.

Aus dem Vergleich lassen sich zwei Schlussfolgerungen ziehen, je nachdem ob die Malschicht an den betreffenden Punkten Preußisch Blau und Bleiweiß enthält oder nicht.

Im Falle, dass die Messpunkte vom Monitoring kein Preußisch Blau enthalten, erklären sich die großen Unterschiede durch unterschiedliches Material an den Messpunkten.

Es sprechen jedoch mehrere Gründe dafür, dass alle Messpunkte an Himmelsflächen der Gemälde Preußisch Blau enthalten. Die Gemälde wurden in Serie hergestellt [145] und in

²⁹ Als signifikant wird ein Farbunterschied bezeichnet für den die folgenden zwei Bedingungen erfüllt sind: $\Delta E_{00} > 0,5$ und $\Delta E_{00} > 2,0 * \text{MAX MCDM}$ [48, 49]

³⁰ Aussage der durchführenden Restauratorin Sabine Bendfeldt.

schneller zeitlicher Abfolge [144, 146]. Zudem wurde Preußisch Blau auf zwei Werken der Königsserie nachgewiesen [129].

Wenn Preußisch Blau Teil der Malschicht an den Messpunkten von *Microfading* und Monitoring (jeweils nur die Messpunkte an Stellen der Himmel) ist, müssen die Ergebnisse vor diesem Hintergrund diskutiert werden:

Aus den *Microfading*-Tests an Gal. Nr. 616 (Abschnitt 5.5.5) wäre auf den Messpunkten mit einer Belichtung von 720 klxh eine Farbveränderung von mindestens $\Delta E_{00}=2,0$ zu erwarten. Diese Erwartung findet keine Bestätigung in den Daten des Monitorings, eine kontinuierliche Zunahme der Farbveränderungen kann hier nicht festgestellt werden. Die Farbwerte der untersuchten Messpunkte zeigen nur in Einzelfällen (606_P2+P4 und 614_P2 und 629_P1) stetige Veränderungen über alle drei CIELab-Werte, für die Mehrheit von 11 der 15 Messpunkte wurden im Monitoring Farbschwankungen gemessen.

Die Ergebnisse beim Vergleich der Veränderungen der Farbwerte zu einander assoziierten Messpunkten zwischen *Microfading* und Monitoring auf Gal. Nr. 616 sind gegensätzlich (Helligkeitszunahme im MFT – (geringe) Helligkeitsabnahme beim Monitoring).

Die Materialzusammensetzung von Preußisch Blau mit Bleiweiß erklärt die großen Farbveränderungen beim *Microfading*. Preußisch Blau (C.I. Pigment Blue 27) ist chemisch präzise Eisen(III)-Hexacyanidoferrat(II). Der Farbverlust bei Preußisch Blau an der Oberfläche ist als Reduktionsreaktion unter Einfluss von Licht zu verstehen [19, 147]. Dabei werden Fe(III)-Ionen des Pigments zu Fe(II)-Ionen reduziert, wobei das Reduktionsmittel noch nicht identifiziert ist. In Malschichten hat die Art des Weißpigments und dessen Konzentration einen Einfluss auf die Reduktionsreaktionen bei Preußisch Blau [19, 124, 138].

Nach der Reduktion von Preußisch Blau besteht die Möglichkeit, dass sich in Dunkelheit unter Einfluss von Sauerstoff wieder Preußisch Blau bildet [21, 60]. Dieser Wechsel der Reduktion von Preußisch Blau und erneuter Oxidation [138] ist als Redoxgleichgewicht aufzufassen und von Umgebungseinflüssen abhängig (Beleuchtungsstärke, Sauerstoffanteil [49, 148]).

Vor diesem Hintergrund lassen sich die Ergebnisse des Monitorings und der MFT-Analyse erklären. Die im Monitoring gemessene, relative Farbstabilität lässt sich so interpretieren, dass auf den Gemälden die Malschicht mit Preußisch Blau und Bleiweiß über die Jahre einen Zustand erreicht hat, der als relativ stabil anzusehen ist, sich aber aus Reduktion und erneuter Oxidation von Preußisch Blau über den Wechsel von Belichtung und Dunkelheit (Tag-Nacht-Zyklus im Museum) zusammensetzt.

Die MFT-Belichtung bringt dieses Wechselspiel durch die stark erhöhte Beleuchtungsstärke aus dem Gleichgewicht. Beim *Microfading* bleicht das noch vorhandene Preußisch Blau weiter aus (es wird reduziert). Auch wenn es nicht messtechnisch verfolgt werden konnte, ist anzunehmen, dass die gemessenen Veränderungen nach dem *Microfading* reversibel sind und reduzierte Preußisch Blau Anteile im Dunkeln wieder zurück zu Preußisch Blau oxidieren.

In der Konsequenz ist bei Preußisch Blau eine extreme Reziprozitätsabweichung festzuhalten, die MFT-Ergebnisse führen bei Übertragung auf Galeriebedingungen zu einer Überschätzung der Veränderungen (im Gegensatz zur Reziprozitätsabweichung bei BW1, wo die MFT-Messungen zu einer Unterschätzung der Farbveränderungen im Vergleich zu Galeriebedingungen führen, siehe Abschnitt 5.5.4). Eine Abweichung von der Reziprozität wurde bei Preußisch Blau mit MFT-Untersuchungen an Aufstrichen [57] bzw. Druckpapieren [113] schon nachvollzogen, an Gemälden bisher noch nicht.

Als praktische Konsequenz für den Umgang mit diesen Gemälden ist zu folgern, dass jede längerfristige und substanzielle Änderung der Beleuchtungssituation das Wechselspiel zwischen Reduktion und Oxidation von Preußisch Blau verändern wird und mittelfristig zu prüfen ist, ob dadurch Farbveränderungen auftreten.

5.5.8 Fazit

Vergleiche zwischen Farbmonitoring bei Langzeitbelichtung und *Microfading*-Untersuchungen sind bisher wenig bekannt [72]. Die hier vorgestellten Ergebnisse beruhen auf der Gegenüberstellung von Daten aus einem Monitoring im Museum bei einer Beleuchtungsstärke von 30–300 lx und MFT-Analysen mit einer Beleuchtungsstärke von ca. 10 Mlx an zwei Objektgruppen: Gemälde und Mustertafeln mit Farbaufstrichen und Blau-Woll-Lichtechtheitstypen.

Die auf den Farbaufstrichen gefundenen Vergilbungserscheinungen verdeutlichen eine grundsätzliche Schwierigkeit von MFT-Messungen an Materialien, die zu Vergilbungen neigen, wie die untersuchten Bleiweiß- und Miloriblaaufstriche in Mohnöl. Die gegensätzlichen Ergebnisse zwischen *Microfading* und Farbmonitoring resultieren aus den unterschiedlichen Prozessen, die je nach Beleuchtungssituation auf den betreffenden Aufstrichen ablaufen. Beim *Microfading* werden durch die hohe Beleuchtungsstärke bereits eingesetzte Vergilbungen ausgebleicht, während in Langzeitbelichtung bei geringer Beleuchtungsstärke und einem Tag-Nach-Zyklus (oder in dauerhafter Dunkelheit) die Vergilbungen zunehmen. Ab einer gewissen täglichen Schwellen-Beleuchtungsstärke (im untersuchten Fall zwischen 90–105 lx) werden in jedem Moment mehr Vergilbungsprodukte zerstört als entstehen können und die Vergilbung geht zurück bzw. wird bei noch höheren Beleuchtungsstärken (> 1000 lx) nicht erkennbar. Der Trocknungszustand der Malschicht beeinflusst wohl die Höhe der Schwellen-Beleuchtungsstärke.

Beim Krapplackaufstrich lieferten *Microfading* und Monitoring in der Qualität der Farbveränderungen vergleichbare Ergebnisse, wenngleich bei gleicher Belichtung im *Microfading* etwas geringere Farbveränderungen hervorgerufen wurden als bei Galerie-Beleuchtungsstärke.

Zur Analyse von Farbveränderungen von Pigmenten stellte sich der verwendete Preußisch Blau Typ (Miloriblau) in Kombination mit dem Mohnöl als nicht ideal heraus. Obwohl Mohnöl eine geringere Vergilbungsneigung hat als beispielsweise Leinöl [24], wurden deutliche Vergilbungen im Untersuchungszeitraum festgestellt. Andere Preußisch Blau Typen, die lichtempfindlicher sind (nach historischer Rezeptur) [19, 149], hätten zu differenzierteren Aussagen geführt, da mit dem Bleiweißaufstrich eine Referenz für die Identifikation von Vergilbungen bzw. den Rückgang von Vergilbungen vorhanden war.

Der Vergleich zwischen Monitoring und *Microfading* an den Gemälden offenbart eine Eigenheit von Preußisch Blau, das je nach Herstellungsart anfällig für eine ausgeprägte Verletzung der Reziprozität ist. Der Vergleich beruht auf der Annahme, dass die entsprechenden Messpunkte von *Microfading* und Monitoring auf den vier Gemälden eine ähnliche Zusammensetzung (Preußisch Blau und Bleiweiß) aufweisen. Die sehr große Veränderung von Preußisch Blau im *Microfading* findet sich beim Monitoring über 1,5 Jahre nicht, wo nur geringfügige Farbschwankungen festgestellt wurden. Als Ursache für die extreme Reziprozitätsabweichung wird die bekannte Dunkel-Reversion von ausgebleichtem Preußisch Blau unter Einfluss von Sauerstoff angenommen [21, 113].

Dass *Microfading*-Tests an Probestück und Originalwerk zu ähnlichen Ergebnissen führen, ist gezeigt worden und bestätigt die Erwartung, dass eine MFT-Analyse an gleichen Materialien zu vergleichbaren Ergebnissen führt.

Um Fehleinschätzungen aus *Microfading*-Tests zu vermeiden, sind folgende Ansatzpunkte zu berücksichtigen: Vergilbungsphänomene lassen sich durch eine Auswertung der Farbveränderungen, die die Veränderungen der Farbwerte im Detail berücksichtigt und auf Plausibilität prüft, erkennen. Zudem ist bei Kenntnis der Malschichtzusammensetzung bei entsprechenden Bindemitteln Vorsicht geboten.

Eine Reziprozitätsverletzung kann aus einer einmaligen MFT-Messung nicht identifiziert werden. Mehrfach-Tests bei verschiedenen Beleuchtungsstärken können ein Ansatzpunkt sein, sind aber zeitaufwendig und sicherlich nur bei wenigen Kunstwerken denkbar.

Bei Übertragung von MFT-Klassifizierungen auf niedrigere Beleuchtungsstärken sollte das Reziprozitätsverhalten der BW-Lichtechtheitstypen und der untersuchten Materialien bekannt sein, sonst sind in extremen Fällen (wie bei Preußisch Blau) Abweichungen von mehr als einer BW-Stufe zu erwarten.

Für den Blauwollstandard BW1 ist die Reziprozitätsabweichung zwischen MFT- und Galerie-Beleuchtungsstärke sehr stark ausgeprägt, was zu einer Hinterfragung des Einsatzes von BW1 als Referenz für MFT-Untersuchungen führen muss. Eine Differenzierung nach BW-Lichtechtheitstypen mit dem MFT ist zwar möglich, hat aber in erster Näherung nur Gültigkeit für MFT-Beleuchtungsstärke. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass eine BW1 Einschätzung mit dem MFT bei Galerie-Beleuchtungsstärke eher ein BW2-Verhalten nach sich zieht. D. h. effektiv kommt es bei der Lichtechtheitsklassifizierung zu einer Abweichung von einer BWS Stufe, ähnlich wie bei konventionellen Lichtechtheitstests [69]. In Anbetracht der Genauigkeit der MFT-Methode und auch der konventionellen Farbmessung, die bei Monitorings eingesetzt wird, ist dies nicht zufriedenstellend. Denn zwischen einem BW1-klassifizierten Objekt und einem BW2-klassifizierten Objekt liegen je nach Beleuchtungsrichtlinie erlaubte Belichtungen von 0,7 Mlxh [11], was bei 50 lx Beleuchtungsstärke im Museum einer Belichtungszeit (Ausstellungsdauer) von knapp 4 Jahren³¹ entspricht.

Der Bedarf nach Lichtechtheitsstandards, die über einen Bereich von 50 lx bis 10 Mlx der Reziprozität folgen und eine präzise Reproduzierbarkeit bei verschiedenen Beleuchtungssituationen aufweisen, wird durch die Auswirkungen der Lichtechtheitsklassifizierung auf den Museumsbetrieb durch den Einsatz von Beleuchtungsrichtlinien [11, 71, 150] deutlich. Wenn eine Reziprozitätsabweichung bei MFT-Analysen vermutet wird, bieten Farbmonitorings, wie das hier gezeigte, die Möglichkeit, mit überschaubarem Aufwand die tatsächlichen Farbveränderungen auf den Materialien zu verfolgen, um ggf. Anpassungen im Lichtschutzkonzept vorzunehmen. Diese sollten je nach der im Test gefundenen Lichtechtheitsstufe mindestens solange durchgeführt werden, bis die entsprechende Belichtung für eine Farbveränderung von einer JND nach CIE 157 [11] aufgetragen ist.

³¹ Unter der Annahme, dass die 0,7 Mlxh Belichtung für 10 h pro Tag für 7 Tage die Woche erfolgt, führen 50 lx Beleuchtungsstärke zu einer Belichtungszeit von 1400 Tagen (=3,83 Jahre).

6 Zusammenfassung und Ausblick

Farbveränderungen sind die Konsequenz von chemischen, teils auch physikalischen Prozessen, die auf farbigen Oberflächen auftreten können. Mit einem *Microfadingtester* (MFT) können Oberflächen gezielt dahingehend getestet werden, ob solche Veränderungen durch Licht induziert werden. Ein MFT unterscheidet sich von konventionellen Lichtechtheitstests durch den kleinen Messpunkt mit 0,2 mm Durchmesser, eine deutlich höhere Beleuchtungsstärke im Bereich von 5–15 Mlx und die kontinuierliche Messung der Remissionswerte während der Belichtung. Dies erlaubt die Anwendung des MFT auf Kunst- und Kulturobjekte.

In dieser Arbeit wurde ein mobiler Aufbau eines MFT zusammengestellt, seine Eigenschaften charakterisiert und der Einfluss der Beleuchtung auf die Oberflächentemperatur analysiert. Bei Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Farbmessung erreicht das MFT nicht die Präzision eines Spektralphotometers, für die Farbabstandsmessung – den wesentlichen Einsatzzweck des MFT – reicht die Genauigkeit aber aus, um Lichtechtheitsklassifizierungen im Bereich zwischen Blau-Woll-Standard BW1 und BW3 durchzuführen.

Von der Vielzahl der in dieser Arbeit mit dem MFT untersuchten Objekte seien zwei Anwendungsbeispiele herausgegriffen, die besonders den Nutzen von MFT-Analysen für konservatorische Fragestellungen in Museen verdeutlichen.

Wenn die Messungen das Ergebnis liefern, dass die Farbveränderungen im *Microfading*-Test niedriger ausfallen als beim Lichtechtheitstyp BW3, kann, wie im Falle von Gerhard Richters Werk *Strip* (2012) (siehe Abschnitt 5.4.3), davon ausgegangen werden, dass das Werk mittelfristig bei Galerie-Beleuchtungsstärke (bis ca. 200 lx) keine Farbveränderungen durch Licht erfahren wird.

Im Falle der Ostwaldschen Farbpulver hingegen, die – wie sich herausstellte – äußerst lichtempfindliche synthetisch-organische Pigmente enthalten (Abschnitt 5.3.1), wird durch die MFT-Untersuchungen offensichtlich, dass nur vollständiger Lichtschutz (d. h. dauerhafte Dunkelheit) die Pulver vor Farbveränderungen bewahrt.

Für Restauratoren wurde in dieser Arbeit ein weiteres Anwendungsfeld erschlossen und exemplarisch demonstriert: die Materialprüfung und Ursachenforschung mit Hilfe von *Microfading* mit UV-Anteil im Beleuchtungsspektrum. Durch Mehrfachmessung (mit und ohne UV-Anteil) kann die Wirkung der UV-Strahlung auf die Materialien untersucht werden. Am Beispiel der Skulptur *Checking Aids (I)* von Zephania Tshuma führte die zweifache MFT-Messung (mit und ohne spektrale UV-Anteile) zur Identifikation von UV-Strahlung als Ursache für die Degradationserscheinungen (Abschnitt 5.2.1). Materialprüfungen mit mehrfachen MFT-Messungen bei verschiedener Beleuchtung wurden auch für das Restaurierungsprojekt am Tobsdorfer Chorgestühl durchgeführt (Abschnitt 5.2.2). Auf deren Grundlage konnte für die Restaurierung eine Materialempfehlung im Hinblick auf die UV-Schutzwirkung eines Lacks ausgesprochen werden.

Wenn Materialien mit dem MFT untersucht werden, die nicht der Reziprozität folgen, kommt es zu Fehlern bei der Abschätzungen der Farbveränderungen bei niedriger Beleuchtungsstärke, wie sie typischerweise in musealen Ausstellungsräumen herrscht. In dieser Arbeit wurde an den Lichtecheitsstandards BW1 eine Reziprozitätsabweichung in der Form festgestellt, dass bei gleicher Belichtung die Farbveränderungen von BW1 bei Galerie-Beleuchtungsstärke um den Faktor 3–4 größer sind als bei MFT-Beleuchtungsstärke (Abschnitt 5.5.3.2).

Dies hat Auswirkungen auf den Einsatz von BW1 als Referenz bei der Klassifizierung der Lichtecheit mit dem MFT. In der Konsequenz führt diese Reziprozitätsabweichung von BW1 zu einer systematischen Überschätzung bei der BW1-Klassifizierung von MFT-Ergebnissen, wenn diese auf niedrigere Beleuchtungsstärken übertragen werden. Hier wird der Forschungsbedarf nach brauchbaren Lichtecheitsreferenzen für MFT-Untersuchungen deutlich, die die Reziprozität bis hin zu MFT-Beleuchtungsstärke von 10 Mlx einhalten.

Ansatzpunkte für MFT-geeignete Lichtecheitsreferenzen wurden mit den Pellet- und Pulverpräparationen aufgezeigt, die beim *Microfading* eine bessere Übereinstimmung mit dem Ausbleichverhalten von BW1 bei Galeriebedingungen aufweisen (Abschnitt 5.1.1). Zudem wurde gezeigt, dass die Messungen an den Pellets und Pulvern eine bessere Reproduzierbarkeit aufweisen als an den textilen BWS, verbunden mit einer leichteren Handhabbarkeit als bei den originalen BW-Standards. Insgesamt sind aber bei der Entwicklung von MFT-geeigneten Lichtecheitsreferenzen noch viele Fragen offen – insbesondere die Frage der Reziprozität.

Die Weiterentwicklung des Auswertungsverfahrens der MFT-Analysen mit Einbezug der Farbveränderungsrate ermöglicht eine präzisere Einschätzung des möglichen Farbverlusts ausgehend von den Messergebnissen (Abschnitt 5.1.2). Bei der Anwendung des neuen Auswertungsverfahrens auf 44 Proben zeigte sich, dass vor allem die Proben eine andere, meist geringere Lichtecheitsklassifizierung erhalten, die ein lineares oder exponentielles Farbveränderungsverhalten über die Belichtung beim *Microfading* zeigen, d. h. die Proben deren Farbveränderungsverhalten von dem der Blauwollstandards abweicht. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf, inwieweit sich durch die erweiterte Auswertung die Testzeit des MFT verkürzen lässt und die Aussagegenauigkeit mit Reziprozitätstests überprüft wird.

Bei der ersten derartigen Vergleichsuntersuchung zwischen Belichtungen bei Galerie- und MFT-Beleuchtungsbedingungen wurden neben dem Reziprozitätsbruch von BW1 (siehe oben) drei wesentliche Erkenntnisse gewonnen:

Für Preußisch Blau wurden unter der Annahme, dass dieses Pigment an den relevanten Messpunkten auf Bernardo Bellottos Gemälden vorhanden ist, im *Microfading* große Farbveränderungen gemessen, während im Monitoring eine relative Farbstabilität registriert wurde. Diese extreme Abweichung zwischen den Farbveränderungen bei Galerie- und MFT-Belichtung lässt sich mit der Reversion von ausgebleichetem Preußisch Blau in Dunkelheit unter Einfluss von Sauerstoff erklären [21, 60].

Die zweite Erkenntnis betraf die Vergilbungserscheinungen in ölhaltigen Malschichten. Bei MFT-Belichtung werden bereits vorhandene Vergilbungsprodukte ausgebleicht, während bei Galerie-Belichtung, d. h. bei niedriger Beleuchtungsstärke (< 90 lx) und im Wechsel von Belichtung und Dunkelheit (Tag-Nacht-Wechsel), die Vergilbungserscheinungen zunehmen. Qualitative Merkmale von Farbveränderungen beim Vergilbungsrückgang durch

Microfading wurden abgeleitet, um die Differenzierung des Vergilbungsrückgangs von typischem Ausbleichen zu erleichtern.

Für das verwendete Mohnöl als Bindemittel konnte anhand der Bleiweiß- und Miloriblaufstriche eine Schwellenbeleuchtungsstärke zwischen 90–105 lx identifiziert werden (bei halbtäglichem Wechsel von Belichtung und Dunkelheit). Oberhalb der Schwellenbeleuchtungsstärke treten nur geringe Vergilbungen auf, darunter nehmen die Vergilbungen kontinuierlich zu, wobei der Trocknungszustand des Bindemittels einen Einfluss auf die Schwellenbeleuchtungsstärke zu haben scheint.

Drittens wurde bei den Krapplackaufstrichen bei beiden Testverfahren ein relativ linearer Farbverlust beobachtet, wenngleich die Farbveränderungen unter Galerie-Belichtung auch in diesem Fall etwas größer waren als bei *Microfading*-Belichtung.

Die MFT-Untersuchungen an den Objekten zeigen, dass ein Lichtecktest zwar ohne Kenntnis der Materialzusammensetzung möglich ist, die Interpretation der Ergebnisse aber mit Grundinformationen zu den getesteten Materialien an Gehalt und Aussagekraft gewinnt. Vor MFT-Untersuchungen sind Rücksprachen mit Restauratoren zur Auswahl der Messpunkte und der dortigen Materialzusammensetzung besonders ratsam.

Bei den *Microfading*-Tests werden einige Standards der Farbmessung berücksichtigt, für die Messung und Auswertung stehen keine standardisierten Vorgaben, wie bei den Normen zu den Echtheitstests, zur Verfügung. Deswegen sollte ein Ziel weiterer Forschungen die Definition von standardisierten Mess- und Auswertungsangaben für MFT-Messungen sein.

Da Reziprozitätsabweichungen auf Grund von einzelnen *Microfading*-Tests nicht identifiziert werden können, wären für die Zukunft umfangreiche Reziprozitätstests an einer Vielzahl von Materialien wünschenswert. Die entwickelten teil-automatisierten MFT [57, 151] bieten die Möglichkeit, einen Teil der Untersuchungen über vielleicht 1–2 Größenordnungen unterhalb der MFT-Beleuchtungsstärke durchzuführen. Eine umfangreiche Datensammlung zum Reziprozitätsverhalten verschiedenster Stoffe würde die Interpretation von MFT-Ergebnissen erleichtern und die Übertragbarkeit auf Galeriebedingungen absichern.

Ein neues Anwendungsfeld der MFT-Untersuchung lässt sich aus den gemessenen Rückgängen der Vergilbungserscheinungen ableiten. In weiteren Forschungen ist zu prüfen, inwieweit mit dem MFT Vorhersagen über die Farbveränderungen durch Rückgang von Vergilbungen bei der Ausstellung von Kunstwerken nach langer Lagerungszeit im Depot getroffen werden können. Erfahrungswerte in diesem Bereich fehlen bislang vollkommen, die Einschätzung kann aber bei der Planung von Ausstellungen (Vorlaufzeit bis ein Gemälde wieder „zeigbar“ ist) hilfreich sein.

Abschließend bleibt das große Potential der *Microfading*-Methode für den Bereich Konservierung und Restaurierung herauszuheben. Die Möglichkeit die Lichtecktest direkt am Objekt zu testen befördert auf Messergebnissen basierende Ausstellungsentscheidungen und objektangepasstes Lichtmanagement.

Literaturverzeichnis

- [1] COMMITTEE ON COLORIMETRY OPTICAL SOCIETY OF AMERICA: *The Science of Color*. Washington, D.C. : Optical Society of America, 1963
- [2] WENDT, MIKE: *Allgemeine Psychologie - Wahrnehmung*. Göttingen : Hogrefe, 2014
- [3] SCHEURMANN, KONRAD: *Farbe als Akteur und Speicher*. URL <http://www.farbaks.de> - abgerufen am 20.11.2017
- [4] POHLMANN, ALBRECHT; SCHÄNING, ANKE: *Flying Colours*. In: RESTAURO 2011;7:21–29
- [5] GILES, C. H.: *The fading of colouring matters*. In: Journal of Biochemical Toxicology 1965;15(12):541–550
- [6] RUSSEL, W. J.; ABNEY, W.: *Action of Light on Walter Colours*. In: Report to the Science and Art Department of the Committee of Council on Education 1888
- [7] HILBERT, GÜNTER S.: *Sammlungsgut in Sicherheit*. 3. Aufl., Berlin : Gebr. Mann, 2002
- [8] DRUZIK, JAMES; ESHOJ, BENT: *Museum lighting: It's past and future development*. In: PADFIELD, T.; BORCHERSEN, K. (Hrsg.): *Museum Microclimates*. Copenhagen : The National Museum of Denmark, 2007, 51–56
- [9] MICHALSKI, STEFAN: *Time's Effects on Paintings*. In: RAMSAY-JOLICOEUR, B.; WAINWRIGHT, I. (Hrsg.): *Shared responsibility: Proceedings of a seminar for curators and conservators*. Ottawa : National Gallery of Canada, 1990, 39–53
- [10] MICHALSKI, STEFAN: *The lighting decision*. In: *Fabric of an Exhibition, Preprints of Textile Symposium 97*. Ottawa : Canadian Conservation Institute, 1997, 97–104
- [11] CIE 157:2004: *Control of Damage to Museum Objects by Optical Radiation*
- [12] MICHALSKI, STEFAN; DRUZIK, JAMES: *The lighting of easel paintings*. In: STONER, J. H.; RUSHFIELD, R. (Hrsg.): *Conservation of Easel Paintings*. New York : Routledge, 2012, 678–692
- [13] WHITMORE, PAUL M.; PAN, XUN; BAILIE, CATHERINE: *Predicting the fading of objects: Identification of fugitive colorants through direct nondestructive lightfastness measurements*. In: Journal of the American Institute for Conservation 1999;38(3):395–409
- [14] FORD, BRUCE: *Microfading Faq*. URL <http://www.microfading.com/microfading-faq.html> - abgerufen am 20.11.2017
- [15] WARDLE, BRIAN: *Principles and Applications of Photochemistry*. Chichester : John Wiley & Sons, 2009
- [16] FELLER, ROBERT L.: *Accelerated Aging - Photochemical and Thermal Aspects*. Marina del Rey, CA : The Getty Conservation Institute, 1994
- [17] DIN 5031-7:1984: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 7: Benennung der Wellenlängenbereiche*

- [18] JOHNSTON-FELLER, RUTH; FELLER, ROBERT L.; BAILIE, CATHERINE W.; CURRAN, MARY: *The Kinetics of Fading: Opaque Paint Films Pigmented With Alizarin Lake and Titanium Dioxide*. In: Journal of the American Institute for Conservation 1984;23(2):114–129
- [19] KIRBY, JO; SAUNDERS, DAVID: *Fading and Colour Change of Prussian Blue: Methods of Manufacture and the Influence of Extenders*. In: The National Gallery Technical Bulletin 2004;25:73–99
- [20] WARE, MIKE: *Prussian blue: artists' pigment and chemists' sponge*. In: Journal of Chemical Education 2008;85(5):612–621
- [21] ZWEIFEL, SOPHIA; TSE, SEASON; MURRAY, ALISON; DOUTRE, MICHAEL: *Exploring the Role of the Substrate in the Fading and Reversion behaviour of Prussian Blue Dye*, Queens University, Kingston, Ontario, 2015
- [22] RAKOFF, H.; THOMAS, F. L.; GAST, L. E.: *Reversibility of yellowing phenomenon in linseed-based paints*. In: Journal of coatings technology 1979;51(649):25–28
- [23] HENRY W. LEVISON: *Yellowing and Bleaching of Paint Films*. In: Journal of the American Institute for Conservation 1985;24(2):69–76
- [24] TOWNSEND, JOYCE H.; CARLYLE, LESLIE; CHO, JA-HYUN; FÉLIX CAMPOS, MARTA: *The yellowing / bleaching behaviour of oil paint: further investigations into significant colour change in response to dark storage followed by light exposure*. In: BRIDGLAND, J. (Hrsg.): *16th Triennial Conference, Lisbon, 19–23 September 2011: preprints*. London : ICOM-CC, 2011, 1–10
- [25] DIN 5033-1:2009: *Farbmessung - Teil 1: Grundbegriffe der Farbmessung*
- [26] LUTHER, ROBERT: *Aus dem Gebiet der Farbreizmetrik*. In: Zeitschrift für technische Physik 1927;8:540–558
- [27] RICHTER, MANFRED: *Einführung in die Farbmessung*. 2. Aufl., Berlin [u.a.] : Walter de Gruyter, 1980
- [28] WYSZECKI, GÜNTHER; STILES, WALTER S.: *Color Science*. 2. Aufl., New York : John Wiley & Sons, 1982
- [29] DIN EN ISO 11664-2:2011: *Farbmessung - Teil 2: CIE Normlichtarten*
- [30] NASSAU, KURT: *The Physics and Chemistry of Color: The Fifteen Causes of Color*. 2. Aufl., New York [u.a.] : Wiley, 2001
- [31] DIN 5036-3:1979: *Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien - Teil 3: Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen*
- [32] GALL, LUDWIG: *Farbmessung - Remission oder Reflexion?* URL <http://www.farbmessung-gall.de/farbmessung/remorref.html> - abgerufen am 20.11.2017
- [33] DIN EN ISO 11664-4:2012: *Farbmessung - Teil 4: CIE 1976 L*a*b* Farbenraum*
- [34] HABEKOST, MARTIN: *Which color differencing equation should be used?* In: International Circular of Graphic Education and Research 2013;(6):20–33
- [35] FAIRCHILD, MARK D.: *Color Appearance Models*. Chichester : John Wiley & Sons, 2005

- [36] CLARKE, F. J. J.; McDONALD, R.; RIGG, B.: *Modification to the JPC79 Colour-difference Formula*. In: Journal of the Society of Dyers and Colourists 1984;100(4):128–132
- [37] CIE 116:1995: *Industrial Colour-Difference Evaluation*
- [38] DIN 6176:2001: *Farbmetrische Bestimmung von Farbabständen bei Körperfarben nach der DIN99-Formel*
- [39] CIE 142:2001: *Improvement to Industrial Colour-Difference Evaluation*
- [40] SCHANDA, JANOS: *Colorimetry: Understanding the CIE System*. Hoboken, New Jersey : John Wiley & Sons, 2007
- [41] DIN EN ISO 11664-6:2016: *Farbmetrik - Teil 6: CIEDE2000 Formel für den Farbabstand (ISO/CIE 11664-6:2014)*
- [42] SHARMA, GAURAV; WU, WENCHENG; DALAL, EDUL N.: *The CIEDE2000 color-difference formula: Implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations*. In: Color Research & Application 2005;30(1):21–30
- [43] DIN EN ISO 105-A02:1994: *Textilien - Farbechtheitsprüfungen - Teil A02: Graumaßstab*
- [44] PRETZEL, BORIS: *Now you see it, now you don't: lighting decisions for the Ardabil carpet based on the probability of visual perception and rates of fading*. In: BRIDGLAND, J. (Hrsg.): *ICOM-CC, 15th Triennial Conference New Delhi - 22–26 September 2008 - Preprints Volume II*. New Delhi : Allied Publishers, 2008, 759–765
- [45] SCHLÄPFER, KURT: *Farbmetrik in der grafischen Industrie*. 3. Aufl., St. Gallen : UGRA, 2002
- [46] LERWILL, ANDREW; TOWNSEND, JOYCE H.; LIANG, HAIDA; THOMAS, JACOB; HACKNEY, STEPHEN: *A Portable Micro-Fading Spectrometer For Versatile Lightfastness Testing*. In: e-PreservationScience 2008;5:17–28
- [47] VÖLZ, HANS G.: *Industrielle Farbprüfung - Grundlagen und Methoden*. Weinheim : WILEY-VCH, 2001
- [48] BERNS, ROY S.: *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. 3. Aufl., New York [u.a.] : Wiley, 2000
- [49] BELTRAN, VINCENT L.; DRUZIK, JAMES; MAEKAWA, SHIN: *Large-scale assessment of light-induced color change in air and anoxic environments*. In: Studies in Conservation 2012;57(1):42–57
- [50] FORD, BRUCE; DRUZIK, JAMES: *Microfading: The state of the Art for Natural History Collections*. In: Collection Forum 2013;27(1–2):54–71
- [51] PESME, CHRISTEL; LERWILL, ANDREW; BELTRAN, VINCENT; DRUZIK, JAMES: *Development of Contact Portable Microfade Tester to Assess Light Sensitivity of Collection Items*. In: Journal of the American Institute for Conservation 2016;55(2):117–137
- [52] CICS INSTITUT FÜR RESTAURIERUNGS- UND KONSERVIERUNGSWISSENSCHAFT: *Kunsttechnologische Untersuchungen*. URL https://www.th-koeln.de/kulturwissenschaften/kunsttechnologische-untersuchungen_12519.php - abgerufen am 20.11.2017

- [53] CANADIAN CONSERVATION INSTITUTE: *Light Damage Calculator*. URL <https://app.pch.gc.ca/application/cdl-ldc/description-about.app?lang=en> - abgerufen am 20.11.2017
- [54] DEL HOYO-MELÉNDEZ, JULIO M.; MECKLENBURG, MARION F.: *A survey on the light-fastness properties of organic-based Alaska Native artifacts*. In: *Journal of Cultural Heritage* 2010;11(4):493–499
- [55] DRUZIK, JAMES; PESME, CHRISTEL: *Comparison of Five Microfading Tester (MFT) Designs*. In: *Textile Specialty Group Postprints* 2010;20:144–156
- [56] PRETZEL, BORIS: *Determining the colour fastness of the Bullerswood carpet*. In: ROY, A.; SMITH, P. (Hrsg.): *Tradition and innovation: advances in conservation*. London : IIC, 2000, 150–154
- [57] LIANG, HAIDA; LANGE, REBECCA; LUCIAN, ANDREI; HYNDES, PAUL; TOWNSEND, JOYCE H.; BRITAIN, TATE; HACKNEY, STEPHEN: *Development of portable microfading spectrometers for measurement of light sensitivity of materials*. In: *16th Triennial Conference, Lisbon, 19-23 September 2011: preprints*. Lissabon, 2011, 7
- [58] WHITMORE, PAUL M.; BAILIE, CATHERINE; CONNORS, SANDRA A.: *Micro-fading tests to predict the result of exhibition: progress and prospects*. In: *Studies in Conservation* 2000;38(3):200–205
- [59] MORRIS, HANNAH R.; WHITMORE, PAUL M.: *“Virtual Fading” of Art Objects: Simulating the Future Fading of Artifacts by Visualizing Micro-Fading Test Results*. In: *Journal of the American Institute for Conservation* 2007;46(3):215–228
- [60] LERWILL, ANDREW J.: *Micro-Fading Spectrometry: An Investigation Into The Display Of Traditional Watercolour Pigments In Anoxia*, PhD Dissertation, Nottingham Trent University, 2012
- [61] TOWNSEND, JOYCE H.: *Microfading: a useful tool for paintings conservators?* In: CLARRICOATS, R.; DOWDING, H.; GENT, A. (Hrsg.): *Colour Change in Paintings*. London : Archetype Publications, 2016, 77–89
- [62] ISO/CIE 11664-6:2014: *Colorimetry - Part6: CIEDE2000 Colour-Difference Formula*
- [63] EIBNER, ALEXANDER: *Untersuchungen über die Lichtechtheit von Malerfarbstoffen*. In: *Technische Mitteilungen für Malerei* 1905;22(12):174–178
- [64] *Öffentlicher Bericht der „Echtheitskommission“ der Fachgruppe für Chemie der Farben- und Textilindustrie im Verein deutscher Chemiker*. In: *Zeitschrift für angewandte Chemie* 1914;27(10):57–63
- [65] DIN EN ISO 105-B01:2014: *Textilien - Farbechtheitsprüfungen - Teil B01: Farbechtheit gegen Licht: Tageslicht*
- [66] DIN EN ISO 105-B02:2013: *Textilien - Farbechtheitsprüfungen - Teil B02: Farbechtheit gegen künstliches Licht*
- [67] PUGH, SAMANTHA L.; GUTHRIE, JAMES T.: *The development of light fastness testing and light fastness standards*. In: *Review of Progress in Coloration and Related Topics* 2001;31(1):42–56
- [68] AATCC: *Technical Manual*. Triangle Park, NC, USA, 2010

- [69] MICHALSKI, STEFAN: *Damage to museum objects by visible radiation (light) and ultraviolet radiation (uv)*. In: *Lighting in Museums, Galleries and Historic Houses. Conference Postprints, Bristol, 9–10 April 1987*. London : Museums Association, 1987, 3–16
- [70] DUPONT, ANNE-LAURENCE; CUCCI, COSTANZA; LOISEL, CLAUDINE; BACCI, MAURO; LAVÉDRINE, BERTRAND: *Development of LightCheck® Ultra: A novel dosimeter for monitoring lighting conditions of highly photosensitive artefacts in museums*. In: *Studies in Conservation* 2008;53(1):49–72
- [71] FORD, BRUCE; SMITH, NICOLA: *Lighting guidelines and the lightfastness of Australian indigenous objects at the National Museum of Australia*. In: BRIDGLAND, J. (Hrsg.): *Preprints, ICOM Committee for Conservation, ICOM-CC, 16th Triennial Conference, Lisbon, 19–23 September 2011*. Almada : Critério Produção Gráfica, 2011, 1–13
- [72] LERWILL, ANDREW; PESME, CHRISTEL; DRUZIK, JAMES: *Investigating the Validity of Microfading Spectroscopy to Predict Photochemically Induced Color Change at Lower Light Levels*. In: *NIP & Digital Fabrication Conference 31*. Springfield (VA), USA, Society for Imaging Science and Technology 2015;1:123–128
- [73] FORD, BRUCE: *Non-destructive microfade testing at the National Museum of Australia*. In: *AICCM Bulletin* 2011;32(1–Special Issue: Proceedings for the AICCM National Conference Fremantle, Western Australia, 21–15 September 2009):54–64
- [74] TSE, SEASON; GUILD, SHERRY; ORLANDINI, VALERIA; TROJAN-BEDYNSKI, MARIA: *Microfade testing of 19th century iron gall inks*. In: *Textile Specialty Group Postprints* 2010;20:167–180
- [75] FORD, BRUCE; SMITH, NICOLA: *Protecting the Most important, Most Exhibited and Most Fugitive Museum Objects from Light-Fading*. In: *Textile Specialty Group Postprints* 2010;20:156–166
- [76] TROALEN, L. G.; RÖHRS, S.; CALLIGARO, T.; PACHECO, C.; KUNZ, S.; DEL HOYO-MELÉNDEZ, J. M.; HULME, A. N.: *A multi-analytical approach towards the investigation of Subarctic Athapaskan colouring of quillwork and its sensitivity to photo-degradation*. In: *Microchemical Journal* 2016;126:83–91
- [77] PEARLSTEIN, ELLEN; KEENE, LIONEL: *Evaluating Color and Fading of Red-Shafted Flicker (Colaptes auratus cafer) Feathers: Technical and Cultural Considerations*. In: *Studies in Conservation* 2010;55:81–94
- [78] TSE, SEASON; CIPERA, LUCI; LECKIE, CAROLYN: *Microfade Testing To Support Exhibit Decisions: The Catharine Parr Traill Scrapbooks*. In: *Collection Forum* 2011;25(1):92–106
- [79] DRUZIK, JAMES R.: *Evaluating the Light Sensitivity of Paints in Selected Wall Paintings at the Mogao Grottoes*. In: AGNEW, N. (Hrsg.): *Conservation of Ancient Sites on the Silk Road: Proceedings of the Second International Conference on the Conservation of Grotto Sites, Mogao Grottoes, Dunhuang, People's Republic of China, June 28–July 3, 2004*. Los Angeles : The Getty Conservation Institute, 2010, 457–463
- [80] DEL HOYO-MELÉNDEZ, J. M.; LERMA, J. L.; LÓPEZ-MONTALVO, E.; VILLAYERDE, V.: *Documenting the light sensitivity of Spanish Levantine rock art paintings*. In: *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences* 2015;II-5/W3:53–59

- [81] FRIIS, LIV: *The fading of IRIS prints - A study in Fading IRIS Prints, reaction and solution*, Bachelor thesis, Göteborgs universitet, 2014
- [82] TAO, CHONG; WHITMORE, PAUL M.: *Development of a Microfading Tester for Light Exposures Including Near-Ultraviolet Wavelengths*. In: Textile Specialty Group Postprints 2010;20:181–189
- [83] LERWILL, ANDREW; BROOKES, ANNA; TOWNSEND, JOYCE H.; HACKNEY, STEPHEN; LIANG, HAIDA: *Micro-fading spectrometry: investigating the wavelength specificity of fading*. In: Applied Physics A 2014;118(2):457–463
- [84] SAUNDERS, DAVID; KIRBY, JO: *Wavelength-dependent fading of artists' pigments*. In: Studies in Conservation 1994;39(sup2):190–194
- [85] LERWILL, ANDREW; TOWNSEND, JOYCE H.; THOMAS, JACOB; HACKNEY, STEPHEN; CASPERS, CHARLOTTE; LIANG, HAIDA: *Photochemical colour change for traditional watercolour pigments in low oxygen levels*. In: Studies in Conservation 2015;60(1):15–32
- [86] BUNSEN, R.; ROSCOE, H. E.: *Photochemische Untersuchungen*. In: Poggendorfs Annalen 1859;108:193–273
- [87] MARTIN, JONATHAN W.; CHIN, JOANNIE W.; NGUYEN, TINH: *Reciprocity law experiments in polymeric photodegradation: a critical review*. In: Progress in Organic Coatings 2003;47(3–4):292–311
- [88] SAUNDERS, DAVID; KIRBY, JO: *Light-induced damage: investigating the reciprocity principle*. In: BRIDGLAND, J. (Hrsg.): *ICOM committee for conservation, 11th triennial meeting in Edinburgh, Scotland, 1–6 September 1996: Preprints*. London : James & James (Science Publishers) Ltd., 1996, 87–90
- [89] DEL HOYO-MELÉNDEZ, JULIO M.; MECKLENBURG, MARION F.: *An Investigation of the Reciprocity Principle of Light Exposures Using Microfading Spectrometry*. In: Spectroscopy Letters 2011;44(1):52–62
- [90] FORD, BRUCE: *The accelerated light fading of iron gall inks in air, hypoxia and near-anoxia*. In: ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints. Melbourne, 15–19 September 2014, International Council of Museums 2014;art. 0604
- [91] DIN 5033-7:2013: *Farbmessung - Teil 7: Messbedingungen für Körperfarben*
- [92] NEWPORT: *Oriel Product Training - Spectral Irradiance*. Stratford, CT, 2013
- [93] DIN EN ISO 11664-1:2011: *Farbmetrik - Teil 1: CIE farbmetrische Normalbeobachter*
- [94] ERB, W. (Hrsg.): *Leitfaden der Spektroradiometrie - INSTAND-Schriftenreihe Band 6*. Berlin : Springer Verlag, 1989
- [95] DIN 5031-3:1982: *Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Größen, Formelzeichen und Einheiten*
- [96] MCDONALD, RODERICK: *Colour Physics for Industry*. 2. Aufl., Bradford, West Yorkshire : Society of Dyers and Colourists, 1997
- [97] PRESTEL, THOMAS: *A classification system to enhance light-fastness data interpretation based on microfading tests and rate of colour change*. In: Coloration Technology 2017;133(6):506–512

- [98] MOUSSA, ALI; DUPONT, DANIEL; STEEN, DANIEL; ZENG, XIANYI; ELIAS, MADY: *Experimental study of back-scattering spectrum of textile structures*. In: *Color Research and Application* 2006;31(2):122–132
- [99] WHITMORE, PAUL; DRUZIK, JAMES; TSE, SEASON; FORD, BRUCE: *Oriel Microfading Tester Manual (V9.8)*, 2011
- [100] ZHANG, HU; COOKSON, PETER; WANG, XUNGAO: *A Comparative Study on Accelerated Weathering Tests of Wool Fabrics*. In: *Textile Research Journal* 2008;78(11):1004–1010
- [101] YOSHIZUMI, KUNIO; COX CREWS, PATRICIA: *Characteristics of fading of wool cloth dyed with selected natural dyestuffs on the basis of solar radiant energy*. In: *Dyes and Pigments* 2003;58(3):197–204
- [102] HATTORI, HIKA; YOSHIZUMI, KUNIO; COX CREWS, PATRICIA: *Wavelength sensitivity of AATCC Blue wool lightfastness standards under light radiation*. In: *Dyes and Pigments* 2012;92(3):936–941
- [103] GILES, CHARLES H.; MCKAY, ROBERT B.: *The Lightfastness of Dyes : a Review*. In: *Textile Research Journal* 1963;33(7):528–577
- [104] HERBST, WILLY; HUNGER, KLAUS; WILKER, GERHARD; OHLEIER, HEINFRED; WINTER, RAINER: *Industrial Organic Pigments: Production, Properties, Applications: Third, Completely Revised Edition*. Weinheim : WILEY-VCH, 2005
- [105] GILES, CHARLES H.; WALSH, DAVID J.; SINCLAIR, ROY S.: *The Relation between Light Fastness of Colorants and their Particle Size*. In: *Coloration Technology* 1977;93(9):348–352
- [106] MAIKOWSKI, M. A.: *Einfluß des kolloiden Verteilungszustands auf die Gebrauchseigenschaften organischer Pigmente*. In: *Progress in Colloid & Polymer Sciences* 1976;59:70–81
- [107] COX CREWS, PATRICIA: *The Fading Rates of Some Natural Dyes*. In: *Studies in Conservation* 1987;32:65–72
- [108] CRISTEA, DANIELA; VILAREM, GERARD: *Improving light fastness of natural dyes on cotton yarn*. In: *Dyes and Pigments* 2006;70(3):238–245
- [109] MECKLENBURG, MARION F.; DEL HOYO-MELÉNDEZ, JULIO M.: *Development and application of a mathematical model to explain fading rate inconsistencies observed in light-sensitive materials*. In: *Coloration Technology* 2012;128(2):139–146
- [110] THE SCIPY COMMUNITY: *scipy.optimize.curve_fit*. URL https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.curve_fit.html - abgerufen am 20.11.2017
- [111] FORD, BRUCE; SMITH, NICOLA: *A reality check for microfade testing: Five examples*. In: *ICOM-CC 18th Triennial Conference Preprints*. Copenhagen, 4–8 September 2017, International Council of Museums 2017;art. 1508
- [112] *Lackfarbstoffe - Farbstoffe für Buch-, Stein- und Offset-Druck*. Frankfurt am Main : I.G. Farbenindustrie, o. J.
- [113] FORD, BRUCE; BATTERHAM, IAN: *Accelerated Light-Fading of Some Historic Office Copy Documents*. In: *Contributions to On Paper? The 8th AICCM Book, Paper and Photographic Materials Symposium*. Sydney, 2014, 14–20

- [114] ALDIB, MOHANAD: *An investigation of an instrument-based method for assessing colour fastness to light of photochromic textiles*. In: *Coloration Technology* 2015;131(4):298–302
- [115] HARMSSEN, MARIE: *Kunsttechnologische Bestandsaufnahme von 23 simbabwischen zeitgenössischen Holzskulpturen des Bildhauers Zephania Tshuma aus dem Besitz des Deutschen Hygiene Museums Dresden - Empfehlungen für Ausstellungs- und Lagerungsbedingungen*, Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, 2016
- [116] R. RAUCH GMBH: *Datenblatt Ambrosia Satin*. URL http://www.rauch-papiere.de/fileadmin/downloads/Datenblatt/DE/DB_AmbrosiaSatin_D.pdf - abgerufen am 20.11.2017
- [117] HEWLETT PACKARD: *Imaging & Printing Technology Backgrounder - Die neuen HP Vivera Pigmenttinten für professionellen Fotodruck*, 2006
- [118] POHLMANN, ALBRECHT: *Von der Kunst zur Wissenschaft und zurück - Farbenlehre und Ästhetik bei Wilhelm Ostwald (1853–1932)*, Dissertation, Universität Halle, 2010
- [119] JAENSCH, WOLFRAM: *jaensch farbkunst*. URL <http://www.jaensch-farbkunst.de> - abgerufen am 20.11.2017
- [120] PRESTEL, THOMAS: *Farbabstände - Theorie versus Realität im Farbsystem von Wilhelm Ostwald*. In: SCHWARZ, A.; KARLICZEK, A. (Hrsg.): *Farre. Farbstandards in den frühen Wissenschaften*. Jena : SALANA, 2016, 191–213
- [121] BRIDAROLLI, ALEXANDRA; ATAK, SEFKAN; HERM, CHRISTOPH: *Analysis of Wilhelm Ostwald's "Colour Organ" with Raman microspectroscopy*. In: *Applied Physics A* 2016;122(11):1–10
- [122] HERM, CHRISTOPH; ATAK, SEFKAN; BRIDAROLLI, ALEXANDRA; PRESTEL, THOMAS: *Wilhelm Ostwalds Farbsystem - Analytisch betrachtet*. In: *METALLA Sonderheft 8, Archäometrie und Denkmalpflege* 2016;112–115
- [123] MYERS, DAVID: *The Color of Art Pigment Database: Pigment Blue, PB*. URL <http://www.artiscreation.com/blue.html#PB29> - abgerufen am 20.11.2017
- [124] SAMAIN, LOUISE; SILVERSMIT, GEERT; SANYOVA, JANA; VEKEMANS, BART; SALOMON, HÉLÈNE; GILBERT, BERNARD; GRANDJEAN, FERNANDE; LONG, GARY J.; U. A.: *Fading of modern Prussian blue pigments in linseed oil medium*. In: *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 2011;26(5):930–941
- [125] SIEGEL, ANNA: *Untersuchungen und Bestandsaufnahme an sieben Gemälden aus dem Frühwerk Fritz Trögers unter besonderer Berücksichtigung der Objektgeschichte und Recherchen zum Künstler*, Seminararbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, 2015
- [126] GIERING, SARAH: *Acht unaufgespannte Gemälde des Berliner Künstlers Hans Stübner, Untersuchung - Konservierung - Restaurierung - Präsentation*, Diplomarbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden, 2016
- [127] HERM, CHRISTOPH: *Farbveränderungen in der Malerei*. In: SCHEURMANN, K.; KARLICZEK, A. (Hrsg.): *GESPRÄCHSSTOFF FARBE*. Köln [u.a.] : Böhlau Verlag, 2017, 498–509
- [128] FORD, BRUCE L.: *Monitoring colour change in textiles on display*. In: *Studies in Conservation* 1992;37(1):1–11

- [129] BENDFELDT, SABINE; HERM, CHRISTOPH: *Untersuchungen und Analysen zur Maltechnik des Gemäldes ‚Dresden vom rechten Elbufer unterhalb der Augustusbücke‘ von Bernardo Bellotto*. In: HENNING, A.; OESINGHAUS, S.; BENDFELDT, S. (Hrsg.): *Bernardo Bellotto - Der Canaletto-Blick. Kabinettausstellung anlässlich der Restaurierung des Gemäldes*. Dresden : Sandstein, 2011, 86–92
- [130] BENDFELDT, SABINE: *Die Restaurierung des „Canaletto-Blicks“ und Betrachtungen zu Bellottos Malweise*. In: HENNING, A.; OESINGHAUS, S.; BENDFELDT, S. (Hrsg.): *Bernardo Bellotto - Der Canaletto-Blick. Kabinettausstellung anlässlich der Restaurierung des Gemäldes*. Dresden : Sandstein, 2011, 68–85
- [131] DEL HOYO-MELÉNDEZ, JULIO M.; MECKLENBURG, MARION F.; DOMÉNECH-CARBÓ, MARÍA TERESA: *An evaluation of daylight distribution as an initial preventive conservation measure at two Smithsonian Institution Museums, Washington DC, USA*. In: *Journal of Cultural Heritage* 2011;12(1):54–64
- [132] FILTENBORG, TROELS; BUTI, DAVID; VILA, ANNA; WADUM, JORGEN: *Colour changes due to the fading of Prussian blue in Danish Golden Age Paintings*. In: CLARRICOATS, R.; DOWDING, H.; GENT, A. (Hrsg.): *Colour Change in Paintings*. London : Archetype Publications, 2016, 27–38
- [133] BENDFELDT, SABINE; PRESTEL, THOMAS; WERDIN, HEIKO: *Dunkle Aussichten für die Kunst. Kein Licht ist auch keine Lösung: Die Auswirkungen der momentanen Beleuchtungssituation in der Gemäldegalerie Alte Meister Dresden*. In: *RESTAURO* 2016;8:48–53
- [134] DEFFNER & JOHANN GMBH: *Bleiweiß (Kremserweiß), bleihaltig, giftig, lichtecht*. URL <https://www.deffner-johann.de/bleiweiss-kremserweiss-bleihaltig-giftig-lichtecht.html> - abgerufen am 20.11.2017
- [135] KREMER PIGMENTE GMBH & CO. KG: *Miloriblau Lux*. URL <http://www.kremer-pigmente.com/de/miloriblau-lux-45202.html> - abgerufen am 20.11.2017
- [136] DIETEMANN, PATRICK: *Towards More Stable Natural Resin Varnishes for Paintings - The Aging of Triterpenoid Resins and Varnishes*, Dissertation, ETH Zürich, 2003
- [137] MALLÉGOL, JACKY; LEMAIRE, JACQUES; SOURCE, JEAN-LUC GARDETTE: *Yellowing of Oil-Based Paints*. In: *Studies in Conservation* 2001;46(2):121–131
- [138] SAMAIN, LOUISE; GILBERT, BERNARD; GRANDJEAN, FERNANDE; LONG, GARY J.; STRIVAY, DAVID: *Redox reactions in Prussian blue containing paint layers as a result of light exposure*. In: *Journal of Analytical Atomic Spectrometry* 2013;28(4):524–535
- [139] PRIVETT, O. S.; BLANK, M. L.; LUNDBERG, W. O.: *An accelerated test of the yellowing tendency of drying oils*. In: *Journal of the American Oil Chemists Society* 1961;38(1):27–30
- [140] MORRIS, H. R.; WHITMORE, P. M.; COLALUCA, V. G.: *Preventing Discoloration in Films of Acrylic Artists' Media by Exposure to Ambient Light*. In: *Studies in Conservation* 2003;47(2):95–102
- [141] SAUNDERS, DAVID; KIRBY, JO: *Light-induced Colour Changes in Red and Yellow Lake Pigments*. In: *National Gallery Technical Bulletin* 1994;15:79–97
- [142] SARAH SANDS: *Volume, Weight, and Pigment to Oil Ratios*. URL <http://www.justpaint.org/volume-weight-and-pigment-to-oil-ratios/> - abgerufen am 20.11.2017

- [143] KUMARATHASAN, RAJKUMAR; RAJKUMAR, AMIRTHINI B.; HUNTER, NORMAN R.; GESSER, HYMAN D.: *Autoxidation and yellowing of methyl linolenate*. In: Progress in Lipid Research 1992;31(2):109–126
- [144] HENNING, ANDREAS: *Bernardo Bellotto und der Blick auf Dresden*. In: HENNING, A.; OESINGHAUS, S.; BENDFELDT, S. (Hrsg.): *Bernardo Bellotto - Der Canaletto-Blick. Kabinettausstellung anlässlich der Restaurierung des Gemäldes*. Dresden : Sandstein, 2011, 12–21
- [145] LÖFFLER, FRITZ: *Bernardo Bellotto genannt Canaletto - Dresden im 18. Jahrhundert*. Leipzig : Koehler & Amelang (VOB), 1985
- [146] KOZAKIEWICZ, STEFAN: *Bernardo Bellotto genannt Canaletto. Band 1, Leben und Werk*. Recklinghausen : Aurel Bongers, 1972
- [147] GERVAIS, CLAIRE; LANGUILLE, MARIE-ANGÉLIQUE; RÉGUER, SOLENN; GILLET, MARTINE; PELLETIER, SÉBASTIEN; GARNIER, CHANTAL; VICENZI, EDWARD P.; BERTRAND, LOÏC: *Why does Prussian blue fade? Understanding the role(s) of the substrate*. In: Journal of Analytical Atomic Spectrometry 2013;28(10):1600–1609
- [148] GERVAIS, CLAIRE; LANGUILLE, MARIE-ANGÉLIQUE; REGUER, SOLENN; GARNIER, CHANTAL; GILLET, MARTINE: *Light and anoxia fading of Prussian blue dyed textiles*. In: Heritage Science 2014;2(1):26–33
- [149] BÖRNER, AXEL: *Berliner Blau für die Retusche? Langzeitbeobachtungen an Probeaufstrichen*. In: RESTAURO 2002;5:327–331
- [150] DRUZIK, JAMES R.; MICHALSKI, STEFAN W.: *Guidelines for Selecting Solid-State Lighting for Museums*. Los Angeles : J. Paul Getty Trust and Canadian Conservation Institute, 2012
- [151] INSTYTUT FOTONOWY: *Color meter - Micro Fading Tester*. URL <https://www.fotonowy.pl/products/micro-fading-tester/?lang=en> - abgerufen am 20.11.2017
- [152] BATZKE, MATTHIAS: *Testbericht Nr. 17591*. Retsch Application Lab, Wuppertal, 2016
- [153] BRIDAROLLI, ALEXANDRA: *Identification and analysis of synthetic organic pigments by Raman Spectroscopy*, Masterarbeit, Technische Universität Dresden, 2015
- [154] ATAK, SEFKAN: *Analyses of synthetic organic dyes and pigments (SOP) from Wilhelm Ostwald colour system*, Masterarbeit, Technische Universität Dresden, 2016

Anhang

A Einzelkomponenten MFT

Beleuchtungseinheit

Xenon Bogen Lampe XBO 75W/2 (Osram, München)
Q Housing with rear reflector (Newport/Oriel, Darmstadt)
Q Housing Arc Lamp Ignitor Kit (Newport/Oriel, Darmstadt)
Adapter Kit Series Q Housing (Newport/Oriel, Darmstadt)
Condensing Lens Assembly F/1.5 (Newport, Darmstadt)
Multiple Filter Holder (Newport, Darmstadt)
Fiber Focus Assembly F/2.0 (Newport, Darmstadt)
Power Supply 50-200W (Newport, Darmstadt)
Light Intensity Controller (Newport, Darmstadt)
Wärmereflexionsfilter IR3 (Reichmann Feinoptik GmbH, Brokdorf)
UV Filter GG395 (Schott AG, Mainz)
Neutralglasfilter OD3 und OD5 (Reichmann Feinoptik GmbH, Brokdorf)

Messkopf

Endoscope ViTiny UM07 2.0MP (Oasis Scientific Inc., Taylors, SC, USA)
Glasfaser Lampe-Messkopf: UV–VIS 200 μm core, 2 m (Newport, Darmstadt)
Glasfaser Messkopf-Spektrometer: UV–VIS 600 μm core, 2 m (Newport, Darmstadt)
2x FS Focusing Beam Probe (Newport, Darmstadt)
Fused Silica Lens Plano Convex SPX012, $f=19$ mm (Newport, Darmstadt)
Fused Silica Lens Plano Convex SPX013, $f=25$ mm (Newport, Darmstadt)
Messkopf Spezialanfertigung (FOUR-HOUR DAY Inc., Baltimore, MD, USA)
Messkopfhalterung Spezialanfertigung (TSO Thalheim Spezialoptik GmbH, Pulsnitz)
Stative: Super Pro Stativ 161MK2B (Manfrotto S.p.A, Cassola, Italien)
Reprostativ RS1 (Kaiser Fototechnik GmbH, Buchen)
PTFE Weißstandard (GetAMO Ltd., Sofia, Bulgarien)

Spektrometer

Silicon PDA-512 380–727 mit Spec32 Software (Control Development, South Bend, IN, USA)

B CERAM Farbfliesen und Graumaßstab



Abbildung B.1: CERAM Farbfliesen

Tabelle B.1: CIELab-Werte (D65, 2°) der CERAM Fliesen aus Farbmessung am 09.06.2015 mit KonicaMinolta CM2600-d

Fliese #	L* (σ)	a* (σ)	b* (σ)	MCDM ΔE76	MCDM ΔE00
1	83,13 (0,04)	-0,24 (0,03)	0,29 (0,04)	0,05	0,05
2	60,25 (0,10)	0,04 (0,04)	0,14 (0,06)	0,10	0,10
3	59,55 (0,10)	-3,21 (0,03)	1,11 (0,11)	0,12	0,11
4	36,76 (0,03)	-0,02 (0,01)	0,39 (0,02)	0,03	0,03
5	46,39 (0,06)	24,02 (0,04)	4,01 (0,01)	0,06	0,05
6	46,66 (0,10)	40,89 (0,04)	20,70 (0,03)	0,09	0,08
7	67,24 (0,08)	37,24 (0,11)	51,89 (0,11)	0,15	0,07
8	84,86 (0,06)	-4,28 (0,04)	76,43 (0,14)	0,13	0,05
9	55,80 (0,06)	-29,16 (0,07)	12,48 (0,11)	0,11	0,07
10	56,27 (0,04)	-28,28 (0,03)	15,52 (0,11)	0,10	0,06
11	54,59 (0,04)	-10,37 (0,02)	-29,17 (0,04)	0,05	0,03
12	28,64 (0,03)	9,96 (0,03)	-19,55 (0,05)	0,05	0,03

Tabelle B.2: CIELab-Werte (D65, 2°) der CERAM Fliesen aus Farbmessung am 02.08.2016 mit KonicaMinolta CM2600-d

Fliese #	L* (σ)	a* (σ)	b* (σ)	MCDM ΔE76	MCDM ΔE00
1	83,26 (0,02)	-0,23 (0,04)	0,24 (0,07)	0,06	0,07
2	60,26 (0,16)	0,05 (0,01)	0,15 (0,04)	0,14	0,12
3	59,57 (0,13)	-3,22 (0,04)	1,06 (0,10)	0,13	0,12
4	36,74 (0,11)	0,00 (0,01)	0,53 (0,05)	0,10	0,08
5	46,47 (0,03)	23,93 (0,04)	4,07 (0,02)	0,05	0,03
6	46,81 (0,12)	41,04 (0,18)	20,86 (0,19)	0,19	0,10
7	67,15 (0,14)	37,35 (0,11)	52,00 (0,19)	0,22	0,13
8	84,90 (0,12)	-4,10 (0,07)	76,51 (0,19)	0,19	0,08
9	55,84 (0,11)	-29,23 (0,08)	12,61 (0,07)	0,13	0,10
10	56,32 (0,10)	-28,29 (0,21)	15,52 (0,07)	0,21	0,12
11	54,63 (0,05)	-10,37 (0,04)	-29,19 (0,03)	0,06	0,04
12	28,66 (0,06)	10,02 (0,07)	-19,54 (0,10)	0,12	0,07

Tabelle B.3: CIELab-Werte (D65, 2°) der CERAM Fliesen aus MFT-Farbmessung vom 09.06.2015

Fliese #	L* (σ)	a* (σ)	b* (σ)	MCDM ΔE_{76}	MCDM ΔE_{00}
1	87,74 (0,39)	0,16 (0,05)	1,51 (0,19)	0,33	0,25
2	59,95 (0,37)	0,16 (0,19)	0,64 (0,40)	0,48	0,49
3	59,36 (0,54)	-3,35 (0,16)	2,29 (0,75)	0,78	0,70
4	30,74 (0,16)	0,34 (0,02)	1,70 (0,13)	0,16	0,14
5	42,38 (0,21)	26,08 (0,24)	4,60 (0,06)	0,28	0,18
6	35,17 (0,28)	41,67 (0,61)	30,74 (0,63)	0,74	0,32
7	60,92 (0,44)	30,54 (0,46)	53,05 (0,97)	0,94	0,42
8	74,37 (0,47)	-8,07 (0,24)	69,30 (1,10)	1,01	0,39
9	54,89 (0,32)	-33,02 (0,27)	15,85 (0,44)	0,49	0,31
10	56,03 (0,12)	-32,73 (0,22)	19,04 (0,64)	0,55	0,28
11	52,72 (0,27)	-13,17 (0,14)	-29,53 (0,29)	0,35	0,25
12	15,23 (1,56)	19,98 (1,17)	-32,78 (0,51)	1,45	0,85

Tabelle B.4: CIELab-Werte (D65, 2°) der CERAM Fliesen aus MFT-Farbmessung vom 17.06.2015

Fliese #	L* (σ)	a* (σ)	b* (σ)	MCDM ΔE_{76}	MCDM ΔE_{00}
1	87,38 (0,58)	0,37 (0,51)	1,49 (0,41)	0,68	0,69
2	60,34 (0,82)	0,24 (0,22)	0,92 (0,23)	0,69	0,67
3	60,30 (1,59)	-3,36 (0,22)	2,46 (0,49)	1,42	1,25
4	30,52 (0,26)	0,30 (0,02)	1,72 (0,03)	0,22	0,17
5	42,38 (0,23)	26,06 (0,24)	4,60 (0,18)	0,32	0,21
6	35,02 (0,27)	42,01 (0,63)	31,29 (0,74)	0,80	0,33
7	60,60 (0,33)	29,83 (0,50)	51,77 (0,19)	0,51	0,33
8	74,27 (0,30)	-8,12 (0,11)	68,56 (1,27)	1,03	0,32
9	54,43 (0,59)	-33,08 (0,46)	15,94 (0,60)	0,78	0,57
10	55,75 (0,26)	-32,74 (0,32)	19,27 (1,02)	0,90	0,51
11	52,81 (0,24)	-13,23 (0,09)	-29,35 (0,18)	0,26	0,20
12	15,39 (1,67)	19,33 (1,54)	-32,05 (1,12)	2,08	1,08

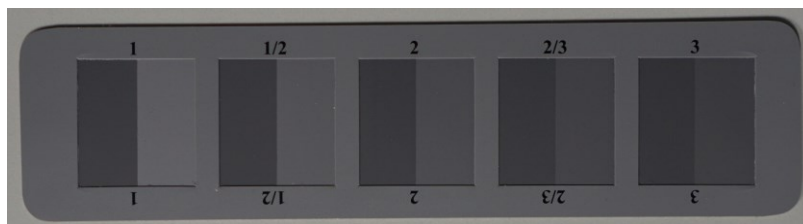


Abbildung B.2: Graumaßstab nach DIN EN ISO 105-A02 [43]

C Teilchengrößen der Blau-Woll-Pulver

Die folgenden Diagramme und Werte stammen aus dem Laborbericht des Retsch Application Lab (Wuppertal) [152], wo die Mahlung der BW-Pulver durchgeführt wurde.

BW1 Pulver

durchschnittliche Teilchengröße:
29,24 μm
Spanne: ca. 1,7–229,0 μm

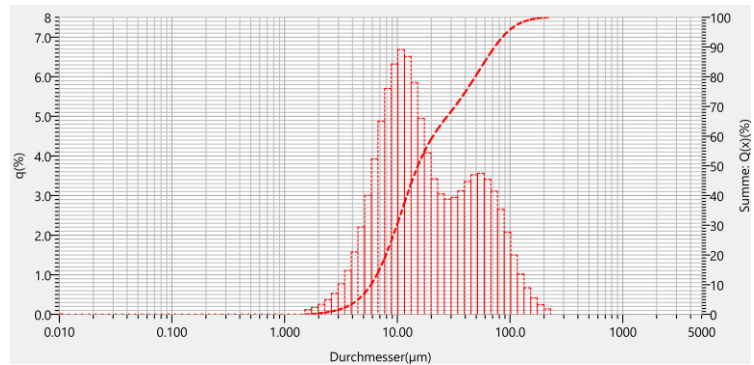


Abbildung C.1: Teilchengröße-Verteilung des BW1-Pulvers

BW2 Pulver

durchschnittliche Teilchengröße:
26,54 μm
Spanne: ca. 1,5–116,2 μm

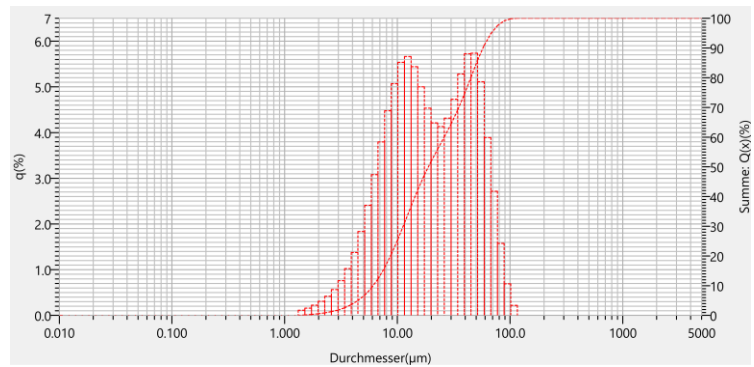


Abbildung C.2: Teilchengröße-Verteilung des BW2-Pulvers

BW3 Pulver

durchschnittliche Teilchengröße:
17,67 μm
Spanne: 0,87–101,46 μm

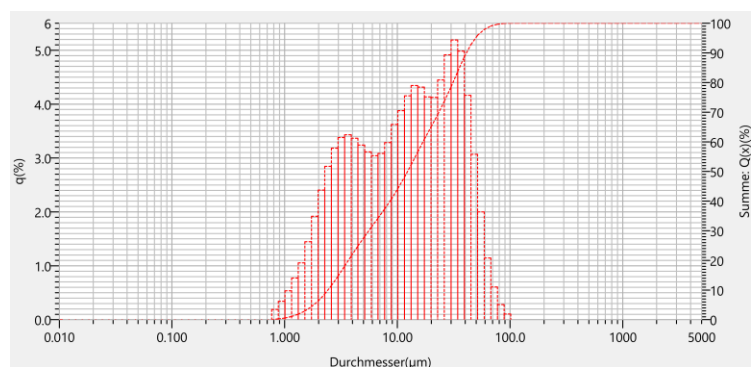


Abbildung C.3: Teilchengröße-Verteilung des BW3-Pulvers

D Lackfarbstoffe – Übersicht und MFT-Messdaten

Im Folgenden sind die 44 untersuchten Lackfarbstoffe mit ihrer Herstellerbezeichnung und der Lichtechtheitsangabe aus dem Musterbuch [112] aufgeführt („5“ bezeichnet demnach eine „mäßige“ Lichtechtheit und „6“ eine „sehr mäßige“ Lichtechtheit). Die Messergebnisse der untersuchten Lackfarbstoffe aus der MFT-Untersuchung sind in den folgenden Abbildungen dargestellt.

Tabelle D.1: Liste der untersuchten Lackfarbstoffe (Lichtechtheitsangabe laut System im Buch)

Nr.	Name	Lichtechtheit	Nr.	Name	Lichtechtheit
1	Lackrot C Pulver und extra	5	23	Orange II L (Ba-Lack)	5
2	Lackrot C extra Teig	5	24	Echtorange O (Ba-Lack)	5
3	Lackrottoner LCL	5	25	Ponceau GR II (Ba-Lack)	5
4	Lackrottoner LCD	5	26	Lackponceau BP (Ba-Lack)	5
5	Litholrot 3G Pulver und Teig	5	27	Lackponceau RRZ (Ba-Lack)	5
6	Helioorange TD	5	28	Lackpurpur 3B (Ba-Lack)	5
7	Helioorange CAG	5	29	Anthosin BN (Ba-Lack)	5
8	Lackorange GR	5	30	Anthosin 3B (Ba-Lack)	5
9	Litholrot GG Pulver und Teig (unverlackt)	5	31	Echtsäureviolett ARR (Ba-Lack)	5
10	Litholrot GG Pulver und Teig (Ba-Lack)	5	32	Säureviolett 3R (Ba-Lack)	6
11	Litholrot R Pulver, Teig, RX Teig (unverl.)	5	33	Säureviolett 4 BLO (Ba-Lack)	6
12	Litholrot R Pulver, Teig, RX Teig (Ba-Lack)	5	34	Wasserblau TR für Lack (Ba-Lack)	5
13	Litholrot RBKX	5	35	Brillantlackblau G extra (Ba-Lack)	5
14	Litholrottoner RB Pulver (mit Substrat)	5	36	Brillantwollblau FFR extra (Ba-Lack)	5
15	Litholrot R Pulver, Teig, RX Teig (Ca-Lack)	5	37	Alkaliblau 7 für Lack (Ba-Lack)	5
16	Litholrot RC KX	5	38	Brillanreinblau 8G extra (Ba-Lack)	6
17	Litholrottoner RC Pulver (mit Substrat)	5	39	Brillantpatentblau A (Ba-Lack)	6
18	Litholrot 3BN Pulver	5	40	Brillantsäureblau B (Ba-Lack)	6
19	Litholrottoner 3 B Pulver (mit Substrat)	5	41	Patentblau AF (Ba-Lack)	6
20	Eosin A salzfrei (Pb-Lack)	6	42	Brillantsäuregrün 6B konz. (Ba-Lack)	6
21	Bengalrosa GTO (Pb-Lack)	6	43	Lichtgrün SLX (Ba-Lack)	6
22	Chinolingelb L extra (Ba-Lack)	5	44	wie 43 mit Chinolingelb L ex. (Ba-Lack)	5

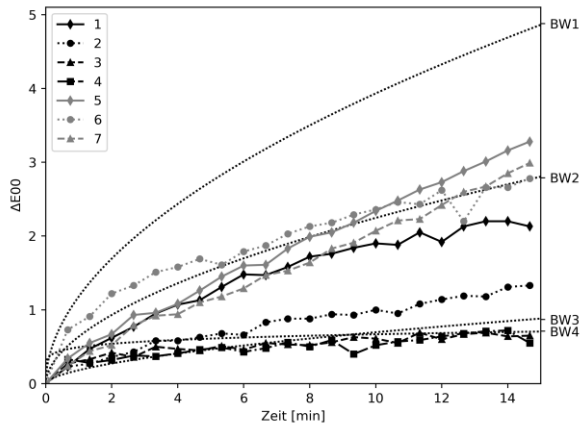


Abbildung D.1: Farbveränderung über die Belichtungszeit der Proben 1–7

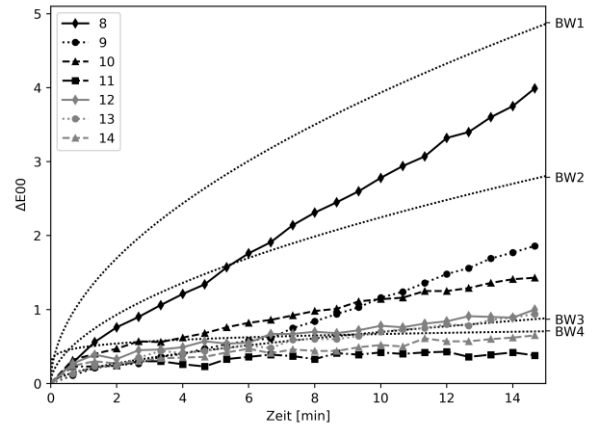


Abbildung D.2: Farbveränderung über die Belichtungszeit der Proben 8–14

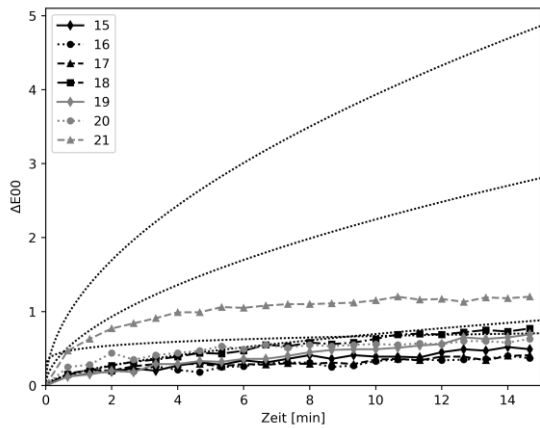


Abbildung D.3: Farbveränderung über die Belichtungszeit der Proben 15–21

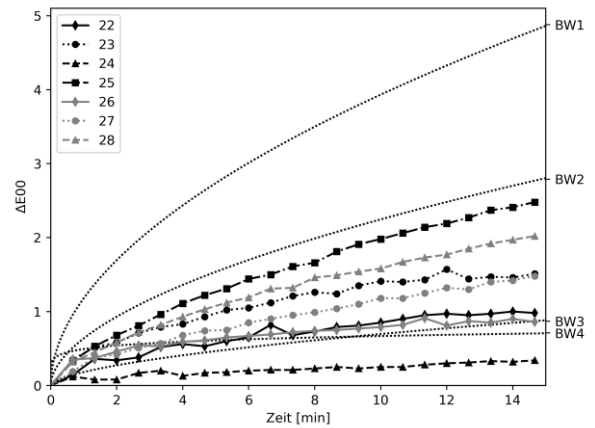


Abbildung D.4: Farbveränderung über die Belichtungszeit der Proben 22–28

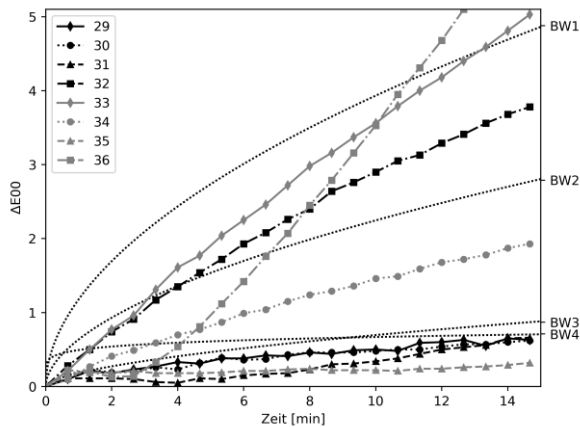


Abbildung D.5: Farbveränderung über die Belichtungszeit der Proben 29–36

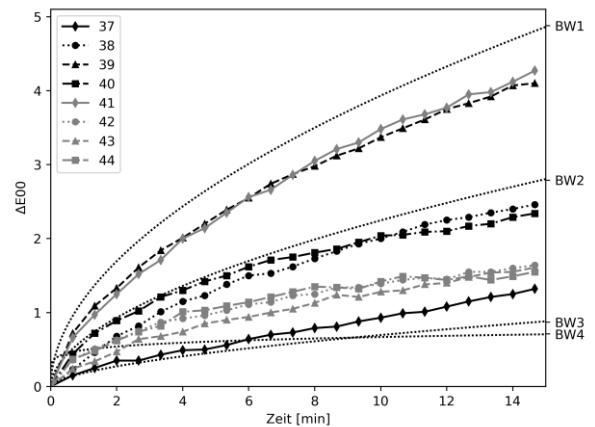


Abbildung D.6: Farbveränderung über die Belichtungszeit der Proben 37–44

E Dokumentation der MFT-Messpunkte auf Gal. Nr. 616



Abbildung E.1: Kartierung der Messpunkte auf dem Gemälde Gal. Nr. 616

Dokumentation der Messpunkt-Positionen mit der Endoskopkamera



Abbildung E.2: Messpunkt MP1



Abbildung E.3: Messpunkt MP2



Abbildung E.4: Messpunkt MP3



Abbildung E.5: Messpunkt MP4

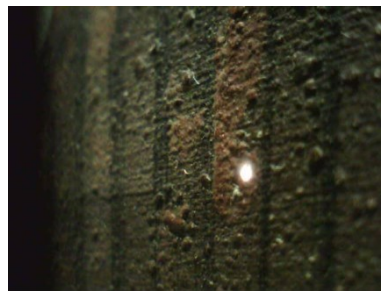


Abbildung E.6: Messpunkt MP5



Abbildung E.7: Messpunkt MP6

F Beleuchtungssituation und Datenerhebung der Belichtung in der Gemädegalerie

Die Beleuchtungssituation in der Gemädegalerie Alte Meister in Dresden ist durch einen regelmäßigen Tagesgang geprägt, der sich in drei Phasen einteilen lässt. Die Phase der Dunkelheit (zwischen 18:00 Uhr und 6:30 Uhr), die Phase für Putz- und Durchgangslicht (6:30 Uhr bis 9:30 Uhr) und die Phase des Ausstellungslichts (9:30 Uhr bis 18:00 Uhr). Innerhalb der jeweiligen Beleuchtungsphasen ist die Beleuchtungsstärke relativ konstant, es kommt bedingt durch Änderungen des Außenlichts und ggf. Nachregelungen der Lampen zu leichten Schwankungen.³² Exemplarisch sind in Abbildung F.1 der Tages- und Wochengang der Beleuchtungsstärke in Raum 1-30 dargestellt.

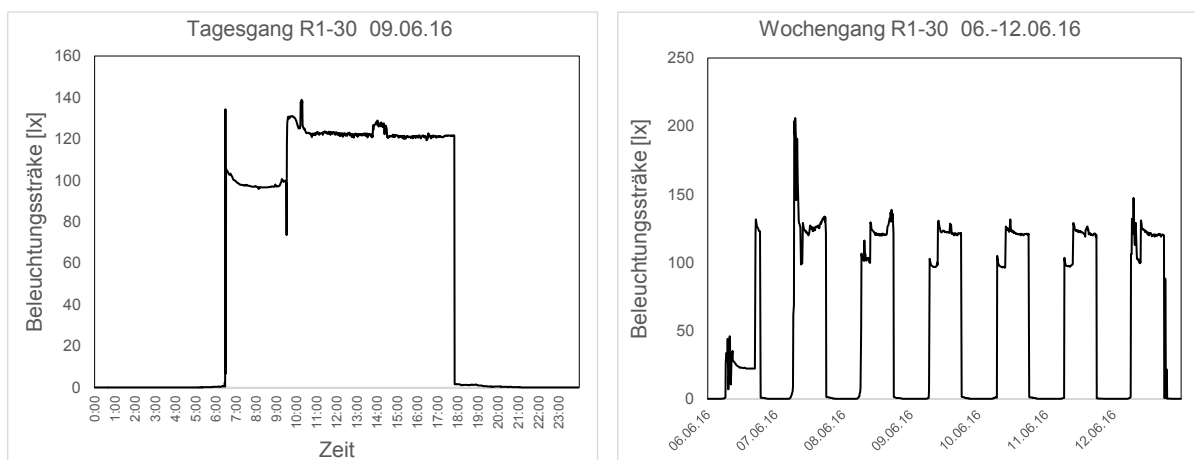


Abbildung F.1: Exemplarischer Tagesgang (links) und Wochengang (rechts) der Beleuchtungsstärke in Raum 1-30 (mobiles Luxmeter)

Die Beleuchtungsstärke an den Orten der acht Mustertafeln in der Galerie (plus zwei Tafeln außerhalb der Galerie und zwei Tafeln als Dunkelreferenzen) wurde über unterschiedliche Sensoren ermittelt. Die Raumlichtsensoren des Museums lieferten die Messdaten für Tafel 7 und 10, die direkt neben den Sensoren positioniert sind (Bereitstellung der Daten durch Kai-Uwe Metzler, SKD). Für Tafel 12 wurden ebenfalls Daten des Raumlichtsensors im Pastellkabinett herangezogen. Tafel 12 hängt ca. 1,5 m schräg unterhalb des Sensors, es ist in Anbetracht der Beleuchtungssituation im Raum (Oberlicht) mit einer geringfügig niedrigeren Beleuchtungsstärke an der Tafel zu rechnen.

Die mobilen Luxmeter lieferten die Daten der Beleuchtungsstärke für Tafel 2, 3 und 4 (Bereitstellung der Daten durch Markus Rösler, Professur für Gebäudeenergie-technik und Wärmeversorgung, TU Dresden).

Diese bereitgestellten Datensätze der Beleuchtungsstärke wurden mit der jeweiligen Belichtungsdauer multipliziert und aufsummiert, um die Werte für die Belichtungen zu bestimmen. Für die mobilen Luxmeter konnte dies minutengenau durchgeführt werden. Im Falle der Museumssensoren wurden Mittelwerte der Beleuchtungsstärke jeder Beleuchtungsphase gebildet, die mit der jeweiligen mittleren Belichtungsdauer multipliziert wurden. Wenn sich die Beleuchtungsstärke grundlegend änderte (z. B. durch Lampenausfall oder Umbauten), wurden neue Mittelwerte für die Beleuchtungsphasen gebildet. Schließtage (wie der 06.06.16) wurden gesondert berücksichtigt.

³² Aussage Kai-Uwe Metzler, Hauselektriker Gemädegalerie Alte Meister (SKD)

Für Tafel 5 und 8 wurden die Werte der Beleuchtungsstärke aus den Messdaten des mobilen Luxmeters in Raum 1-04 für Tafel 4 abgeleitet. Dazu wurde eine Korrelation aus den Beleuchtungsstärkedaten am Sensor mit den Werten aus Handmessungen an den beiden Tafeln gebildet. Die mittlere prozentuale Abweichung zwischen Beleuchtungsstärke am Sensor und auf den Tafeln wurde für einen Tag bestimmt und auf die gesamten Messdaten angewandt, um die Belichtung an den Tafeln auf Grundlage der Daten am mobilen Luxmeter abzuschätzen. Dieses Vorgehen rechtfertigt sich durch den sehr regelmäßigen Wochengang und die Tatsache, dass die Werte innerhalb eines Raumes mit der gleichen Beleuchtungssituation korreliert werden.

Die durchschnittliche Beleuchtungsstärke an den Standorten der Tafeln für 11,5 h Belichtungszeit pro Tag weicht von den Regelungswerten (50–200 lx) ab und liegt faktisch zwischen 30–300 lx (Tabelle F.1). Grund sind die Unterschiede in der Beleuchtungssituation zwischen den Positionen der Sensoren, die zur Regelung verwendet werden, und den Positionen der Tafeln.

Die Durchschnittswerte für die Beleuchtungsstärke waren über den Untersuchungszeitraum für die Tafeln 7, 10 und 12 relativ konstant. Für Tafel 2 und 3 ging die durchschnittliche Beleuchtungsstärke über den Untersuchungszeitraum hinweg zurück. Grund war nach Aussage von Kai-Uwe Metzler (SKD) ein fortschreitender Ausfall von einzelnen Lichtquellen, so dass die verbleibenden Lichtquellen die Beleuchtungsstärke nach Regelungsvorgabe nicht mehr aufbringen konnten.

Für Tafel 4, 5 und 8 kam es durch die Umpositionierung ab dem 18.10.16 bzw. 08.05.17 zu einer Erhöhung der durchschnittlichen Beleuchtungsstärke durch die andere Beleuchtungssituation an den neuen Positionen.

Tabelle F.1: Durchschnittliche Beleuchtungsstärke (für 11,5h Belichtung/Tag) auf den Mustertafeln in der Galerie

Zeitraum	29.02.16-	31.05.16-	30.08.16-	29.11.16-	28.02.17-	23.05.17-
Tafel	30.05.16	29.08.16	28.11.16	27.02.17	22.05.17	04.09.17
2	105 lx	101 lx	98 lx	74 lx	71 lx	59 lx
3	118 lx	99 lx	96 lx	78 lx	70 lx	63 lx
4*	88 lx	77 lx	85 lx/ 108 lx	106 lx	109 lx	110 lx
5*	92 lx	81 lx	87 lx/ 108 lx	106 lx	109 lx	110 lx
7	176 lx	160 lx	163 lx	159 lx	154 lx	155 lx
8**	91 lx	80 lx	87 lx/ (U) lx	0 lx	0 lx/ 721 lx	687 lx
10	264 lx	286 lx	261 lx	209 lx	288 lx	292 lx
12	35 lx	33 lx	32 lx	29 lx	28 lx	33 lx

* Die Werte im Zeitraum 30.08.-28.11.16 sind aufgeteilt in die Zeiträume 30.08.-17.10.16 sowie 18.10.-28.11.16.

** Durch den Umbau zwischen dem 18.10.-28.11.16 war die Beleuchtungssituation in Raum 1-04 für Tafel 8 sehr unregelmäßig (U), es wurden tägliche Belichtungen zwischen 26 lxh und 19000 lxh aufgetragen. Im Maximum wurden Beleuchtungsstärken bis zu 11000 lx gemessen.

Für Tafel 8 sind die Werte zusätzlich wie bei * noch im Zeitraum 28.02.-22.05.17 aufgeteilt in die Zeiträume 28.02.-07.05.17 und 08.05.-22.05.17.

Die kumulierten Werte der Belichtungen über den Untersuchungszeitraum, die für die Auswertung der Farbveränderungen im Textteil verwendet werden, sind in Tabelle F.2 dargestellt.

Tabelle F.2: Kumulierte Belichtung vom 29.02.2016 bis zum jeweiligen Messzeitpunkt

Messzeitpunkt		II 30.05.16	III 29.08.16	IV 28.11.16	V 27.02.17	VI 22.05.17	VII 04.09.17	Fehler
Tafel	Raum	[klxh]	[klxh]	[klxh]	[klxh]	[klxh]	[klxh]	
2	R1-11	109	215	317	394	463	534	2%
3	R1-31	124	227	327	409	476	552	2%
4	R1-04/14	92	173	273	384	488	621	2%
5	R1-04/14	96	181	283	394	499	631	5%
6	Atelier	865	1730	2595	3460	4258	5256	>50%
7	R2-12	184	351	521	687	836	1024	5%
8	R1-04	95	179	371	371	487	1316	5%
10	R1-14	276	576	849	1067	1346	1698	2%
11	privat	552	1103	1655	2206	2716	3352	>50%
12	R2-10	37	72	106	137	164	204	2%

Für Tafel 6 und 11 wurde einmalig für jeweils eine Woche die Beleuchtungsstärke mit einem Handmessgerät protokolliert (Tafel 6: 22.09.-29.09.2016 bzw. Tafel 11: 30.09.-08.10.2016). Für Tafel 6 wurden ein Zeitraum mit 6–10 Stunden täglicher Sonnenscheindauer gemessen, für Tafel 11 ein Zeitraum mit 0–4 Stunden täglicher Sonnenscheindauer.³³

Die Tagesbelichtung an den Positionen von Tafel 6 und 11 schwankte stark in Abhängigkeit des Außenlichts (Tabelle F.3). Für Tafel 6 lag die mittlere Belichtung bei 7820 ± 4771 lxh, für Tafel 11 lag diese bei 6053 ± 939 lxh. Die kumulierten Daten (Tabelle F.2) aus den Tagesmittelwerten der Belichtungen auf Tafel 6 und 11 sind daher als sehr grobe Abschätzung der Gesamt-Belichtung auf diesen Tafeln zu verstehen.

Tabelle F.3: Maximale Beleuchtungsstärke und Tages-Belichtungswerte im Untersuchungszeitraum auf Tafel 6 und 11

Tag		1	2	3	4	5	6	7
T6	Max Bel.-Stärke [lx]	547	697	513	4162	966	3566	3853
	Belichtung [lxh]	3882	3972	3164	11725	6027	15512	10456
T11	Max Bel.-Stärke [lx]	1623	1581	1283	1692	1551	1277	1893
	Belichtung [lxh]	4383	6462	5539	7084	6722	5562	6618

Bestimmung Belichtung für das Farbmonitoring an den Gemälde

Zur Abschätzung der nicht erfassten Belichtung (02.02.16–28.02.16) wurde die mittlere Tagesbelichtung des Erfassungszeitraums (29.02.16–17.10.16) gebildet und mit der Anzahl der nicht erfassten Tage multipliziert und zur Belichtung im Erfassungszeitraum addiert.

Geschätzte Gesamtbelichtung 02.02.16–17.10.16: 247 klxh (Fehler 5%)

Gesamtbelichtung nach Umpositionierung 18.10.16–04.09.17 473 klxh (Fehler 5%)
(Werte von mobilem Luxmeter und Raumlichtsensor in Raum 1-14)

³³ Quelle: <http://www.klotzsche-wetter.de/> (aufgerufen am 20.11.2017)

Versicherung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Datum, Unterschrift

Diese Arbeit wurde im Zeitraum 02/2014 bis 01/2018 im Labor für Archäometrie der HfBK Dresden unter der Betreuung von Prof. Dr. Christoph Herm und an der Professur für Bioanalytik der TU Dresden (Betreuung Prof. Dr. Eike Brunner) angefertigt.