Bachelorarbeit

Spektrale und lichttechnische Charakterisierung historischer Farbkataloge der Technischen Universität Dresden am Beispiel „Baumanns Neue Farbtonkarte – System Prase Block No.1“

eingereicht bei der Fakultät Informatik und Medien

der Hochschule für Technik, Wirtschaft und Kultur Leipzig

am 31.03.2025

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering (FH)

vorgelegt von: **cand. ing. Nicklaus, Lena**

Studiengang Verpackungstechnologie und Nachhaltigkeit

Abstract

This work investigates, the suitability of the MA-T12 spectrophotometer in combination with the Pantora software from X-Rite for the spectral and photometric recording of historical color exhibits at the Technical University of Dresden. The color charts “Baumanns Neue Farbtonkarte - System Prase Block No.1” from the collection *Sammlung Farbenlehre* served as an example. The aim was to identify suitable measuring conditions and parameters in order to ensure reproducible measurement results and to check the consistency between the data recorded with the MA-T12 and those of another spectroscopic measuring device.

The investigations showed that the MA-T12 has a high repeat accuracy. Despite the largely homogeneous appearance of the color tone maps, small scattering of measured values was detected, indicating varying reflection behavior within the surfaces. While the influence of ambient lighting on the measured values was ruled out, a measurable dependence on the substrate was found. For this reason, the spectral recording of the Baumann-Prase color tone map was carried out on a defined velvet black background, whereby two measuring points were recorded for each color tone map. The measurement results were compiled in a digital archive.

The MA-T12 proved to be suitable for the spectral characterization of historical colour catalogs, as it provides reproducible and comparable values. However, its use in the collection *Sammlung Farbenlehre* is limited to exhibits of sufficient size and with a flat surface.

Inhaltsverzeichnis

Verzeichnis der Abbildungen III

Verzeichnis der Tabellen V

Verzeichnis der Abkürzungen VI

1 Einleitung 7

2 Theoretischer Teil 9

2.1 Farbtonkarten Baumann-Prase 9

2.2 Remission 10

2.3 Glanz 13

2.4 Spektralphotometer 14

2.4.1 Funktionsweise 15

2.4.2 Messgeometrie 16

2.5 BRDF: Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion 18

2.6 Darstellung der BRDF 21

3 Experimenteller Teil 28

3.1 Versuchsaufbau 29

3.1.1 Spektralphotometer MA-T12 29

3.1.2 Software Pantora 31

3.1.3 Spektrometer CAS 120 mit Reflectance Measurement Head – RMH 45 35

3.1.4 Messumgebung 37

3.1.5 Proben 38

3.2 Versuchsdurchführung 39

3.2.1 Vormessungen zur Bestimmung der Messparameter 39

3.2.1.1 Messung der Homogenität 39

3.2.1.2 Messung mit variierender Umgebungsbeleuchtung 39
3.2.1.3 Messung mit variierendem Untergrund 40
3.2.1.4 Vergleichsmessung mit CAS 120 und RMH 45 40
3.2.2 Messung der Wiederholgenauigkeit 41

4 Ergebnisse und Auswertung 41

4.1 Ergebnisse der Vormessungen 41
4.1.1 Wiederholgenauigkeit des MA-T12 42
4.1.2 Homogenität der Proben 42
4.1.3 Einfluss der Umgebungsbeleuchtung 45
4.1.4 Einfluss des Untergrunds 47
4.1.5 Ergebnisse der Vergleichsmessung 50
4.2 Festlegung der Messparameter und Messung der Baumann-Prase-Farbtonkarten 52
4.3 Fehlerbetrachtung 53

5 Fazit und Ausblick 54

Quellenverzeichnis 56

Verzeichnis der Abbildungen

Abbildung 2-2: Einteilung und Kennzeichnung der Stammfarben 9
Abbildung 2-1: Baumanns Neue Farbtonkarte – System Prase Block No.1 9
Abbildung 2-3: Reflexionsarten 13
Abbildung 2-4: Bedingungen zur Glanzdefinition 14
Abbildung 2-5: 45°/0° Winkelgeometrie 16
Abbildung 2-6: Beispiel für eine Mehrwinkelgeometrie für die farbmetrische Erfassung von Effektlacken 16
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung zur Definition und messtechnischen Erfassung des Glanzes 17
Abbildung 2-8: Geometrie der BRDF 18
Abbildung 3-1: MA-T12 Spektralphotometer des Unternehmens X-Rite 29
Abbildung 3-2: Zwölf Messgeometrien des MA-T12 29
Abbildung 3-3: Submodul Messungen Editor in der Pantora-Software, mit den Anwendungsfenstern Allgemein, Details der Messung, Messungen und Gewählte Messproben 32
Abbildung 3-4: Submodul Repräsentation in der Pantora-Software mit den Eigenschaften des diffusen Modells bzw. der Farbe 33
Abbildung 3-5: Submodul Connect in der Pantora-Software; Anwendungsfenster Messdaten zeigt eine Live-Vorschau des Messbereichs, nachdem ein neuer Messvorgang erstellt und das Messprogramm gewählt wurde 34
Abbildung 3-6: Spektrometer CAS 120 des Unternehmens Instrument Systems 35
Abbildung 3-7: Reflectance Measurement Head –RMH 45 – des Unternehmens Instrument Systems 35
Abbildung 3-8: Messplatz mit CAS 120 und RMH 45 (links), MA-T12 (Mitte), Rechner zur Steuerung der Software und Farbtonkarten (rechts unten) 37
Abbildung 3-9: fünf ausgewählte Baumann-Prase-Farbtonkarten (oben: Vorderseite mit Leimfarbauftrag; unten: Rückseite mit alphanumerischer Bezeichnung) 38
Abbildung 3-10: einige Farbtonkarten mit Verschmutzungen und Beschädigungen 38
Abbildung 3-11: variierende Umgebungsbeleuchtung für die Vormessung (von links nach rechts: abgedunkelte Umgebung, abgedunkelte Umgebung mit Deckenlicht, abgedunkelte Umgebung mit Schreibtischlicht, Tageslicht 40
Abbildung 4-1: Spektren von fünf Messpunkten der Farbtonkarte 7 6 X für das diffuse Modell (oben) sowie die Messgeometrien r45as45 (Mitte) und r45as15 (unten) 44
Abbildung 4-2: Spektren der Farbtonkarte 7 6 X unter variierender Umgebungsbeleuchtung für das diffuse Modell (oben) sowie die Messgeometrien r45as45 (Mitte) und r45as15 (unten) 46

Abbildung 4-3: Spektren der Farbtonkarte 15- 2 Pr 3 auf variierenden Untergründen für das diffuse Modell (oben) sowie die Messgeometrien r45as45 (Mitte) und r45as15 (unten) 49

Abbildung 4-4: Spektrum der Farbtonkarte 1246- 10 V-Vb für die diffuse Geometrie des CAS 120 sowie die Geometrien r15as-15 und r45as45 und das diffuse Modell des MA-T12 51

Abbildung 4-5: Spektrum der Farbtonkarte 1246- 10 V-Vb für die Glanzgeometrie des CAS 120 sowie die Geometrien r15as-45, r45as75 und r45as110 des MA-T12 51

Verzeichnis der Tabellen

Tabelle 4-1: durchschnittliche Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung der Wiederholgenauigkeit 42

Tabelle 4-2: durchschnittliche Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung der Homogenität.....43

Tabelle 4-3: durchschnittliche Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung des Einflusses der Umgebungsbeleuchtung.....45

Tabelle 4-4: durchschnittlichen Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung des Einflusses des Untergrunds.....47

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Erläuterung
API	Programmierschnittstelle
AxF	Appearance Exchange Format
BCRA	British Ceramic Research Association
BRDF	Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion
BTF	Bidirektionale Texturfunktion
CCD	Charge Coupled Device
CIE	Internationale Beleuchtungskommission
CPA2	Messprogramm CarPaint 2.0
CSV	Comma-Separated Values
CxF	Color Exchange Format
DC	Direct Current
GE	Glanzeinheiten
LED	Light Emitting Diodes
OpenGL	Open Graphics Library
RMH	Reflectance Measurement Head
SQP	Sequential Quadratic Programming
SVBRDF	Räumlich variierende Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion
TTL-Trigger	Transistor-Transistor-Logik-Auslöser
TU	Technische Universität
VLB	Virtual Light Booth

1 Einleitung

Die Pflege und Erhaltung wissenschaftshistorisch relevanter Exponate ist von zentraler Bedeutung für die Bewahrung des Erbes von Wissenschaft und Technik sowie dessen Weitergabe an zukünftige Generationen. Die Sammlung Farbenlehre der Technischen Universität Dresden (TU Dresden) leistet dazu einen bedeutenden Beitrag, indem sie Lehr- und Forschungsobjekte zum Thema Licht und Farbe sammelt und erhält. In der Ausstellung befinden sich die Forschungsobjekte und Nachlässe namhafter Farbtheoretiker wie Harald Küppers, Paul Baumann oder Wilhelm Ostwald, die die Entwicklung der Farbenlehre, Farbmetrik und Farbsysteme dokumentieren.

Eine besondere Herausforderung bei der langfristigen Erhaltung dieser Sammlung stellt die physische Vergänglichkeit der Exponate dar. Historische Farbproben unterliegen Alterungsprozessen, die durch Lichteinwirkung, Umwelteinflüsse oder chemische Prozesse beschleunigt werden können. Während physische Proben im Verlaufe der Zeit Veränderungen aufweisen, ermöglichen digitale Erfassungsmethoden eine dauerhafte Sicherung der Farbcharakteristika. In einem ersten Schritt wurden in der TU Dresden bereits historische Farbproben graphisch digitalisiert. Der nächste Schritt zur Konservierung des aktuellen Zustands ist die spektrale Erfassung und Speicherung der Farbexponate. Neben der langfristigen Sicherung der Farbcharakteristika schafft die Dokumentation der spektralen Eigenschaften eine objektive Referenz für verschiedene Anwendungsbereiche, etwa in der Forschung, Entwicklung oder Restaurierung. Darüber hinaus erlaubt die Digitalisierung einen weltweiten Zugriff auf die gespeicherten Daten, unabhängig vom physischen Zustand der Originalexponate.

Die spektrale Charakterisierung historischer Farbproben stellt besondere Anforderungen an die Messtechnik. Aufgrund der unterschiedlichen, teils fragilen Beschaffenheiten sowie der großen Anzahl an Exponaten müssen Messverfahren eingesetzt werden, die eine präzise Erfassung ermöglichen, ohne die Proben übermäßigen Belastungen auszusetzen. Moderne Messtechnologien bieten hierfür innovative Lösungen. Ein vielversprechendes Messsystem ist das MA-T12 von X-Rite, ein Spektralphotometer mit zwölf Messwinkeln und integrierter Digitalkamera, das in Kombination mit der Software Pantora eine detaillierte Visualisierung, Analyse und Bearbeitung der Messdaten ermöglicht. Im Vergleich zu herkömmlichen optischen Systemen erlaubt das MA-T12 eine umfassendere Charakterisierung von Materialien mit komplexen Eigenschaften. Das Messsystem wird bereits in verschiedenen Anwendungsbereichen wie Automobil-, Kosmetik- oder Verpackungsindustrie eingesetzt und soll nun auf seine Eignung für die spektrale und lichttechnische Charakteri-

sierung historischer Farbproben untersucht werden. Als Vorstufe zur möglichen Messung der gesamten Sammlung der TU Dresden werden zunächst „Baumanns Neue Farbtonkarte – System Prase Block No.1“ gemessen. Diese dienen nicht nur als erste Referenz zur spektralen Erfassung der Farbproben, sondern auch der Evaluierung der Messtechnik für diese spezielle Anwendung. Die zentralen Fragestellungen dieser Arbeit lauten daher: Welche Messparameter müssen berücksichtigt werden, um unter Verwendung des MA-T12 reproduzierbare und aussagekräftige Ergebnisse zu erzielen? Und inwieweit stimmen die mit dem MA-T12 erfassten Messwerte mit denen eines weiteren spektroskopischen Messgeräts überein? Zur Beantwortung dieser Fragen werden in vorbereitenden Messungen zunächst die Funktionsweise und Messparameter des MA-T12 untersucht. Dabei wird analysiert, ob die Baumann-Prase-Farbtonkarten ein homogenes Remissionsverhalten aufweisen und wie sich Faktoren wie Untergrund und Umgebungsbeleuchtung auf die Messergebnisse auswirken. Zudem erfolgt ein Vergleich der erfassten Messwerte mit denen des Spektrometers CAS 120 in Kombination mit dem Reflectance Measurement Head – RMH 45 – vom Unternehmen Instrument Systems, um die Übertragbarkeit des Messsystems zu bewerten. Anschließend erfolgt die Ermittlung der Wiederholgenauigkeit des MA-T12 für die Messung der spektralen Remissionswerte. Durch die vorgenommenen Untersuchungen sollen Erkenntnisse über die Eignung des MA-T12 für diese Anwendung gewonnen werden. Die Ergebnisse dieser Arbeit können als Grundlage für die weitere spektrale Erfassung der historischen Farbexponate der Sammlung Farbenlehre dienen.

Im folgenden *Theoretischen Teil* werden zunächst die Baumann-Prase-Farbtonkarten näher vorgestellt, bevor die beiden spektralen Eigenschaften von Oberflächen, Remission und Glanz thematisiert werden. Anschließend wird die Funktionsweise von Spektralphotometern erläutert, wobei auf die relevanten Messgeometrien zur Erfassung des spektralen Remissionsgrades und des Glanzes gesondert eingegangen wird. Darüber hinaus wird das Konzept der Bidirektionalen Reflexionsverteilungsfunktion (BRDF) und dessen Darstellung vorgestellt, da die verschiedenen Messprogramme des MA-T12 diese Funktion zur Berechnung der Reflexionseigenschaften von Oberflächen nutzen. Im *Experimentellen Teil* wird die methodische Vorgehensweise zur Beantwortung der zentralen Fragestellungen beschrieben. Zunächst werden im Kapitel *Versuchsaufbau* die verwendeten Messsysteme hinsichtlich ihrer Spezifikationen vorgestellt, gefolgt von einer Beschreibung der Messumgebung und der Charakteristika der Proben. In der Versuchsdurchführung werden die durchgeführten Messungen zur Bestimmung der Messparameter und der Wiederholgenauigkeit sowie die Vergleichsmessung mit dem CAS 120 erläutert. Die erfassten Messwerte werden im vorletzten Kapitel

Ergebnisse und Auswertung analysiert. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen aus den Vormessungen werden die Messparameter für die eigentliche spektrale Erfassung der Baumann-Prase-Farbtonkarten abgeleitet. Schließlich werden die finale Messung unter Anwendung dieser Parameter sowie die Aufbereitung der Messdaten beschrieben. Den Abschluss der Arbeit bilden eine Fehlerbetrachtung sowie das Kapitel *Fazit und Ausblick*, in dem die zentralen Erkenntnisse zusammengefasst und potenzielle weiterführende Untersuchungen diskutiert werden.

2 Theoretischer Teil

2.1 Farbtonkarten Baumann-Prase

Gegenstand der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Messungen ist „Baumanns Neue Farbtonkarte – System Prase Block No.1“ aus dem Jahr 1927. Es ist die zweite Auflage dieser Art und setzt sich aus einem Karteikasten mit 1.325 enthaltenen Farbtonkarten mit Leimfarbauftrag zusammen (vgl. Abbildung 2-2). Der Farbtonkartenhersteller Paul Baumann brachte die erste Auflage der Farbtonkarten im Jahr 1912 im sächsischen Aue heraus. Bedeutenden Anteil an der Konzeption und Umsetzung dieser und folgender Auflagen hatte der Malermeister und Farbtheoretiker Otto Prase. (Bendin, 2011) Allgemein „sortieren und ordnen [Farbtonkarten] eine Sammlung von Farbtönen“ (Kocourek, 2011) und dienen als Verständigungsmittel in farbbezogenen Bereichen. Die Farbtonkarten von Baumann und Prase bildeten die erste „geordnete Grundlage für die handwerk-

Abbildung 2-2: Baumanns Neue Farbtonkarte – System Prase Block No.1

Abbildung 2-1: Einteilung und Kennzeichnung der Stammfarben

liche, gewerbliche und industrielle Anwendung von Farben“ (Bendin, 2011, S.28) in Deutschland. Gemeinsam mit der zugehörigen Übersichtskarte ergibt sich ein „Farbenlexikon“, dem Mischrezepturen, Farbharmonien und Informationen über Pigmente und Malmittel entnommen werden können. (Bendin, 2011)

Das System von Prase basiert auf einem 48-teiligen Farbtonkreis mit Purpur im Zenit und der sogenannten „Farbtontreppe, eine Systematik zur gestuften Aufhellung der Stammfarben (dunkelklaren Farben) mit Weiß“ (Bendin, 2012, S.23). Der Karteikasten ist in diese Stammfarben durch Einschübe aus Pappe unterteilt. Zwischen zwei Einschüben befinden sich alle zur Stammfarbe gehörigen Farbtonkarten. Die einzelnen Farbtonkarten und Einschübe sind systematisch alphanumerisch gekennzeichnet. Dabei stehen Buchstaben für die Farbtöne und Zahlenwerte für die Aufhellungsstufen (vgl. Abbildung 2-1). „Große und kleine Anfangsbuchstaben der jeweils gebräuchlichen Tonbezeichnungen sowie deren Kombinationen erleichterten die visuelle Vorstellung [z. B.: Grün nach Blau neigend – Gb].“ (Bendin, 2012, S.23)

Heute befinden sich die Farbtonkarten nach Baumann-Prase in der Sammlung Farbenlehre in den Räumen der TU Dresden. Sie gilt als eine der „größten europäischen Wissenssammlungen zum Thema Licht und Farbe“ (Ploch, 2025). Gegründet wurde die Lehr- und Forschungssammlung im Jahr 2005 und dient seither der Sicherung zahlreicher historischer Exponate und Entwicklungen auf dem „interdisziplinären Gebiet der Farbenlehre in Wissenschaft, Bildung, Kultur und Kunst im mitteldeutschen Raum“ (Kustodie, 2022).

2.2 Remission

Bei den Farbtonkarten von Baumann-Prase (Proben) handelt es sich um Körperfarben, das heißt um nicht selbstleuchtende Objekte, die erst infolge einer Beleuchtung sichtbar werden. Die von den Proben zurückgeworfene Strahlung gelangt ins Auge, wo sie von spezifischen Sinneszellen verarbeitet wird, sodass im Gehirn ein Farbeindruck entsteht. (Richter, 1976) Diese zurückgeworfene Strahlung wird Farbreiz genannt, die wahrgenommene Farbempfindung Farbvalenz. Während der Farbreiz objektiv mit physikalischen Mitteln erfasst werden kann, ist die resultierende Farbwahrnehmung des Menschen nicht messbar. Mit der Beschreibung und Quantifizierung sowohl der physikalisch messbaren Farbeigenschaften als auch der menschlichen Farbwahrnehmung befasst sich die Farbmetrik. (Possel, n. d.) Als „Lehre von den Maßbeziehungen der Farben untereinander“ (Richter, 1976, S.7) bildet sie die Grundlage für die Farbmessung, deren Ziel die „[Erfassung] der

spektralen Zusammensetzung des Farbreizes und nummerische Darstellung der Farbvalenz als Satz von drei Koordinaten eines Farbraums [ist].“ (Possel, n. d.)

Der von einer nichtselbstleuchtenden Oberfläche ausgehende Farbreiz ergibt sich aus der Strahlung der Lichtquelle und den spektralen Materialeigenschaften der Oberfläche. Hierbei beschreiben die spektralen Materialeigenschaften die physikalischen Vorgänge, die bei „der Wechselwirkung von Licht mit stofflicher Materie“ (Gall, 2004, S.46) auftreten. Trifft Lichtstrahlung auf die Materialoberfläche, können dabei Reflexion, Transmission, Absorption, Streuungen und Emission stattfinden. Jeder dieser Prozesse lässt sich durch spezifische Materialkennzahlen charakterisieren. (Gall, 2004) Im Falle der Baumann-Prase-Farbtonkarten kommt es zu einer Kombination aus Reflexion, Absorption und Streuung, der Remission.

Unter Remission ist die von einer betrachteten Fläche veränderte, zurückgeworfene Strahlung zu verstehen. Die von einer Lichtquelle ausgesandte Strahlung wird zu einem geringen Teil an der Oberfläche reflektiert. „[Ein] wesentlicher Teil dringt in die Oberfläche ein, wird in der Oberflächenschicht hin und her reflektiert und tritt schließlich geschwächt“ (Richter, 1976, S.51) in undefinierter Richtung aus, wodurch die Strahlung gleichmäßig gestreut wird. Darüber hinaus werden im Inneren der Oberflächenschicht selektiv einzelne Wellenlängen absorbiert. Die austretende Strahlung ist damit zusätzlich in ihrer Zusammensetzung verändert im Gegensatz zur ursprünglichen Strahlung der Lichtquelle. (Richter, 1976)

Diese Änderung lässt sich mit dem spektralen Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ beschreiben. Der spektrale Remissionsgrad einer Oberfläche ergibt sich aus dem Verhältnis der unter denselben Beleuchtungsbedingungen von einem Weißnormal und der untersuchten Fläche in die gleiche Richtung reflektierten Strahlung. Diese Größe ist dimensionslos und abhängig von der Wellenlänge.

$$\beta(\lambda) = \frac{\Delta\Phi_P(\lambda)}{\Delta\Phi_N(\lambda)} \tag{2-1}$$

Das Weißnormal (z. B. Bariumsulfat) dient als Referenz und ist als ideal weiße Fläche zu verstehen, die Strahlung im sichtbaren Bereich vollständig streut und remittiert. Definitionsgemäß nimmt das Weißnormal einen Remissionsgrad von

$$\beta(\lambda) = 1 \tag{2-2}$$

an. (Gobrecht et al., 1978) Die Strahlungsflüsse $\Delta\Phi_P(\lambda)$ und $\Delta\Phi_N(\lambda)$ beschreiben die Strahlungsleistung, welche ohne Beachtung geometrischer Parameter von den beleuchteten Flächen der Probe und des Weißnormals ausgehen. (Gall, 2004) Dabei ist die Strahlungsleistung $\Phi(\lambda)$ stets für einen bestimmten Wellenlängenbereich $\lambda + \Delta\lambda$ zu betrachten. (Gobrecht et al., 1978) Aufgrund ihrer Wellenlängenabhängigkeit gelten sie als spektrale Strahlungsflüsse:

$$\Phi_{e\lambda} = \frac{\partial \Phi_\lambda}{\partial \lambda} \tag{2-3}$$

Da das Weißnormal Licht vollständig remittiert, ist sein reflektierter spektraler Strahlungsfluss $\frac{\partial \Phi_N}{\partial \lambda}(\lambda)$ proportional zu dem von der Lichtquelle ausgesendeten spektralen Strahlungsfluss $\frac{\partial \Phi_0}{\partial \lambda}(\lambda)$. In der Farbmetrik wird anstatt des absoluten spektralen Strahlungsfluss $\frac{\partial \Phi_0}{\partial \lambda}(\lambda)$ einer Lichtquelle meist die relative spektrale Strahlungsverteilung S_λ verwendet. Diese stellt eine normierte Größe dar, die durch die Multiplikation mit einem willkürlichen Normierungsfaktor C entsteht:

$$S_\lambda = C * \Phi_{e\lambda} \tag{2-4}$$

Meist wird der Normierungsfaktor C so gewählt, dass S_λ bei der mittleren Wellenlänge $\lambda = 560nm$ den Wert 100,00 annimmt. S_λ ist für jede Lichtquellenart charakteristisch und tabellarisch oder graphisch beschrieben. (Richter, 1976) Im Gegensatz zum Weißnormal wird der reflektierte Strahlungsfluss der Probe $\frac{\partial \Phi_P}{\partial \lambda}(\lambda)$ gegenüber dem der Lichtquelle durch ihre spezifische spektrale Remission $\beta(\lambda)$ verändert:

$$\frac{\partial \Phi_P}{\partial \lambda}(\lambda) = \beta(\lambda) * \frac{\partial \Phi_N}{\partial \lambda}(\lambda) \tag{2-5}$$

Der spektrale Remissionsgrad $\beta(\lambda)$ ist von der Intensität und Zusammensetzung der Strahlung unabhängig und stellt bei unveränderter molekularer Struktur der Oberfläche eine stoffkennzeichnende Größe dar. (Gobrecht et al., 1978) Alle von einer Oberfläche ermittelten spektralen Remissionsgrade der Wellenlängen im sichtbaren Bereich setzen sich zur Funktion der spektralen Remission $\beta(\lambda)$ zusammen. Wird diese mit der relativen spektralen Strahlungsverteilung der Lichtquelle S_λ multipliziert, ergibt sich die eingangs angesprochene Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$:

$$\varphi(\lambda) = S_\lambda * \beta(\lambda) \tag{2-6}$$

2.3 Glanz

Der Glanz ist neben der Farbe eine weitere bedeutsame Eigenschaft zur Charakterisierung von Oberflächen und sollte berücksichtigt werden, da dieser die Farbwahrnehmung und das Erscheinungsbild der Oberfläche beeinflussen kann. „Als Glanz bezeichnet man die Eigenschaft einer Oberfläche, Licht ganz oder teilweise spiegelnd zu reflektieren." (Heim, 2016) Entscheidend für den Glanz sind die Beschaffenheit und Reflexionseigenschaften einer Oberfläche. Eine glatte ideal spiegelnde Oberfläche reflektiert einen einfallenden parallelen Lichtstrahl in eine bestimmte Richtung zu einem ebenfalls nahezu parallelen Lichtstrahl. In diesem Fall wird von gerichteter oder spekularer Reflexion gesprochen. Dabei tritt keine Streuung auf und die Reflexion erfolgt gemäß Reflexionsgesetz – Einfallswinkel entspricht Ausfallswinkel (vgl. Abbildung 2-3, *gerichtet*). An rauen matten Oberflächen hingegen kommt es zur ideal diffusen Streuung. Das einfallende Licht wird gleichmäßig in alle Richtungen gestreut und gerichtete Reflektion bleibt aus (vgl. Abbildung 2-3, *diffus*). Oberflächen mit dieser Eigenschaft werden Lambert-Reflektor genannt. In der Realität besitzen Oberflächen meist beide Reflexionseigenschaften. Die reflektierte Strahlung wird im Bereich des Ausfallswinkels zu einem Reflexionskegel gestreut (vgl. Abbildung 2-3, *gestreut*). (Hagler, 2006) Zwischen der ideal spekularen und ideal diffusen Reflexion gibt es zahlreiche Varianten mit gemischtem Verhalten, bei denen mehr oder weniger gerichtete Reflexion beziehungsweise Streuung auftreten. Je höher der Anteil spekular reflektierter Strahlung einer Oberfläche, desto glänzender wirkt diese.

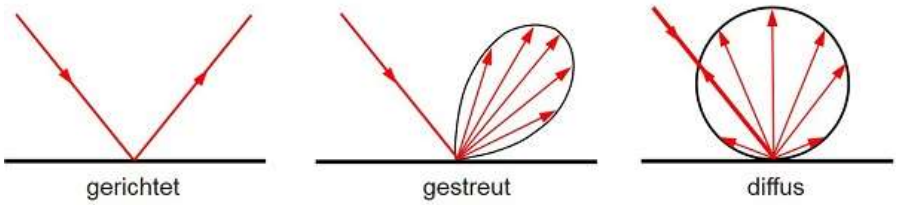

Abbildung 2-3: Reflexionsarten

(Trempler, 2015 S.341)

Quantifiziert wird der Glanz einer Fläche unter anderem durch die Glanzzahl ξ. Diese setzt sich aus dem Verhältnis des Remissionsgrades β bei einem Messwinkel von $\gamma = 0°$ und $\gamma = 25°$, bei Beleuchtung der Probe mit parallelem Licht aus einem Winkel von 25° zusammen: (vgl. Abbildung 2-4)

$$\xi = \frac{\beta(\gamma = 25°)}{\beta(\gamma = 0°)} = \frac{L(\gamma = 25°)}{L(\gamma = 0°)} \tag{2-7}$$

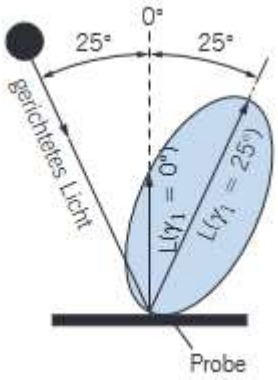

Abbildung 2-4: Bedingungen zur Glanzdefinition

(Gall, 2004, S.69)

In Zusammenhang mit der Glanzzahl ξ steht die subjektive Glanzempfindung G:

$$G = 0{,}5 * (1 + \xi) \tag{2-8}$$

Mit der Bedeutung:

$G = 1$	kein Glanz
$G = 1{,}3 \ldots 1{,}7$	geringer Glanz
$G = 1{,}7 \ldots 3{,}1$	mittlerer Glanz
$G \geq 3{,}1$	starker Glanz

Ein weiteres Maß, in dem der Glanz angegeben werden kann, ist die Glanzeinheit (GE). Zur Bestimmung der GE werden die Messflächen unter festgelegten Einfallswinkeln bestrahlt und die gerichtet reflektierte Strahlungsleistung gemessen. Das Messergebnis wird auf einen schwarzen, polierten Glasstandard mit definiertem Brechindex bezogen, für den die Glanzeinheit bei definiertem Winkel einen Wert von

$$GE = 100{,}00 \tag{2-9}$$

annimmt. (Torso-Verlag, n. d.)

2.4 Spektralphotometer

Zur messtechnischen Erfassung der spektralen Reflexionseigenschaften einer Oberfläche werden Spektralphotometer eingesetzt. Das sind optische Instrumente zur Messung der Lichtintensität in einem kleinen Wellenlängenintervall in Abhängigkeit von der Wellenlänge. (Possel, n. d.) Sie dienen zur präzisen Bestimmung der spektralen Remissionsgrade einer Probe, woraus sich dann rechnerisch ihre Farbwerte unter vorgegebenen Beleuchtungsbedingungen ermitteln lassen. Aufgrund dessen finden Spektralphotometer unter anderem Anwendung im industriellen Farbmanagement

zur Überprüfung von Textilien, Druckerzeugnissen, Farbstoffen oder Lacken. (Possel, n. d.) Neben der Farbmetrik können Spektralphotometer bei bestimmten Messgeometrien auch den Glanz einer Oberfläche ermitteln. In diesem Kapitel sollen Funktionsweise und relevante Messgeometrien von Spektralphotometern geklärt werden.

2.4.1 Funktionsweise

Grundlegende Bestandteile eines Spektralphotometers sind die Lichtquellen, der Monochromator, die Strahlungsempfänger sowie optische Elemente, wie Blende, Spiegel oder Linsen zur Strahlführung. Als Lichtquellen werden Lampen eingesetzt, die normierte Lichtarten emittieren. Normlichtarten sind Lichtquellen mit definierter spektraler Strahlungsverteilung. Sie wurden von der CIE (frz.: Commission Internationale de l'Eclairage, dt.: Internationale Beleuchtungskommission) festgelegt, um einheitliche Grundlagen für die Farbkennzeichnung zu schaffen. (Possel, n. d.) Häufig werden Wolfram-Halogen-Glühlampen, Xenonlampen oder LED-Lampen mit der Normlichtart D65 zur Simulation des durchschnittlichen Tageslichts verwendet. (Meichsner, n. d.) Mit diesen wird die Messfläche über das Spektrum des sichtbaren Lichts von 380 nm bis 780 nm beleuchtet. Die von der Probe reflektierte Strahlung wird im Monochromator in ihre einzelnen Wellenlängenbestandteile bspw. durch ein Prisma oder ein Beugungsgitter zerlegt. Das Licht liegt dann typischerweise in 20 bis 40 etwa 20 nm bis 10 nm breiten Bändern vor und wird in den Detektor geleitet. Diese Detektoren sind lichtempfindliche Photodioden (z. B. CCD-Sensoren als Diodenarray), welche elektrische Ladungen proportional zur Intensität in jedem Wellenlängenband erzeugen und speichern. (Possel, n. d.) Nähere Informationen zur Funktionsweise von CCD-Sensoren sind auf folgender Website zu finden: https://www.astro.uni-jena.de/Teaching/Praktikum/pra2002/node242.html.

Ein Computer liest die gespeicherten Informationen der Detektoren aus. Im Vorfeld der Messungen wird das Spektralphotometer an einem Weißstandard kalibriert. Die dabei ermittelte reflektierte Strahlungsleistung des Weißstandard wird, wie im Kapitel *2.2 Remission* beschrieben, mit der von der Probe reflektierten Strahlungsleistung verglichen und ihr Verhältnis ausgewertet. Im Ergebnis entsteht ein Spektrum mit der spektralen Remissionskurve $\beta(\lambda)$. Darüber hinaus sind moderne Spek-tralphotometer in der Lage „valenzmetrische Auswertungen“ durchzuführen, welche zum Zwecke der abschließenden Farbmessung zur „Bestimmung der Wirkung der durch [die Farbreizfunktion] $\varphi(\lambda)$ beschriebenen Strahlung auf das […] Auge“ (Gobrecht et al., 1978, S.689) anzuschließen sind. Aus den gemessenen Remissionswerten werden durch Integration des Produkts aus Farbreizfunktion $\varphi(\lambda)$ und Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ über die Wellenlängen

des sichtbaren Spektrums die Normfarbwerte X, Y, Z der Messfläche errechnet. Für einheitliche Farbberechnungen werden dafür die Normspektralwertkurven $\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$ des Normalbeobachters verwendet. Der Normalbeobachter wurde von der CIE definiert und beschreibt die gemittelte menschliche Farbwahrnehmung. (Possel, n. d.) Zusatzinformationen zum CIE-Normalbeobachter gibt es unter folgendem Link: https://www.kennerblick.net/normalbeobachter.html

Häufig werden die Farbmaßzahlen X, Y, Z wiederum in Farbkoordinaten eines anderen Farbsystems umgerechnet. Gebräuchliche Farbräume sind z. B. das CIEL*a*b-System oder das CIE-Normvalenzsystem. Tiefere Einblicke in die verschiedenen Farbsysteme und die Umrechnung der Farbkoordinaten gibt es unter folgendem Link: https://wisotop.de/lab-farbraum-cie-luv-farbraum.php

2.4.2 Messgeometrie

Die Wahl der Messgeometrie beeinflusst die Ergebnisse und ist entscheidend für die Vergleichbarkeit der Messdaten. Für die farbbestimmende Reflexionsmessung werden drei gängige Messgeometrien eingesetzt. Es wird zwischen 45°/0° Winkelgeometrie, Mehrwinkelgeometrie und d/8° Kugelgeometrie unterschieden. Letztere ist nicht in den für diese Arbeit verwendeten Spektralphotometern integriert und wird deswegen nicht behandelt. Eine ausführliche Beschreibung zur d/8° Kugelgeometrie findet sich unter folgendem Link: https://www.kennerblick.net/spektral-photometer.html#funktionsweise

Zur Bestimmung der spektralen Remissionsgrade von glatten bis leicht strukturierten Proben, weitestgehend ohne Effektpigmente, eignet sich die 45°/0° Winkelgeometrie. Die Messfläche wird mit

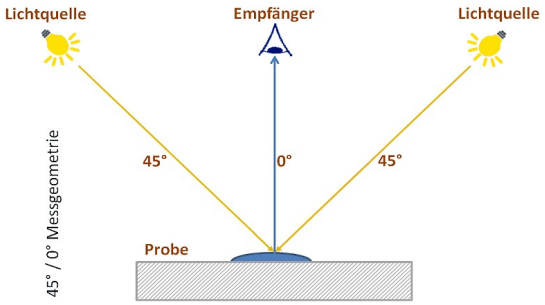

Abbildung 2-5: 45°/0° Winkelgeometrie

(Possel, n. d.)

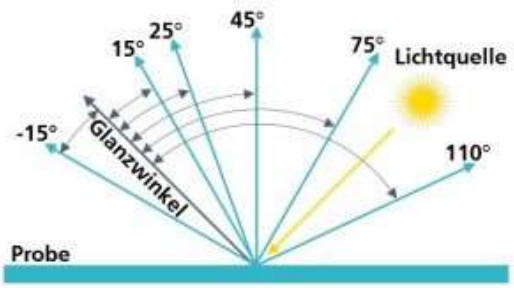

Abbildung 2-6: Beispiel für eine Mehrwinkelgeometrie für die farbmetrische Erfassung von Effektlacken

(Schäfer & Tran, 2018, S.18-20)

ein bis zwei Lichtquellen aus einem 45°-Winkel zur Flächennormalen beleuchtet. Senkrecht über der Probe – bei einem 0°-Winkel zur Flächennormalen – befindet sich der Strahlungsempfänger, welcher die diffus reflektierte Strahlung der Probe aufnimmt (vgl. Abbildung 2-5). Auch die umgekehrte Anordnung mit der Beleuchtung unter 0° und der Messung bei 45° ist möglich. Vorteil dieser Messgeometrien ist, dass die Remission unter Ausschluss der spekularen Reflexion erfasst wird und somit auch glänzende Proben farbmetrisch charakterisiert werden können. (Possel, n. d.)

Bei Metallic- und Effektlackierungen mit winkelabhängigem Farb- und Glanzwechsel, werden zusätzliche Messwinkel zur Farbbestimmung benötigt. Mehrwinkel-Spektralphotometer funktionieren nach dem gleichen Prinzip wie die 45°/0°- beziehungsweise 0°/45°-Winkelgeometrie, mit dem Unterschied, dass aus mehreren Winkeln beleuchtet und gemessen wird. Diese Methode simuliert eine „Drehung“ der Probe und ermöglicht die winkelabhängige Farbmessung. Übliche Messwinkel bei einer Beleuchtung unter 45° sind 15°, 25°, 45°, 75° und 110° zum spekularen Reflexionswinkel (Glanzwinkel). Bei Oberflächen mit Farbflop („vom Betrachtungswinkel abhängiger Farbeindruck“ (PROvendis, n. d.)) wird zusätzlich der Winkel -15° eingesetzt (vgl. Abbildung 2-6). Auch bei der Mehrwinkelgeometrie kann die Anzahl und Anordnung von Lichtquellen und Messaufnehmern variieren. (Schäfer & Tran, 2018, S.18-20)

Um den Glanz einer Oberfläche zu bestimmen, muss die spekular reflektierte Strahlungsleistung (gerichtete Reflexion) gemessen werden. Dafür wird die Lichtquelle in einem definierten Winkel zur Flächennormalen auf die Probe gerichtet und der Detektor im gleichen Winkel auf der anderen Seite der Flächennormalen positioniert (vgl. Abbildung 2-7). Einige Spektralphotometer verfügen über diese Winkelgeometrie und können somit zur Glanzmessung eingesetzt werden. In der Regel werden allerdings spezielle Glanzmessgeräte (Reflektometer) verwendet. Diese quantifizieren den Glanz einer Oberfläche in der oben genannten Glanzeinheit (GE). Weitere Ausführungen zum Reflektometer und zur Glanzeinheit gibt es unter folgendem Link: https://www.torso.de/Glanzmessung:_:61.html

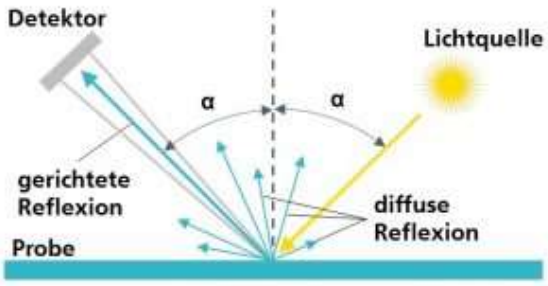

Abbildung 2-7: Schematische Darstellung zur Definition und messtechnischen Erfassung des Glanzes

(Schäfer & Tran, 2018, S.18-20)

2.5 BRDF: Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion

Wie bereits erläutert, können verschiedene Oberflächen unter den gleichen Beleuchtungsbedingungen unterschiedliches Reflexionsverhalten aufweisen. Zur einheitlichen Darstellung und Berechnung des Reflexionsverhaltens von Oberflächen wurde 1977 die Bidirektionale Reflexionsverteilungsfunktion vom National Bureau of Standards (USA) amtlich definiert. (Weidenbacher, 2002) Die BRDF (engl. Bidirectional Reflectance Distribution Function) „gibt an, welche Reflexionseigenschaften eine Materialoberfläche besitzt“ (Fraunhofer IOSB, 2015, „BRDF-Definition“). Neben der Anwendung in Analyse und Qualitätskontrolle von Oberflächen wird die BRDF in der Computergrafik, bspw. zur Nachbildung des Erscheinungsbildes realer Materialien an digitalen editierbaren Modellen, eingesetzt. (Guarnera et al., 2016)

Bei der Messung wird die Probe durch eine Lichtquelle mit einer bestimmten Wellenlänge bestrahlt und die reflektierte Strahldichte gemessen. Der BRDF-Messwert ergibt sich aus dem Verhältnis der reflektierten Strahldichte aus Betrachtungsrichtung zur auf die Probe aus Beleuchtungsrichtung wirkenden Bestrahlungsstärke. (Fraunhofer IOSB, 2015)

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) \stackrel{\text{def}}{=} \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o; E_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o; E_i)}{L_i(\theta_i, \varphi_i)\cos\theta_i \, d\omega_i} \left[\frac{1}{sr}\right] \tag{2-10}$$

Die BRDF ist eine vierdimensionale Funktion für eine bestimmte Wellenlänge. Dabei beschreiben die Variablen θ_o, θ_o die Deklinationswinkel und φ_i, φ_o die Azimutwinkel von Lichteinfalls- und Reflexionsrichtung. Die beiden Richtungen können auch als Vektoren $\overrightarrow{v_i}, \overrightarrow{v_o}$ dargestellt werden. Zur Beschreibung der Flächennormale dient der Vektor $\vec{n}$. $dL_r(\theta_o, \varphi_o)$ ist die in Richtung (θ_o, φ_o) reflektierte Leuchtdichte und $dE_i(\theta_i, \varphi_i)$ die aus Richtung (θ_i, φ_i) auf die Fläche wirkende Bestrahlungsstärke (vgl. Abbildung 2-8). Der Faktor $\cos\theta_i$ berücksichtigt die Flächenverkürzung, die durch den Einfallswinkel des Lichts zur Flächennormalen bedingt ist. Ein unter dem Winkel θ zur Flä-

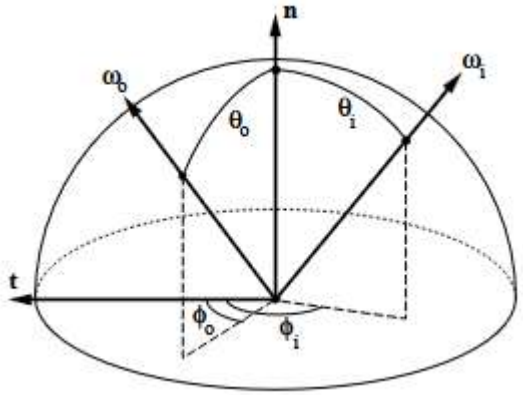

Abbildung 2-8: Geometrie der BRDF

(Rusinkiewicz & Stanford University, n. d.)

chennormalen einfallender Lichtstrahl beleuchtet eine um $\frac{1}{\cos\theta}$ größere differentielle Fläche im Vergleich zu einem Lichtstrahl parallel zur Normalen. Folglich verringert sich die auftreffende Energie pro Flächeneinheit um den Faktor $\cos\theta$. $d\omega_i$ bezeichnet den Raumwinkel, unter dem die Lichtstrahlung auf die Fläche trifft. (Weidenbacher, 2002) (Tönnies & Lemke, 1994)

Die BRDF wird unter Berücksichtigung einer Halbkugel (Hemisphäre Ω) berechnet, die einen Punkt auf der betrachteten Oberfläche umgibt. Zur quantitativen Beschreibung des von der Lichtquelle ausgesandten und von der Probe reflektierten Licht- und Strahlungsfeldes dient der Raumwinkel ω. Der Raumwinkel ω ist das Verhältnis von einem Flächenanteil der Kugeloberfläche dA_K zum Quadrat des Kugelradius r. Er hat die Einheit Steradiant sr, die mit dem Einheitsraumwinkel ($\omega_0 = 1sr$) eingeführt wird. (Gall, 2004) (Sopp, 2017)

$$d\omega = \frac{dA_K}{r^2}\omega_0\ [sr] \tag{2-11}$$

Für eine vollständige Kugeloberfläche mit der Fläche $4\pi r^2$ ergibt sich ein gesamter Raumwinkel von $4\pi sr$, für die Hemisphäre entsprechend $2\pi sr$. Da das reflektierte Licht bei der BRDF-Messung als Lichtstrom erfasst wird, der sich durch den Raum ausbreitet, wird der infinitesimale Raumwinkel verwendet, um das Licht aus einem kleinen Bereich zu betrachten. Dabei wird die betrachtete Fläche auf der Kugelfläche dA_K als rechteckig mit infinitesimal kleiner Größe angenommen. Der infinitesimale Raumwinkel $d\omega$ wird in polarer Darstellung mit dem Azimutwinkel φ und dem Deklinationswinkel θ berechnet:

$$d\omega = \sin\theta\ d\theta\ d\varphi \tag{2-12}$$

(Gall, 2004) (Sopp, 2017)

„Die Leuchtdichte ist ein Parameter für die Beschreibung der ‚Helligkeit' von Objekten" (Gall, 2004, S.35). Sie ist definiert als der von einer Fläche abgestrahlte Strahlungsfluss pro Flächenprojektion und Einheitsraumwinkel und hängt von Beleuchtungs- sowie Betrachtungsrichtung ab.

$$L(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) = \frac{d\Phi_o(\theta_o, \varphi_o)}{dA\cos\theta_o\, d\omega_0}\ [\frac{cd}{m^2}] \tag{2-13}$$

Mit der Flächenprojektion $dA\cos\theta_o$ wird die scheinbar wirksame Fläche, die von der Projektionsrichtung θ_o abhängt, berücksichtigt. Trifft Licht eine Oberfläche im Winkel θ_i zur Flächennormalen, verringert sich die bestrahlte Fläche scheinbar um den Faktor $\cos\theta_o$.

Die Bestrahlungsstärke beschreibt die auf eine Fläche auftreffende Strahlungsleistung pro Flächeneinheit und wird definiert als:

$$E(\theta_i, \varphi_i) = \frac{d\Phi_i(\theta_i, \varphi_i)}{dA}\ [\frac{W}{m^2}] \tag{2-14}$$

Sie hängt von der Einfallsrichtung der Strahlung (θ_i, φ_i) ab und folgt dem photometrischen Entfernungsgesetz, wodurch sie mit dem Quadrat der Entfernung zur Strahlquelle abnimmt. (Gall, 2004)

Für physikalische Plausibilität sollte die BRDF drei grundlegende Eigenschaften erfüllen. Zum einen muss die Helmholz-Reziprozität gelten, die besagt, dass der Messwert der BRDF unverändert bleibt, wenn Einfalls- und Ausfallsrichtung des Lichts vertauscht werden:

$$f_\lambda(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) = f_\lambda(\theta_o, \varphi_o, \theta_i, \varphi_i) \tag{2-15}$$

Zum anderen muss die Energieerhaltung erfüllt sein, sodass die Summe der von der Oberfläche reflektierten Strahlung die einfallende Strahlungsmenge nicht überschreitet. Betrachtet über die Hemisphäre Ω aller Reflexionsrichtungen ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\int_\Omega f_\lambda(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) \cos\theta_o \, d\omega_o \leq 1 \tag{2-16}$$

Zuletzt sollte die BRDF stets positive Werte annehmen, da die Reflexion von negativer Energie ausgeschlossen ist:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) \geq 0 \tag{2-17}$$

Eine zusätzliche Eigenschaft der BRDF ist, dass sich zwei Lichtstrahlen, die im selben Punkt einer Oberfläche auftreffen, nicht gegenseitig beeinflussen. Reflexionen von Lichtstrahlen aus verschiedenen Richtungen bleiben unabhängig voneinander. (Müller, 1997) (Weidenbacher, 2002)

Darüber hinaus werden zwei Klassen von BRDFs für isotrope und anisotrope Oberflächenstrukturen definiert. Bei isotropen Materialien ändert sich die Leuchtdichte, die von einem Punkt reflektiert wird, nicht, wenn die Oberfläche um ihre Normale gedreht wird. „Die BRDF einer isotropen Oberfläche kann daher für einen festen Azimutwinkel $\varphi_i = 0$ definiert werden, denn sie hängt nicht von beiden Azimutwinkeln $[\varphi_i, \varphi_o]$, sondern nur vom Unterschied zwischen ihnen ab:“ (Tönnies & Lemke, 1994, S.135)

$$BRDF_{isotrop}(\theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) = BRDF(\theta_i, 0, \theta_o, \varphi_o - \varphi_i) \tag{2-18}$$

Im Gegensatz dazu verändert sich bei anisotropen Materialien die reflektierte Leuchtdichte, wenn die Oberfläche um den Azimutwinkel φ unter Beibehaltung der Deklinationswinkel θ von Beleuchtungs- und Betrachtungsrichtung rotiert wird. (Tönnies & Lemke, 1994)

Des Weiteren kann die BRDF f_r in eine Glanzkomponente und eine diffuse Komponente unterteilt werden: (Ngan et al. 2005)

$$f_r = f_{r,speckular} + f_{r,diffus} \tag{2-19}$$

Die BRDF beschreibt die Reflexionseigenschaften homogener Materialien. Für nicht-homogene Oberflächen wird dieses Konzept durch die räumlich variierende BRDF (SVBRDF) erweitert. Dabei handelt es sich um eine über die Oberfläche verteilte Sammlung von BRDFs. Im Vergleich zur BRDF berücksichtigt die SVBRDF zusätzlich die Position auf der Oberfläche und wird durch die Funktion

$$f_r(x, y, \theta_i, \varphi_i, \theta_o, \varphi_o) \tag{2-20}$$

parametrisiert. (Guarnera et al., 2016)

Der Einsatz von BRDF und SVBRDF begrenzt sich allerdings auf die Reflexionsbeschreibung von Oberflächen im groben Maßstab. Feine Mikrostrukturen und dadurch bedingte winkel- und raumbezogenen Oberflächenvariationen, die bspw. bei modernen Autolacken für den Eindruck der Tiefe oder Farbverschiebungen sorgen, lassen sich mit den Konzepten nicht charakterisieren. Zur Darstellung komplexer rauer Materialien wurde die Bidirektionale Texturfunktion (BTF) eingeführt. Sie wird durch die gleichen Parameter wie die SVBRDF bestimmt. Im Unterschied zu den beiden anderen Konzepten geschieht die Datenerhebung durch bildbasierte Messungen. (Guarnera et al., 2016)

2.6 Darstellung der BRDF

Aufgrund der zahlreichen Parameter der BRDF resultieren aus der Reflexionsmessung große Datenmengen. Eine gängige Herangehensweise zur Darstellung der gemessenen BRDF ist die Approximation der Oberflächeneigenschaften eines Materials mithilfe von analytischen Modellen. Diese Modelle lassen sich in empirische und physikalisch basierte Ansätze unterteilen. Empirische Modelle beruhen auf Messdaten und bieten eine einfache mathematische Beschreibung der Reflexionseigenschaften. Sie haben oft eine geringe Anzahl an Parametern, die auf keiner physikalischen Grundlage beruhen. Die Modelle sind rechnerisch effizient aber oft weniger geeignet für die Beschreibung komplexer Materialien. Physikalisch basierte Modelle werden durch mathematische Formeln und Parameter nach physikalischen Gesetzen beschrieben und eignen sich für die genaue Simulation von komplexen Lichtreflexionen. (Guarnera et al., 2016) Die einzelnen Modelle unterscheiden sich in den verwendeten Parametern, berücksichtigten Effekten und ihrer Anwendbarkeit auf isotrope und anisotrope Materialien. (Sopp, 2017) Einige gängige BRDF-Modelle werden im Folgenden kurz vorgestellt.

Das Lambert-Modell ist ein einfach zu berechnendes Modell, was häufig als diffuse Lichtkomponente in anderen BRDF-Modellen verwendet wird. Es beschreibt Oberflächen mit perfekt diffuser Reflexion, bei der die gesamte auftreffende Strahlung unabhängig vom Einfallswinkel gleichmäßig

in alle Richtungen der Hemisphäre gestreut wird. Der vollständig diffus reflektierte Anteil der auftreffenden Beleuchtung wird durch den diffusen Reflexionsgrad ρ_d (diffuse Albedo), eine Konstante mit Werten zwischen $[0,1]$ beschrieben. Zur Sicherstellung der Energieerhaltung wird der diffuse Reflexionsgrad mit π normalisiert. Das Modell eignet sich für die hinreichend realistische Beschreibung isotroper, matter Oberflächen ohne Glanzlichter und winkelabhängige Reflexionen. (Montes & Ureña, 2012) (Sopp, 2017)

Ebenfalls recht einfach zu berechnen ist das Modell von Phong. Es gilt als empirisches Modell, da es keine Energieerhaltung oder Reziprozität berücksichtigt. Das Phong-Modell ist eine lineare Kombination aus einem spekularen Anteil und dem diffusen Lambert-Modell und ermöglicht damit zusätzlich die Darstellung von spekularen Reflexionen isotroper Oberflächen. Im Wesentlichen wird das Modell durch drei Parameter beschrieben. Zwei materialabhängige Reflexionskoeffizienten k_d, k_s mit Werten zwischen $[0,1]$ kontrollieren den Anteil der diffusen beziehungsweise spekularen Reflexion. Zur Formung der Glanzkeule (engl. lobes) wird der Kosinus-Term mit dem dritten Parameter $n \in [0, \infty[$ als Exponent verwendet. Der Kosinus-Term berücksichtigt den Winkel zwischen Einfalls- und Betrachtungsrichtung und kann mit dem Exponenten n als Normalverteilungsfunktion interpretiert werden. Für glänzende Oberflächen nimmt n große Werte an, für matte Flächen Werte um eins. (Montes & Ureña, 2012) (Sopp, 2017)

Das Blinn-Phong-Modell ist eine Modifizierung des Phong-Modells, bei der die Richtung der stärksten spekularen Reflexion entlang des Habvektors $\vec{h}$ angenommen wird. Der Halbvektor „ist die Richtung auf halbem Weg zwischen der Blickrichtung und der Lichtposition." (*Blinn-Phong Model*, n. d.) Er wird durch die Normalisierung der Summe aus Lichteinfallsvektor $\overrightarrow{v_i}$ und Reflexionsvektor $\overrightarrow{v_o}$ berechnet:

$$\vec{h} = \frac{\overrightarrow{v_i} + \overrightarrow{v_o}}{|\overrightarrow{v_i} + \overrightarrow{v_o}|} \tag{2-21}$$

Das Blinn-Phong-Modell setzt sich aus den gleichen Komponenten wie das Phong-Modell zusammen. Der zentrale Unterschied besteht darin, dass der Kosinus-Term nicht den Winkel zwischen Einfalls- und Betrachtungsrichtung verwendet, sondern stattdessen den Winkel zwischen Flächennormale $\vec{n}$ und Halbvektor $\vec{h}$. Da die Reflexionsrichtung nicht explizit berechnet werden muss, sondern direkt aus $\vec{h}$ gewonnen wird, reduziert sich der Rechenaufwand, wodurch das Modell effizienter ist und sich besonders für Echtzeitanwendungen eignet. (Montes & Ureña, 2012) (Guarnera et al., 2016)

Das Lafortune-Modell ist ein flexibles, empirisches Reflexionsmodell, das auf dem Phong-Modell basiert, aber im Gegensatz dazu den Energieerhaltungssatz als auch die Reziprozität erfüllt. Es

ermöglicht durch Erweiterungen eine kompakte Darstellung komplexer Reflexionseigenschaften realer, anisotroper Materialen. Das Lafortune-Modell ist eine Verallgemeinerung des Cosine-Lobe-Modells, das Reflexionen als Kosinus-Potenzfunktion beschreibt. Es setzt sich aus einer Anzahl N an steuerbaren Glanzkeulen zusammen, die jeweils durch bis zu drei Parameter C_x, C_y, C_z und den Exponenten n in ihrer Form und Richtung auf der Oberfläche angepasst werden können. (Montes & Ureña, 2012) (Guarnera et al., 2016)

Das Cook-Torrance-Modell ist ein physikalisch basiertes BRDF-Modell, das die mikroskopische Oberflächenrauheit berücksichtigt, um realistische, richtungsabhängige Lichtreflexionen zu berechnen. Es basiert auf dem Microfacetten-Modell, das die Oberflächen als eine Vielzahl kleiner Flächen mit unterschiedlicher Normalenausrichtung zur Gesamtflächennormalen beschreibt. Dadurch wird das Licht von den einzelnen Mikrofacetten in unterschiedlichen Ausfallswinkeln reflektiert. Die Flächennormale der ideal ausgerichteten Mikrofacetten liegt genau zwischen Lichteinfallsvektor $\overrightarrow{v_i}$ und Reflexionsvektor $\overrightarrow{v_o}$ und wird daher als Halbvektor bezeichnet. (Ngan et al. 2005) (Sopp, 2017) Das Cook-Torrance-Modell setzt sich aus einem diffusen Anteil, beschrieben durch das Lambert-Modell, und einem spekularen Anteil zusammen. Es wird angenommen, dass nur der Anteil der Facetten, die in Richtung des Halbvektors ausgerichtet sind, zur spekularen Reflexion beiträgt. Dieser Anteil wird durch die Normalverteilungsfunktion $D(\vec{h})$ angegeben, die vom Winkel α zwischen Einfalls- und Reflexionsrichtung v_i, v_o sowie vom Rauheitsparameter m abhängt. Zusätzlich berücksichtigt das Modell die Anzahl der aus verschiedenen Betrachtungswinkeln sichtbaren Facetten und deren Reflexionsverhalten. Aufgrund der unterschiedlichen Ausrichtung der Facetten entstehen Schatten- und Maskierungseffekte, die durch den Abschwächungsterm $G(v_i, v_o)$ beschrieben werden. Das Reflexionsverhalten an den polierten Mikrofacetten wird durch den Fresnel-Term $F(\theta_o)$ modelliert, der vom Brechungsindex η des Materials abhängt. Das Cook-Torrance-Modell eignet sich besonders zur Darstellung von Metallen und anderen isotropen Materialien unterschiedlicher Rauheit, da es richtungsabhängige Farbänderungen realistisch darstellt. (Montes & Ureña, 2012) (Guarnera et al., 2016)

Das physikalische Modell von He et al. ist eine Weiterentwicklung früherer optischer Modelle, wie das von Cook-Torrance. Es basiert ebenfalls auf der mikrostrukturierten Beschreibung von Oberflächen, wobei Maskierungs- und Abschattungs-Effekte berücksichtigt werden. Darüber hinaus erweitert das He et al.-Modell frühere Ansätze durch die Berücksichtigung von Polarisationseffekten sowie eine wellennaturbasierte Modellierung von Licht, um Beugungs- und Interferenzeffekte realistisch abzubilden. Zur Beschreibung der Reflexionseigenschaften setzt sich das Modell aus einem spekularen, richtungsabhängig diffusen und uniform diffusen Term zusammen. Letzterer

wird durch des Lambert-Modell approximiert. Der spekulare Term modelliert gerichtete Reflexion unter Berücksichtigung des Fresnel-Terms $F(\theta_o)$, der Schattenfunktion S, der Oberflächenrauheit σ und der Wellenlänge λ des einfallenden Lichts. Zur Beschreibung der Beugungseffekte, die das Licht über die Hemisphäre verteilen, dient der richtungsabhängig diffuse Term. Hierbei ist die Autokorrelationslänge τ ein wichtiger Parameter zur Quantifizierung der Oberflächenrauheit. Zudem spielen die Einfalls- und Reflexionswinkel eine Rolle. Alle Modellparameter sind physikalisch fundiert, wodurch sich ein komplexes BRDF-Modell ergibt. Es eignet sich insbesondere für die realistische Beschreibung stark glatter und rauer metallischer sowie dielektrischer Materialien, die Beugungseffekte und außerspekulare Reflexionen aufweisen. Allerdings ist das Modell rechenaufwendig und nicht für anisotrope Materialien anwendbar. (Montes & Ureña, 2012) (Guarnera et al., 2016)

Das Ashikhmin-Shirley-Modell eignet sich zur Modellierung anisotroper Reflexionen mehrschichtiger Materialien wie lackierte oder gebürstete Metalle, da es unterschiedliche Reflexionseigenschaften in verschiedene Richtungen abbilden kann. Es basiert auf physikalischen Prinzipien und verwendet das Mikrofacetten-Modell zur Beschreibung der Oberfläche. Aufbauend auf dem Phong-Modell beschreibt das Ashikhmin-Shirley-Modell sowohl diffuse als auch spekulare Reflexion getrennt. Dabei wird angenommen, dass die Reflektion von der Betrachtungsrichtung abhängt. Bei flachen Winkeln überwiegt die spekulare Reflexion, während bei steilen Winkeln die diffuse Reflexion dominiert. Für die spekulare Komponente wird die Verteilungsfunktion der Mikrofacetten $D(\vec{h})$ verwendet, die durch die Parameter e_x, e_y gesteuert wird. Die Parameter e_x, e_y definieren die Achsen einer Ellipse, die den Halbvektor $\vec{h}$ der Mikrofacetten entlang der X-Achse und Y-Achse ausrichtet und somit die Anisotropie der Reflexion bestimmt. Zudem wird für die spekulare Reflexion der Fresnel-Term $F(\theta_o)$ berücksichtigt. Die diffuse Reflexion wird durch eine modifizierte, winkelabhängige Variante des Lambert-Modells beschrieben. Diese erfüllt das Energieerhaltungsgesetz und berücksichtigt den Effekt, dass diffuse Reflexion bei steilen Winkeln abnimmt. (Montes & Ureña, 2012) (Guarnera et al., 2016)

Das Ward-Modell wurde für die Darstellung sowohl isotroper als auch anisotroper Materialien entwickelt. Es bietet die Möglichkeit, gemessene Reflexionsdaten in einer einfachen Formel genau wiederzugeben. Die Formel enthält einen diffusen und einen spekularen Reflexionsanteil, wobei Glanzspitzen durch eine Gauß-Verteilung modelliert werden. Dabei dient die Konstante k_d zur Beschreibung der diffusen Reflexion und k_s in Verbindung mit dem Halbvektor $\vec{h}$ zur Bestimmung der spekularen Reflexion. Im Modell für isotrope Oberflächen wird die Gauß-Verteilung durch den Parameter α_m beschrieben. Für anisotrope Oberflächen werden die Parameter α_x, α_y verwendet, um die Breite der Glanzkeulen in den Hauptachsen der Anisotropie zu steuern. Zusätzlich sorgt der

Normierungsfaktor $\frac{1}{4\pi\alpha_m^2}$ für die korrekte Integration der Funktion über die Hemisphäre. Das Modell ist nicht vollständig physikalisch plausibel, da der Energieerhaltungssatz bei flachen Einfallswinkeln nicht eingehalten wird. (Montes & Ureña, 2012) (Guarnera et al., 2016)

Das Spektralphotometer MA-T12 des Unternehmens X-Rite ist in der Lage, verschiedene Materialoberflächen mithilfe unterschiedlicher Messprogramme zu charakterisieren. Die Berechnung und Darstellung der Oberflächeneigenschaften der einzelnen Messprogramme basiert auf unterschiedlichen Funktionen. Für die Analyse homogener Materialien wird die BRDF eingesetzt, Autolacke werden unter Zuhilfenahme der BTF modelliert (Messprogramm CarPaint 2.0 (CPA2)) und texturierte Materialien mit der SVBRDF repräsentiert.
Die genaue Umwandlung der Messdaten in Parameterwerte der BRDF, SVBRDF und BTF durch die Messtechnik von X-Rite kann aus Schutz des geistigen Eigentums nicht genau nachvollzogen werden. Allgemein kann allerdings für die BRDF-Parametrisierung davon ausgegangen werden, dass die durch die RGB-Kamera und das Spektralphotometer erhobenen Messdaten zunächst gespeichert werden, bspw. in einer Matrix. Jeder Pixel der Kameraaufnahmen und jedes Sensorsignal des Spektralphotometers wird als BRDF-Messwert mit den Winkelparametern $\theta_i, \varphi_i, \theta_r, \varphi_r$ definiert. Winkel, die nicht gemessen wurden, können extrapoliert werden. In den nächsten Schritten werden die Daten an ein geeignetes theoretisches Modell angepasst. Die Publikation aus dem Jahr 2005 von Ngan, Durand und Matusik (Ngan et al. 2005) beschreibt, dass alle BRDF-Modelle durch jeweils drei Parameter zur Darstellung der diffusen c_d und spekularen c_s Reflexion für Rot, Grün und Blau und eine Anzahl n an Parametern p für die Formung des Glanzlichts definiert werden können. (Ngan et al. 2005) (Sopp, 2017)

$$M = \begin{pmatrix} c_{dr} \\ c_{dg} \\ c_{db} \end{pmatrix} diffus + \begin{pmatrix} c_{sr} \\ c_{sg} \\ c_{sb} \end{pmatrix} spekular \begin{pmatrix} p_0 \\ p_1 \\ \dots \\ p_n \end{pmatrix} \tag{2-22}$$

In der Modellfunktion M repräsentiert $diffus$ den diffusen Anteil des BRDF-Modells und $spekular$ den spekularen Anteil, dessen Glanzlichtform durch den Parametervektor p bestimmt wird. (Sopp, 2017) Der Parametervektor p enthält spezifische Oberflächeneigenschaften, die das Reflexionsverhalten des Lichts beeinflussen. Dazu gehören bspw. Rauheitsparameter, der Fresnel-Reflexionskoeffizient, Brechzahlen oder andere materialabhängige Konstanten. Je nach BRDF-Modell variieren die Anzahl n und die Art der verwendeten Parameter. Für komplexere Modelle werden mehr Parameter benötigt. Beispielsweise umfasst der Parametervektor p des einfachen

Blinn-Phong-Modells nur den Exponenten n des Kosinus-Terms, der die Formung des Glanzlichts bestimmt ($p_0 = n$). Für das etwas komplexere Cook-Torrance-Modell werden hingegen sowohl der Fresnel-Parameter als auch der Rauheitsparameter m berücksichtigt ($p_0 = F(\theta_o), p_1 = m$). (Ngan et al. 2005)

Ngan et al. konnten zeigen, dass BRDF-Modelle mit der Glanzformulierung des Halbvektors die spekulare Reflexion am besten abbilden. In der Gegenüberstellung verschiedener BRDF-Modelle in der Arbeit von Ngan et al., konnten die Modelle von Cook-Torrance, He et al. und Ashikhmin-Shirley die BRDF isotroper Materialien am besten nachbilden. Dabei wurde für den Vergleich der BRDF-Modelle festgelegt, dass der diffuse Anteil durch das Lambert-Modell beschrieben wird und lediglich eine Glanzlichtkeule abgebildet werden soll. Außerdem wurde festgelegt, dass die Form der Glanzlichtkeule über alle Farbkanäle Rot, Grün und Blau (RGB) konstant bleiben soll. Eine präzisere Annäherung der Reflexion an die Messdaten konnte in der Analyse von Ngan et al. durch die Berechnung mit zwei verknüpften Glanzlichtkeulen in den Modellen von Cook-Torrance und Lafortune erzielt werden. (Ngan et al. 2005) (Sopp, 2017)

Mithilfe eingeschränkter nichtlinearer Optimierungsverfahren (z. B. Sequential Quadratic Programming (SQP)) werden die Parameterwerte zur Glanzlichtformung $p_0, p_1, \dots, p_n$ angepasst. Die sechs Parameter für diffuse und spekulare Farbe werden analytisch mittels Teilverfahren auf Grundlage einer linearen Methode der kleinsten Quadrate berechnet. (Ngan et al. 2005) (Sopp, 2017)

Die Vorgehensweise zur Darstellung gemessener anisotroper Materialien ähnelt dem für isotrope Materialien beschriebenen Anpassungsverfahren. Der wesentliche Unterschied liegt in der Wahl des BRDF-Modells. Um anisotrope Materialien korrekt abzubilden, müssen geeignete Modelle wie das anisotrope Ward-Modell verwendet werden. (Ngan et al. 2005)

Die Studie von Ngan et al. zeigt, dass einige komplexe anisotrope Materialien die Aussagekraft aktueller parametrischer BRDF-Modelle übersteigen können. Für die Parametrisierung wird daher das mikrofacettenbasierte BRDF-Modell von Ashikhmin et al. [APS00] vorschlagen. (Ngan et al. 2005) Die Vorgehensweise dieser Methode ist unter folgendem Link zu finden: https://people.csail.mit.edu/addy/research/ngan05_brdf_eval.pdf

Die Publikation von Rump et al. (Rump et al., 2008) lässt Rückschlüsse auf die Beschreibung der Reflexionseigenschaften von Autolacken durch das Messprogramm CPA2 zu. Darin wird eine hybride analytische BRDF mit einer bildbasierten BTF-Darstellung kombiniert. Die Erfassung der Messdaten erfolgt durch eine bildbasierte BTF-Messung, eine Reihe von Bildaufnahmen der Oberfläche

mit einer Kamera. Zur Parametrisierung wird das Erscheinungsbild von metallischen Autolacken in zwei Komponenten eingeteilt. Eine Komponente ist der homogene BRDF-Anteil, der das Reflexionsverhalten der Grund- und Deckschicht beschreibt. Die zweite Komponente ist der räumlich variierende BTF-Anteil, verursacht durch Effektpartikel. Zur Darstellung des homogenen Anteils wird in der Studie das BRDF-Modell von Cook-Torrance, das mehrere Glanzlichtkeulen berücksichtigt, eingesetzt. Um auch betrachtungswinkelabhängige außerspekulare Farbverschiebungen von Autolacken mit Perlglanzeffekten abbilden zu können, wird das Modell von Cook-Torrance um eine betrachtungsrichtungs- und lichteinfallsabhängige spektrale Komponente erweitert. Die Messdaten für das Modell können sowohl durch spektrale Messungen erfasst als auch aus den BTF-Messungen extrahiert werden. Im darauffolgenden Schritt werden die Parameter des BRDF-Modells mittels Anpassungsverfahren berechnet. Zur Bestimmung der BTF wird das berechnete Cook-Torrance-Modell von den erfassten Messbildern subtrahiert. Für jedes Pixel werden die Lichteinfalls- und Lichtausfallsrichtung ω_i, ω_o anhand der Kalibrierdaten bestimmt. Durch eine Subtraktion im RGB-Raum entstehen Messbilder, die ausschließlich die spezifischen Informationen der Effektpartikel enthalten. Somit lässt sich die Gesamtreflexion M_X von Autolacken durch folgenden hybriden analytischen und bildbasierten Zusammenhang beschreiben:

$$\mathrm{M}_X(x, \omega_i, \omega_o) = \overline{BTF}(x, \omega_i, \omega_o) + M_X(\omega_i, \omega_o) \tag{2-23}$$

Dabei steht M_X für die Gesamtreflexionseigenschaften in einem Punkt x für Lichteinfallsrichtung ω_i und die Beobachtungsrichtung ω_o. Sie setzt sich aus dem räumlich variierenden Anteil BTF und dem homogenen BRDF-Anteil M_X zusammen. (Rump et al., 2008) (Guarnera et al., 2016)

Im abschließenden Schritt erfolgen Datensynthese und Bilddarstellung. Eine Synthetisierung der Daten ist erforderlich, um eine präzise und artefaktfreie Visualisierung der Materialen zu gewährleisten. (Rump et al., 2008) Detaillierte Informationen zur Arbeit von Rump et al. finden sich unter folgendem Link: https://cg.cs.uni-bonn.de/backend/v1/files/publications/rump-2008-photo-realistic.pdf

3 Experimenteller Teil

Ein Ziel dieser Arbeit ist die lichttechnische und spektrale Erfassung der Baumann-Prase-Farbtonkarten unter Verwendung des Spektralphotometers MA-T12 in Kombination mit der Software Pantora des Unternehmens X-Rite. Hierzu sollen die spektralen Remissionsgrade messtechnisch erfasst und gespeichert werden. Im Vorfeld der eigentlichen Messung erfolgt eine Untersuchung der zu berücksichtigenden Messbedingungen und Parameter zur Beantwortung der zentralen Fragestellungen. Anhand quantitativer Messungen werden die Homogenität der Proben sowie die Einflüsse von Untergrund und Umgebungsbeleuchtung auf die Messergebnisse analysiert. Ergänzend dazu erfolgt eine Gegenüberstellung der erfassten Messwerte durch Vergleichsmessungen mit dem Spektrometer CAS 120 in Kombination mit dem Reflectance Measurement Head – RMH 45 – vom Unternehmen Instrument Systems. Zudem wird die Wiederholgenauigkeit des MA-T12 für die Messung des spektralen Remissionsgrads auf den Baumann-Prase-Farbtonkarten ermittelt. In den vorbereitenden Messungen werden Datensätze mit Stichproben wellenlängenabhängiger spektraler Remissionswerte erhoben. Die Messergebnisse werden in Excel visualisiert und analysiert, wobei Tabellen und Spektren zur Darstellung genutzt werden. Die Auswertung erfolgt durch eine visuelle Begutachtung der Spektren sowie die Berechnung der Variationskoeffizienten im Kapitel *4 Ergebnisse und Auswertung*.

In den folgenden Kapiteln werden die spezifischen Anwendungen und technischen Spezifikationen der eingesetzten Messgeräte und Software dargestellt. Zudem wird ein Überblick über die Messumgebung sowie die charakteristischen Eigenschaften der Baumann-Prase-Proben gegeben, bevor anschließend die Versuchsdurchführung zur Bestimmung der Messparameter und der Wiederholgenauigkeit beschrieben wird.

3.1 Versuchsaufbau

3.1.1 Spektralphotometer MA-T12

Das MA-T12 ist ein tragbares Mehrwinkelspektralphotometer des Unternehmens X-Rite Pantone, das speziell für die präzise Messung von Effektfarben und -lacken entwickelt wurde (vgl. Abbildung 3-1). „Mit seinen 12 Messwinkeln und der farbkalibrierten Kamera ermöglicht das MA-T12 die vollständige Charakterisierung von Materialien mit Oberflächenstruktur-Effekten und Materialien mit komplexer Oberflächenstruktur." (*MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite*, n. d.) Genauer können mithilfe des Messgeräts Materialeigenschaften wie Farbe, Sparkle, Coarseness und Textur quantifiziert und überprüft werden. Dabei ist unter Sparkle ein Effekt zu verstehen, bei dem „kleine ‚Flecken' […] das Licht von der direkten Lichtquelle reflektieren." (X-Rite Pantone, 2017, S.2) Coarseness ist „ein unregelmäßiges Muster von Hell-/Dunkelunterschieden" (X-Rite Pantone, 2017, S.2), das unter diffuser Beleuchtung zu erkennen ist. Aufgrund seiner Funktionen wird das MA-T12 in der Automobil-, Haushaltsgeräte-, Unterhaltungselektronik- und Kosmetikindustrie zur „Kommunikation, Spezifikation, Messung und Gewährleistung der Konformität" (*MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite*, n. d.) komplexer Materialien verendet.

Das MA-T12 hat die Maße 266 mm in der Länge, 95 mm in der Breite und 128 mm in der Höhe bei einem Gewicht von 1,2 kg. Es wird durch einen Lithium-Ionen-Akku mit 7,4 V DC (engl.: Direct Current, dt.: Gleichspannung) und 2.400 mAh Kapazität versorgt, der durchschnittlich 800 Messungen ermöglicht. Für die Gerätebedienung und Live-Vorschau des Messbereichs ist das MA-T12 mit einem 3,5 Zoll Farb-Touchscreen-Display ausgestattet. Es ist für Betriebstemperaturen von 10 °C bis

Abbildung 3-1: MA-T12 Spektralphotometer des Unternehmens X-Rite

(MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite, n. d.)

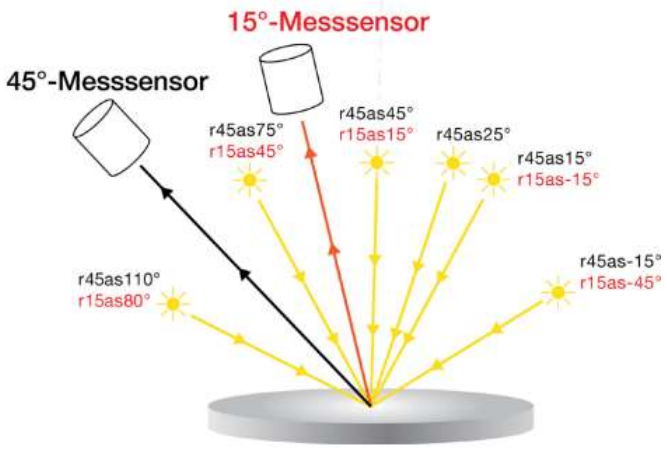

Abbildung 3-2: Zwölf Messgeometrien des MA-T12

(X-Rite Pantone, 2017, S.3)

40 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von bis zu 85 % (nicht kondensierend) ausgelegt. Die Lagerung des Geräts kann auch bei Temperaturen von -20 °C bis 50 °C erfolgen.

Um optimale Messbedingungen zu gewährleisten, verfügt das Messgerät über drei Positionierungsstifte, die symmetrisch um die rechteckige Messfläche mit den Abmessungen 9 mm x 12 mm angeordnet sind. (*MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite*, n. d.) Zur Realisierung der zwölf Messwinkel verfügt das MA-T12 über sechs Beleuchtungsquellen und zwei Messaufnehmer. Die Mehrwinkelgeometrie entspricht dem Schema aus Kapitel *2.4.2 Messgeometrie*, jedoch mit der Abweichung, dass die Positionen der Beleuchtungsquellen und Messaufnehmer vertauscht sind. Die Messaufnehmer sind in Winkeln von 15° und 45° relativ zur Flächennormalen positioniert. Die Beleuchtungsquellen bestrahlen die Probe unter den Winkeln 65°, 30°, 0°, 20°, 30°, 45° und 60° zur Normalen.

Die Kennzeichnung der zwölf Messgeometrien basiert auf der umgekehrten Anordnung der Komponenten (*r: reverse*) sowie der Relation des Beleuchtungswinkels zum spekularen Reflexionswinkel des Messaufnehmers (*as: aspecular*). Die spezifischen Winkelbezeichnungen lauten: r45as110°, r45as75°, r45as45°, r45as25°, r45as15°, r45as-15°, r15as80°, r15as45°, r15as15°, r15as-15°, r15as-30° und r15as-45°. Dabei beschreiben positive Winkel eine Ablenkung nach links vom spekularen Reflexionswinkel, während negative Winkel eine Abweichung nach rechts anzeigen (vgl. Abbildung 3-2).

Das MA-T12 nutzt polychromatische weiße LEDs mit Blauverstärkung als Lichtquellen. Die Messungen erfolgen im Spektralbereich von 400 nm bis 700 nm mit einer spektralen Auflösung von 10 nm. Um eine gleichbleibend hohe Messgenauigkeit sicherzustellen, ist eine Kalibrierung mit dem Weißstandard in einem Intervall von 30 Tagen erforderlich. Für die Farbberechnung stehen die Standardbeobachter 2° und 10° sowie die Lichtarten A, C, D50, D65, F2, F7, F11 und F1 zur Verfügung. Die Farbabstände können in verschiedenen Farbtoleranzsystemen dargestellt werden, darunter L*a*b*, LCh°, ΔE*, ΔECMC, ΔE DIN6175 und ΔE2000. Detaillierte Informationen zu den Farbräumen und Farbtoleranzen sind unter folgendem Link verfügbar: https://www.datacolor.com/wp-content/uploads/2023/05/color-management-ebook-4-de.pdf

Das MA-T12 verfügt über drei Funktionen zur Messung der Oberflächenwirkung. Es wird zwischen den Messfunktionen BRDF für homogene Materialien, CPA2 für Oberflächen mit Effektpigmenten und SVBRDF für texturierte Materialien unterschieden. Dabei beträgt die Zykluszeit pro Messung 5,5 s. Die durchschnittliche Abweichung zwischen Geräten des gleichen Modells liegt bei 0,18 ΔE2000 auf BCRA-Standards. Bei BCRA-Standards handelt es sich um farbige keramische Prüfkacheln der British Ceramic Research Association (BCRA) zur Kalibrierung und Bewertung der Messgenauigkeit. (Farbmessung, n. d.) Bei der Wiederholgenauigkeit auf BCRA-Graustandards beträgt

der ΔE2000-Wert durchschnittlich weniger als 0,01. Die Kurzzeitwiederholgenauigkeit auf Weißstandard bei zehn aufeinanderfolgenden Messungen beträgt 0,02 ΔE*. (*MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite*, n. d.)

Die im MA-T12 integrierte RGB-Kamera verfügt über eine Auflösung von 40 Pixel pro Millimeter (1016 dpi). Mithilfe einer speziellen Bildbearbeitungstechnologie werden die von X-Rite definierten Parameter Sparkle und Coarseness von dieser Farbkamera voneinander getrennt und präzise berechnet. (X-Rite Pantone, 2017) Für die Coarseness-Messung sind zusätzliche Diffusorplatten integriert, um eine homogene diffuse Messbeleuchtung zu erzeugen. Die Wiederholgenauigkeit der Coarseness-Messung unter konstanten Bedingungen weist eine durchschnittliche Abweichung von 0,09 % vom Medianwert auf. Die Reproduzierbarkeit beträgt 1,4 % (mittlere Fehler auf den Medianwert). Im Fall der Sparkle-Messung liegt die Wiederholgenauigkeit bei 0,12 %, während die Reproduzierbarkeit 1,9 % beträgt. (*MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite*, n. d.)

Zur Virtualisierung der Farb- und Wirkungseigenschaften kann das Messgerät mit der Pantora-Software verbunden werden. Für die Anwendung in der Qualitätskontrolle ist eine Integration mit der EFX QC-Software vorgesehen. Zudem verfügt das Messgerät über eine USB 2.0-Schnittstelle zur Datenübertragung. (*MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite*, n. d.)

3.1.2 Software Pantora

Die Pantora-Software ist eine Desktop-Anwendung zur Verwaltung, Verarbeitung und Virtualisierung umfangreicher spektraler Farb- und Materialdaten. Sie wurde vom Unternehmen X-Rite speziell für die Integration mit Messgeräten wie dem MA-T12 entwickelt. In Kombination ermöglichen Messgerät und Software die Erfassung, Analyse und Simulation optischer Materialeigenschaften, insbesondere von Effektlacken und strukturierten Oberflächen. Anwendung findet die Software in der Forschung, Produktentwicklung und Qualitätskontrolle. (*Pantora Software | Material Control Hub by X-Rite*, n. d.)

Pantora basiert auf dem Appearance Exchange Format (AxF), einem systemunabhängigen Datei-Format zur „Erfassung, Speicherung, Bearbeitung und Kommunikation komplexer Materialeigenschaften anhand numerischer Daten“. (*Appearance Exchange Format (AxF) | AxF File Format*, n. d.)

Die Software gewährleistet den plattformübergreifenden Austausch von digitalen Materialien, indem sie den Import und Export von AxF-Dateien anbietet. In einer Datei können die von den drei Messprogrammen BRDF, CPA2 und SVBRDF erfassten Daten für ein einziges Material oder als Katalog für eine Menge von Materialien gespeichert werden. (X-Rite Pantone, n. d.)

Der Systemzugriff auf Pantora ist durch Administratorrechte geregelt. Je nach Lizenz kann auf verschiedene Anwendungsmodule zugegriffen werden. Zu den verfügbaren Modulen zählen *Browser*, *Editor, Viewer, Connect, TAC 7* und *VLB.* Das Browser-Modul dient zur Organisation und gibt einen Überblick über alle gespeicherten Materialien. Im Editor-Modul wird zwischen fünf Submodulen unterschieden. Jedes Submodul erfüllt spezifische Funktionen zur Verarbeitung der Materialdaten. Dazu gehören die Bearbeitung von Metadaten, die Festlegung bestimmter Materialdarstellungen durch die Implementierung der inhärenten Parameter, die Bearbeitung von Texturen mittels digitaler Werkzeuge sowie die Generierung neuer Materialvarianten durch die Kombination verschiedener Materialdaten. Zudem ermöglicht das Submodul *Messungen Editor* die Verwaltung der Messdaten aus der Spektralphotometer-Messung. In dieser Anwendung werden, wie in Abbildung 3-3 dargestellt, vier Fenster angezeigt. Die Fenster *Allgemein* und *Details der Messung* enthalten allgemeine Informationen zur Messung, wie den Material- und Dateinamen, Speicherort, Datum der Messung und verwendetes Messinstrument. Im Fenster *Messungen* sind alle zur Probe gespeicherten spektralen Messwerte jeder Messgeometrie aufgelistet. Diese Messungen können einzeln ausgewählt und im Fenster *Gewählte Messproben* betrachtete werden. Neben einem Spektral- oder Farbbild der Materialoberfläche befindet sich in dem Fenster ebenfalls das Spektrum für die entsprechende Messgeometrie. Darüber hinaus können die Lab-Werte, der Spektralbereich, die Geometrie und die Beleuchtungsquelle der Messung entnommen werden.

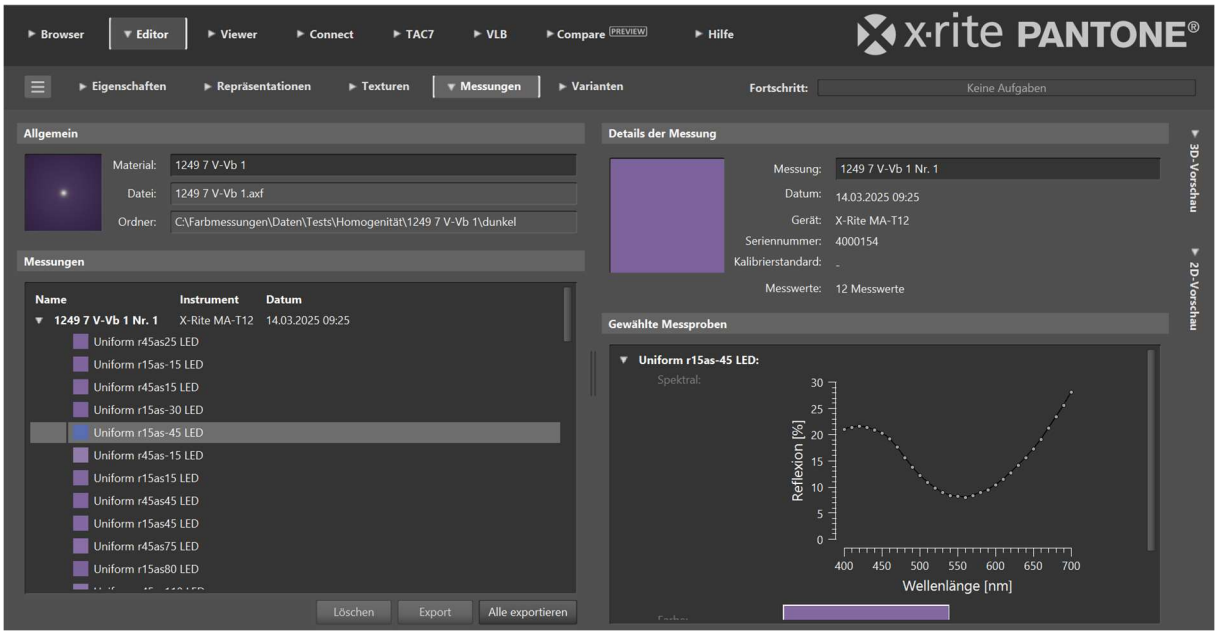

Abbildung 3-3: Submodul Messungen Editor in der Pantora-Software, mit den Anwendungsfenstern Allgemein, Details der Messung, Messungen und Gewählte Messproben

Zusätzlich dazu können im Submodul *Repräsentation* die Eigenschaften des „diffusen Modells“ bzw. der Farbe des gemessenen Materials angezeigt werden. Abbildung 3-4 zeigt im rechten Fenster das Spektrum des diffusen Modells. Die dargestellten Spektralwerte werden mithilfe eines mathematischen Optimierungsverfahrens aus allen Messgeometrien berechnet. Dabei basieren sie auf den Parametern, die den diffusen Anteil des verwendeten BRDF-Modells beschreiben (M. Peter, persönliche Kommunikation, 17. März 2025). Die Spektraldaten zu den Messgeometrien können gebündelt oder einzeln im CSV- (Comma-Separated Values) oder CxF-Format (Color Exchange Format) exportiert werden. Das Spektrum des diffusen Modells kann ebenfalls exportiert werden, jedoch nur einzeln. Die exportierte Datei enthält zwei Zeilen, wovon die erste Zeile die Wellenlängen und die zweite Zeile die zugehörigen Spektralwerte wiedergibt. (X-Rite Pantone, n. d.)

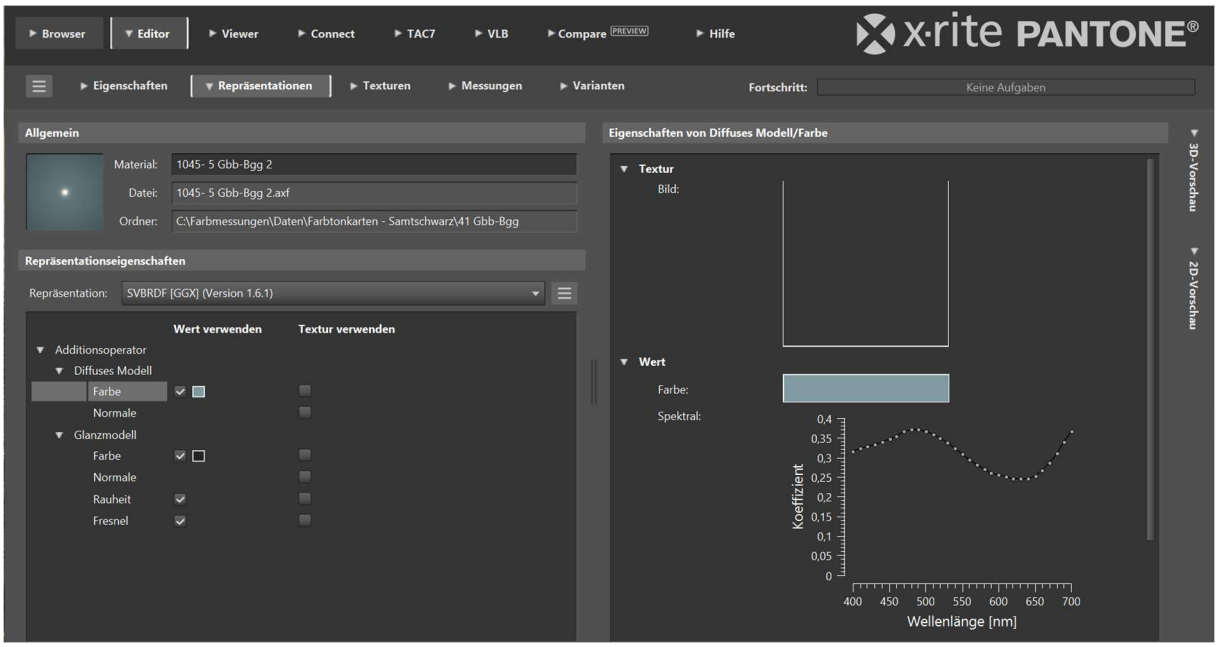

Abbildung 3-4: Submodul Repräsentation in der Pantora-Software mit den Eigenschaften des diffusen Modells bzw. der Farbe

Das Connect-Modul bietet die Möglichkeit, ein Messgerät mit der Software zu verbinden, um so Materialien zu messen oder die auf dem Gerät gespeicherten Messdaten zu importieren. Dazu dienen die entsprechende Registerkarte *Messen* oder *Import*. In der Registerkarte *Jobs* sind die laufenden und abgeschlossenen Messvorgänge einsehbar. Bevor eine Messung gestartet werden kann, muss das Messgerät per USB-Schnittstelle mit dem Desktop verbunden und ausgewählt werden. Im ersten Schritt zur Messung werden Dateiname und Speicherort der AxF-Datei festgelegt. Außerdem können Metadaten zum Material hinzugefügt werden. Im zweiten Schritt erfolgt die Auswahl des Messprogramms und die Festlegung der Mess- und Darstellungsoptionen. Für das MA-

T12 stehen die Messprogramme BRDF, CPA2 und SVBRDF zur Verfügung, die Messdaten, wie in Kapitel *2.6 Darstellung der BRDF* beschrieben, unterschiedlich verarbeiten und darstellen. In den Programmen BRDF und SVBRDF wird die Materialcharakteristik durch die Angabe bestimmt, ob die Oberfläche mit einem Klarlack beschichtet ist. Im Programm CPA2 erfolgt zudem eine Angabe hinsichtlich des Vorhandenseins von Effektpigmenten sowie deren Partikelgröße. Im letzten Schritt wird die Messung durchgeführt. Das Fenster *Messdaten* zeigt eine Live-Vorschau des Messbereichs, um eine präzise Positionierung des Messgeräts zu gewährleisten (vgl. Abbildung 3-5). Innerhalb einer Datei können mehrere Messungen der Probe durchgeführt und gespeichert werden. Die hinzugefügten Messungen werden ebenfalls in diesem Fenster angezeigt. (X-Rite Pantone, n. d.)

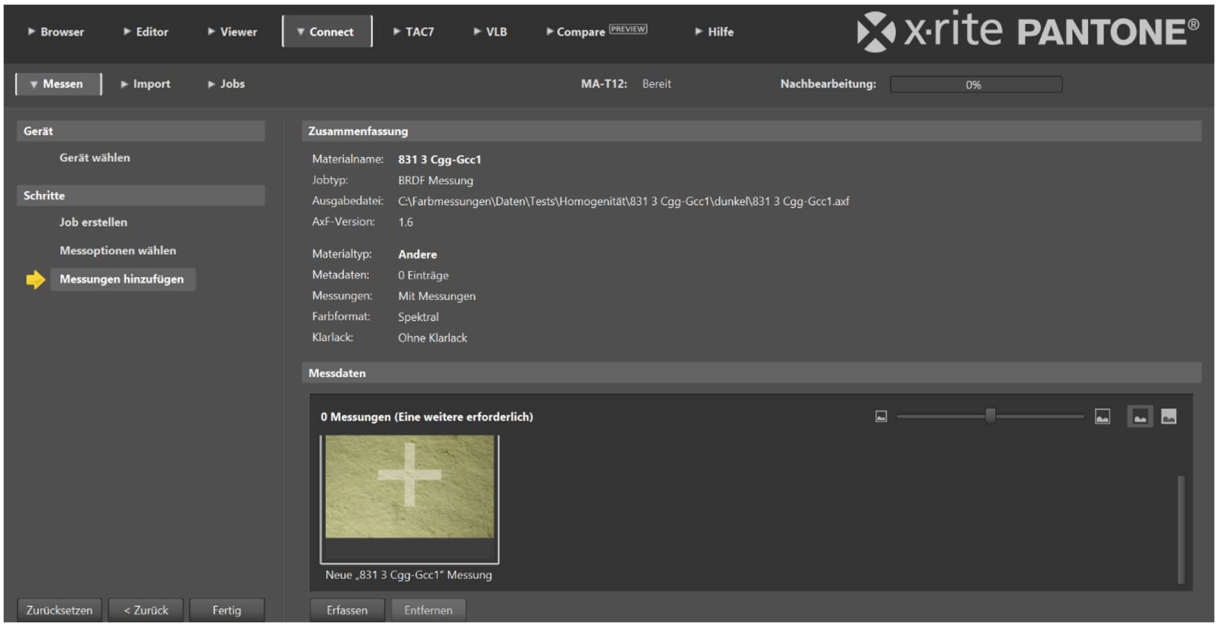

Abbildung 3-5: Submodul Connect in der Pantora-Software; Anwendungsfenster Messdaten zeigt eine Live-Vorschau des Messbereichs, nachdem ein neuer Messvorgang erstellt und das Messprogramm gewählt wurde

Zur Visualisierung der Materialien dient das Viewer-Modul. Die gemessenen und gespeicherten Materialien können mithilfe des OpenGL-Rendering auf unterschiedlichen Objekten in verschiedenen Szenen dargestellt werden. OpenGL-Rendering beschreibt die Darstellung von 2D- und 3D-Grafikanwendungen mithilfe von Open Graphics Library (OpenGL), einer plattform- und programmiersprachenübergreifenden Programmierschnittstelle (API). (Spo-Comm, 2019) Sowohl die Objekte als auch die Szenen können vom Benutzer individuell angepasst und aus unterschiedlichen Betrachtungswinkeln visualisiert werden. Darüber hinaus ermöglicht die gezielte Einstellung der Beleuchtung eine optische Bewertung der Materialwirkung unter wechselnden Lichtverhältnissen.

Die Bearbeitung und Verwaltung der Szenen für die Virtual Light Booth (VLB) erfolgt im VLB-Modul. (X-Rite Pantone, n. d.)

Das verbleibende Modul TAC7 wird eingesetzt, um Oberflächeneigenschaften wie Glanz, Struktur, Farbe, Transluzenz und Transparenz von Materialproben mithilfe des TAC7-Scanners, einem Messgerät zur Charakterisierung des Erscheinungsbilds, zu messen. Die dabei erhobenen digitalen Materialdaten können mittels Softwareanwendungen bearbeitet und im AxF-Dateiformat gespeichert werden. (*TAC7 Material Scanner | X-Rite*, n. d.) (X-Rite Pantone, n. d.)

3.1.3 Spektrometer CAS 120 mit Reflectance Measurement Head – RMH 45

Das Spektrometer CAS 120 von Instrument Systems ist ein Messgerät zur Analyse der spektralen Zusammensetzung von Strahlung. Es hat ein Gewicht von rund 7 kg und Abmessungen von 147 mm in der Höhe, 343 mm in der Breite und 317 mm in der Tiefe (vgl. Abbildung 3-6). Durch die Anbindung des Reflectance Measurement Head - RMH 45 – über Lichtleitkabel kann das CAS 120 zur Messung von Reflexionsspektren unterschiedlicher Oberflächen eingesetzt werden. Das RMH 45 ermöglicht Messungen in den Geometrien 45°/0° und 45°/45° für die Analyse diffuser und gerichteter Reflexionen (vgl. Abbildung 3-7). Im Vorfeld der Messungen erfolgt die Bestimmung des Referenzwertes durch eine Kalibrierung mit einem Weißstandard. Anschließend wird das RMH 45 auf die Probe positioniert. Zur Beleuchtung der Probenoberfläche ist eine Halogenlampe mit einer Leistung von 10 Watt verbaut, die Licht im Wellenlängenbereich von 380 nm bis 2.200 nm emittiert. Je nach Messgeometrie wird das von der Probe reflektierte Licht über den 0°- oder 45°-Anschluss des RMH 45 mittels Lichtleitkabel zum CAS 120 geleitet. (T/R Measurement Adapter – Instrument Systems, n. d.) (Instrument Systems, n. d.)

Abbildung 3-6: Spektrometer CAS 120 des Unternehmens Instrument Systems

(CAS 120 – Instrument Systems, n. d.)

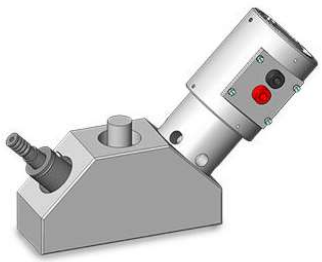

Abbildung 3-7: Reflectance Measurement Head – RMH 45 – des Unternehmens Instrument Systems

(T/R Measurement Adapter – Instrument Systems, n. d.)

Das VIS-Model des CAS 120 misst im Spektralbereich von 360 nm bis 830 nm und in einer Integrationszeit von 4 ms bis 20 s. Es erreicht mit der standardgemäß 100 µm Spaltbreite eine spektrale Auflösung von 2,2 nm bei einem Datenintervall von 0,3 nm. Die spektrale Zerlegung des Lichts erfolgt durch einen Crossed-Czerny-Turner-Spektrographen (CCT), bestehend aus einer rund 34,3 mm breiten Eintrittsapertur, zwei Spiegeln zur Strahlführung und einem planen Reflexionsgitter. Die optische Anordnung besitzt eine Brennweite von 120 mm, was zu einer Blendenzahl von f/3,5 führt. Die dispergierte Strahlung wird auf einen rückseitig beleuchteten CCD-Detektor mit einer Anzahl von 2.048 x 14 Pixeln gerichtet. Ein integriertes Dichtefilterrad, eine Vorrichtung mit optischen Filtern der Dichten 1 bis 4, ermöglicht eine Anpassung der Lichtintensität und realisiert einen Dynamikbereich von 14.000 : 1 bei 4 ms Integrationszeit. Zudem dient das Dichtefilterrad zur automatischen Dunkelstromkalibrierung, indem es das durch den Detektor verursachte Grundrauschen ausgleicht. In seiner zusätzlichen Funktion als Dunkelstromverschluss blockiert der Filter den Lichteinfall, sodass der CCD-Detektor ausschließlich sein selbst verursachtes unerwünschtes Signal (Dunkelstrom) erfasst. Die Dunkelmessung wird in regelmäßigen Abständen automatisch durchgeführt und der ermittelte Dunkelstrom von den eigentlichen Messwerten subtrahiert. Die Signalstabilität des Detektors weist eine Schwankung von ± 400 Zähleinheiten beziehungsweise ± 2,5 % der gemessenen Intensität auf. Das CAS 120 erreicht eine Messgenauigkeiten von ± 4 %, eine Linearität von ± 0,6 % und eine Wellenlängengenauigkeit von 0,3 nm. Das Spektrometer kann Bestrahlungsstärken im Bereich von 3×10^{-8} W/m²nm bis 3×10^{2} W/m²nm erfassen. Bei einer Integrationszeit von 1 s beträgt die minimale detektierbare Signalstärke 5×10^{-7} W/m²nm. Die Farbmessgenauigkeit unter Normlichtart A liegt bei ± 0,002, mit einer Reproduzierbarkeit von ± 0,0002. (Instrument Systems, n. d.)

Das CAS ist mit einem 16-Bit-Analog-Digital-Wandler und einer USB 2.0-Schnittstelle ausgestattet. Zur präzisen Synchronisierung mit externen Geräten verfügt das CAS 120 über TTL-Trigger (Transistor-Transistor-Logik-Auslöser). Für den Betrieb des Geräts wird eine Netzspannung von 100 V bis 240 V Wechselspannung bei einer Netzfrequenz von 50 Hz oder 60 Hz unterstützt. Der maximale Stromverbrauch beträgt 35 VA (Voltampere). Das Gerät ist für Umgebungstemperatur zwischen 15°C und 35°C bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von maximal 70 % (nicht kondensierend) ausgelegt. Die Berechnung sämtlicher photometrischen, radiometrischen und farbmetrischen Größen erfolgt in der LabVIEW-Software. (Instrument Systems, n. d.)

3.1.4 Messumgebung

Die Messungen werden in einem Prüflabor durchgeführt, in dem keine aktive Kontrolle der Temperatur oder der relativen Luftfeuchtigkeit erfolgt. Da die spektralen Eigenschaften der untersuchten Proben weitgehend temperaturunabhängig sind, hat dieser Umstand keinen Einfluss auf die Messergebnisse. Zudem liegt die Raumtemperatur innerhalb des empfohlenen Betriebsbereichs der verwendeten Messgeräte. Zur gezielten Variation der Umgebungsbeleuchtung während der Testmessungen kann der Raum abgedunkelt werden.

Abbildung 3-8 zeigt die Anordnung der Geräte am Messplatz. Zentral auf dem Tisch befindet sich das MA-T12, das über eine USB-Schnittstelle mit einem Rechner verbunden ist, welcher zur Steuerung der Pantora-Software dient. Ein zusätzlicher Bildschirm ermöglicht eine vergrößerte Darstellung der Benutzeroberfläche. Rechts in Abbildung 3-8 sind ein weiterer Rechner und ein Bildschirm zur Steuerung der LabVIEW-Software positioniert. Auf der linken Seite befinden sich das Spektrometer CAS 120 sowie der zugehörige Reflectance Measurement Head – RMH 45. Während der Messung wird die jeweilige Probe auf der freien Tischfläche vor dem Rechner platziert. Der Messuntergrund muss eben sein, um die Verfälschung der Messung durch Störlicht zu verhindern. Zur Untersuchung des Einflusses verschiedener Untergründe werden die entsprechenden Materialien unter der Probe angeordnet.

Abbildung 3-8: Messplatz mit CAS 120 und RMH 45 (links), MA-T12 (Mitte), Rechner zur Steuerung der Software und Farbtonkarten (rechts unten)

3.1.5 Proben

Die vorliegenden Untersuchungen beziehen sich auf die Baumann-Prase-Farbtonkarten. Jede der insgesamt 1.325 Farbtonkarten besteht aus einem Trägermaterial aus Papier, das mit einem dünnen Farbaufstrich aus Leimfarbe beschichtet ist. Die Abmessungen der Karten sind ca. 53 mm in der Breite und 37 mm in der Höhe, wodurch sie das Messfenster des MA-T12 vollständig abdecken können. Eine visuelle Inspektion zeigt, dass die Farbtonkarten eine opake und homogene Farbgebung aufweisen. Diese Beobachtung soll in den Messungen zur Bestimmung der Parameter überprüft werden. Aufgrund ihrer ebenen Oberfläche eignen sich die Baumann-Prase-Farbtonkarten besonders gut als Probenmaterial für Messungen mit dem MA-T12. Jede Farbtonkarte ist mit einer eindeutigen alphanumerischen Codierung versehen, die zur systematischen Zuordnung und Kennzeichnung der erhobenen Messdaten verwendet wird (vgl. Abbildung 3-9, unten).

Der Erhaltungszustand der einzelnen Proben variiert jedoch erheblich. Vermutlich aufgrund des praktischen Einsatzes weisen einige Proben sichtbare Gebrauchsspuren wie Verschmutzungen, Knicke, Löcher oder Verfärbungen auf (vgl. Abbildung 3-10). Solche Farbtonkarten werden in den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen ausgeschlossen, um eine Beeinflussung der Messergebnisse zu minimieren. Stattdessen werden die fünf in Abbildung 3-9 dargestellten Farbtonkarten zur Bestimmung der Messparameter verwendet. Diese Proben wurden ausgewählt, da sie unversehrt sind und unterschiedliche spektrale Remissionswerte aufweisen.

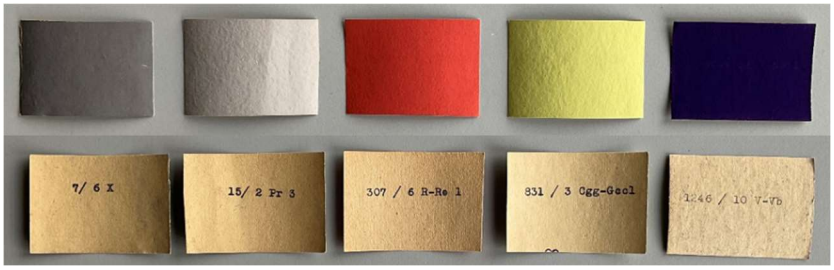

Abbildung 3-9: fünf ausgewählte Baumann-Prase-Farbtonkarten (oben: Vorderseite mit Leimfarbauftrag; unten: Rückseite mit alphanumerischer Bezeichnung)

Abbildung 3-10: einige Farbtonkarten mit Verschmutzungen und Beschädigungen

3.2 Versuchsdurchführung

3.2.1 Vormessungen zur Bestimmung der Messparameter

3.2.1.1 Messung der Homogenität

Vor jeder Messung wird sichergestellt, dass das MA-T12 ordnungsgemäß mit dem Weißstandard kalibriert ist. Um zu überprüfen, ob die spektralen Reflexionseigenschaften über die gesamte Probenoberfläche konstant sind, werden die fünf ausgewählten Farbtonkarten an fünf Messpunkten mit dem MA-T12 gemessen. Bei der Positionierung der Messpunkte wird darauf geachtete, dass das Messfenster des MA-T12 ausschließlich von der Probe und nicht vom Untergrund abgedeckt wird. Abweichungen würden zu einer Verfälschung der Messwerte führen. Zur Überprüfung dient die in der Pantora-Software angezeigte Live-Vorschau. Für die Vergleichbarkeit der Stichproben werden gleichbleibende Messbedingungen geschaffen. Der Raum wird so stark wie möglich abgedunkelt und als Untergrund dient das Samtschwarz. Die Messung wird mit dem Messprogramm BRDF für homogene Materialen mit der Auswahl *ohne Klarlack* ausgeführt.
Nach der Messung liegen die spektralen Remissionsgrade jedes Messpunkts für jede Winkelgeometrie sowie das daraus berechnete diffuse Modell in der Software vor. Da die verwendete Softwareversion derzeit in Überarbeitung ist, wird der Export gebündelter CSV-Dateien nicht unterstützt. Um nicht jedes Spektrum für die Auswertung einzeln exportieren zu müssen, werden nur die Werte der als relevant erachteten Messgeometrien exportiert. Zum einen handelt es sich dabei um die r45as45-Geometrie, die als gängige Geometrie zur Erfassung der spektralen Remissionswerte eingesetzt wird. Die zweite Messgeometrie ist r45as15, da sie der typischen Glanzmessgeometrie 45°/45° am nächsten ist. Zudem werden die diffusen Modelle der einzelnen Messpunkte zur Auswertung exportiert, um sie mit den Messwerten der Geometrien r45as45 und r45as15 zu vergleichen. Zur Analyse der Homogenität werden die spektralen Remissionswerte in Excel ausgewertet.

3.2.1.2 Messung mit variierender Umgebungsbeleuchtung

Die Untersuchung des Einflusses der Umgebungsbeleuchtung auf die Messergebnisse des MA-T12 erfolgt durch Messungen unter variierenden Lichtverhältnissen bei konstantem Messuntergrund. Dazu werden dieselben fünf Proben, die bereits für die Homogenitätsmessung verwendet wurden, auf einem samtschwarzen Untergrund gemessen. Im Gegensatz zur vorherigen Messung wird hierbei nur die spektrale Remission an einem einzelnen Messpunkt mit dem Messprogramm BRDF für homogene Materialien ohne Klarlack erfasst. Das Messfenster wird möglichst mittig auf der jeweili-

gen Probe positioniert und während der gesamten Messungen nicht verschoben. Für jede Probe werden insgesamt vier Datensätze mit den spektralen Remissionswerten unter verschiedenen Beleuchtungsbedingungen erhoben: in abgedunkelter Umgebung, abgedunkelter Umgebung mit Deckenlicht, in abgedunkelter Umgebung mit Schreibtischlicht sowie bei Tageslicht (vgl. Abbildung 3-11). Zur anschließenden Auswertung werden die Messdaten der Winkelgeometrien r45as45 und r45as15 sowie die diffusen Modelle in Excel importiert.

Abbildung 3-11: variierende Umgebungsbeleuchtung für die Vormessung (von links nach rechts: abgedunkelte Umgebung, abgedunkelte Umgebung mit Deckenlicht, abgedunkelte Umgebung mit Schreibtischlicht, Tageslicht

3.2.1.3 Messung mit variierendem Untergrund

Die Analyse des Einflusses des Untergrunds auf die spektralen Remissionswerte erfolgt durch die Messung der fünf ausgewählten Proben auf unterschiedlichen Unterlagen mithilfe des MA-T12. Dazu werden die Proben jeweils auf samtschwarzem Untergrund, einem weißen Blatt Papier und der Tischoberfläche platziert. Die Messungen werden unter abgedunkelter Umgebungsbeleuchtung unter Verwendung des Messprogramms BRDF für homogene Materialien ohne Klarlack durchgeführt. Zur anschließenden Auswertung werden die spektralen Remissionswerte von den diffusen Modellen sowie den Messgeometrien r45as45 und r45as15 exportiert. Für jede Probe entstehen somit drei Stichproben mit drei Datensätzen, die in Excel analysiert werden.

3.2.1.4 Vergleichsmessung mit CAS 120 und RMH 45

In einer Vergleichsmessung werden die unter identischen Messbedingungen erhobenen Messergebisse des MA-T12 mit denen des CAS 120 in Kombination mit dem RMH 45 untersucht. Ziel der Analyse ist es, zu überprüfen, inwieweit die spektralen Remissionswerte beider Messsysteme übereinstimmen. Hierfür werden die fünf ausgewählten Proben zunächst mithilfe des MA-T12 auf samtschwarzem Untergrund in abgedunkelter Umgebung unter Verwendung des Messprogramms BRDF (ohne Klarlack) gemessen. Anschließend erfolgt die Messung derselben Proben unter den denselben Bedingungen mit dem CAS 120 und dem RMH 45 unter den verfügbaren Messgeome-

trien 45°/0° und 45°/45°. Zur Auswertung werden die ermittelten Spektren des CAS 120 in Excel importiert und aufgrund des erweiterten Spektralbereichs sowie der höheren spektralen Auflösung an die Messwerte des MA-T12 angepasst. Die mit dem MA-T12 erfassten Spektralwerte der diffusen Modelle sowie aller zwölf Messgeometrien werden ebenfalls in Excel importiert und für die weitere Analyse aufbereitet.

3.2.2 Messung der Wiederholgenauigkeit

Da die Spezifikationen des Herstellers die Wiederholgenauigkeit des MA-T12 ausschließlich für die Farbkoordinaten als ΔE2000-Wert angibt, soll in einer Messung die Wiederholgenauigkeit für die spektralen Remissionswerte auf den Baumann-Prase-Farbtonkarten ermittelt werden. Dafür werden die fünf ausgewählten Proben auf einem samtschwarzen Untergrund positioniert. In einer abgedunkelten Umgebung werden die spektralen Remissionswerte an einem konstanten Messpunkt erfasst, wobei für jede Probe zehn aufeinanderfolgende Messungen mit dem MA-T12 durchgeführt werden. Zur Analyse werden die jeweils zehn Datensätze der spektralen Remissionswerte für die Messgeometrien r45as45 sowie r45as15 und das diffuse Modell in Excel importiert.

4 Ergebnisse und Auswertung

4.1 Ergebnisse der Vormessungen

Die Ergebnisse der Vormessungen sind Grundlage für die Festlegung der Messbedingungen und -parameter der eigentlichen Messung der Farbtonkarten. Zur Auswertung der umfangreichen Messwerte wurde überwiegend der Variationskoeffizient berechnet. Mithilfe dieser statistischen Kenngröße lässt sich die relative Streuung der Messwerte quantifizieren. Für die Berechnung des Variationskoeffizienten werden zunächst für jede Wellenlänge die Mittelwerte und Standardabweichungen der Remissionswerte aus den erhobenen Stichproben ermittelt. Der Variationskoeffizient ergibt sich aus dem Verhältnis von Standardabweichung zu Mittelwert und wurde über alle Wellenlängen gemittelt. Somit ergibt sich für jede untersuchte Probe ein Wert für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15.

4.1.1 Wiederholgenauigkeit des MA-T12

Die berechneten Variationskoeffizienten werden in diesem Zusammenhang zur Schätzung der Wiederholgenauigkeit des MA-T12 bei der Messung der spektralen Remissionsgrade auf den Farbtonkarten herangezogen. Sie quantifizieren die Schwankungen über zehn aufeinanderfolgende Messungen an derselben Position der Farbtonkarten und dienen als Näherungswert für die Messstabilität des Geräts. Tabelle 4-1 zeigt die durchschnittlichen Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten. Daraus ist ersichtlich, dass die Variationskoeffizienten für alle untersuchten Spektren Werte unter 1 ‰ aufweisen. Die sehr niedrigen Variationskoeffizienten belegen, dass das MA-T12 eine hohe Wiederholgenauigkeit aufweist und stabile Messergebnisse liefert. Auffällig ist, dass die Spektralwerte der r45as15-Geometrie mit einem maximalen Variationskoeffizienten von rund 1 ‰ die größten Schwankungen aufweisen.

Tabelle 4-1: durchschnittliche Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung der Wiederholgenauigkeit

Farbtonkarte	7 6 X	15- 2 Pr 3	307- 6 R-Ro 1	831 3 Cgg-Gcc1	1246- 10 V-Vb
Diffuses Modell	0,00090	0,00056	0,00033	0,00025	0,00041
r45as45	0,00037	0,00069	0,00050	0,00035	0,00055
r45as15	0,00063	0,00098	0,00068	0,00052	0,00063

4.1.2 Homogenität der Proben

Zur Bewertung der Homogenität enthält Tabelle 4-2 die mittleren Variationskoeffizienten der Spektralwerte für die fünf Messpunkte der analysierten Farbtonkarten. Daraus lässt sich erkennen, dass die relative Streuung der Messergebnisse um ihre Mittelwerte für alle betrachteten Spektren und Proben im Promille-Bereich liegt. Die geringste relative Streuung der Messwerte zeigt sich bei der Messgeometrie r45as45 mit Variationskoeffizienten zwischen ca. 2 ‰ und 6 ‰. Die größte relative Streuung tritt bei der Messgeometrie r45as15 mit maximalen Werten von ca. 8 ‰ auf. Dies könnte darauf hindeuten, dass die Farbtonkarten feine Oberflächenstrukturen aufweisen, die schräg einfallendes Licht ungleichmäßiger streuen, während senkrecht einfallendes Licht gleichmäßiger reflektieren wird.

Tabelle 4-2: durchschnittliche Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung der Homogenität

Farbtonkarte	7 6 X	15- 2 Pr 3	307- 6 R-Ro 1	831 3 Cgg-Gcc1	1246- 10 V-Vb
Diffuses Modell	0,00374	0,00459	0,00474	0,00529	0,00617
r45as45	0,00273	0,00167	0,00581	0,00327	0,00495
r45as15	0,00613	0,00689	0,00536	0,00513	0,00762

Abbildung 4-1 unterstützt dieses Ergebnis. Sie zeigt die gemessenen spektralen Remissionsgrade der Farbtonkarte *7 6 X* für das diffuse Modell sowie die beiden betrachteten Messgeometrien. Die Remissionsspektren des diffusen Modells und der r45as45-Geometrie liegen näher beieinander als die der r45as15-Geometrie. Die eng zusammenliegenden Spektralwertkurven und geringen Variationskoeffizienten deuten auf vergleichbare Messergebnisse und eine weitgehend homogene Oberfläche der Farbtonkarten hin. Insgesamt sind die berechneten Variationskoeffizienten zwar sehr gering, dennoch sind sie um ein Vielfaches höher als die Werte der Wiederholgenauigkeit. Dies bedeutet, dass die gemessene Streuung der Spektralwerte nicht durch das Messgerät, sondern durch Unterschiede in den Farbproben verursacht wird. Obwohl die Farbproben geringe Inhomogenitäten aufweisen, sind dennoch minimale Unterschiede im Reflexionsverhalten an verschiedenen Punkten messbar. Aufgrund dessen sollten für noch genauere Messergebnisse mehrere Messpunkte der Farbtonkarten gemessen und die erfassten Spektralwerte gemittelt werden.

Zusätzlich zu den Spektralwerten der fünf Messpunkte für die Messgeometrie r45as45 sind im mittleren Spektrum von Abbildung 4-1 auch die gemittelten Spektralwerte des diffusen Modells dargestellt. Auffällig ist, dass die Spektralwerte des diffusen Modells geringfügig höher ausfallen als die der Messgeometrie r45as45. Dies könnte darauf zurückzuführen sein, dass die umgekehrte diffuse Geometrie r45as45 des MA-T12 nicht die gesamte diffuse Reflexion der Farbtonkarten erfasst. Erst durch das mathematischen Optimierungsverfahren, das alle Messgeometrien einbezieht und daraus das diffuse Modell ableitet, kann das diffuse Reflexionsverhalten modelliert werden.

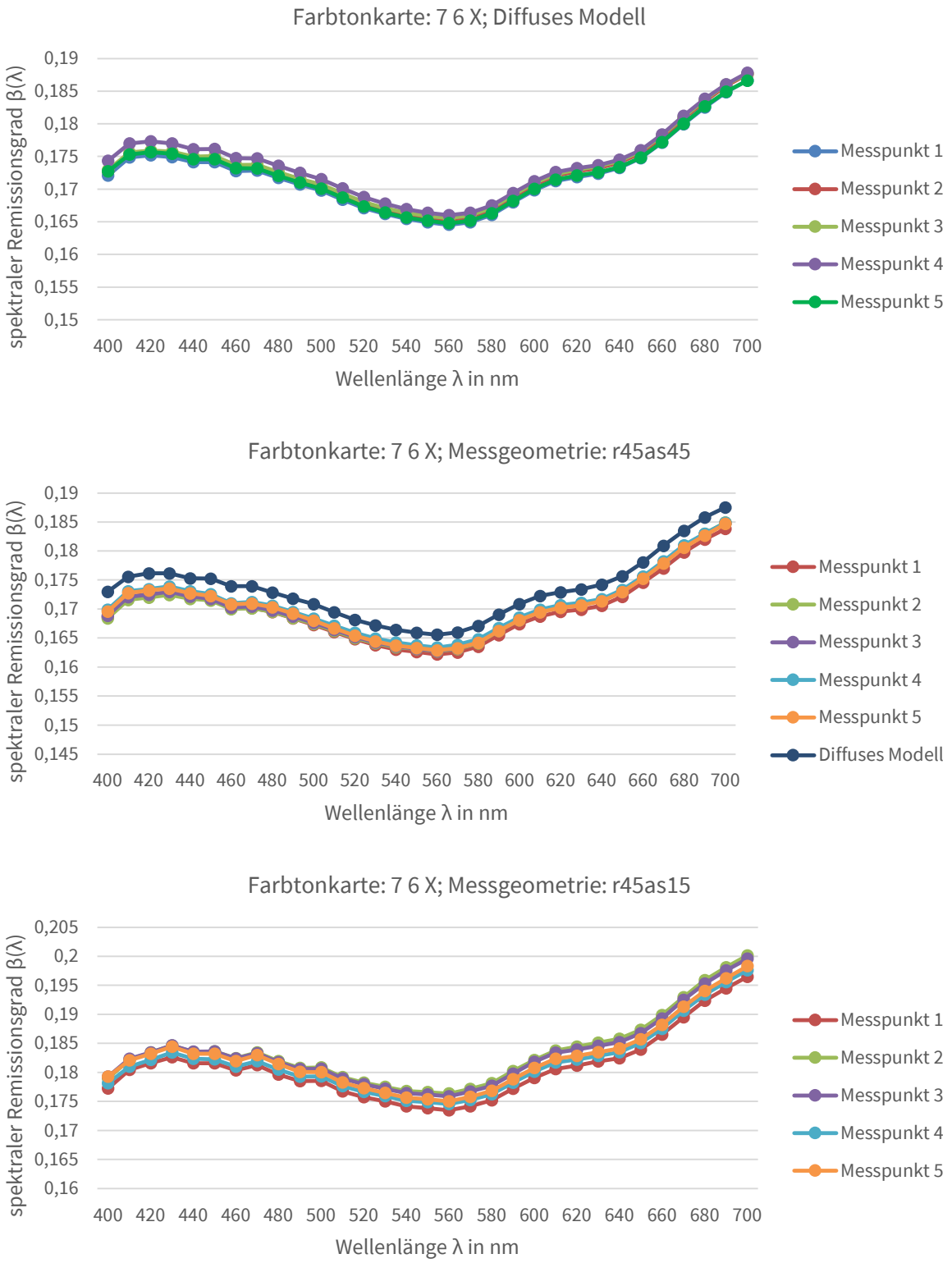

Abbildung 4-1: Spektren von fünf Messpunkten der Farbtonkarte 7 6 X für das diffuse Modell (oben) sowie die Messgeometrien r45as45 (Mitte) und r45as15 (unten)

4.1.3 Einfluss der Umgebungsbeleuchtung

Tabelle 4-3 gibt die durchschnittlichen Variationskoeffizienten der unter verschiedenen Umgebungsbeleuchtung erfassten Messwerte für die Farbtonkarten wieder. Auch hier zeigt sich, dass die relative Streuung der Messwerte für die Messgeometrie r45as15 mit einem maximalen Variationskoeffizienten von ca. 1,4 ‰ am größten ist. Insgesamt bleibt die relative Streuung der Messwerte jedoch deutlich unter diesem Maximalwert und ist daher als sehr gering einzustufen. Zudem liegen die Variationskoeffizienten im Bereich der ermittelten Werten für die Wiederholgenauigkeit.
Die Abbildung 4-2 verdeutlichen dieses Ergebnis. Sie zeigt die Spektren der Farbtonkarte *7 6 X* für das diffuse Modell sowie die untersuchten Messgeometrien. In allen Spektren liegen die Spektralkurven nahe beieinander, was auf eine hohe Übereinstimmung der Messwerte hinweist. Das mittlere Spektrum in Abbildung 4-2 zeigt zudem erneut, dass die Spektralwerte des diffusen Modells leicht über denen der r45as45-Geometrie liegen. Die Ergebnisse der Messung legen nahe, dass das MA-T12 die Umgebungsbeleuchtung nahezu vollständig abschirmt, sodass externe Lichtquellen keinen signifikanten Einfluss auf die Messergebnisse haben.

Tabelle 4-3: durchschnittliche Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung des Einflusses der Umgebungsbeleuchtung

Farbtonkarte	7 6 X	15- 2 Pr 3	307- 6 R-Ro 1	831 3 Cgg-Gcc1	1246- 10 V-Vb
Diffuses Modell	0,00052	0,00032	0,00023	0,00025	0,00040
r45as45	0,00082	0,00059	0,00047	0,00046	0,00046
r45as15	0,00144	0,00105	0,00085	0,00088	0,00068

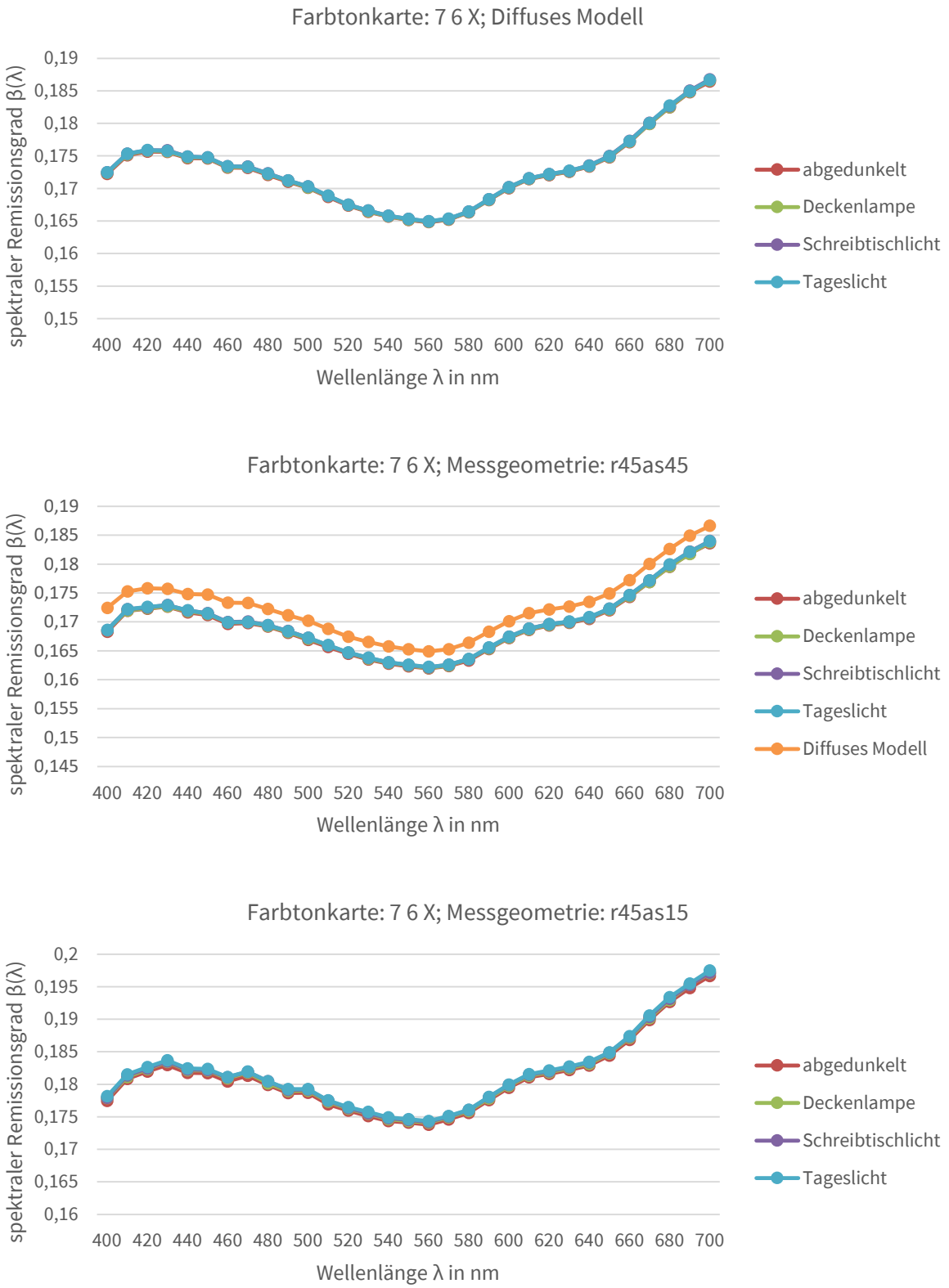

Abbildung 4-2: Spektren der Farbtonkarte 7 6 X unter variierender Umgebungsbeleuchtung für das diffuse Modell (oben) sowie die Messgeometrien r45as45 (Mitte) und r45as15 (unten)

4.1.4 Einfluss des Untergrunds

Die aus den Messwerten berechneten Variationskoeffizienten für die Messung der Farbtonkarten auf verschiedenen Untergründen sind in Tabelle 4-4 aufgeführt. Die geringste relative Streuung liefert das diffuse Modell, insbesondere bei den Farbtonkarten *7 6 X* und *1246- 10 V-Vb* mit den Werten 0,3 ‰ und 0,8 ‰. Überwiegend liegt die relative Streuung der Messwerte jedoch über 1 ‰. Die höchsten Streuungen treten bei der r45as15-Geometrie auf, mit Variationskoeffizienten von bis zu 1,1 %. Die Variationskoeffizienten sind insgesamt als sehr niedrig einzustufen, was darauf hindeutet, dass die Messwerte nur geringe Abweichungen aufweisen. Dennoch liegen sie deutlich über dem ermittelten Wert der Wiederholgenauigkeit. Das legt nahe, dass die Messwertabweichungen nicht auf die Messungenauigkeiten des MA-T12, sondern auf den verwendeten Messuntergrund zurückzuführen sind.

Tabelle 4-4: durchschnittlichen Variationskoeffizienten für das diffuse Modell sowie die Messgeometrien r45as45 und r45as15 der untersuchten Farbtonkarten zu Bewertung des Einflusses des Untergrunds

Farbtonkarte	7 6 X	15- 2 Pr 3	307- 6 R-Ro 1	831 3 Cgg-Gcc1	1246- 10 V-Vb
Diffuses Modell	0,00028	0,00425	0,00220	0,00505	0,00076
r45as45	0,00341	0,00656	0,00569	0,00818	0,00380
r45as15	0,00837	0,00514	0,01104	0,00857	0,00763

Abbildung 4-3 zeigt exemplarisch die Spektralwerte der Farbtonkarte *15- 2 Pr 3* für das diffuse Modell sowie die untersuchten Messgeometrien. Es ist erkennbar, dass die Spektralwertkurven der Messung auf Papier und der Tischoberfläche in allen Spektren nahezu identisch sind, während die auf Samtschwarz gemessenen Werte leicht darüber liegen. Dieses Verhalten zeigt sich bei allen untersuchten Proben in unterschiedlichem Ausmaß. Farbtonkarten mit geringem Kontrast zum samtschwarzen Untergrund, wie *7 6 X* und *1246- 10 V-Vb,* weisen eine geringere Messwertstreuung auf als bspw. die gelbe Farbtonkarte *831 3 Cgg-Gcc1*. Wären die Farbtonkarten in einem signifikanten Maße transparent, würde der umgekehrte Effekt eintreten. Ein Teil des Lichts würde die Probe durchdringen und mit dem Untergrund wechselwirken. Helle Untergründe wie das Papier oder die Tischoberfläche würden das Licht streuen, während der samtschwarze Untergrund es nahezu vollständig absorbiert. Dadurch wäre der Anteil des remittierten Lichts – und somit der spektrale Remissionsgrad – auf dunklem Untergrund geringer als auf hellem. Da jedoch in den Messungen ein

gegenteiliger Effekt beobachtet wurde, spricht dies eher für eine Ursache im Messgerät oder Messaufbau als auf eine nennenswerte Transparenz der Proben. Eine mögliche Erklärung für die insgesamt höheren Remissionswerte auf Samtschwarz ist, dass der schwarze Untergrund weniger Licht reflektiert und somit unerwünschte Streulichtanteile im Messaufbau reduziert. Dies kann dazu führen, dass der gemessene Anteil der von der Farbprobe reflektierten Strahlung relativ höher ausfällt. Für präzise und konsistente Messergebnisse sollte die Messung der Farbtonkarten folglich auf einem festgelegten Untergrund erfolgen.

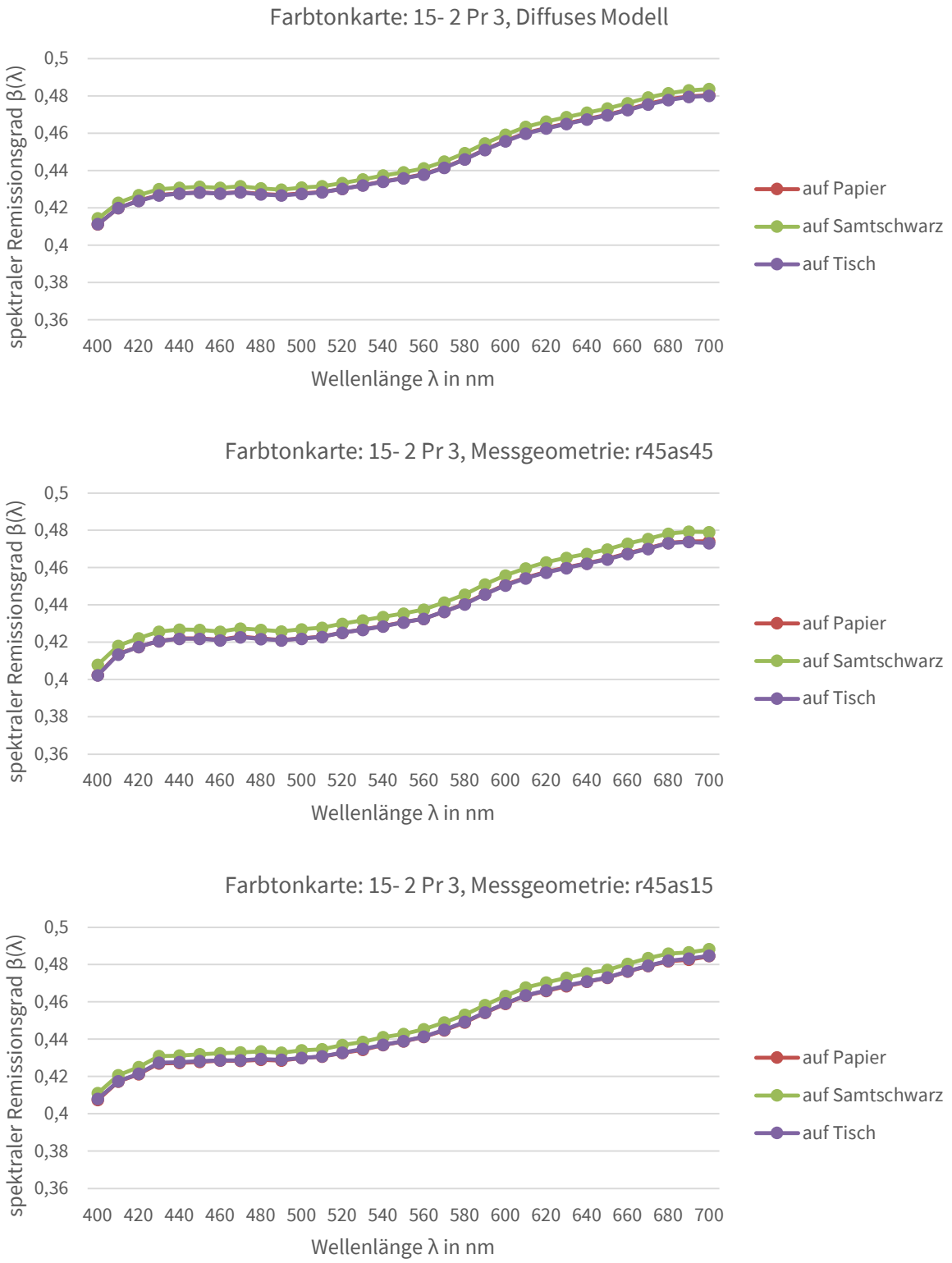

Abbildung 4-3: Spektren der Farbtonkarte 15- 2 Pr 3 auf variierenden Untergründen für das diffuse Modell (oben) sowie die Messgeometrien r45as45 (Mitte) und r45as15 (unten)

4.1.5 Ergebnisse der Vergleichsmessung

Zur Beurteilung der Übereinstimmung der Messergebnisse des MA-T12 von X-Rite und des CAS 120 von Instrument Systems zeigen die Abbildung 4-4 und Abbildung 4-5 exemplarisch die Spektren der Farbtonkarte *1246- 10 V-Vb.* In Abbildung 4-4 sind die Messergebnisse der diffusen Messgeometrie 45°/0° des CAS 120 sowie aus Übersichtsgründen nur die Messgeometrien des MA-T12 mit der größten Übereinstimmung dargestellt. Die Spektralkurve der Glanzgeometrie 45°/45° des CAS 120 ist in Abbildung 4-5 zu sehen, ebenfalls mit den am besten übereinstimmenden Messgeometrien des MA-T12. Die mit dem CAS 120 erfassten Spektralwerte zeigen, dass die untersuchten Farbtonkarten keine signifikanten Glanzeffekte aufweisen, sodass überwiegend diffuse Reflexion vorliegt. Die Analyse der Spektren aller untersuchten Proben ergab, dass die Geometrien r45as45 und r15as-15 des MA-T12 die größte Ähnlichkeit zur 45°/0°-Geometrie des CAS 120 aufweisen. Noch konsistentere Übereinstimmungen zur diffusen Messgeometrie des CAS 120 bestehen jedoch beim diffusen Modell des MA-T12. Dies deutet darauf hin, dass die durch die Pantora-Software mittels Optimierungsverfahren berechneten Spektralwerte die diffuse Reflexion der Farbtonkarten am präzisesten wiedergeben.

Abbildung 4-5 zeigt zudem, dass die Geometrien r15as-45, r45as75 und r45as110 des MA-T12 die höchste Übereinstimmung mit der 45°/45°-Glanzgeometrie des CAS 120 aufweisen. Bei diesen Messgeometrien handelt es sich nicht um klassische Glanzgeometrien, da sie nicht den spekularen Reflexionswinkel erfassen. Die Ergebnisse widerlegen somit die Annahme, dass die dem typischen Glanzwinkel am nächstliegende Geometrie r45as15 des MA-T12 den Glanz der Farbtonkarten am besten erfasst.

Insgesamt bestätigt der Vergleich die Glanzfreiheit der untersuchten Proben und zeigt, dass die Remissionswerte des diffusen Modells des MA-T12 die höchste Übereinstimmung mit der diffusen Messung des CAS 120 aufweisen. Für die Untersuchung des Glanzes liefern die Geometrien r15as-45, r45as75 und r45as 110 vergleichbare Ergebnisse zur Glanzmessung des CAS 120.

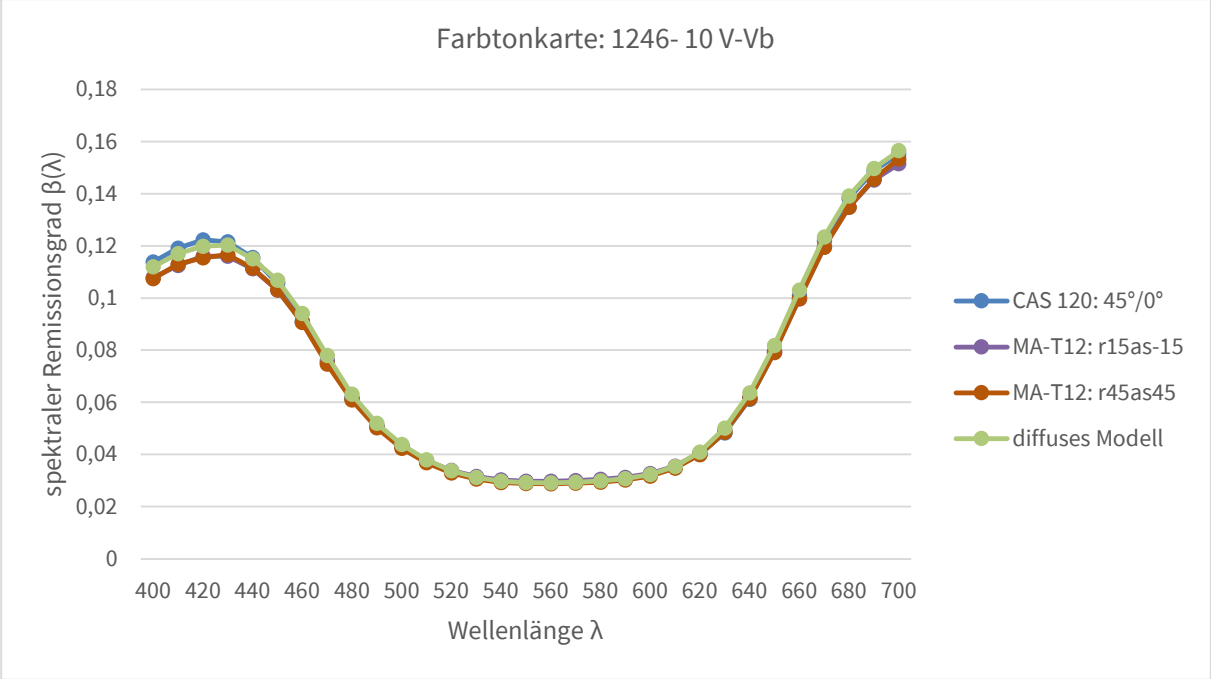

Abbildung 4-4: Spektrum der Farbtonkarte 1246- 10 V-Vb für die diffuse Geometrie des CAS 120 sowie die Geometrien r15as-15 und r45as45 und das diffuse Modell des MA-T12

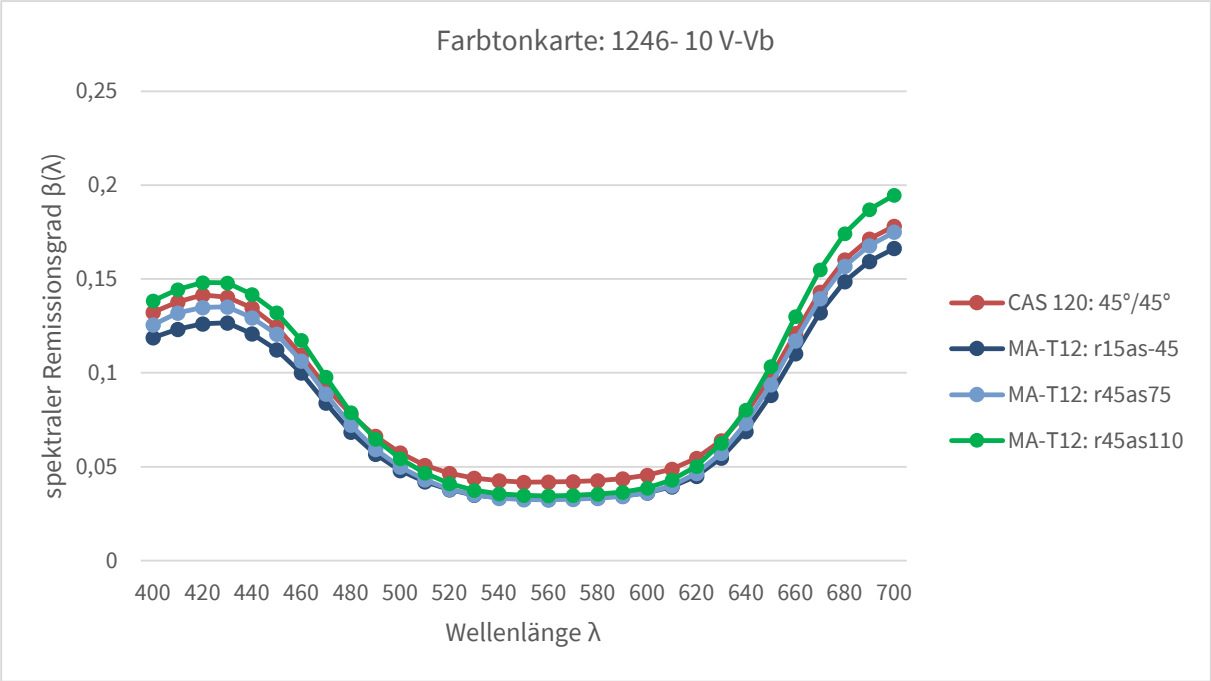

Abbildung 4-5: Spektrum der Farbtonkarte 1246- 10 V-Vb für die Glanzgeometrie des CAS 120 sowie die Geometrien r15as-45, r45as75 und r45as110 des MA-T12

4.2 Festlegung der Messparameter und Messung der Baumann-Prase-Farbtonkarten

Aus den Ergebnissen der Vormessungen lassen sich die relevanten Messbedingungen für die spektrale Erfassung der Baumann-Prase-Farbtonkarten ableiten. Um präzise und vergleichbare Messergebnisse zu gewährleisten, erfolgt die finale Messung der Farbtonkarten auf einem samtschwarzen Untergrund. Die Vormessungen haben gezeigt, dass externe Lichtquellen keinen Einfluss auf die spektralen Remissionsgrade der Farbtonkarten haben, weshalb die Umgebungsbeleuchtung während der Messung nicht kontrolliert wird. Jede Farbtonkarte wird nacheinander auf dem Untergrund positioniert und mit dem MA-T12 von X-Rite unter Verwendung des Messprogramms BRDF mit der Auswahl *ohne Klarlack* gemessen. Für jede Farbtonkarte wird eine neue AxF-Datei erstellt, deren Bezeichnung der alphanumerischen Codierung der jeweiligen Farbtonkarte entspricht. Die Dateien werden entsprechend der Einteilung des Aufbewahrungskastens der Farbtonkarten in Ordnern gespeichert, die nach den Stammfarben benannt sind. Zur Erfassung des durchschnittlichen Reflexionsverhaltens über die gesamte Farboberfläche werden die spektralen Remissionswerte an zwei Messpunkten ermittelt und in derselben AxF-Datei gespeichert. Farbtonkarten mit sichtbaren Verschmutzungen werden ausschließlich an weitgehend sauberen Stellen gemessen, um eine Verfälschung der Messergebnisse zu vermeiden. Nach Abschluss der Messung aller 1.325 Baumann-Prase-Farbtonkarten liegt ein digitaler Ordner vor, der analog zur physischen Ordnung die Spektraldaten aller Farbtonkarten nach Stammfarben unterteilt enthält.

Die gespeicherten AxF-Dateien beinhalten die spektralen Remissionswerte der zwölf Messgeometrien sowie das von der Pantora-Software berechnete diffuse Modell der Farbtonkarten. Die Vergleichsmessungen zeigen, dass die Remissionsspektren des diffusen Modells von X-Rite die größte Übereinstimmung mit denen der diffusen Messgeometrie des CAS 120 von Instrument Systems aufweisen. Daher sollte das diffuse Modell als Referenz für die Charakterisierung des diffusen Reflexionsverhaltens herangezogen werden. Zur Beurteilung des Glanzverhaltens sind insbesondere die Messgeometrien r15as-45, r45as75 und r45as110 zu berücksichtigen.

4.3 Fehlerbetrachtung

Die Messergebnisse dieser Arbeit unterliegen Messunsicherheiten, die sich aus verschiedenen Einflussfaktoren ergeben. Da jedes Messgerät systematische Ungenauigkeiten aufweist, sind auch die erfassten spektralen Remissionswerte davon betroffen. In den Spezifikationen des MA-T12 von X-Rite wird jedoch keine explizite Messgeräteungenauigkeit für die erhobenen Remissionswerte angegeben. Zur näherungsweisen Bestimmung wurde daher die Wiederholgenauigkeit des Geräts an den Baumann-Prase Farbtonkarten ermittelt. Die Richtigkeit dieser Werte konnte nicht überprüft werden, jedoch deutet die geringe Abweichung darauf hin, dass sie mit den in den Spezifikationen genannten niedrigen Messgenauigkeiten übereinstimmen. Eine genauere Bewertung der systematischen Fehler wäre möglich, wenn die mittlere Abweichung der Messwerte eines Standards mit bekanntem definiertem Referenzwert, wie einem BCRA-Standard, bestimmt würde. Zur Bewertung der Streuung der spektralen Remissionsgrade wurde der Variationskoeffizient herangezogen. Dabei ist zu beachten, dass dieser stark vom Mittelwert abhängt und bei niedrigen Remissionswerten unverhältnismäßig hohe Werte annehmen kann. Zudem erfasst er nur die relative Streuung innerhalb einer Messreihe, aber keine systematischen Abweichungen zwischen unterschiedlichen Messbedingungen. Daher sind direkte Vergleiche zwischen Messungen mit stark variierenden Mittelwerten oder unterschiedlichen Materialien nur eingeschränkt aussagekräftig. Neben den systematischen Fehlern des Messgeräts können auch Unterschiede zwischen Farbtonkarten selbst, wie Verschmutzungen, Beschädigungen oder Variationen in der Oberflächenstruktur und Farbschichtdicke, zu Messabweichungen führen. Einige Farbtonkarten wiesen Wölbungen auf, die die Messbedingungen, insbesondere wenn die Probe nicht vollständig plan auf dem Messuntergrund aufliegt, beeinflussen.

Die durchgeführten Messungen zeigen, dass das MA-T12 eine hohe Wiederholgenauigkeit auf den Baumann-Prase-Farbtonkarten aufweist. Darüber hinaus sind die Messwerte der MA-T12 mit denen des CAS 120 in Kombination mit dem RMH 45 von Instrument Systems reproduzierbar und vergleichbar. Dies bestätigt die allgemeine Konsistenz der Messungen, sodass die erhobenen Daten als zuverlässig angesehen werden können. Dennoch ist die Wiederholgenauigkeit nur für die Messung an den Baumann-Prase-Farbtonkarten nachgewiesen und kann nicht ohne Weiteres auf andere Materialien übertragen werden. Für Oberflächen mit sehr gleichmäßiger Beschaffenheit, Rauheit und Opazität könnte die Wiederholgenauigkeit höher ausfallen. Texturierte und strukturierte Materialien mit stark unregelmäßigem Reflexionsverhalten liefern weniger konsistente Remissionswerte, wodurch sich eine niedrigere Wiederholgenauigkeit ergibt. Eine weitere Unsicherheit

besteht bei dem durch die Pantora-Software berechneten diffusen Modell, da die genaue Herleitung der Remissionswerte nicht nachvollzogen werden kann.
Da die untersuchten Farbtonkarten keinen signifikanten Glanz aufweisen, sollte für eine umfassende Bewertung der Messgeometrien des MA-T12 ein Vergleich an glänzenden Proben mit der gängigen Glanzgeometrie 45°/45° durchgeführt werden. Ergänzend könnte ein Abgleich mit weiteren Messgeräten zur Spektralanalyse eine umfassendere Bewertung der Messungenauigkeit ermöglichen. Zudem sollte die Ursache für die erhöhten spektralen Remissionsgrade auf samtschwarzem Untergrund weiter untersucht werden.
Eine zusätzliche Herausforderung stellt die Verfügbarkeit der gemessenen Spektraldaten dar. Die Speicherung der Messergebnisse im AxF-Format erfordert spezielle Programme, wie die Pantora-Software, um auf die Spektraldaten zuzugreifen. In der aktuellen Version der Software ist der Export aller Spektren als separate Datei mit erheblichem Aufwand verbunden, was die Weiterverarbeitung der Daten erschwert. Eine effizientere Datenschnittstelle könnte die Analysemöglichkeiten verbessern.

5 Fazit und Ausblick

In dieser Arbeit wurde die Eignung des Spektralphotometers MA-T12 in Kombination mit der Pantora-Software des Unternehmens X-Rite für die spektrale und lichttechnische Erfassung historischer Farbexponate untersucht. Als Beispiel dienten die Farbtonkarten „Baumanns Neue Farbtonkarte – System Prase Block No.1“ aus der Sammlung Farbenlehre der TU Dresden. Dabei wurden die relevanten Messbedingungen und -parameter zur Sicherstellung reproduzierbarer Messergebnisse analysiert und die Übereinstimmungen der mit dem MA-T12 erfassten Werte mit denen eines weiteren spektroskopischen Messgeräts überprüft.
Die durchgeführten Vormessungen zeigten, dass das MA-T12 auf den Baumann-Prase-Farbtonkarten eine sehr hohe Wiederholgenauigkeit aufweist. Während die Farbtonkarten insgesamt als homogen eingestuft wurden, konnten geringe Streuungen in den Messwerten festgestellt werden, die auf variierendes Reflexionsverhalten innerhalb der Kartenoberflächen hindeuten. Der Einfluss der Umgebungsbeleuchtung wurde ausgeschlossen, während der Messuntergrund nachweislich einen messbaren Einfluss auf die Remissionswerte hatte. Samtschwarzer Untergrund führte durchgehend zu geringfügig höheren Remissionswerten im Vergleich zu anderen Untergründen. Die Vergleichsmessungen mit dem CAS 120 in Kombination mit dem RMH 45 des Unternehmens

Instrument Systems ergaben, dass das von der Pantora-Software berechnete diffuse Modell die größte Übereinstimmung mit den diffusen Messwerten des CAS 120 aufwies. Die Remissionswerte der Glanzgeometrie wurden durch die Geometrien r15as-45, r45as75 und r45as110 am genauesten erfasst. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde für die spektrale Charakterisierung der gesamten Farbtonkarten der samtschwarze Untergrund als Standard festgelegt. Zur Bestimmung des mittleren Reflexionsverhaltens wurden pro Farbtonkarte zwei Messpunkte erfasst. Das Ergebnis der Messung ist ein digitaler Datensatz mit den spezifischen Spektraldaten aller Baumann-Prase-Farbtonkarten, welcher als Grundlage für zukünftige farbmetrische Untersuchungen genutzt werden kann. Für das Abrufen der Daten sind allerdings Programme erforderlich, die das AxF-Dateiformat unterstützen. In weiterführenden Analysen könnte die Wiederholgenauigkeit des MA-T12 für spektrale Remissionswerte mithilfe eines definierten Standards überprüft werden. Zudem wäre eine Untersuchung glänzender Proben erforderlich, um die Eignung der Messgeometrien des MA-T12 für Proben mit stark spekularem Reflexionsverhalten zu bewerten.

Für die Nutzung des Geräts in der Sammlung Farbenlehre ist zu beachten, dass die Farbexponate über eine ebene Oberfläche mit einer Mindestgröße von 9 mm x 12 mm verfügen müssen, um die Messfläche des MA-T12 abzudecken. Da viele Objekte in der Sammlung jedoch kleinere Farbflächen aufweisen, wäre für diese ein alternatives Messgerät mit einer kleineren Messfläche erforderlich. Zudem sind einige Exponate plastische Objekte, die nicht auf einem definierten Messuntergrund positioniert werden können. In Kombination mit sehr kleinen Farbflächen oder Rundungen ist eine Messung mit dem MA-T12 daher nicht möglich. Weitere Herausforderungen bestehen bei der farbmetrischen Charakterisierung von Pigmenten in Pulverformen sowie pastösen Malfarben, da diese mit einem Spektralphotometer nicht direkt erfasst werden können. Zudem gibt es in der Sammlung Objekte, bei denen die Farbproben in plastischen Modellen angeordnet sind, sodass sie mit herkömmlichen Messgeräten schwer zugänglich sind. In solchen Fällen müsste geprüft werden, ob eine Demontage des Modells für eine Messung vertretbar und praktikabel wäre.

Alles in allem hat sich das MA-T12 aufgrund seiner Praktikabilität, Funktionen, Messgenauigkeit und Übertragbarkeit der Messwerte grundsätzlich als geeignet für die spektrale Erfassung historischer Farbexponate erwiesen. Allerdings ist die Anwendung des Messgeräts in der Sammlung Farbenlehre durch die erforderliche Mindestgröße und Erscheinungsform der Exponate begrenzt, sodass für die Messung der gesamten Sammlung zusätzlich zum Spektralphotometer MA-T12 alternative Messgeräte und -methoden in Betracht gezogen werden müssen.

Quellenverzeichnis

Appearance Exchange Format (AXF) | AXF File Format. (n. d.). X-Rite. https://www.xrite.com/de/axf [abgerufen am: 7. März 2025]

Bendin, E. (2011, 2012). 1019 8 Gbb 1 - Grün nach Blau neigend. Zur Geschichte eines Klassikers. 100 Jahre Baumanns Neue Farbtonkarte – System Prase*. Phänomen Farbe*, Sonderdruck mit Beiträgen aus Dezember 2011 und Februar 2012, 28-30, 22-24. https://tu-dresden.de/bu/architektur-landschaft/die-fakultaet/einrichtungen/sam_farbenlehre/ressourcen/dateien/sammlung-farbenlehre-alte-struktur/sa_farbenlehre/publikationen/sonderdruck2012?lang=de1

Blinn-Phong model. (n. d.). https://paroj-github-io.translate.goog/gltut/Illumination/Tut11%20BlinnPhong%20Model.html?_x_tr_sl=en&_x_tr_tl=de&_x_tr_hl=de&_x_tr_pto=rq [abgerufen am: 11. März 2025]

Farbmessung, U. S. F. (n. d.). *CCS (BCRA) Farbkacheln*. https://farbmessung.com/html/bcra_farbkacheln.html [abgerufen am: 6. März 2025]

Fraunhofer IOSB. (2015). BRDF: Robotergestützte Reflexionsmessung. *Fraunhofer*. file:///C:/Users/user/Downloads/BRDF-Robotergest%C3%BCtzte%20Reflexionsmessung-1.pdf

Gall, D. (2004). *Grundlagen der Lichttechnik: Kompendium* (2. Aufl.). Richard Pflaum Verlag.

Guarnera, D., Guarnera, G., Ghosh, A., Denk, C., & Glencross, M. (2016). BRDF Representation and acquisition. *Computer Graphics Forum*, *35*(2), 625–650. https://doi.org/10.1111/cgf.12867

Gobrecht, H., Eichler, H., Bergmann, L., & Schaefer, C. (1978). *Lehrbuch der Experimentalphysik - Band 3 Optik* (7. Aufl.). de Gruyter.

Hagler, J. (2006, April 10). *Strahlenoptik für Beleuchtung, Reflexion und Transmission in der 3d-Grafik.* Digital Media for Artists. http://www.dma.ufg.ac.at/app/link/Grundlagen%3A3D-Grafik/module/9329?step=all, [abgerufen am: 2. Februar 2025]

Heim, G. (2016). *Glanz.* Rhetos Lern-Lexikon der Physik und der spekulativen Philosophie. www.rhetos.de/physik/lexikon/glanz.htm [abgerufen am: 11. Februar 2025]

Instrument Systems. (n. d.). *Array spectrometer for lab and production*. https://www.instrumentsystems.com/fileadmin/Downloads/Brochures_Datasheets/CAS120_EN.pdf

CAS 120 – Instrument Systems. (n. d.). https://www.instrumentsystems.com/de/produkte/spektrometer/cas-120 [abgerufen am: 9. März 2025]

Kocourek, T. (2011, Oktober 31). *Farbtonkarten, Farbtonfächer*. Farbenlehre. https://www.farbenergie.com/2011/10/farbtonkarten-farbtonfacher-farbtone/ [abgerufen am: 13. Februar 2025]

Kustodie (2022, September 12). *Sammlung Farbenlehre*. TU Dresden. https://tu-dresden.de/kustodie/sammlungen-kunstbesitz/bau-und-umwelt/sammlung-farbenlehre [abgerufen am: 24. Januar 2025]

MA-T12 | Tragbares Mehrwinkel-Spektralfotometer X-Rite. (n. d.). X-Rite. https://www.xrite.com/de/categories/portable-spectrophotometers/ma-family/ma-t12 [abgerufen am: 7. März 2025]

Montes, R., & Ureña, C. (2012). An overview of BRDF models. In University of Granada, *Technical Report LSI-2012-001*. University of Granada.

Müller, G. (1997) *Beschleunigung Strahlbasierter Rendering-Algorithmen*. (Diplomarbeit, Informatik). Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn. https://drive.google.com/file/d/1SfhFqEkwlgHUvsG-AXvW_tfOheoEfCbG/edit?pli=1

Ngan, A., Durand, F., Matusik, W. (2005). Experimental Analysis of BRDF Models*. Proceedings of the Eurographics Symposium on Rendering*. Eurographics Association, S.117–226. https://people.csail.mit.edu/addy/research/ngan05_brdf_eval.pdf

Pantora Software | Material Control Hub by X-Rite. (n. d.). X-Rite. https://www.xrite.com/de/pantora-software [abgerufen am: 9. März 2025]

Ploch, M. (2025, Januar 22). *Die Sammlung Farbenlehre*. TU Dresden. https://tu-dresden.de/bu/architektur-landschaft/die-fakultaet/einrichtungen/sam_farbenlehre [abgerufen am: 24. Januar 2025]

Possel, H. (n. d.). *Farbmetrik*. Kennerblick. https://www.kennerblick.net/farbmetrik.html [abgerufen am: 11. Februar 2025]

Possel, H. (n. d.). *Lichtart*. Kennerblick. https://www.kennerblick.net/lichtart.html [abgerufen am: 11. Februar 2025]

Possel, H. (n. d.). *Normalbeobachter*. Kennerblick. https://www.kennerblick.net/ normalbeobachter.html [abgerufen am: 11. Februar 2025]

Possel, H. (n. d.). *Spektralphotometer.* Kennerblick. https://www.kennerblick.net/spektralphotometer.html [abgerufen am: 5. Februar 2025]

PROvendis (n. d.). *Farbflop-Effekte ohne Interferenzpigmente - Kostengünstige Erzeugung von Farbflop-Effekten*. Provendis. https://provendis.info/technologien/angebot/verfahrenstechnik/farbflop-effekte-ohne-interferenzpigmente-kostenguenstige-erzeugung-von-farbflop-effekten [abgerufen am: 26. Februar 2025]

Richter, M. (1976). *Einführung in die Farbmetrik* (1. Aufl.). de Gruyter.

Rump, M., Müller, G., Sarletter, R., Koch D., Klein R. (2008). Photo-realistic rendering of metallic car paint from image-based measurements. *Eurographics*. (Vol. 27, Nr. 2). Institute for Computer Science II, University of Bonn. https://cg.cs.uni-bonn.de/backend/v1/files/publications/rump-2008-photo-realistic.pdf

Rusinkiewicz, S. M. & Stanford University. (n. d.). A new change of variables for efficient BRDF representation. In *Stanford University* [Journal-article]. https://www.cs.princeton.edu/~smr/papers/brdf_change_of_variables/brdf_change_of_variables.pdf

Sopp, S. (2017). Approximation der Parameterwerte des Ashikhmin-Shirley BRDF-Modells, zur Nachbildung gemessener BRDFs, mittels Levenberg-Marquardt Verfahren. In Technische Hochschule Mittelhessen (THM), C. Malerczyk, H. C. Arlt, & T. Kollig, *Technische Hochschule Mittelhessen (THM)*. https://publikationsserver.thm.de/xmlui/bitstream/handle/123456789/226/Masterarbeit_Sopp_Sebastian.pdf?sequence=1&isAllowed=y

TAC7 Material Scanner | X-Rite. (n. d.). X-Rite. https://www.xrite.com/categories/appearance/total-appearance-capture-ecosystem/tac7 [abgerufen am: 9. März 2025]

Torso-Verlag. (n. d.). *Wissenswertes über Glanzmessung.* Torso-Verlag. https://www.torso.de/Glanzmessung:_:61.html [abgerufen am: 11. Februar 2025]

T/R Measurement Adapter – Instrument systems. (n. d.). https://www.instrumentsystems.com/en/products/power-sources-accessories/t-r-measurement-adapter [abgerufen am: 9. März 2025]

Trempler, J. (2015). Optische Eigenschaften. In Grellmann, W., Seidler, S. (Hrsg.), *Kunststoffprüfung* (3. Aufl., S.341). Carl Hanser Verlag.

Meichsner, G. (n. d.). *Spektralphotometer*. Farbenlabor. https://colorschool.farbenlabor.de/reflexionsspektren/spektralphotometer [abgerufen am: 6. Februar 2025]

Schäfer, M. & Tran, M. H. (2018). Prozessabsicherung bei der Entwicklung lackierter Kunststoffteile - Visuelle und messtechnische Beurteilung des Erscheinungsbildes (Appearance) lackierter Bauteile. *Werkstoffe in der Fertigung,* Nr. 4, S. 18-20. https://publica-rest.fraunhofer.de/server/api/core/bitstreams/ed7d9dd6-5513-409b-bb4b-ad039f382dc8/content

Spo-Comm. (2019, Februar 25). *Gut zu wissen: Was ist OpenGL?.* Spo-Comm. https://spo-comm.de/gut-zu-wissen-was-ist-opengl/ [abgerufen am: 9. März 2025]

Tönnies, K. & Lemke, H. (1994) *3D-computergrafische Darstellungen*. Oldenburg Verlag GmbH.

Wang, H., Zhang, W., & Dong, A. (2013). Measurement and modeling of Bidirectional Reflectance Distribution Function (BRDF) on material surface. *Measurement*, *46*(9), 3654–3661. https://doi.org/10.1016/j.measurement.2013.07.008

Weidenbacher, U. (2002) *Beleuchtungsmodelle*. Universitat Ulm. https://www.yumpu.com/de/document/read/18849271/beleuchtungsmodelle-universitat-ulm

X-Rite Pantone. (2017). *Effektlackierungen – mit MA-T und EFX QC perfekt im Griff*. [Whitepaper] https://www.xrite.com/-/media/xrite/files/literature/l10/l10-500_l10-599/l10-577_mat_technical_whitepaper/l10-577_mat_technical_whitepaper-de.pdf [abgerufen am: 5. März 2025]

X-Rite Pantone. (n. d.). *User Guide for PANTORA Version 2024.2*. [Benutzerhandbuch] file:///E:/Pantora/PANTORA%20User%20Guide.pdf