



Technische Universität Berlin
Fakultät IV: Institut für Energie- und Automatisierungstechnik
Fachgebiet Lichttechnik

Masterarbeit

Bau eines Messgerätes zur Bestimmung spektraler Reflexionsgrade

Aleksandra Piotrowska 342188
Berlin, 26. Januar 2022

Betreuung: Dr. Martine Knoop
Prüfer/in Prof. Dr.-Ing. Stephan Völker
Prof. Dr.-Ing. Sibylle Dieckerhoff

Hiermit versichere ich, Aleksandra Piotrowska, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und eigenhändig sowie ohne unerlaubte fremde Hilfe und ausschließlich unter Verwendung der aufgeführten Quellen und Hilfsmittel angefertigt habe.



Berlin, den 26. Januar 2022,

Aleksandra Piotrowska

Abkürzungen und Symbole

CIE	Internationale Beleuchtungskommission (Commission internationale de l'éclairage)
λ	Wellenlänge [nm]
$\rho(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad
$\rho_{\text{dif}}(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad bei diffuser Messung
$\rho_{\text{g}}(\lambda)$	spektraler Reflexionsgrad bei gerichteter Messung
Φ_{e}	Strahlungsfluss [W]
Φ_{v}	Lichtstrom [lm]
BaSO ₄	Bariumsulfat
E_{e}	Bestrahlungsstärke [W/m ²]
E_{v}	Beleuchtungsstärke [Lux]
LED	Leuchtdiode (light emitting diode)
USB	Universal Serial Bus
DC	Gleichspannung
A	Fläche
$V(\lambda)$	Hellempfindlichkeitskurve
PWM	Pulsweitenmodulation
I_{f}	Vorwärtsstrom
AP	Arbeitspunkt
CYN	Cyan
FRD	Far Red
BLU	Blue
LME	Lime
PRP	Purple
PNK	Horticulture White
VB	Violett-blau
CSV	comma-seperated values
VBA	Visual Basic for Applications
O20	Omega 20
CAD	computer-aided design

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	6
2	Problemstellung	8
3	Theorie	9
3.1	Tageslicht	9
3.1.1	Normlichtart D65	9
3.2	Radiometrische Grundbegriffe	10
3.2.1	Reflexionsgrad	10
3.2.2	Ulbrichtkugel	10
3.3	Messung des spektralen Reflexionsgrades	10
4	Planung	11
4.1	Gesamtkonzept	11
4.2	Referenzlichtquelle	12
4.2.1	Anforderungen	12
4.2.2	Steuerung mittels Mikrocontroller	13
4.2.3	Spannungsversorgung und Peripherie	14
4.2.4	LEDs	15
4.2.5	Simulation Spektrum	16
4.2.6	Arbeitsbereiche der LEDs	17
4.2.7	Schaltungssimulation	19
4.3	Ulbrichtkugel und Gehäuse	21
5	Umsetzung	24
5.1	Aufbau der Hardware	24
5.1.1	Referenzleuchte	24
5.1.1.1	Testaufbau	24
5.1.1.2	Änderungen	25
5.1.1.3	Platinendesign	26
5.1.2	Aufbau	28
5.1.3	Ulbrichtkugel	30
5.1.4	Arduino-Code	31
5.2	Datenausgabe	32
6	Validierung	33
6.1	Testmessung Spektrum Referenzleuchte und Justierung	33
6.1.1	Messaufbau und Durchführung	33
6.1.2	Messergebnisse und Auswertung	34
6.1.2.1	Kalibrieren der Referenzleuchte	34
6.1.2.2	Stabilisierung des Spektrums	36

6.1.2.3	Einfluss der auf dem Bedienfeld lokalisierten Potentiometer .	39
6.1.2.4	Temperatureinfluss	41
6.1.2.5	Zusammenfassung	42
6.2	Vergleich mit Labormessgerät Bruins Omega 20	43
6.2.1	Vorbereitung und Konzept	43
6.2.2	Messaufbau und Durchführung	44
6.2.2.1	Materialproben	44
6.2.2.2	Versuchsdurchführung	45
6.2.3	Messergebnisse und Auswertung	48
6.2.3.1	Berechnung	48
6.2.3.2	Vergleich der Referenznormale und Schwarz-Messungen . . .	50
6.2.3.3	Messergebnisse	52
6.2.3.4	Glättung der Messwerte	58
6.3	Feldmessung	59
6.3.1	Vorbereitung und Konzept	59
6.3.2	Messaufbau und Durchführung	60
6.3.3	Messergebnisse und Auswertung	60
7	Ergebnisse	64
7.1	Messgerät	64
7.2	Technische Daten	65
8	Zusammenfassung	66
9	Fazit	67

1 Einleitung

Seit 1950 hat sich die Weltbevölkerung fast verdreifacht, wobei der größte Teil des Wachstums in Großstädten, Städten und Vororten stattfindet. Die Urbanisierung, also die Zunahme der Population im städtischen Raum, schlägt sich nicht nur in der Zunahme der Bevölkerungsdichte, sondern auch im Wachstum des städtischen Raums selbst nieder [1]. Bewohnbarkeit, Lebensqualität und ein angenehmes Ortsgefühl sind wichtige Faktoren für die Stadtplanung. Tageslicht und seine Eigenschaften können diese Faktoren maßgeblich steigern, weshalb es wichtig ist, sie bei der Planung der Bebauung neuer, expandierender Gebiete zu berücksichtigen. Tageslicht steht nicht nur kostenfrei zur Verfügung, sondern hat einen fundamentalen physiologischen Effekt auf den Menschen. Hierbei spielt nicht nur der Aspekt der Helligkeit, sondern auch die spektralen Eigenschaften des Tageslichts und die Wechselwirkungen dieser mit der Umgebung eine tragende Rolle. Im Kontext der Stadtplanung sollten daher nicht nur die spektralen Eigenschaften des Tageslichts selbst eine Rolle spielen, sondern auch die spektrale Wechselwirkung mit vorhandenen Materialien, die unter anderem über den spektralen Reflexionsgrad der Oberflächen erfassbar ist. Der Großteil derzeitiger Tageslichtsimulationsverfahren, die von Lichtplanern und Architekten eingesetzt werden, verwendet trotz der zeitlichen und räumlichen Variation der spektralen Verteilung des Tageslichts am häufigsten auf Leuchtdichte basierende Himmelsmodelle, die ohne spektrale Informationen arbeiten (CIE oder Perez Himmelsmodell) [2]. Andere Tageslichtsimulationsverfahren, die spektrale Daten des Himmels sowie der Materialien zur Erzeugung von Tageslichtdarstellungen verwenden (LARK und ALFA), liefern Ergebnisse, die von einander abweichen wie in Abbildung 1.0.1 zu sehen. Um die Unterschiede in den Herangehensweisen der von LARK und ALFA zu determinieren, ist eine korrekte Darstellung der spektralen Reflexionsgrade notwendig.

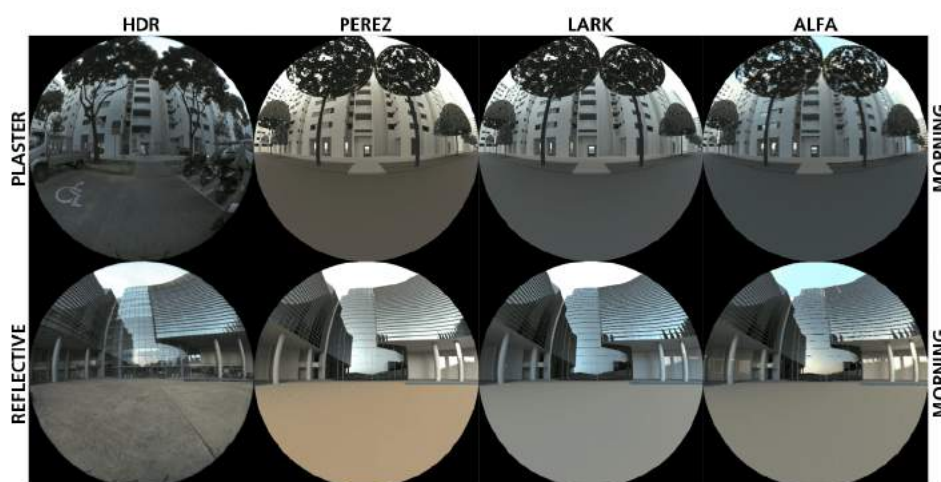


Abbildung 1.0.1: Vergleich Tageslichtsimulationsverfahren ([2], S.1195)

Since 1950 the world's population has nearly tripled with most of the growth occurring in cities, towns and suburbs. Urbanization, i.e. the increase in the population in urban areas, is

reflected not only in the increase in population density, but also in the growth of the urban area itself [1]. Habitability, quality of life, and environmental aesthetics are important factors in urban planning. Daylight and its properties can significantly increase these factors, which is why it is important to take them into account when planning the development of new, expanding areas. Daylight has a fundamental natural physiological effect on people. Not just the level of luminance, but also the spectral properties of daylight and their interactions with the environment play a major role. In the context of urban planning, therefore not only the spectral properties of daylight itself should play a role, but also the spectral interaction with existing materials, which can be recorded, among other things, via the spectral reflectance of the surfaces. The majority of current daylight simulation methods used by lighting designers and architects, despite the temporal and spatial variation of the spectral distribution of daylight, most often use luminance-based sky models that work without spectral information (CIE or Perez sky model) [2]. Other daylight simulation methods that use spectral data from the sky and material properties to generate daylight representations (LARK and ALFA) produce results that differ from one another, as can be seen in figure 1.0.1. In order to determine the differences in the approaches of LARK and ALFA, a correct representation of the spectral reflectances is necessary.

2 Problemstellung

Die Messung spektraler Reflexionsgrade ist in der Regel mit der Anschaffung eines kostspieligen, immobilen Gerätes verbunden. Ziel dieser Arbeit ist es, ein mobiles Messgerät zu konzipieren, welches den spektralen Reflexionsgrad in Abhängigkeit von der Wellenlänge im urbanen Raum messbar macht.

Der grobe Aufbau mit einer kleinen Ulbrichtkugel, einer Referenzlichtquelle und einem Spektroradiometer soll als Grundlage genutzt werden. Da die Messung Aufschluss über die vom Tageslicht hervorgerufenen spektralen Eigenschaften der Materialien geben soll, muss die Referenzlichtquelle ein Spektrum aufweisen, dass möglichst dem Spektrum des Tageslichts entspricht. Tageslicht selbst kann in der Messanordnung nicht verwendet werden, da Tageslichteinfall nicht nur großen spektralen Schwankungen sowie Schwankungen in Bezug auf Helligkeit unterliegt, sondern auch der in die entsprechende Öffnung der Ulbrichtkugel einfallende Anteil des Tageslichts für den Messaufbau zu gering wäre. Der Messaufbau erfordert daher eine elektrische Lichtquelle. Aufgrund ihres dem Normlicht D65, welches wiederum Tageslicht annähert, ähnlichen spektralen Verlaufs werden üblicherweise Xenonlampen in diesem Kontext verwendet, doch da es sich bei diesen um Gasentladungslampen handelt, die ein Vorschaltgerät zur Zündung benötigen, ist ein mobiler Aufbau ohne Netzversorgung nicht möglich.

Die Messung soll spektral aufgelöst erfolgen, hierfür wird als Messempfänger das Spektroradiometer Jeti Specbos 1201 eingesetzt. Das Messgerät soll mobil sein, daher ist eine Referenzleuchte zu wählen, welche kompakt ist und nicht vom Netz versorgt werden muss.

3 Theorie

3.1 Tageslicht

Als Tageslicht wird das Licht der Sonne, welches durch die Erdatmosphäre gefiltert auf die Erdoberfläche auftrifft, bezeichnet. Im Gegensatz zu künstlichen Beleuchtungsanlagen, welche im Allgemeinen ortsfest sind und konstante spektrale sowie räumliche Strahlungsverteilungen aufweisen, ist Tageslicht durch seine Veränderlichkeit bezüglich Raum, Zeit und relativer spektraler Strahlungsverteilung charakterisiert. Es bestehen direkte Abhängigkeiten von Tageszeit, Jahreszeit, Bewölkung und Witterungseinflüssen in Form von meteorologischen und astronomischen Parametern. Hinzu kommt, dass das wahrgenommene Tageslicht nicht nur aus dem durch die Erdatmosphäre gefilterten Sonnenlicht besteht, sondern ebenso aus den vom Himmelsgewölbe und der Umgebung erzeugten Reflexionen [3]. Aus diesem Grund ist Tageslicht im farb- oder photometrischen Kontext als Bezug nicht greifbar. Es muss daher durch ein normiertes Standard repräsentiert werden.

3.1.1 Normlichtart D65

Die internationale Beleuchtungskommission (*CIE*) hat die Normlichtart des Typs D65 klassifiziert, welche eine mittlere Tageslichtphase auf Basis von experimenteller Ermittlung repräsentiert. Ihre ähnlichste Farbtemperatur beträgt 6500 K. Abbildung 3.1.1 zeigt die relative spektrale Strahlungsleistung über dem sichtbaren Wellenlängenbereich von 380 nm - 780 nm aufgetragen. D65 bildet Tageslicht nur bedingt nach, es handelt sich vielmehr um einen Mittelwert, der bei farb- und photometrischen Berechnungen, Messungen und Prüfungen Verwendung findet.

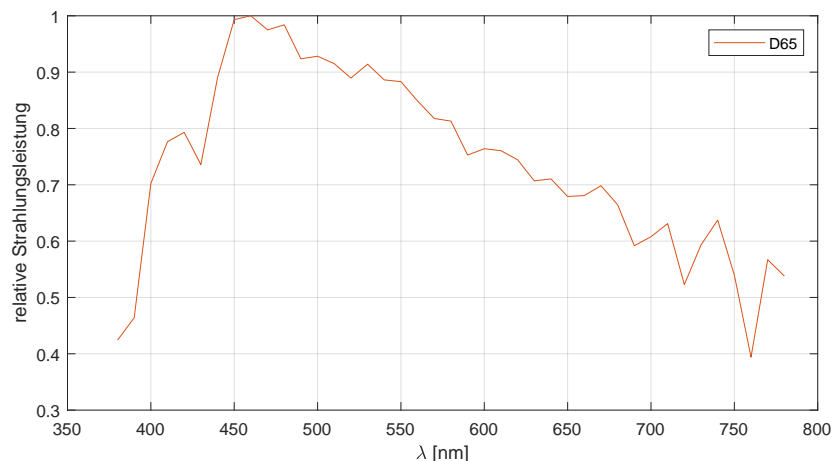


Abbildung 3.1.1: Spektrale Strahlungsverteilung des Normlichts D65 nach CIE

3.2 Radiometrische Grundbegriffe

3.2.1 Reflexionsgrad

Als Reflexionsgrad ρ eines Körpers ist der Quotient aus der von dem Körper reflektierten Strahlungsleistung und der gesamten, auf den Körper einfallenden Strahlungsleistung definiert. Mit der einfallenden spektralen Strahlungsleistung $\Phi_{\text{ein}}(\lambda)$ und der reflektierten spektralen Strahlungsleistung $\Phi_{\rho}(\lambda)$ ergibt sich für den spektralen Reflexionsgrad der grundsätzliche Zusammenhang [4] :

$$\rho(\lambda) = \frac{\Phi_{\rho}(\lambda)}{\Phi_{\text{ein}}(\lambda)} \quad (3.2.1.1)$$

3.2.2 Ulbrichtkugel

Die Ulbrichtkugel, oder auch Kugelphotometer, ist ein lichttechnisches Element, welches zur Bestimmung des Lichtstroms einer Lichtquelle eingesetzt wird. Bei der Ulbrichtkugel handelt es sich um eine Hohlkugel, die innenseitig mit einem möglichst diffus reflektierenden Material, beispielsweise BaSO_4 , beschichtet ist. Zweck der Ulbrichtkugel ist es, aus gerichteter Strahlung eine räumlich möglichst diffuse Verteilung zu erhalten und somit Richtungsabhängigkeit des einfallenden Lichts zu kompensieren. Bei der Verwendung eines Kugelphotometers für lichttechnische Messungen, müssen mehrere Elemente über Öffnungen Zugang zum Inneren der Kugel haben. In der DIN-Norm 5036 werden feste, relativ zum Kugeldurchmesser definierte Richtwerte der Öffnungsdurchmesser vorgegeben. Diese sind deutlich kleiner zu halten als der Innendurchmesser der Kugel selbst. Auch die Messgeometrien, also die Anordnung der Öffnungen sind vorgegeben. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass Messungen lichttechnischer Größen mit verschiedenen Messgeometrien vergleichbar sind.

3.3 Messung des spektralen Reflexionsgrades

Es werden die Bestrahlungsstärken E_0 (an schwarzer Öffnung), E_x (Materialprobe), sowie E_N (an Reflexionsnormal mit bekanntem Reflexionsgrad $\rho_{N,\text{dif}}$) gemessen. Für den spektralen Reflexionsgrad bei diffusem Lichteinfall gilt nach [4][3][5] die Berechnung:

$$\rho_{\text{dif}}(\lambda) = \frac{E_x(\lambda) - E_0(\lambda)}{E_N(\lambda) - E_0(\lambda)} \cdot \frac{E_N(\lambda)}{E_x(\lambda)} \cdot \rho_{N,\text{dif}} \quad (3.3.0.1)$$

Für die gerichtete Messung des spektralen Reflexionsgrades gilt nach [5]:

$$\rho_g(\lambda) = \frac{E_x(\lambda) - E_0(\lambda)}{E_N(\lambda) - E_0(\lambda)} \cdot \rho_N \quad (3.3.0.2)$$

4 Planung

In diesem Abschnitt wird die Planung als solche sowie die einzelnen Schritte zum vollständigen Konzept des Messgerätes aufgearbeitet. Nach einer kurzen Übersicht über die benötigten Komponenten wird das Konzept für die Referenzleuchte erörtert, wobei mit der Begründung der Auswahl der einzelnen LEDs begonnen wird. Eine Simulation des geplanten Spektrums wird als Hilfsmittel zur Schaltungsdimensionierung erläutert. Ebenso wird die geplante Schaltung diskutiert, sowie die dazugehörige Spannungsversorgung. Diese Aspekte werden zu einer Übersicht über den Gesamtaufbau der Referenzleuchte zusammengefasst. Es wird die Geometrie der Ulbricht'schen Kugel sowie der geplante Aufbau des Messgerätes als Ganzes betrachtet.

4.1 Gesamtkonzept

Für die Messung von spektralen Reflexionsgraden erfordert es grundsätzlich vier Komponenten. Eine Ulbrichtkugel, eine Referenzleuchte, einen Messempfänger sowie eine Materialprobe. Die Ulbrichtkugel bildet das Verbindungselement zwischen den verbleibenden Komponenten, daher benötigt diese drei Öffnungen: eine Öffnung als Fenster zur zu bemessenden Materialprobe, eine Öffnung für den Messempfänger und eine dritte Öffnung für die Referenzleuchte. Für diesen Zweck wird vom Fachgebiet eine speziell für diese Anwendung entworfene Ulbrichtkugel mittels 3D-Druck realisiert. Als Messempfänger steht das Spektroradiometer *Jeti Specbos 1201* zur Verfügung. Da eine Messung des spektralen Reflexionsgrades im sichtbaren Wellenlängenbereich erfolgen soll, ist die Anforderung an das Spektrum der Referenzleuchte, den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich spektral abzudecken. Es wird das Ziel definiert, das D65 Normlichtspektrum zu modellieren, was durch eine Überlagerung einzelner LEDs erfolgen soll. Um die einzelnen LEDs anzusteuern wird ein Arduino Mikrocontroller verwendet. Dieser hat den Vorteil, dass eine Spannungsversorgung mittels USB Kabel direkt an den zur Messung verwendeten Laptop oder über eine handelsübliche Powerbank gewährleistet werden kann.

Die Anforderungen an das zu bauende Messgerät bauen aufeinander auf. Die Kette fängt bei der Anforderung der Mobilität an. Diese schränkt die Größe der Ulbrichtkugel ein. Der Durchmesser der Ulbrichtkugel bestimmt die maximale Größe des Fensters zur Referenzleuchte, was wiederum die Anzahl der zu verwendenden LEDs einschränkt. Ebenfalls durch den Durchmesser der Ulbrichtkugel bestimmt wird der für den Messbetrieb erforderliche Lichtstrom. Der Aspekt der Mobilität schränkt die Möglichkeiten zur Energieversorgung ein. Für die Planung des Messgerätes wird sich auf folgende Ausgangsbedingungen festgelegt:

- Die Ulbrichtkugel soll möglichst klein sein
- die Spannungsversorgung soll 5 V DC betragen

4.2 Referenzlichtquelle

4.2.1 Anforderungen

Um die Referenzlichtquelle dimensionieren zu können, muss der erforderliche von ihr abgestrahlte minimale Lichtstrom berechnet werden.

Als Richtwert für die mindestens erforderliche Beleuchtungsstärke, welche im Zuge einer Messung am Materialfenster vorliegen soll, wurden $E_{v,\min} = 500 \text{ lux}$ vom Fachgebiet vorgegeben. Dies bedeutet, dass im Zuge einer beliebigen Materialmessung, das Material mindestens diese Beleuchtungsstärke zurück in die Ulbrichtkugel reflektieren soll, damit der verwendete Messempfänger ein ausreichendes Messsignal zur Verfügung hat, und so eine verlässliche Messung gewährleistet wird. Als Richtwert für den Durchmesser der Ulbrichtkugel werden zunächst $d = 20 \text{ cm}$ angenommen. Daraus lässt sich mithilfe der berechneten Innenfläche der Ulbrichtkugel ($A_{\text{UKugel}} = 2\pi r^2 = 0.063 \text{ m}^2$ mit $r = 10 \text{ cm}$) der mindeste erforderliche Lichtstrom $\Phi_{v,\min}$ für eine zuverlässige Messung berechnen. Hier gilt der allgemeine Zusammenhang:

$$E = \frac{\Phi}{A_{\text{UKugel}}} \quad (4.2.1.1)$$

Daraus ergibt sich die Berechnung:

$$\begin{aligned} \Leftrightarrow \Phi_{v,\min} &= E_{v,\min} \cdot A_{\text{U-Kugel}} \\ \Leftrightarrow \Phi_{v,\min} &= 500 \text{ lux} \cdot 0.063 \text{ m}^2 \\ \Leftrightarrow \Phi_{v,\min} &= 31.5 \text{ lm} \end{aligned} \quad (4.2.1.2)$$

Der kleinste von der Materialprobe reflektierte Lichtstrom muss also 31.5 lm betragen. Zu beachten ist jedoch, dass Lichtstrom $\Phi_{v,\min}$ eine photometrische Größe ist. Er entspricht der Strahlungsleistung E_e auf den Verlauf der menschlichen Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ bezogen. Dies bedeutet beispielhaft, dass eine rote LED eine höhere Lichtemission aufweisen muss, als eine Gelb-Grüne, um auf den selben Lichtstrom zu kommen, was bei der Auswahl der LEDs berücksichtigt werden muss. In diesem Kontext bedeutet das, dass die Strahlungsleistung der Wellenlängen an den Randgebieten der menschlichen Hellempfindlichkeitskurve bei der Berechnung schwächer gewichtet werden als beispielsweise die Strahlungsleistung bei der Wellenlänge 550 nm. Zu beachten ist ebenfalls, dass der oben berechnete minimale Lichtstrom nur den von einer Materialprobe reflektierten Lichtstrom definiert. Somit muss eine grobe Annäherung an den gesamten Lichtstrom erfolgen, die Tatsache berücksichtigend, dass er nur über einen bestimmten Wellenlängenbereich Aufschluss gibt. So wird grob angenähert, dass insgesamt das 5-fache an Lichtstrom auf die beispielhafte Materialprobe auftreffen soll, was etwa in der Größenordnung 150 lm liegt. Damit eine zuverlässige Messung mittels Spektroradiometer gewährleistet werden kann, muss die Referenzleuchte eine möglichst hohe Strahlungsleistung aufweisen. Da das mobile Messgerät von der benutzenden Person während des Messvorgangs an der Materialprobe stabilisiert werden muss, muss das Messintervall möglichst kurz gehalten werden. Da das Messintervall durch die Strahlungsleistung der Referenzleuchte bestimmt ist, wird der zuvor genannte Richtwert für den Lichtstrom von etwa 150 lm um weitere 100 lm erhöht. Es wird sich auf die Verwendung von Hochleistungs-LEDs festgelegt, da diese in diesem Bereich arbeiten. Der zu planende Gesamtlichtstrom von 250 lm stellt einen Kompromiss zwischen dem Anspruch, möglichst viel Strahlungsleistung in der Ulbrichtkugel zu erhalten, sowie

dem Anspruch, dies mit einer Betriebsspannung von 5 V DC aus einer mobilen Spannungsquelle betreiben zu können, dar.

Es wird geplant, die Strahlungsemission der einzelnen LEDs in einem bestimmten Arbeitsbereich variabel zu halten, um gegebenenfalls erforderliche Anpassungen der Strahlungsemission durchführen zu können.

4.2.2 Steuerung mittels Mikrocontroller

Für die Steuerung der Referenzlichtquelle soll der Mikrocontroller Arduino Leonardo verwendet werden. Dieser kann über eine externe Spannungsquelle mit 7 V-12 V, oder über seinen USB-Anschluss mit 5 V betrieben werden. Für die hier dokumentierte Anwendung soll der Mikrocontroller über einen mobilen Lithium-Ionen Akku, in Folgenden *Powerbank* genannt, welcher 5 V bereitstellt, am USB-Anschluss betrieben werden. Die Maße des Controllers betragen 68.6 mm x 53.3 mm bei einem Gewicht von 20 g. Dies eignet sich hervorragend für die geplante mobile Anwendung.

Der Arduino Leonardo verfügt über 20 Anschlüsse, welche als digitale Ein- oder Ausgänge genutzt werden können. Als Ausgang betrieben können diese Art von Anschlüssen entweder auf *low* (0 V) oder *high* (5 V) gesetzt werden, wobei abhängig von der Last ein maximaler Strom von 40 mA im *high*-Zustand fließt. Da die Hochleistungs-LEDs einen deutlich höheren Strom als 40 mA benötigen, werden Bipolartransistoren als stromverstärkende Elemente genutzt, welche über die Ausgänge des Arduinos angesteuert werden sollen. Somit kann das Zeitintervall, in dem die Referenzleuchte aktiv ist, genau definiert werden. Das mobile Ladegerät soll hierbei nicht nur den Mikrocontroller selbst, aber auch die die Hochleistungs-LEDs betreibenden Transistoren mit Spannung versorgen. Über den 5 V Pin ist diese am Arduino abgreifbar, wobei durch Zwischenschalten eines Kippschalters die Spannungsversorgung und somit die Betriebsbereitschaft unterbrochen werden kann.

Um die Bereitschaft der Referenzleuchte anzuzeigen, soll eine blinkende Indikator-LED über den Mikrocontroller realisiert werden. Das Aktivieren der Referenzleuchte soll über einen Taster möglich sein.

Sieben der Ausgänge des Arduino können ein pulswidenmoduliertes Signal (PWM-Signal) ausgeben, welches in vielen Anwendungen dazu genutzt wird, die Strahlungsleistung von LEDs vermeintlich zu variieren. Das Konzept der Regulierung der Strahlungsleistung über PWM besteht darin, dass nicht die Strahlungsleistung selbst variiert wird, sondern die LED einem Rechtecksignal folgend an- und abgeschaltet wird. Wird die An- und Ausschaltedauer ausreichend kurz gehalten, so nimmt das menschliche Auge die durchschnittliche Strahlungsleistung wahr. Auf diese Weise kann über die Modulation der Pulsweite zwar die durchschnittliche, jedoch nicht die absolute Strahlungsleistung variiert werden. Auf einen Messempfänger hat eine Regulierung der LEDs über Pulsweitenmodulation daher nicht den gewünschten Effekt, sondern ist eine potentielle Fehlerquelle. Aus diesem Grund wird die Strahlungsleistung der LEDs nicht direkt über den Mikrocontroller erfolgen, es wird stattdessen eine schaltungstechnische Lösung angestrebt.

4.2.3 Spannungsversorgung und Peripherie

Powerbanks werden hauptsächlich zum Aufladen von Mobiltelefonakkus verwendet, wobei es erwünscht ist, dass die Powerbank sich nach vollständiger Aufladung abschaltet. Ist der Verbraucher vollständig geladen, so reduziert sich der Stromfluss vom mobilen Akku zum Verbraucher. Unterschreitet dieser einen bestimmten Schwellenwert, so schaltet sich die Powerbank selbstständig ab. Bei der Anwendung als Energieversorgung der Referenzleuchte ist dieser Effekt unerwünscht, da bei Abschalten der Powerbank das Aktivieren der Referenzleuchte, welches durch das Auslesen eines Taster-Zustands erreicht wird, nicht möglich ist. Das Auslesen des Tasters durch den Mikrocontroller erfordert dessen eingeschalteten Betrieb. Aus diesem Grund wird eine kleine Last-Schaltung implementiert, die auch bei nicht aktiver Referenzleuchte einen geringen Stromfluss von der Powerbank beziehen soll. Um diese nicht dauerhaft durch diese Last-Schaltung zu belasten und ein vorzeitiges Entladen zu vermeiden, wird die Schaltung impulsartig über einen Ausgangspin des Arduino Mikrocontrollers an- und abgeschaltet. Da auch eine Indikator-LED verbaut werden soll, wird die Impulslast-Schaltung gleichzeitig zum Betrieb dieser genutzt. Während die Referenzleuchte in Betriebsbereitschaft ist, soll die Indikator-LED in einem gleichmäßigen 1s-an-1s-aus-Muster blinken.

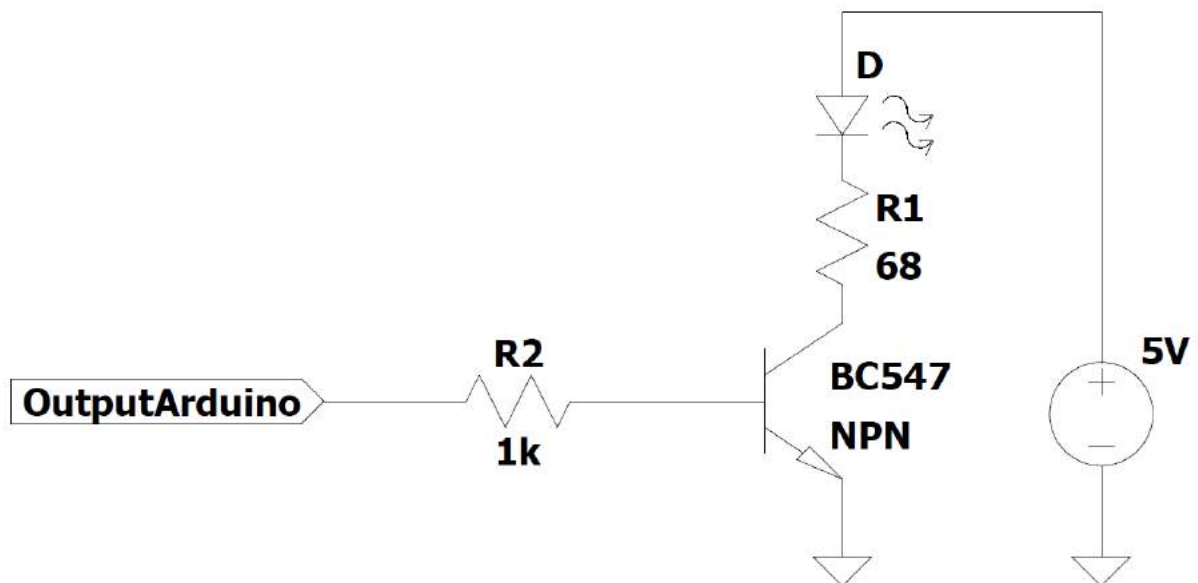


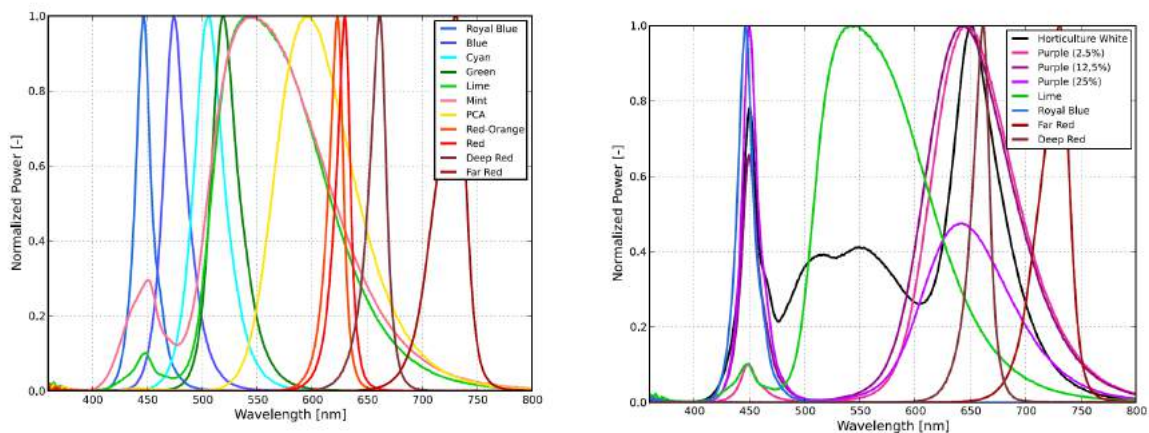
Abbildung 4.2.1: Nicht nur zum Unterbinden des automatischen Abschaltens der Powerbank, sondern auch zum Betreiben der Indikator LED wird die hier abgebildete Impulslast-Schaltung in der Gesamtschaltung der Referenzleuchte als peripheres Element implementiert.

Abbildung 4.2.1 zeigt die geplante Impulslast-Schaltung. Hierfür wird eine einfache Emitter-schaltung realisiert, bei welcher die gewünschte Indikator-LED in den Kollektor-Zweig integriert wird. Die Basis des Bipolartransistors wird an einen der Arduino Ausgänge gelegt, sodass dieser den benötigten Schaltimpuls bereitstellen kann. Die Schaltung wird über den 5V Pin des Arduino mit Spannung versorgt.

4.2.4 LEDs

In Abschnitt 4.2.1 wurde festgelegt, dass die gesamte Strahlungsleistung der Referenzleuchte im der Größenordnung von etwa 250 lm liegen soll. Es sollen Hochleistungs-LEDs eingesetzt werden. Diese liefern typischerweise einen Lichtstrom im unteren dreistelligen Bereich, was jedoch mit einer hohen thermischen Erwärmung gekoppelt ist. Für die Anwendung als Referenzleuchte werden die LEDs jedoch weder im Dauer- noch Maximalbetrieb arbeiten. Aus diesem Grund, sowie aufgrund des Anspruches, das Gerät möglichst kompakt zu konzipieren, wird auf die Verwendung von Kühlkörpern für die LEDs verzichtet.

Durch Überlagerung von LEDs mit verschiedenen spektralen Eigenschaften soll ein Gesamtspektrum erzeugt werden, dass sich möglichst über den gesamten sichtbaren Wellenlängenbereich erstreckt und dem D65-Normlicht ähneln soll. Hierfür wird sich für spezielle auf Gartenbau ausgelegte Produktreihen von Hochleistungs-LEDs (*Lumileds LUXEON 2835 Color Line* und *Lumileds LUXEON SunPlus 2835 Line*) entschieden, welche den Vorteil bestimmter Mischspektren bieten. Diese weisen stellenweise breitbandige spektrale Verläufe auf und tragen so in großem Maß dazu bei, den gewünschten Wellenlängenbereich optimal abzudecken. Abbildung 4.2.2 zeigt die normalisierten Strahlungsleistungen, auf Grundlage derer die Auswahl der zu verwendenden LEDs erfolgt ist. In Abbildung 4.2.2 (a) können die ungefähren Peak-Wellenlängen der ausgewählten einfarbigen LEDs abgelesen werden (490 - 510 nm **Cyan**, 469 - 480 nm **Blue** und 720 - 740 nm **Far Red**), in Abbildung 4.2.2 (b) können die spektralen Verläufe der gemischt farbigen LEDs abgelesen werden (**Horticulture White**, **Purple (25%)** und **Lime**). Diese haben einen Peak bei etwa 450 nm gemein. Die Prozentangabe bei der Purple-LED bezieht sich auf den in der spektralen Strahlungsleistung enthaltenen Blau-Anteil. Zusätzlich wird eine LED mit der Peak-Wellenlänge 410 nm für den violett-blauen Bereich des Herstellers *Kingbright* verwendet.



(a) Lumileds LUXEON 2835 Color Line : verwendet werden die LEDs **Cyan, Blue und Far Red**
 (b) Lumileds LUXEON SunPlus 2835 Line: verwendet werden die LEDs **Horticulture White, Purple (25%) und Lime**

Abbildung 4.2.2: Auszüge aus den Datenblättern der verwendeten Produktserien *Lumileds LUXEON 2835 Color Line* ([6] S. 6) und *Lumileds LUXEON SunPlus 2835 Line* ([7] S. 5): Darstellungen der normalisierten Strahlungsleistungen der in den Produktserien enthaltenen LEDs über der Wellenlänge

4 Planung

Als Basis für die Planung dient das D65 Spektrum, in das Stützstellen eingefügt werden, um sich an diesen bei der Modellierung des Spektrums zu orientieren. Die Wellenlängen der Stützstellen werden so gewählt, dass sie möglichst mit den ausgewählten LEDs repräsentierbar sind und möglichst über das gesamte Spektrum verteilt sind. Abbildung 4.2.3 zeigt die sieben gewählten Stützstellen im relativen Strahlungsleistungsspektrum des D65 Normlichts. Im Gegensatz zum Wellenlängenbereich von 490 nm bis 650 nm weist das Spektrum im Bereich zwischen 420 nm bis 490 nm keinen linear annäherbaren Verlauf auf, daher werden im Bereich 420 nm bis 490 nm mehr Stützstellen gesetzt, als im Bereich 490 nm bis 650 nm. Auch weist der Wellenlängenbereich von 420 nm bis 490 nm eine höhere relative Strahlungsleistung auf und ist daher stärker betont, was ein weiterer Grund für die vermehrt auftretenden Stützstellen in diesem Bereich ist.

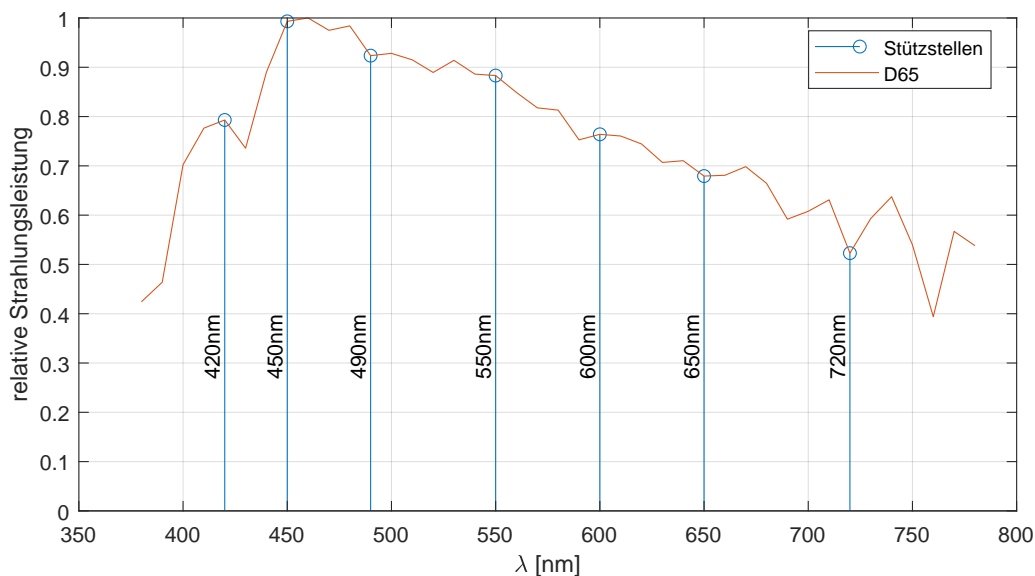


Abbildung 4.2.3: Relative Strahlungsleistung über der Wellenlänge des D65 Normlichts mit eingezeichneten Stützstellen

4.2.5 Simulation Spektrum

Der Hersteller *Lumileds* der ausgewählten LEDs stellt ein Online-Simulationstool [8] zur Verfügung, welches die Möglichkeit bietet, das Gesamtspektrum einer LED-Konstellation basierend auf den gewählten Strahlungsleistungen der einzelnen LEDs zu simulieren und wichtige Kennwerte des Gesamtspektrums, wie den Gesamtlichtstrom, die Farbtemperatur sowie den Farbwiedergabeindex ausgeben zu lassen. Abbildung 4.2.4 zeigt den Ausschnitt aus dem Simulationstool, in dem das simulierte Gesamtspektrum der ausgewählten LED-Konstellation dargestellt ist. Der Gesamtlichtstrom dieser Anordnung beträgt laut Simulationsdaten 247.5 lm.

Abbildung 4.2.5 zeigt den zum in Abbildung 4.2.4 dargestellten Graphen gehörenden Datensatz mit den einzelnen Strahlungsleistungen in lm. Die Strahlungsleistungen der LEDs Far Red und Violett-Blau sind in Watt angegeben, da sie spektral an den Rändern der Hellempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$ lokalisiert sind, und eine Angabe in Lumen daher über keine ausreichende Aussagekraft verfügt, wie bereits im Abschnitt 4.2.1 aufgegriffen wurde. Als violett-blaue LED wurde im Simulationstool eine äquivalente LED des Herstellers zu der im vorangehenden Abschnitt genannten LED ausgewählt.

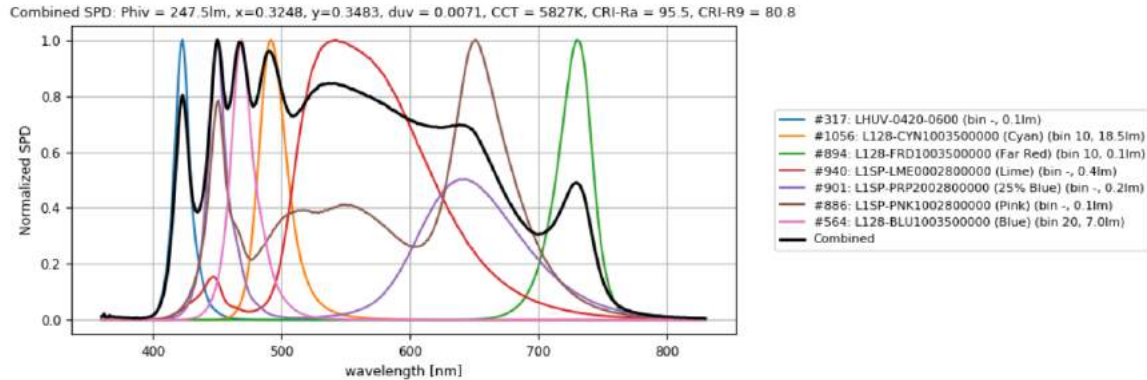


Abbildung 4.2.4: Im Simulationstool simulierte relative Strahlungsleistung über der Wellenlänge der gewählten LED-Konstellation.

	Category	Product	Color Bin	SPD File Name	Flux
Remove	LUXEON Z UV	LHUV-0420-0600	-	317	0.055
Remove	LUXEON 2835 Color	L128-CYN1003500000	10	1056	18.5
Remove	LUXEON 2835 Color	L128-FRD1003500000	10	894	0.06
Remove	LUXEON SunPlus 2835	L1SP-LME0002800000	-	940	0.39
Remove	LUXEON SunPlus 2835	L1SP-PRP2002800000	-	901	0.20
Remove	LUXEON SunPlus 2835	L1SP-PNK1002800000	-	886	0.10
Remove	LUXEON 2835 Color	L128-BLU1003500000	20	564	7
					Add

☐ Include Horticulture Calculations

Please note: Calculations are based on the corresponding typical SPD(s) on record for the selected LED(s).
If the selected product is part of the SunPlus Series, or is a UV/Violet/Royal Blue/Deep Red/Far Red/IR LED, the "Flux" column auto-fills with the corresponding typical Φ_{hiv} value [W].
If the product is a White LED, or a color LED not included in the previous list, the "Flux" column auto-fills with the typical Φ_{hiv} value [lm].

Abbildung 4.2.5: Datensatz zur simulierten Strahlungsleistung der gewählten LED-Konstellation. Aus diesem werden die Werte für die benötigten Lichtströme entnommen.

4.2.6 Arbeitsbereiche der LEDs

Über die in der Simulation ermittelten erforderlichen Strahlungsleistungen werden mithilfe der Nenn-Arbeitspunkte aus den Datenbättern der LEDs die relativen, auf den Nennbetrieb bezogenen Strahlungsleistungen ermittelt. Der Nennbetrieb der ausgewählten LEDs charakterisiert sich durch einen Vorwärtsstrom von 120 mA und einer bestimmten, in diesem Betrieb emittierten Nennstrahlungsleistung Φ_{N} . Dieser Betrieb ist mit dem relativen Strahlungsfaktor 1 gekennzeichnet. Abbildung 4.2.6 zeigt beispielhaft die Kennlinie, die zur Bestimmung der relativen Strahlungsfaktoren und somit zur Bestimmung der erforderlichen Vorwärtsströme für die LEDs Blue und Cyan genutzt wird. Zu sehen ist der über dem Vorwärtsstrom aufgetragene, normalisierte Photonenstrom, welcher direkt proportional zur Strahlungsleistung ist. Der Nennbetrieb ist in der Abbildung mit einer grauen Kennzeichnung markiert: Bei einem Vorwärtsstrom von 120 mA ist der normalisierte Photonenstrom 1 und somit auch die normalisierte Strahlungsleistung 1. Für die Cyan-LED beträgt die Strahlungsleistung im Nennbetrieb $\Phi_{\text{N}} = 30 \text{ lm}$ bei einem Vorwärtsstrom von 120 mA, benötigt werden allerdings nach der Simulation nur $\Phi_{\text{AP}} = 18.5 \text{ lm}$. Durch Quotientenbildung ergibt sich ein relativer Strahlungsfaktor von etwa 0,61. Dieser wird in der gezeigten Normalized Photon Output - Forward Current-Kennlinie gesucht und der für die Cyan-LED erforderliche Vorwärtsstrom $I_{\text{f,AP}}$ abgelesen, der

4 Planung

eben zu der 0,61-fachen Strahlungsleistung des Nennbetriebes korrespondiert. Dieser ergibt sich zu $I_{f,AP} = 61.87 \text{ mA}$. Analog dazu werden die erforderlichen Vorwärtsströme für die übrigen LEDs ermittelt. Abbildung 4.2.6 zeigt beispielhaft die Ermittlung der Vorwärtsströme für Cyan und Blue. Tabelle 4.1 beinhaltet die ermittelten Vorwärtsströme für die verbleibenden LEDs.

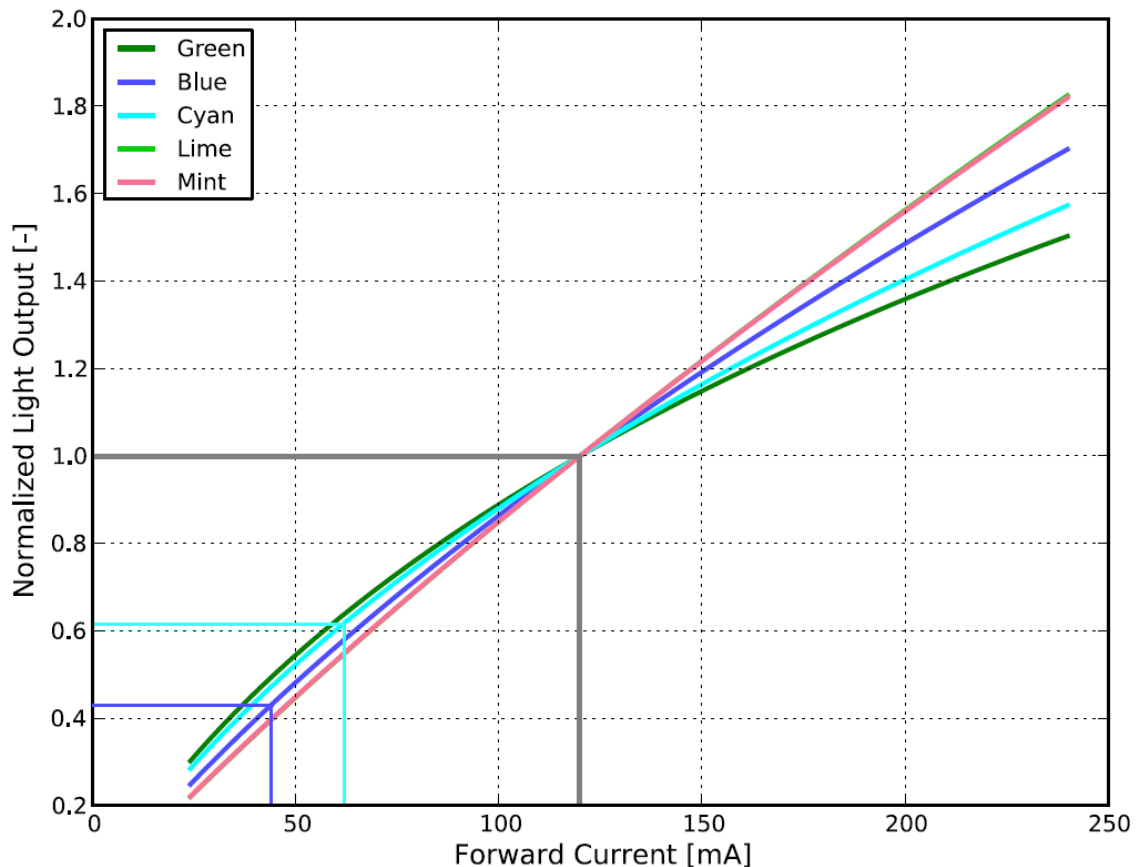


Abbildung 4.2.6: Auszug aus dem Datenblatt *Lumileds Luxeon 2835 Color Line* [4]. Ermittlung des gewünschten Vorwärtsstromes aus der *Normalized Photon Output - Forward Current*-Kennlinie exemplarisch für Cyan-LED (cyan) und Blue-LED (blau). In grau markiert ist der Nenn-Arbeitspunkt.

Für die LEDs LME und VB sind die benötigten Strahlungsleistungen Φ_{AP} signifikant größer als die Nennstrahlungsleistungen der LEDs. Da der Betrieb in einem Arbeitsbereich über dem Nennbetrieb mit thermischer Erwärmung einhergeht, werden diese LEDs in mehrfacher Ausführung eingeplant, sodass die erforderliche Strahlungsleistung auf die einzelnen LEDs aufgeteilt wird.

Zu beachten ist weiterhin, dass aufgrund Temperaturschwankungen und parasitärer Effekte die ausgearbeiteten Arbeitspunkte nicht exakt getroffen werden können. Auch können sich die Arbeitspunkte während des Betriebs aufgrund von Temperaturschwankungen ändern. Die ermittelten Arbeitspunkte bilden die Grundlage zur Schaltungsdimensionierung.

LED	Anzahl	Φ_{AP}	$\frac{\Phi_{AP}}{\Phi_N}$	$I_{f,AP}$
Cyan (CYN)	1	18,5 lm	0,61	61,87 mA
Far Red (FRD)	1	0,06 W	0,61	73,21 mA
Blue (BLU)	1	7 lm	0,4375	43,22 mA
Lime (LME)	2	2x0,195 W (0,39 W)	1,15	2x 137,27 mA
Purple 25% Blue (PRP)	1	0,2 W	1,14	134,01 mA
Horticulture White (PNK)	1	0,1 W	0,5754	68,05 mA
410nm Violett-Blau (VB)	3	3x 0,018 W (0,055 W)	1	3x 20 mA

Tabelle 4.1: Tabelle zur Bestimmung der Arbeitspunkte der verwendeten LEDs. Aus dem Quotienten der sich aus der Simulation ergebenden Strahlungsleistungen und der in den Datenblättern zu findenden Nennstrahlungsleistungen werden die relativen Strahlungsfaktoren berechnet. Aus der *Normalized Photon Output - Forward Current*-Kennlinie der LEDs lassen sich die für die gewählten Arbeitspunkte nötigen Ströme entnehmen.

4.2.7 Schaltungssimulation

Die in Tabelle 4.1 dargestellten 7 LED-Gruppen sollen jeweils von einem Ausgangs-Pin des verwendeten Mikrocontrollers angesteuert werden. Da der verwendete Mikrocontroller pro Ausgangspin einen maximalen Strom von nur 40mA bereitstellen kann, ein derartiger Strom allerdings zu gering ist, um eine Hochleistungs-LED zu betreiben, ist eine Schaltung erforderlich, welche den Ausgangsstrom des Mikrocontrollers verstärkt. Der Ausgangsstrom des Mikrocontrollers soll gleichzeitig als Steuersignal fungieren, welches einen kontaktlosen Schalter zur Aktivierung der einzelnen LED-Stränge steuert. Auf diese Weise soll gewährleistet werden, dass die einzelnen LED-Stränge über den Mikrocontroller schaltbar sind und so ein festes Zeitintervall, in dem die LEDs in Betrieb sind, definiert werden kann.

Als kontaktloser Schalter wird ein NPN-Bipolartransistor pro LED-Strang eingesetzt, der über den korrespondierenden Steuerstrom in Form des Ausgangsstroms des Mikrocontrollers gesteuert wird. Im durchgeschalteten Zustand wird der Steuerstrom durch den Bipolartransistor verstärkt. Um den Arbeitsbereich der einzelnen LEDs in einem bestimmten Bereich justieren zu können, muss der Strom durch die LED in diesem bestimmten Bereich variabel gehalten werden, was durch den Einsatz von Potentiometern erreicht wird.

Für die Simulation werden zunächst die Ausgangspins des Mikrocontrollers in Spannungsquellen umgewandelt. Ist ein Ausgangspin aktiv, liegen im Leerlauf 5 V an, im Kurzschlussfall fließt ein maximaler Strom von 40 mA aus dem Pin. Daraus ergibt sich eine Ersatzspannungsquelle mit einer Quellenspannung von 5 V und einem Innenwiderstand von 125 Ohm. Abbildung 4.2.7 zeigt exemplarisch einen einzelnen LED-Strang. Zu sehen ist in cyan eingerahmt die Ersatzspannungsquelle, die einen Ausgangspin modelliert und über zwei Widerstände an die Basis des grau eingerahmten NPN-Bipolartransistors, der als Schalter und als stromverstärkendes Element dient, geschaltet ist. Rot eingerahmt ist die 5 V bereitstellende externe Spannungsquelle, welche die in der Praxis zu nutzende Powerbank modelliert und über einen blau eingerahmten Vorwiderstand und die grün eingerahmte LED an den Kollektor-Anschluss des NPN-Transistors angeschlossen ist. Ist die LED in Betrieb, fällt über ihr eine Spannung von etwa 3 V ab, über der Kollektor-Emitter-Strecke des Bipolartransistors fallen etwa 150 mV ab. Nach der Maschenregel verbleiben für den Vorwiderstand etwa 1.85 V. Da ein maximaler Vorwärtstrom von etwa 150 mA durch die Diode fließen soll, ergibt sich ein Vorwiderstand von etwa 12.3 Ohm. Es wird

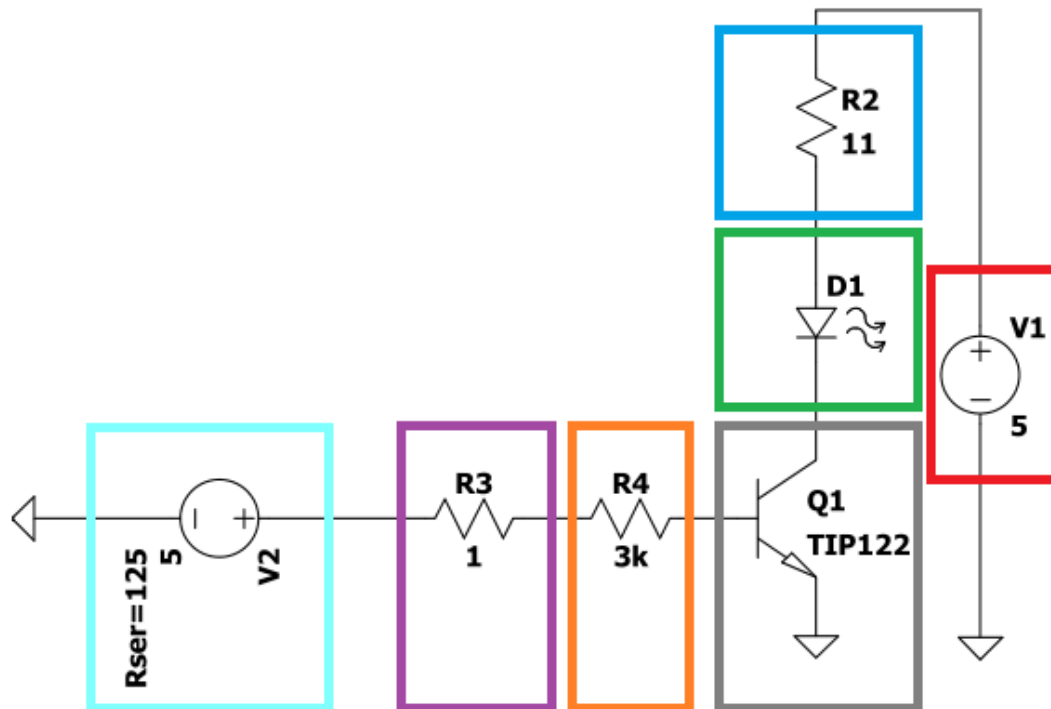


Abbildung 4.2.7: Einzelner LED Strang mit Bipolartransistor als Schalter. Die einzelnen Schaltungskomponenten sind wie folgt farblich gekennzeichnet: Ersatzspannungsquelle, die den Ausgang des Arduino modelliert (cyan), ein Potentiometer in Minimalstellung durch einen Widerstand modelliert (violett), ein Vorwiderstand zur Begrenzung des Stromflusses in die Basis des Bipolartransistors und zur Arbeitspunkteinstellung (orange), ein als kontaktloser Schalter und Stromverstärker fungierender Bipolartransistor (grau), eine LED (grün), ein Vorwiderstand zur Begrenzung des Diodenstroms (blau) und die die Powerbank modellierende 5 V Spannungsquelle.

der nächstmögliche Widerstandswert von 11 Ohm gewählt. Um die Schaltung energieeffizient zu gestalten, wird der Diodenstrom über den Stromfluss in die Basis des NPN-Transistors gesteuert. Da maximal 40 mA in die Basis fließen können und dieser Maximalbetrieb aufgrund des Energieeffizienzanspruches vermieden werden soll, wird ein Darlington-Transistor für die Schaltung verwendet. Diesen kennzeichnet, dass er sich aus zwei hintereinandergeschalteten NPN-Bipolartransistoren zusammensetzt. Hierbei wird der Emittor des ersten Transistors auf die Basis des zweiten Transistors gelegt, was zu einer Erhöhung des Stromverstärkungsfaktors führt, und was entsprechend die erforderlichen Steuerströme reduziert. Es wird der NPN-Darlington-Transistor TIP122 verwendet. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist, dass an der Basis des Transistors der komplette Arbeitsbereich des zu verwendenden Potentiometers nutzbar sein soll. Für die Dimensionierung wird in der Simulation das Potentiometer als 1 Ohm Widerstand (violett eingerahmt) dargestellt, um den maximalen Stromfluss durch die Diode zu simulieren. Um diesen maximalen Strom zu begrenzen, und so den Arbeitsbereich der Diode zu definieren und zu stabilisieren, wird ein zusätzlicher Vorwiderstand (orange eingerahmt) an die Basis in Reihe zum Potentiometer geschaltet. Da die eingesetzten LEDs und ihre jeweiligen Arbeitspunkte nicht identisch sind, unterscheiden sich die Widerstandswerte von Diodenstrang zu Diodenstrang. Abbildung 4.2.8 zeigt alle 7 LED Stränge mit der farblichen Kennzeichnung

der oben beschriebenen Funktionsgruppen.

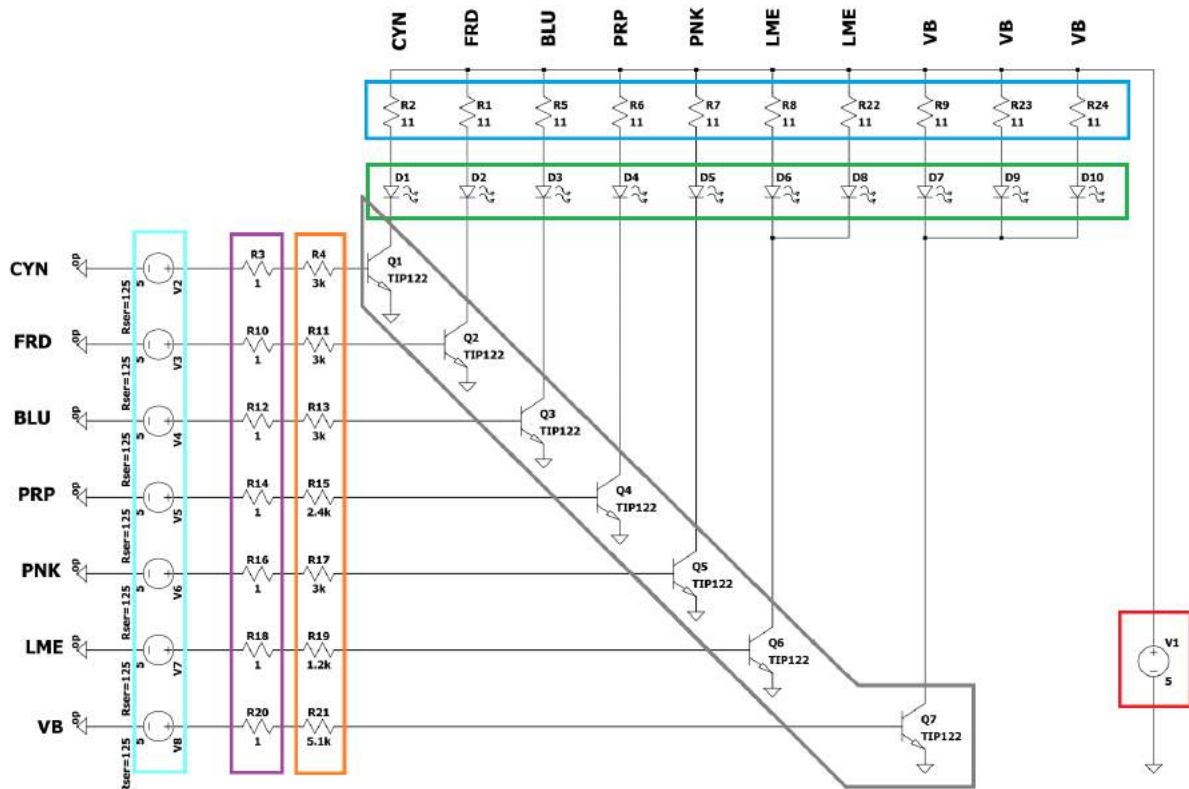


Abbildung 4.2.8: Gesamtkonzept 7 LED-Stränge

4.3 Ulbrichtkugel und Gehäuse

Eine Ulbrichtkugel wird für den Zweck des Messgerätes gemäß DIN 5036 mittels 3D-Drucker am Fachgebiet für Lichttechnik gedruckt. Abbildung 4.3.1 zeigt die Darstellung des schematischen Aufbaus, welche der DIN Norm entnommen wurde. Zu beachten ist, dass die Öffnungen der Kugel durch den Durchmesser der Kugel bestimmt sind. Der Durchmesser des Probenfensters d_1 soll $D/2$ betragen, wobei D den Durchmesser der Ulbrichtkugel bezeichnet. Der Durchmesser d_2 bezeichnet den Durchmesser des Diffusors, der bündig mit der Kugelinnenwand zu befestigen ist und hinter dem sich der Messempfänger befinden soll. d_2 darf $0,1 \cdot D$ nicht überschreiten. Auch ist die Anordnung der an der Kugel montierten Komponenten vorgegeben. Weder das Spektroradiometer, noch die Referenzleuchte dürfen direkt auf die zu bemessende Probe gerichtet sein. Aus diesem Grund müssen die Strahlungswege beider Komponenten mittels speziell für diesen Zweck erstellten Schattlern abgeschirmt werden. Die Ulbrichtkugel soll von innen maximal diffus reflektierend sein [5]. Dies wird durch das Lackieren des Inneren der Kugel mit BaSO_4 haltiger Farbe erreicht. Der Kugel wird ein Durchmesser von 150 mm zugewiesen. Daraus ergibt sich der Durchmesser der Probenöffnung (75 mm). Der Durchmesser der Diffusorscheibe ist durch den zu verwendenden Messempfänger Jeti Specbos 1201 gegeben und beträgt 9 mm. Dies erfüllt die Vorgaben, zu beachten ist jedoch, dass die Öffnung, die erforderlich ist, um den Empfänger bündig zur Kugelwand anzubringen 29 mm groß sein muss. Für die Referenzleuchte, welche ebenfalls bündig zur Kugelwand montiert werden soll, wird eine 22 mm große Öffnung bereitgestellt.

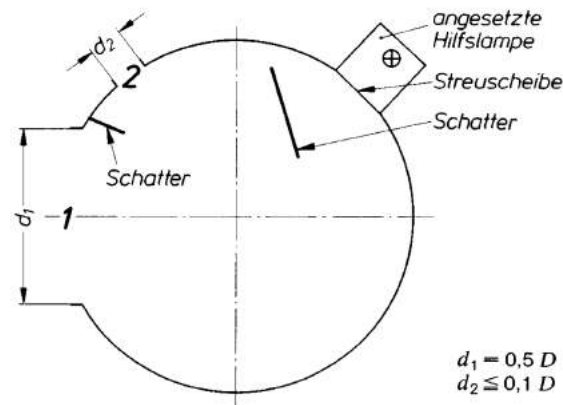


Abbildung 4.3.1: Nach DIN 5036 definiertes Schema für eine Ulbrichtkugel zur Messung des Reflexionsgrades bei diffusem Lichteinfall ([5]S. 3).

Abbildungen 4.3.2 und 4.3.3 zeigen Darstellungen aus der CAD-Software, mit welcher die Ulbrichtkugel und das benötigte Gehäuse für die Referenzleuchte konstruiert worden sind. In Abbildung 4.3.3 sind die signifikante Komponenten gekennzeichnet. Diese sind in Tabelle 4.2 erläutert. Die Kugel soll in zwei Teilen gedruckt werden. Die Gehäusekomponenten sollen ebenfalls separat gedruckt werden.

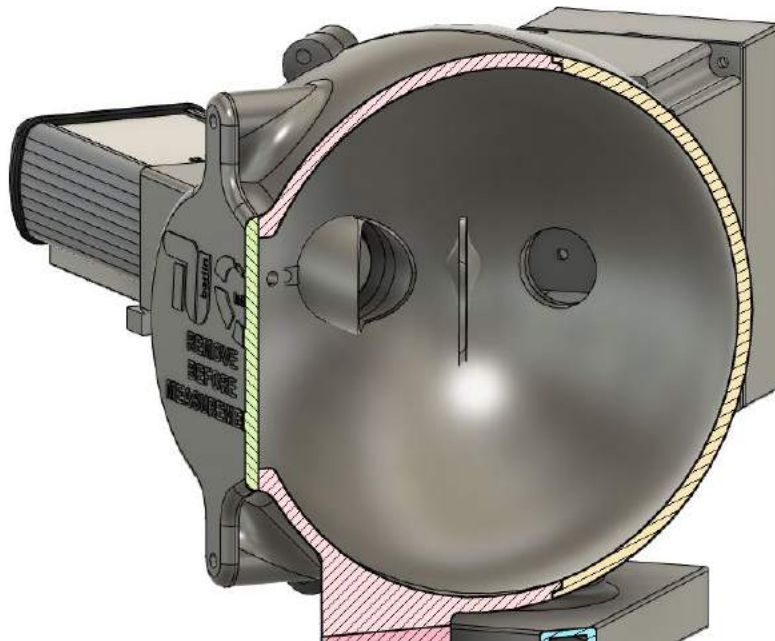


Abbildung 4.3.2: Ausschnitt aus dem CAD Modell: Zu sehen sind die Öffnungen für die Referenzleuchte (rechts), welche durch einen Schatter vom Messempfänger (linke Öffnung) abgekoppelt ist. Die Öffnung für den Messempfänger ist durch einen weiteren Schatter vom Materialfenster abgekoppelt. Zu sehen ist die mit einer TU-Prägung versehene Kunststoffflasche, welche durch aufbringen von BaSO_4 -haltiger Farbe als Referenznormal gelten soll.

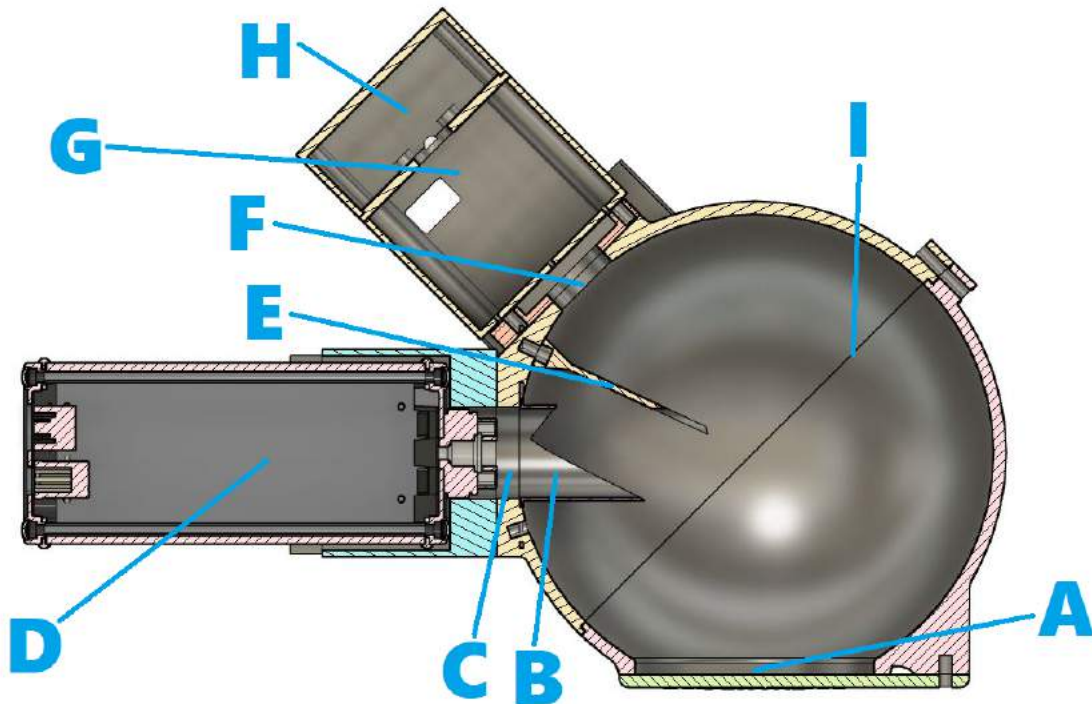


Abbildung 4.3.3: Ausschnitt aus dem CAD-Modell: Querschnitt des durch das Fachgebiet für Lichttechnik realisierten Kugelphotometers. Die Messgeometrie folgt DIN 5036 für eine Ulbrichtkugel mit Beleuchtungseinrichtung für diffusen Lichteinfall mit Referenzleuchte an der Kugelwand zur diffusen Messung vom spektralen Reflexionsgrad.

Bezeichnung	Erläuterung
A	Probenfenster mit montiertem Kunststoffverschluss
B	Schatter zum optischen Entkoppeln des Messempfängers vom Materialfenster
C	Diffusor-Aufsatz des Messempfängers
D	Messempfänger Jeti Specbos 1201
E	Schatter zum optischen Entkoppeln der Referenzleuchte vom Materialfenster sowie vom Messempfänger
F	Öffnung zum Einbau der Referenzleuchte
G	Gehäuse für Arduino und Platine A mit Öffnung für USB Anschluss (weiß)
H	Gehäuse für Bedienelemente (Kippschalter, Taster und Potentiometer)
I	Verbindungs-Achse der zwei Kugelhälften

Tabelle 4.2: Erläuterung der in Abbildung 4.3.3 gekennzeichneten Komponenten der Ulbrichtkugel mit Gehäusekomponenten.

5 Umsetzung

5.1 Aufbau der Hardware

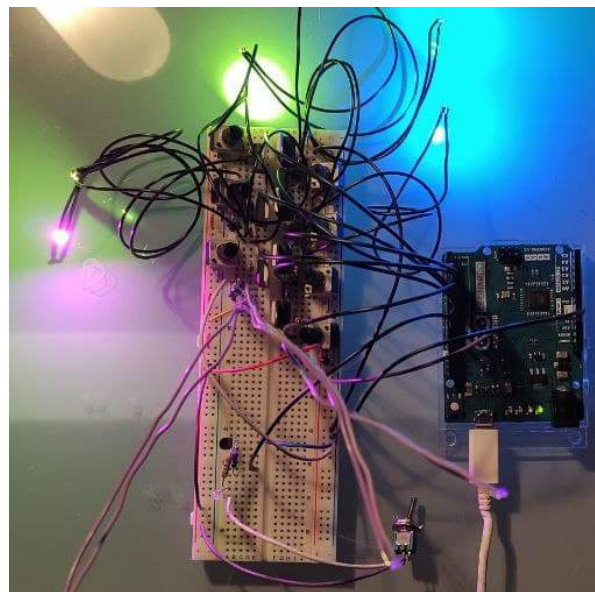
5.1.1 Referenzleuchte

5.1.1.1 Testaufbau

Um einen Testaufbau auf dem Steckbrett zu ermöglichen, müssen die LEDs zunächst mit Leitungen versehen werden. Hierbei muss vorsichtig vorgegangen werden, da nicht nur die LEDs selbst eine erhöhte Temperaturempfindlichkeit aufweisen, sondern auch die aus Kunststoff bestehenden Gehäuse. Die LEDs des Herstellers *Kingbright* bestehen nach Herstellerangabe aus dem temperaturbeständigen Silikonharz, zu den LEDs des Herstellers *Lumileds* gibt es keine Materialangabe. Beide Hersteller empfehlen das Reflow-Lötverfahren mit einer Maximaltemperatur von 260°C, bei dem zunächst Weichlotpaste vor der Bestückung auf die Platine aufgetragen wird und der Lötvorgang selbst auf einer sich erhitzenden Platte oder in einem Lötoven erfolgt. Das Anbringen der Leitungen erfolgt mithilfe eines Lötkolbens. Die Löt-dauer muss möglichst kurz gehalten werden, um eine thermische Zerstörung der LEDs zu vermeiden. Hierfür wird vermehrt auf die Verwendung von Flussmittel zurückgegriffen.



(a) Verwendete High-Power-LEDs in SMD Bauform 3,5 mm x 2,8 mm und 2 mm x 1,25 mm (Stift als Maßstab)



(b) Testaufbau auf dem Steckbrett

Abbildung 5.1.1

Nach erfolgreichem Anbringen der Leitungen wird der Aufbau auf einem Steckbrett aufgebaut (Abbildung 5.1.1 (b)) und in Betrieb genommen. Ein einfacher Arduino-Code lässt die LEDs für ein kurzes Zeitintervall leuchten. Nachdem die Schaltung der Referenzleuchte sowie ihrer Peripherie auf dem Steckbrett auf ihre Funktionalität hin überprüft wurde, wird sie auf eine Lochrasterplatine übertragen. Hierbei werden die Bedienelemente separat von der verbleibenden Peripherie getrennt. Es ergibt sich der Aufbau wie in Abbildung 5.1.2 zu sehen.

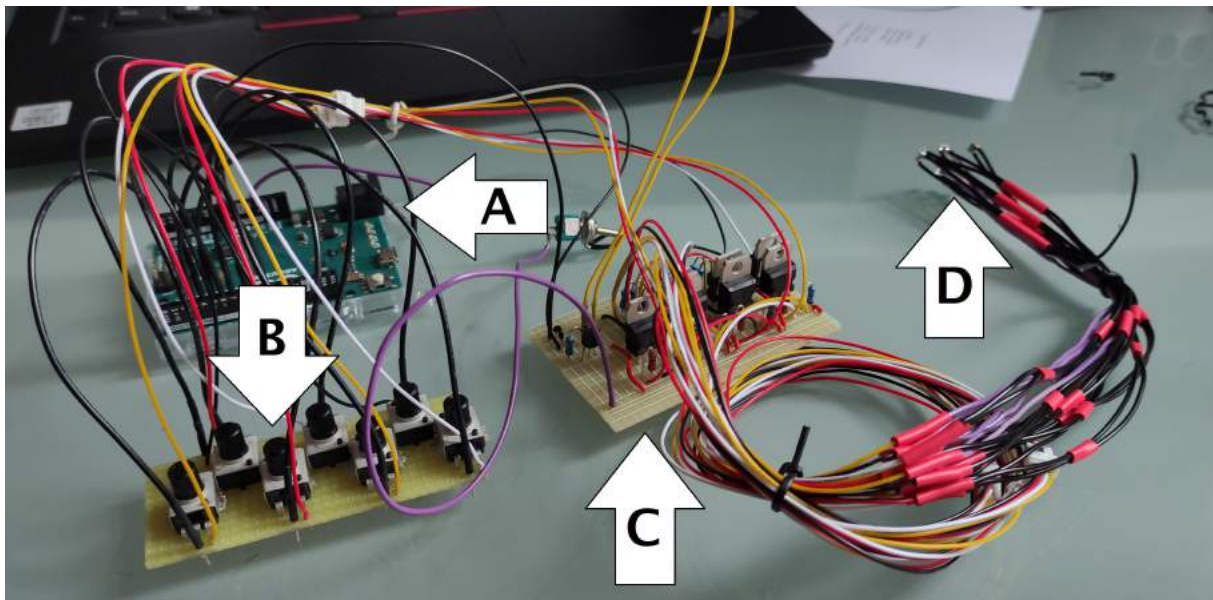


Abbildung 5.1.2: Testaufbau mit Lochrasterplatten. Die Komponenten Arduino Leonardo Mikrocontroller (A), Bedienfeld (B), Transistorschaltungen der LEDs (C) und die LEDs (D) sind mit Pfeilen gekennzeichnet.

5.1.1.2 Änderungen

Im Rahmen der Betrachtung und Auswertung des Testaufbaus wurden einige Änderungen an der die LEDs betreibenden Schaltung vorgenommen. Der Arbeitsbereich der LEDs wird durch die verwendeten 100 kOhm Drehpotentiometer zu weit ausgedehnt, auch sind die berechneten Arbeitspunkte an keiner signifikanten Drehstellung der einzelnen Potentiometer verortet, sodass ein Verstellen dieser dazu führt, dass der zuvor eingestellte Arbeitspunkt nicht ohne weiteres wieder einstellbar ist.

Die einzelnen LEDs sollen zwar auf einen bestimmten Arbeitspunkt ausgelegt werden, jedoch soll weiterhin die Möglichkeit eines Nachjustierens bestehen. Dies wird über Potentiometer und Trimmer erzielt. Die Trimmer sollen nicht nur die im Abschnitt 4.2.7 definierten Vorwiderstände ersetzen, sondern dienen auch zum Einrichten des Arbeitspunktes auf die Mittenstellung der für die anwendende Person zugänglichen Potentiometer. Über die Trimmer ist eine feste Eichung der Referenzleuchte möglich, über die Potentiometer können feine Einstellungen zum Nachjustieren vorgenommen werden, wobei die LEDs durch die als Vorwiderstand dienenden Trimmer vor zu hohen Strömen geschützt sind.

LED	$(R_{v,AP} - R_{v,min}) = \Delta R [\Omega]$	$\rightarrow R_{pot,center} [\Omega]$	$\rightarrow R_{trim} [\Omega]$
CYN	6,535k - 3k = 3,535k	2,5k ($\rightarrow R_{pot} = 5k$)	$R_{v,min} + 1,035k$
FRD	5,45k - 3k = 2,45k	2,5k ($\rightarrow R_{pot} = 5k$)	$R_{v,min} - 0,05k$
BLU	9,3k - 3k = 6,3k	5k ($\rightarrow R_{pot} = 10k$)	$R_{v,min} + 1,3k$
PRP	2,89k - 2,4k = 0,49k	0,5k ($\rightarrow R_{pot} = 1k$)	$R_{v,min} - 0,01k$
PNK	5,85k - 3k = 2,85k	2,5k ($\rightarrow R_{pot} = 5k$)	$R_{v,min} + 0,35k$
LME	1,36k - 1,2k = 0,16k	0,25k ($\rightarrow R_{pot} = 0,5k$)	$R_{v,min} - 0,09k$
VB	6,4k - 5,1k = 1,3k	0,5k ($\rightarrow R_{pot} = 1k$)	$R_{v,min} + 0,8k$

Tabelle 5.1: Der Arbeitspunkt soll auf die Mittenstellung der Potentiometer gelegt werden, jedoch darf $R_{v,min}$ nicht unterschritten werden. ΔR bezeichnet den zur Verfügung stehenden Widerstandsbereich für die Potentiometer in Mittenstellung. Da Potentiometer nur in bestimmten diskreten Werten zur Verfügung stehen, werden Trimmer verwendet, um die Differenz zwischen benötigtem $R_{pot,center}$ und den realen Potentiometerwiderständen in Mittenstellung auszugleichen. Die Trimmer-Widerstände werden anschließend mit $R_{v,min}$ zusammengefasst.

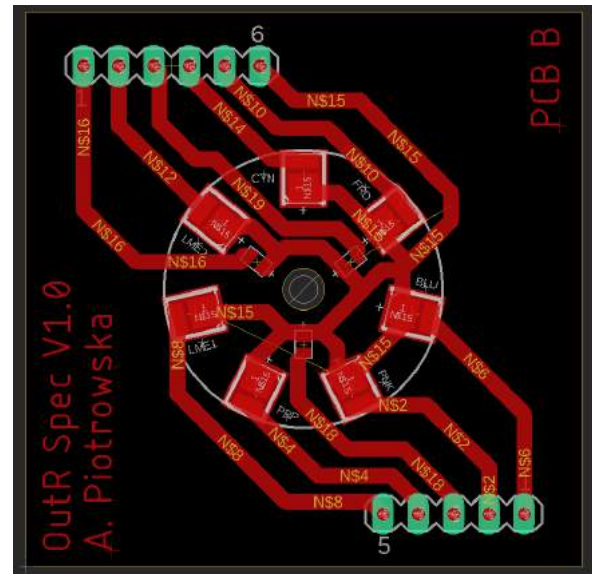
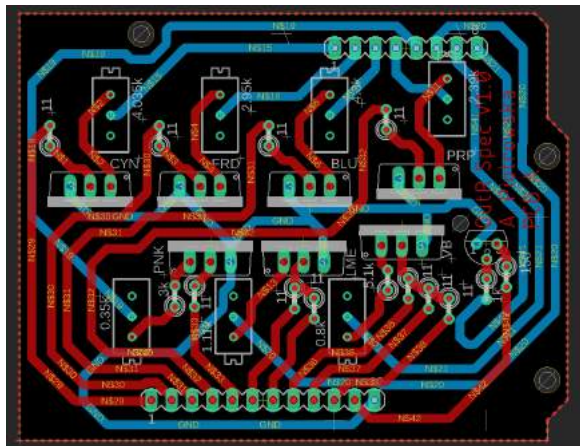
Dadurch, dass die LEDs auf verschiedene Arbeitspunkte ausgelegt sind und diese auf die Mittenstellung der Potentiometers gelegt werden sollen, können nicht für alle LEDs die selben Widerstandswerte der Potentiometer gewählt werden. Tabelle 5.1 visualisiert die Berechnung der benötigten Potentiometer. Die Widerstandswerte der Trimmer werden zum Ende mit den Vorwiderständen zusammengefasst, außer bei den Strängen PNK und VB. Hier werden die Vorwiderstände als fest verbaute Widerstände erhalten, um Trimmer in einer kleineren Größenordnung verwenden zu können, welche sich feiner einstellen lassen. Bei den LEDs FRD, PRP und LME muss der Vorwiderstand geringfügig verringert werden, um das Einstellen der Mittenstellung der Potentiometer auf den Arbeitspunkt realisieren zu können. Da die Vorwiderstände für maximale Vorwärtsströme von etwa $I_f = 150 \text{ mA}$ dimensioniert wurden, stellt dies kein Problem dar, da diese Größenordnung weiterhin weit unterhalb der vom Hersteller angegebenen Betriebsgrenze liegt. Es werden Trimmer in der Größenordnung 1 kOhm und 5 kOhm eingesetzt.

Im Zuge der Validierung stellt sich der Widerstandsbereich der verwendeten Trimmer als zu schmal heraus. Es werden alle verwendeten Trimmer gegen 100 kOhm -Trimmer ausgetauscht, die Dimensionierung der Potentiometer bleibt jedoch erhalten.

5.1.1.3 Platinendesign

Um einen einfachen Einbau der Referenzleuchte in ein Gehäuse sowie eine Montage der LEDs bündig zur Kugelfinnenwand gewährleisten zu können, ist es erforderlich, Platinen zu entwerfen. Es wird entschieden, separate Platinen für die geplanten Schaltungen (Platine A) und für die LEDs (Platine B) auszuarbeiten. Die der das Messgerät benutzenden Person zugänglichen Bedienelemente in Form des Kippschalters, des Tasters sowie der Potentiometer werden direkt an eine der Gehäusewände montiert. In Abbildung 5.1.3 sind die Layouts der zwei entworfenen Platinen zu sehen.

Der Umriss von Platine A wird an den Umriss des verwendeten Arduino-Leonardo Mikrocontrollers angepasst (68.6 mm x 53.3 mm), sodass die Platine direkt an den Mikrocontroller mithilfe von Montageschrauben und Abstandshaltern angebracht werden kann und so ein platzsparender Einbau in das Gehäuse ermöglicht wird. Aufgrund des limitierten Platzes auf der Platine



(a) Platine A mit der Peripherie der LED- Schaltung- (b) In die Ulbrichtkugel zeigende Platine B. Die LEDs sind in einem Kreis von 22 mm Durchmesser angeordnet. Die roten Leiterbahnen befinden sich auf der oberen Leiterbahnebene, die blauen stellen die umseitig net. lokalisierten Leiterbahnen dar.

Abbildung 5.1.3: In *Autodesk Eagle* entworfene Platinen-Layouts

wird diese mit einer weiteren Leiterbahnebene auf ihrer Rückseite versehen. Platine B (40 mm x 40 mm) soll aus Aluminium hergestellt werden, um gleichzeitig die Funktion eines Kühlkörpers zu übernehmen. Da ein Teil der Platine in das Innere der Ulbrichtkugel zeigen wird, ist es notwendig, dass die Oberfläche der Platine weiß ist. Die Herstellung der Platine aus Aluminium erlaubt nur eine Leiterbahnen tragende Ebene. Da Aluminium ein Leiter ist, muss bei der Montage der Stiftleiste darauf zu achten, dass keine Kurzschlüsse mit der Platine entstehen. Der Lötprozess wird auf der Aluminium Leiterplatte erschwert aufgrund der Wärmeleitfähigkeit des Materials. Abbildung 5.1.4 zeigt die fertigen Platinen.

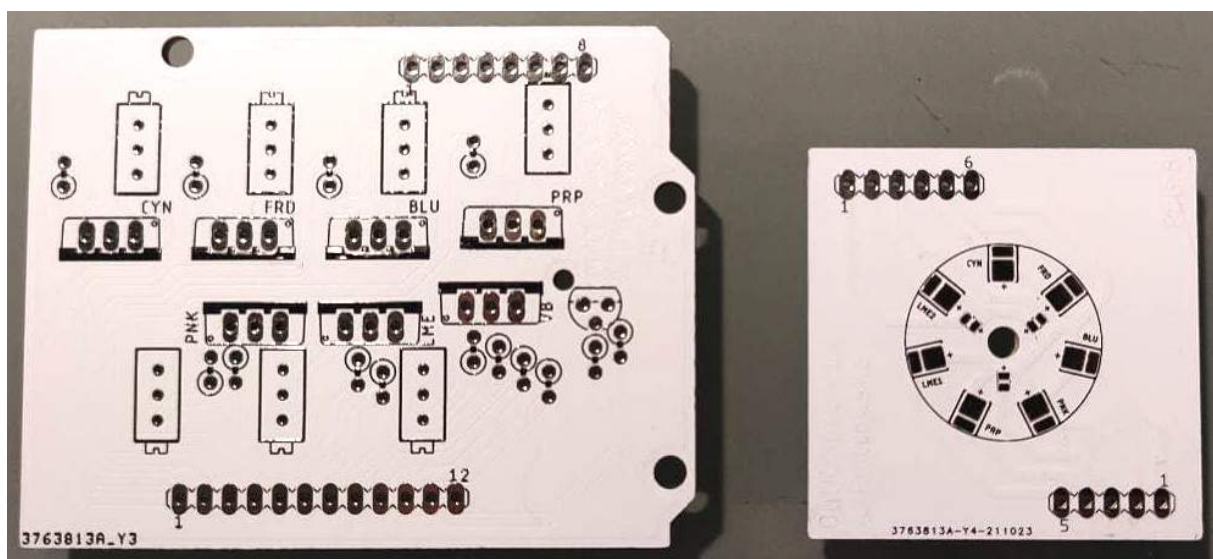


Abbildung 5.1.4: Fertige Platinen

5.1.2 Aufbau

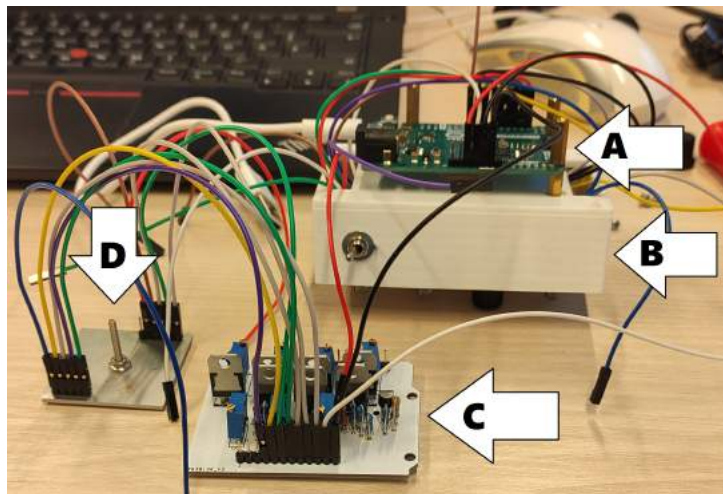
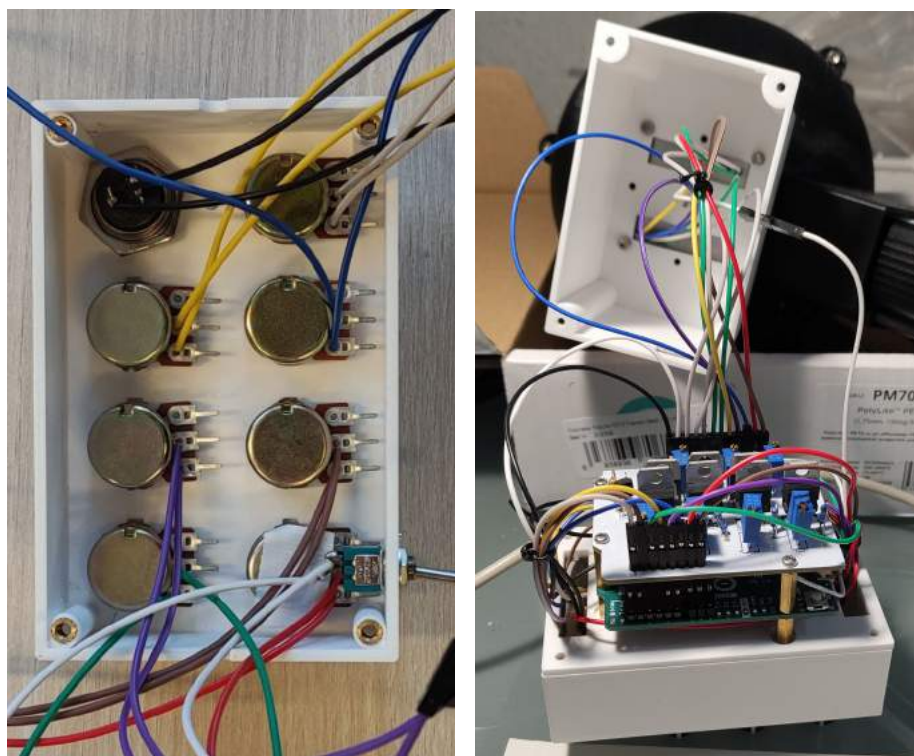


Abbildung 5.1.5: Aufbau mit Platine und Teilen des Gehäuses. Die Komponenten Arduino Leonardo Mikrocontroller (A), ins Gehäuse eingebautes Bedienfeld (B) aus Abbildung 5.1.6 (a), Transistorschaltungen der LEDs und Peripherie (C) und die LED-Platine (D) sind mit Pfeilen gekennzeichnet.

Abbildung 5.1.5 zeigt die aus 5.1.2 bekannten Komponenten des Gesamtaufbaus in endgültiger Ausführung.



(a) Ins Gehäuse eingebaute Bedienelemente (Potentiometer, Taster und Kippschalter) (b) In die Ulbrichtkugel zeigende Platine B. Die LEDs sind in einem Kreis von 22 mm Durchmesser angeordnet.

Abbildung 5.1.6

Abbildung 5.1.6 (a) zeigt die ins Gehäuse eingebauten Bedienelemente. Dieser Gehäuseteil ist in Abbildung 5.1.6 (b) als weißer Kasten wiederzufinden, auf dem der Mikrocontroller und Platine A verschraubt sind. Die Rückseite der Platine B ist in Abbildung 5.1.6 (b) im oberen weißen Gehäuseteil, welcher an die Ulbrichtkugel montiert ist, zu sehen. Abbildung 5.1.7 (a) zeigt Platine B nach der Bestückung. Die eingereiste Zone der Platine zeigt in die Ulbrichtkugel. Die Platine wird über eine mittige Schraube an einen kleinen Rahmen und den weißen Gehäuseteil aus Abbildung 5.1.6 (b) montiert. Über vier Schrauben wird dieser mitsamt der Platine an die in Abbildung 5.1.7 (b) zu sehende Position der Ulbrichtkugel angebracht. Im Testbetrieb und während der Justierung wird der Aufbau wie in 5.1.6 (b) beibehalten, um Zugang zu den Trimmern auf Platine A zu haben.



(a) Bestückte Platine B



(b) Für Platine B bestimmte Öffnung an der Ulbrichtkugel.

Abbildung 5.1.7

5.1.3 Ulbrichtkugel



(a) Ausgedruckte Ulbrichtkugel in 2 Teilen. Die Schatter wurden separat gedruckt und sind mittels Schrauben fixiert. (b) In die Ulbrichtkugel zeigende Platine B. Die LEDs sind in einem Kreis von 22 mm Durchmesser angeordnet.

Abbildung 5.1.8

Abbildung 5.1.8 (a) zeigt die in 2 Teilen 3D-gedruckte Ulbrichtkugel mit befestigten Schattern. Die Kugel selbst wurde aus schwarzem Material gedruckt, um Lichteinfall durch das Material zu verhindern. Die Schatter wurden in weiß gedruckt, da diese schlussendlich weiß lackiert werden müssen. Bevor die BaSO_4 -haltige Farbe in den beiden Kugelhälften aufgetragen wird, werden zunächst die Schatter entfernt. Jede der zu streichenden Komponenten wird zunächst mit einer Lage Haftgrund versehen, um ein Haften der Farbe auf dem Material zu gewährleisten. Es muss das Kugellinnere, die Schatter sowie eine Materiallasche, welche als Referenznormal eingesetzt werden wird, mit BaSO_4 -haltiger Farbe gestrichen werden. Abbildung 5.1.8 (b) zeigt das Referenznormal nach der ersten Lage des Anstrichs. Auf alle Komponenten sind insgesamt 4 Lagen BaSO_4 -haltiger Farbe aufgetragen worden. Nach Zusammenbau der Kugel wird die Verbindungslinie der Kugelhälften mehrfachen Anstrichen unterzogen. Abbildung 5.1.9 (a) zeigt die Verbindungslinie der Kugelhälften. Die fertig angestrichene und montierte Kugel ist in Abbildung 5.1.9 (b) zu sehen. Die überstrichene Verbindungslinie ist nur noch schwach angedeutet. Die Photographie ist mit Blitzlicht aufgenommen worden, um die Reflexionseigenschaften des Anstrichs beobachten zu können.



(a) Verbindungslinie nach Zusammenbau der Kugel-
hälften

(b) In die Ulbrichtkugel zeigende Platine B. Die LEDs
sind in einem Kreis von 22 mm Durchmesser angeord-
net.

Abbildung 5.1.9

5.1.4 Arduino-Code

Grundsätzlich ist ein einfacher endlicher Automat mit zwei möglichen Zuständen zu implementieren. Abbildung 5.1.10 zeigt das den Automaten beschreibende Zustandsdiagramm. Der Grundzustand des Automaten ist Zustand A (*warten*). Hierbei blinkt die im Impulslast-Kreis geschaltete Indikator-LED langsam, was nicht nur den Zweck den Warten-Zustand anzuzeigen hat, sondern auch das automatische Abschalten der Powerbank verhindert. Wird der Taster betätigt, so geht der Automat in den Zustand B (*messen*) über. Dieser besteht aus einem Programmablauf, welcher mit einem schnellen Blinken (5x) der Indikator-LED beginnt und mit dem Aufleuchten der als Referenzleuchte dienenden LEDs für ein bestimmtes Betriebsintervall (30 s) endet. Ist der Ablauf abgeschlossen, so geht der Automat wieder in den Zustand *warten* über.

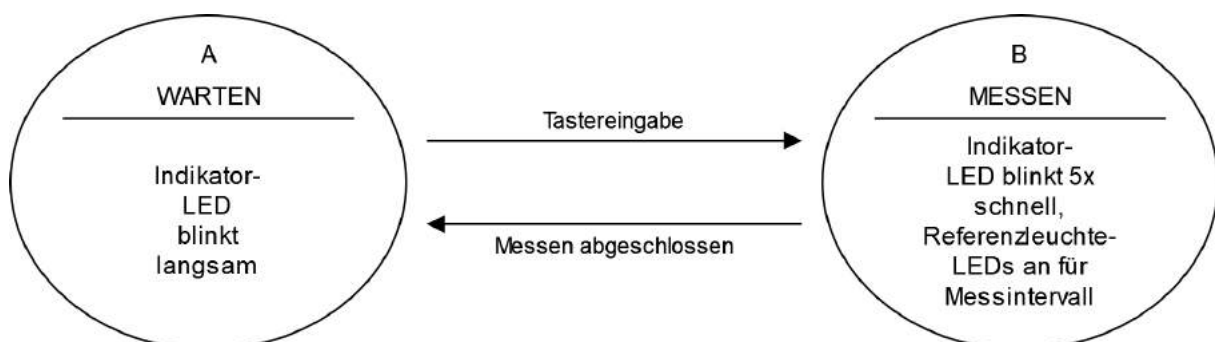


Abbildung 5.1.10: Zustandsdiagramm des zu implementierenden endlichen Automaten

5.2 Datenausgabe

Über Jeti LiVal, die Messsoftware des Jeti Specbos 1201, sind die aufgenommenen Messdaten als CSV (comma-separated values) für eine weitere Verarbeitung exportierbar. Hierbei können die Daten zu allen innerhalb einer Sitzung aufgenommenen Messungen in einer einzelnen Datei gespeichert werden. Aus diesen Messdaten sollen über eine automatisierte Verarbeitung die gemessenen spektralen Reflexionsgrade ausgegeben werden. Hierfür soll eine Benutzeroberfläche erstellt werden, mit der die das Messsystem benutzende Person die automatisierte Verarbeitung der durch Jeti LiVal bereitgestellten Messdaten ausführen kann. Nach der Vorgabe des Fachgebiet wird hierfür Microsoft Excel verwendet. Die Skriptsprache *Visual Basic for Applications* (VBA) erlaubt es, automatisierte Abläufe und Berechnungen zu programmieren und diese innerhalb der Microsoft Office Umgebung auszuführen. Es wird also eine Arbeitsmappe in Microsoft Excel erstellt, welche die auszuwertende CSV importiert, die Berechnung der spektralen Reflexionsgrade umsetzt und diese als Datensätze sowie als Graphen innerhalb der Microsoft Office Umgebung zurückgibt.

6 Validierung

Das aufgebaute Messgerät wird nun messtechnisch auf seine Eigenschaften hin untersucht. Zunächst wird das Spektrum sowie die Bestrahlungsstärke der Referenzleuchte gemessen und Stellen im Spektrum, welche ein Nachjustieren erfordern, identifiziert und ausgebessert. Anschließend wird die Stabilität des Spektrums untersucht und korrigiert. Es wird der Einfluss der auf dem Bedienfeld befindlichen Potentiometer betrachtet, sowie die Temperaturabhängigkeit des Systems als Ganzes beleuchtet. Mit den erarbeiteten Ergebnissen wird zu einer Vergleichsmessung von spektralen Reflexionsgraden mit einer nicht-mobilen Messanordnung der Technischen Universität Berlin übergeleitet. Bei dem hierfür verwendeten Messsystem handelt es sich um das *Omega 20* von Bruins Instruments.

Das Konzept der Vergleichsmessung, der Messaufbau und die Durchführung werden konkretisiert und die Auswahl der zu bemessenden Test-Materialien begründet. Die von den verschiedenen Messsystemen aufgenommenen Messungen werden ausgewertet und einander gegenübergestellt. Zuletzt wird eine Feldmessung, die als Probemessung dienen soll, durchgeführt. Die Messergebnisse werden diskutiert und anhand der vorangehenden Gesamtheit aller Ergebnisse gewichtet.

6.1 Testmessung Spektrum Referenzleuchte und Justierung

6.1.1 Messaufbau und Durchführung

Der Aufbau zur Messung des Spektrums der Referenzleuchte wird durch das Montieren einer mit BaSO_4 -haltiger Farbe betupften Materiallasche, welche als Referenznormal dient, an die Materialöffnung erreicht. Hierfür wird die Annahme getroffen, dieses Referenznormal verfüge über den spektralen Reflexionsgrad $\rho(\lambda) \approx 1$. Darauf basierend kann weiterhin angenommen werden, dass auf das Normal auftreffende Licht werde gänzlich reflektiert, sodass eine Messung in dieser Anordnung das reine Spektrum der Referenzleuchte ausgibt. Zu beachten ist jedoch, dass der tatsächliche Reflexionsgrad des Referenznormal nicht nur < 1 ist, sondern auch eine spektrale Abhängigkeit aufweist, wodurch die Messung des Spektrums auf diesem Wege zu einer leichten Verzerrungen unterliegenden Näherung führt. Der spektrale Reflexionsgrad des Referenznormal wird im Zuge der Vergleichsmessung in Abschnitt 6.2.3.2 gemessen und diskutiert.

6.1.2 Messergebnisse und Auswertung

6.1.2.1 Kalibrieren der Referenzleuchte

Die Referenzleuchte wird im in Abschnitt 4.2.7 berechneten Arbeitspunkt betrieben, um das Simulationsergebnis mit dem darauf basierenden Aufbau vergleichen zu können. Aus der Messung ergibt sich das in Abbildung 6.1.1 dargestellte Spektrum.

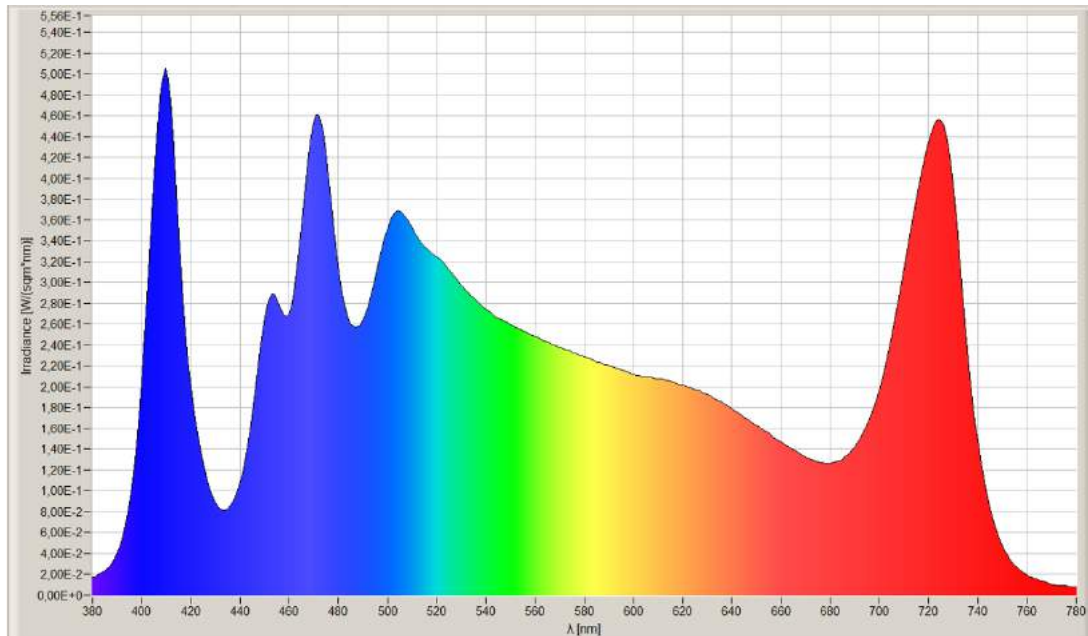
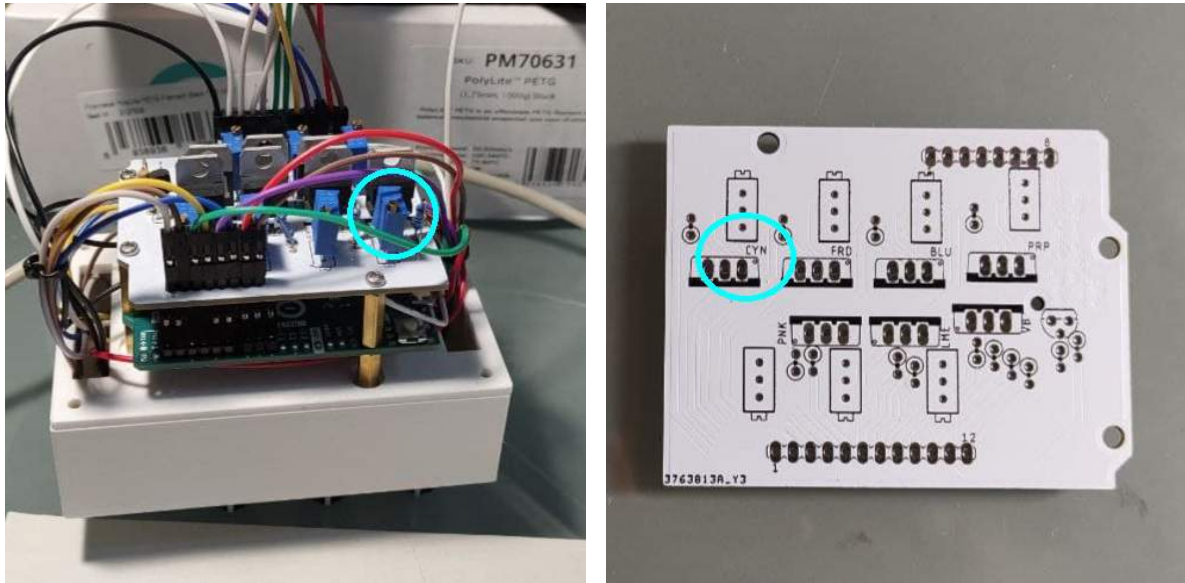


Abbildung 6.1.1: Mit JETiLiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke über der Wellenlänge der LED-Referenzleuchte vor der Korrektur.

Deutlich zu erkennen sind die Maxima bei etwa 725 nm, 470 nm und 410 nm. Der Verlauf des realen Spektrums weicht zwar quantitativ auch im verbleibenden Wellenlängenbereich von der Simulation ab, jedoch ist in diesem Bereich dennoch eine grobe qualitative Annäherung an die Simulation erkennbar. Die Abweichungen können mit den in der Simulation durch einfache Ersatzspannungsquellen modellierten Ausgängen des verwendeten Arduinos begründet werden. Das Konzept der Ersatzspannungsquelle ist eine sehr ungenaue Annäherung der Ausgänge des Mikrocontrollers, welche den Stromfluss durch die einzelnen LEDs steuern und somit direkten Einfluss auf die Lichtemission bzw. den Arbeitspunkt dieser haben. Auch handelt es sich bei der als Spannungsquelle dienenden Powerbank nicht um eine, wie in der Simulation angenommen, ideale Spannungsquelle. Die auf diesen Annahmen basierenden Berechnungen der Diodenströme weichen daher von den tatsächlichen Strömen ab und führen somit zu Abweichungen im resultierenden Spektrum.

Zur genauen Identifikation der die Abweichungen verursachenden LEDs werden die Spektren dieser einzeln vermessen. Bei den LEDs VB (violett-blau ≈ 410 nm), BLU (blau ≈ 470 nm) und FRD (rot ≈ 730 nm) muss der den Steuerstrom regulierende Widerstand erhöht werden, um die Lichtemission zu reduzieren. Um ein Maximum des Spektrums bei 450 nm zu erhalten, müssen die Strahlungsemissionen der LEDs PRP (violett), PNK (weiß) und LME (grün-gelb) erhöht, also die die betreffenden Steuerströme regulierenden Widerstände verringert werden. Die LEDs PRP, PNK und LME verfügen jeweils über einen Emissionsanteil in der Wellenlänge



(a) Lokalisation der den Steuerstrom regulierenden Trimmer-Potentiometer. Exemplarisch eingekreist ist das Trimmer-Potentiometer für die CYN-LED	(b) Die Beschriftung der Trimmer-Potentiometer auf der Platine. Exemplarisch eingekreist ist die Beschriftung für das Trimmer-Potentiometer der CYN-LED
--	---

Abbildung 6.1.2: Steuerstrom regulierende Trimmer-Potentiometer

450 nm und sorgen gleichzeitig für eine Anhebung des Spektrums in Bereich zwischen 530 nm - 680 nm. Auch wird der Steuerstrom und somit die Strahlungsemission der CYN-LED erhöht.

Mithilfe der den Steuerstrom regulierenden Trimmer-Potentiometer können die Anpassungen einfach vorgenommen werden (Abbildung 6.1.2). Während des Anpassungsprozesses werden die Potentiometer verstellt und mittels spektraler Messung wird nach jeder Änderung die Annäherung an den gewünschten spektralen Verlauf der Bestrahlungsstärke beobachtet. Hierbei wird die normierte spektrale Bestrahlungsstärke betrachtet, um die in Abschnitt 4.2.5 geplanten Stützstellen nachbilden zu können. Beim Anpassungsprozess wird der Stromfluss durch die betreffenden LEDs mithilfe eines Multimeters kontrolliert, sodass gewährleistet wird, dass die LEDs nicht außerhalb des vom Hersteller vorgesehenen Arbeitsbereichs betrieben werden. Nach Anpassung des Spektrums liegen die Ströme weiterhin unterhalb des vom Hersteller definierten Nennbetriebes.

6 Validierung

Abbildung 6.1.3 zeigt das korrigierte Spektrum der LED-Referenzleuchte. D65 wird zwar über die in Abschnitt 4.2.5 definierten Stützstellen angenähert, eine exakte Nachbildung ist nicht umsetzbar.

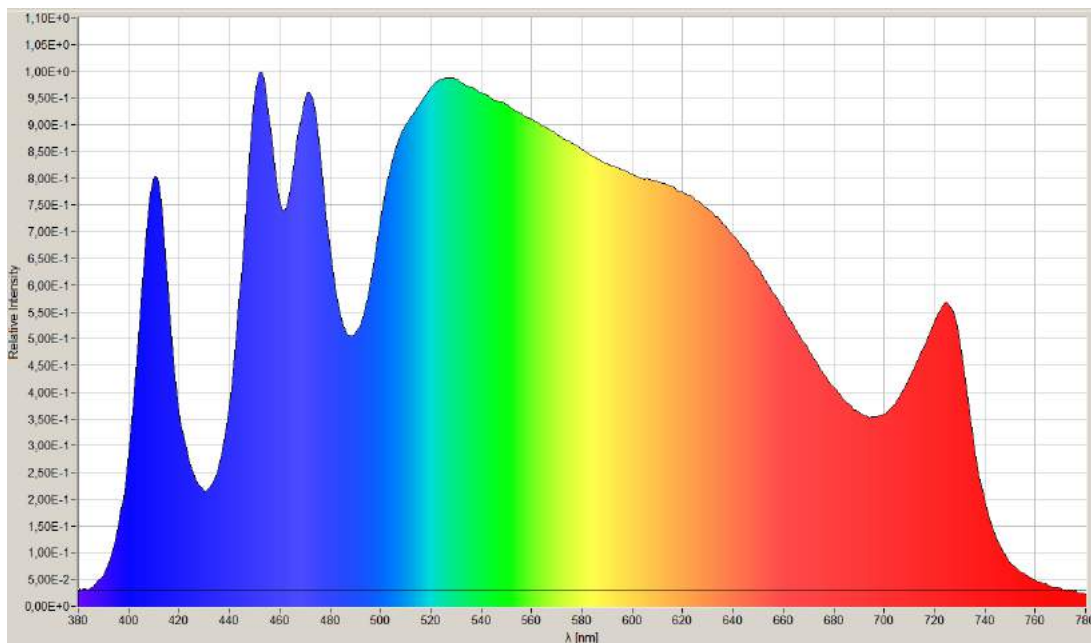


Abbildung 6.1.3: Mit JETiLiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessenes normiertes Spektrum der LED-Referenzleuchte nach der Korrektur.

Eine Annäherung an D65 wie in Abbildung 6.1.3 zu sehen ist jedoch weiterhin zur Modellierung von Tageslicht zweckdienlich, da alle Wellenlängen im geforderten Wellenlängenbereich vertreten sind und somit eine Reflexionsmessung eben in diesem Wellenlängenbereich möglich ist. Die integrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte beträgt im unkorrigierten Zustand $87.90 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, die Farbtemperatur 6771 K. Der Messempfänger benötigt für die spektrale Messung 179 ms. Für diese Dauer muss bei einer Messung das Messgerät an der Materialprobe stabilisiert werden. Nach Korrektur des Spektrums beträgt die Farbtemperatur 5051 K und die Bestrahlungsstärke $65.56 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Die verringerte Farbtemperatur steht im direkten Zusammenhang mit der Reduktion der Emission der VB- und der BLU-Komponente des Gesamtspektrums. Die Abweichung der Farbtemperatur von D65 begründet sich in dem Verlauf des Spektrums im Wellenlängenbereich 380 nm - 520 nm, welcher durch tiefliegende Minima bei 380 nm, 430 nm, 460 nm und 490 nm gekennzeichnet ist. Die Ränder des Spektrums zwischen 380 nm und 400 nm sowie zwischen 740 nm und 780 nm sind durch eine geringe Strahlungsleistung charakterisiert, was bei Messungen zu Problemen in diesem Bereich führen könnte. Die Minima bei 430 nm, 460 nm, 490 nm und 690 nm weisen eine ausreichende Bestrahlungsstärke auf, sodass keine Schwierigkeiten an diesen Stellen bei einer Messung zu erwarten sind. Durch die Korrektur verlängert sich das Messintervall auf 237 ms.

6.1.2.2 Stabilisierung des Spektrums

Während des Korrekturvorgangs ist zu beobachten, dass die Spektren der einzelnen LEDs FRD, BLU und VB innerhalb des Gesamtspektrums bei einer erneuten Messung zu einem späteren Zeitpunkt nicht den selben Verlauf aufweisen, wie unmittelbar nach der Korrektur.

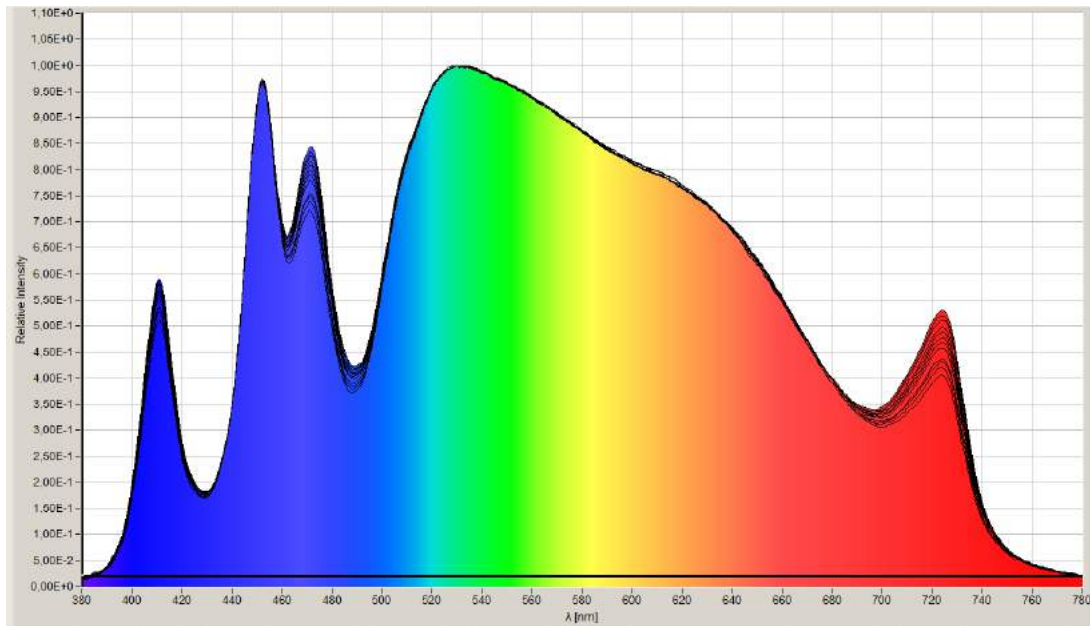


Abbildung 6.1.4: Mit JETiLiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene normierte Spektren der LED-Referenzleuchte. Nach der Korrektur wurden während des 30 s langen Betriebsintervalls unmittelbar nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen normierten Spektren sind übereinander aufgetragen. Zu sehen sind die Instabilitäten der LEDs FRD (720 nm), BLU (470 nm) und der VB (410 nm) in Form unterschiedlicher spektraler Verläufe. Farblich unterlegt ist die zeitlich letzte Messung, sodass zu erkennen ist, dass die Maxima an den Stellen 410 nm, 470 nm und 730 nm sich einem Sättigungswert annähern. Die normierte Ansicht lässt vermeintlichen Freiraum für Interpretationen, da dieser Verlauf ebenso durch eine Verringerung des Maximalwertes, welcher als Ankerpunkt für die Normierung fungiert, hervorgerufen werden könnte. In diesem Fall würde jedoch auch das Maximum bei 450 nm variieren.

Die Strahlungsemissionen der einzelnen LEDs FRD, BLU und VB sacken einige Minuten nach jedem Korrekturvorgang um etwa 12% (VB), 12% (BLU) und 24% (FRD) ab. Wird der spektrale Verlauf erneut korrigiert, so weist er zu einem weiteren späteren Zeitpunkt erneut den um etwa 12% (VB), 12% (BLU) und 24% (FRD) reduzierten Verlauf auf.

Nach Durchführung von Testmessungen in Abschnitt 6.2.2.1 wird anhand der Ergebnisse deutlich, dass die spektrale Bestrahlungsstärke bestimmter LEDs innerhalb des 30 s Zeitintervalls, in dem die Referenzleuchte aktiv ist, variiert. Abbildung 6.1.4 zeigt die übereinandergelegten Messergebnisse von 12 Messungen, die unmittelbar nacheinander im Rahmen eines 30 s-Betriebsintervalls aufgenommen wurden. Die Strahlungsemission der LEDs FRD, BLU und VB nimmt im Laufe der 30 s stetig zu, nämlich um etwa 12% (VB), 12% (BLU) und 24% (FRD). Dies erklärt, weshalb das Korrigieren der Referenzleuchte zu immer dem selben Ergebnis geführt hat. Wird die Referenzleuchte mehrfach nacheinander aktiviert, so stabilisiert sich die Strahlungsemission der betroffenen LEDs allmählich bei einem Sättigungswert. Eine Korrektur bewirkt in diesem Szenario daher nichts anderes, als ein Einstellen auf einen bestimmten Sättigungswert, der nach einer längerer Betriebspause wieder auf den Startwert, der um etwa 12% (VB), 12% (BLU) und 24% (FRD) unter dem eingestellten Wert liegt, absinkt.

Die Ursache für das instabile Verhalten der betroffenen LEDs FRD, BLU und VB kann damit begründet werden, dass die LEDs im Rahmen der Korrektur durch die signifikante Reduktion ihrer Strahlungsemission unterhalb der in Abschnitt 4.2.5 berechneten Arbeitspunkte geregelt wurden. Im Zuge des Korrekturprozesses wurden die Strahlungsemissionen der verbleibenden LEDs oberhalb des in Abschnitt 4.2.5 berechneten Arbeitspunkte geregelt. Es ergibt sich demnach ein signifikantes Ungleichgewicht, was die einzelnen Diodenströme anbetrifft. Der Stromfluss teilt sich an einem bestimmten Knoten in der Schaltung gemäß des Stromteiler-Prinzips, also proportional zu den in den Strängen vorliegenden Widerständen, auf die einzelnen Dioden-Stränge auf. Der Teil der LEDs, der oberhalb seiner in Abschnitt 4.2.5 berechneten Arbeitspunkte betrieben wird, erwärmt sich in einem höheren Maß, als die LEDs, die unterhalb ihrer in Abschnitt 4.2.5 berechneten Arbeitspunkte betrieben werden. Die thermische Erwärmung führt dazu, dass sich der Widerstand in dem betreffenden Zweig erhöht und somit weniger Strom in diesen Diodenzweig fließt. Die Stromaufteilung auf die einzelnen Stränge ändert sich dahingehend, dass diese Stromdifferenz in die Stränge fließt, die sich aufgrund ihres niedrigen Arbeitspunktes weniger erwärmen und somit proportional einen geringeren Widerstand aufweisen. Insbesondere bei den LEDs LME, welche als einzige oberhalb ihres Nennbetriebes arbeiten und zusätzlich zweifach vertreten sind, spielt dieser Effekt eine signifikante Rolle. Die Reduktion des Stromflusses durch die zwei LME LEDs fällt spektral weniger ins Gewicht, als der zunehmende Stromfluss durch die im untersten Arbeitsbereich dimensionierten LEDs. Aus diesem Grund ist es für eine Stabilisierung des Spektrums erforderlich, die Arbeitspunkte der LEDs näher aneinander anzusiedeln. Dies wird dadurch erreicht, dass die Arbeitspunkte und somit die Strahlungsemissionen der LEDs VB, BLU und FRD nach oben verschoben werden.

Nach der Stabilisierung sind bei Inbetriebnahme der Referenzleuchte im ersten 30 s Betriebsintervall geringfügige spektrale Schwankungen zu vermessen, welche sich zum folgenden Betriebsintervall stabilisieren. Aus diesem Grund ist es notwendig für eine zuverlässige Messung die Referenzleuchte 2x hintereinander für jeweils 30 s zu aktivieren, um unmittelbar danach die eigentliche Messung durchzuführen. Auf diese Weise kann davon ausgegangen werden, dass das Spektrum der Referenzleuchte sich während der Messung stabil hält. Basierend darauf werden die Vergleichsmessungen in Abschnitt 6.2.2.1 erneut aufgenommen. Abbildung 6.1.5 zeigt die während eines 30 s Betriebsintervalls aufgenommene Serie an Messungen nachdem die Referenzleuchte bereits für 2 Betriebsintervalle aktiv war. In diesem Arbeitspunkt beträgt die durchschnittliche integrale Bestrahlungsstärke etwa $89.37 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, die Farbtemperatur 6137 K. Zu erwähnen ist, dass während der Gesamtheit der Messreihen die integrale Bestrahlungsstärke Schwankungen von etwa 5% unterliegt.

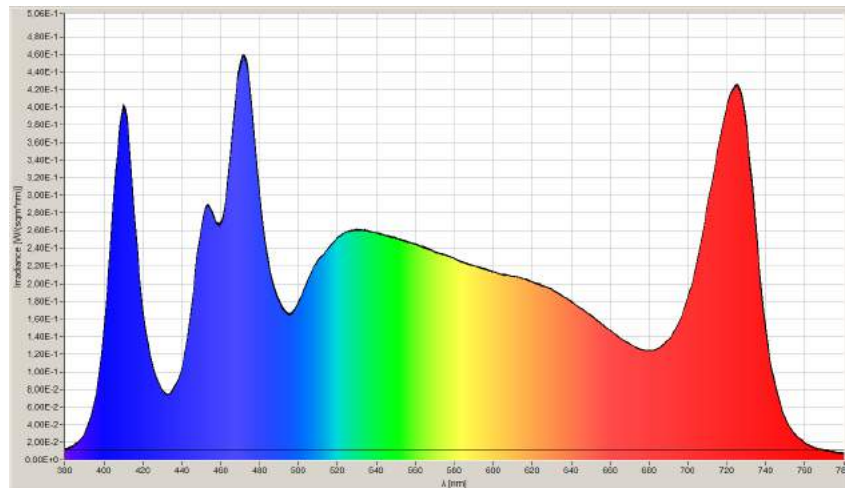


Abbildung 6.1.5: Mit JETiLiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte. Nach 2 durchlaufenen 30 s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen und liegen übereinander. Das Spektrum kann als stabil angenommen werden.

6.1.2.3 Einfluss der auf dem Bedienfeld lokalisierten Potentiometer

Der Arbeitspunkt der Referenzleuchte ist auf die Mittenstellung der auf dem Bedienfeld befindlichen Potentiometer gelegt. In den Abbildungen 6.1.6 und 6.1.7 sind die Verläufe der spektralen Bestrahlungsstärken $E_{\text{Potis max.}}(\lambda)$ (alle Potentiometer auf Maximalstellung) und $E_{\text{Potis min.}}(\lambda)$ (alle Potentiometer auf Minimalstellung) abgebildet. Als schwarze Linie ist in beiden Graphen die spektrale Verteilung in Mittenstellung der Potentiometer als Vergleich zu sehen. Die Messungen erfolgten bei etwa 21 °C. Zu sehen ist in Abbildung 6.1.6, dass das Positionieren der Potentiometer auf Maximalstellung nur einen geringen Einfluss hat. Die Bestrahlungsstärke nimmt im Bereich 455 nm - 540 nm zu, was auf die CYN-LED zurückgeführt werden kann. Des weiteren nimmt die Bestrahlungsstärke der VB-LED leicht ab, genau wie der Bereich zwischen 560 nm und 630 nm. Über die Dauer des Betriebsintervalls hält sich das Spektrum stabil.

Abbildung 6.1.7 zeigt den spektralen Verlauf der gemessenen Bestrahlungsstärke bei Positionierung der Potentiometer auf Minimalstellung. Die Strahlungsleistung der LED BLU nimmt über 50% ab. Die Bestrahlungsstärke der FRD-LED nimmt zunächst etwa 17% ab, nimmt im Laufe des Betriebsintervalls wieder zu, da sie mit dem Herunterregeln des Diodenstroms in einen instabilen Betriebsbereich, wie in Abschnitt ?? beschrieben, gelangt. Es ist eine Zunahme der Bestrahlungsstärke im Bereich 510 nm - 690 nm zu beobachten, sowie bei der Wellenlänge 410 nm um nahezu 25%.

Wie bereits in Abschnitt 5.1.1.2 behandelt, variieren die Widerstandswerte der Potentiometer von LED zu LED. Dies hat den Effekt, dass die einzelnen Potentiometer unterschiedlich starken Einfluss auf die Strahlungsemission der jeweiligen LEDs haben. Auch haben die Potentiometer schaltungstechnisch keinen direkten Einfluss auf den Diodenstrom, sondern bestimmen den Arbeitspunkt der den Diodenstrom steuernden Bipolartransistoren und unterliegen dem direkten Einfluss der Ströme durch die entsprechenden Arduino-Ausgänge. Somit passiert der

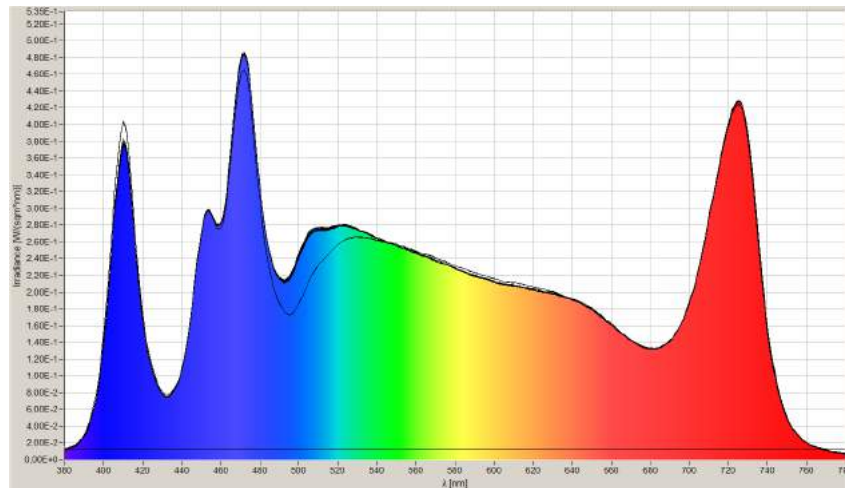


Abbildung 6.1.6: Mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte mit **Potentiometern auf Maximalstellung**. Nach 2 durchlaufenen 30 s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen.

Einfluss der Potentiometer unterschiedliche Faktoren, dessen ideale Verhalten zwar in der Simulation berücksichtigt wurden, auf der anderen Seite jedoch der Einfluss von realen Faktoren vernachlässigt wurde und nicht ohne Weiteres konkret quantifiziert werden kann. Wie im vorangehenden Abschnitt beschrieben hat die Stromaufteilung am Knoten von der Powerbank zu den einzelnen Diodensträngen einen signifikanten Einfluss auf das Betriebsverhalten der einzelnen LEDs, beeinflusst deren Arbeitspunkte also maßgeblich. Auch beeinflussen sich die einzelnen Arbeitspunkte der LEDs gegenseitig. Diese Faktoren wirken teilweise stärker auf die Schaltung ein, als die Potentiometer, wie an der Messung zu Abbildung 6.1.7 gehörenden Messung deutlich wird.

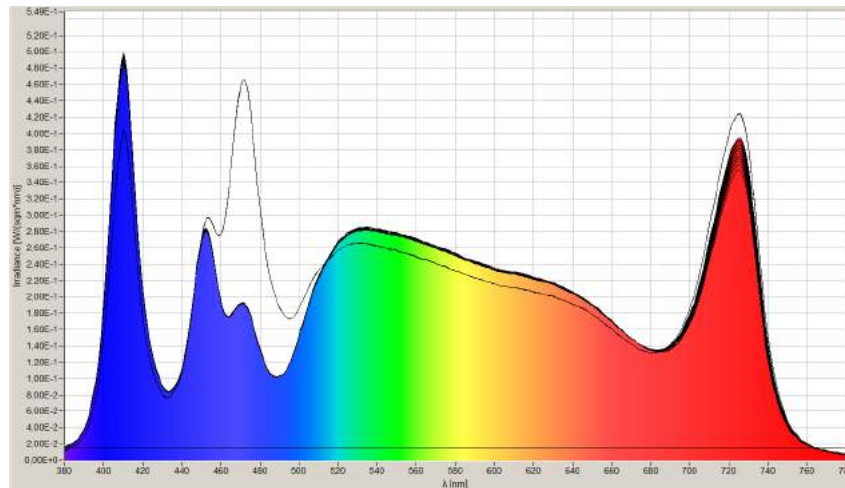


Abbildung 6.1.7: Mit JETILiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte mit **Potentiometern auf Minimalstellung**. Nach 2 durchlaufenen 30 s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen und weisen eine Instabilität auf.

6.1.2.4 Temperatureinfluss

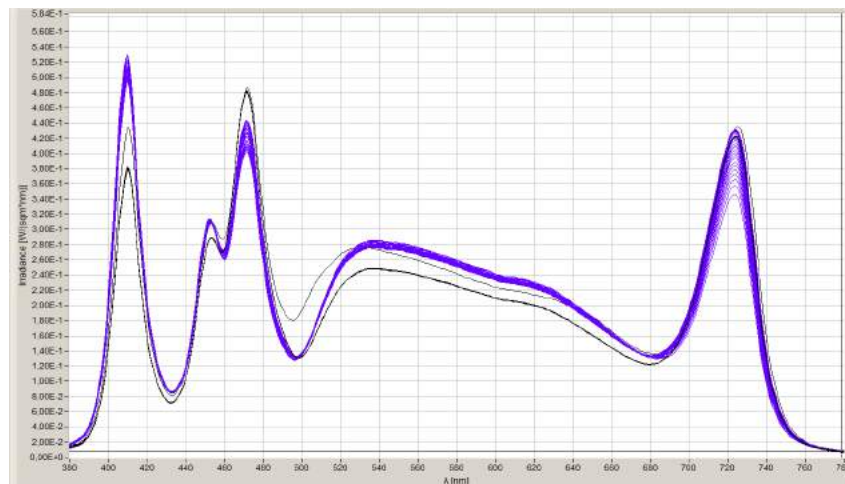


Abbildung 6.1.8: Bei 6 °C mit JETILiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte mit Potentiometern auf Maximalstellung. Nach 2 durchlaufenen 30 s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen. Die dünne schwarze Linie zeigt als Referenz das Ergebnis einer Messung bei 21 °C. Die blauen Linien zeigen die Ergebnisse der 12 Messungen bei 6 °C. Die dicke schwarze Linie zeigt eine Stabilisation des Spektrums bei 6 °C durch Maximieren der aller Potentiometer auf dem Bedienfeld.

Nach Durchführung der Feldmessung bei etwa 2 °C wird anhand der Messergebnisse deutlich, dass das Messsystem bei einer derartig stark verringerter Temperatur keine zuverlässigen Ergebnisse liefert. Die bisherige Justierung und Kalibrierung fand bei einer konstanten Zim-

temperatur von etwa 21 °C statt. Um den Faktor der Temperatur genauer zu untersuchen, wird eine weitere Testmessung des Verlaufs der spektralen Bestrahlungsstärke aufgenommen. Damit das Messsystem mit allen seinen Komponenten die Temperatur vor der Messung annimmt, wird das Messsystem für etwa 15 Minuten auf einem Balkon (6 °C) platziert, auf dem im Anschluss die Messung durchgeführt werden soll. Dort wird anschließend wie im vorhergehenden Abschnitt 2x hintereinander die Referenzleuchte aktiviert, um zu gewährleisten, dass die spektrale Bestrahlungsstärke einen stabilen Verlauf im Rahmen des 30s Betriebsintervalls aufweist. Bei der Vergleichsmessung bei verschiedenen Temperaturen reduziert sich die integrale Bestrahlungsstärke von $E_{e21^\circ} = 84.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ auf $E_{e2^\circ} = 83.19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$. Dies kann auf den in der verwendeten Powerbank verbauten Li-Ionen-Akku zurückgeführt werden. Mit sinkender Temperatur wird das darin enthaltene Elektrolyt zähflüssiger, was den Stromfluss vom Plus zum Minuspol erschwert und somit verringert. Durch den verringerten Strom wird die Gesamtleistung der Referenzleuchte in Form einer Reduktion der Bestrahlungsstärke reduziert. Abbildung 6.1.8 zeigt den bei 6 °C aufgenommenen Verlauf der spektralen Bestrahlungsstärke, welcher im Vergleich zum Verlauf bei einer Messung bei 21 °C Verzerrungen unterliegt. Die Peak-Wellenlängen der LEDs sind leicht verringert, was am Peak der FRD-LED in Abbildung 6.1.8 gut zu erkennen ist. Während der seriellen Messung kann der in Abschnitt 6.1.2.2 beschriebene Instabilitätsprozess beobachtet werden: Die Bestrahlungsstärke der Wellenlängen zwischen etwa 510 nm und 670 nm nimmt ab, während die Bestrahlungsstärke der FRD, BLU und VB LEDs zunimmt. Durch Maximieren aller auf dem Bedienfeld vorliegenden Potentiometer kann eine Stabilisation erreicht werden. Bei einer weiteren Messung bei etwa 2 °C kann eine Stabilität des Spektrums mit der selben Maßnahme jedoch nicht mehr gewährleistet werden. Der Einfluss der stark verringerten Temperatur auf den Messempfänger kann ebenfalls zu Verfälschungen der Messergebnisse führen.

6.1.2.5 Zusammenfassung

Bis auf geringfügige Schwankungen im ersten Betriebsintervall ist das Spektrum der LED-Referenzleuchte bei einer Temperatur von 21°C konstant. Bei einer Temperatur von 6°C kann auftretenden Instabilitäten noch mit dem Maximieren der Drehstellung der Potentiometer entgegengewirkt werden. Bei 2°C liefert das Messsystem keine zuverlässigen Messergebnisse aufgrund der Instabilität des Spektrums der Referenzleuchte.

Um eine Stabilität der Referenzleuchte zu gewährleisten, muss diese unmittelbar vor der Messung bereits mindestens für 1 Betriebsintervall aktiviert worden sein, idealerweise für 2 Betriebsintervalle hintereinander.

6.2 Vergleich mit Labormessgerät Bruins Omega 20

In diesem Abschnitt wird die Vergleichsmessung mit dem Labormessgerät Omega 20 von *Bruins Instruments* beschrieben, erläutert und ausgewertet. Zunächst wird mit dem Erläutern des grundsätzlichen Konzeptes begonnen und die für die Messung ausgewählten Materialien erläutert. Die Versuchsdurchführung wird beschrieben, sowie die für die Auswertung der Messdaten erforderlichen Berechnungen. Zuletzt werden die aus den Messungen gewonnenen spektralen Reflexionsgrade beider Messsysteme gegenübergestellt und diskutiert.

6.2.1 Vorbereitung und Konzept

Um den spektralen Reflexionsgrad aus der Datenausgabe des innerhalb des Messsystems als Empfänger genutzten Spektroradiometers berechnen zu können, sind zusätzlich zur Messung an der Materialprobe weitere Messungen an Referenzmaterialien mit bekannten Eigenschaften erforderlich. Diese zusätzlichen Messungen erlauben es, die Wellenlängenabhängigkeit des Messaufbaus selbst in Form des spektralen Verlaufs der Referenzlichtquelle und des Einflusses der Ulbrichtkugel aus den Materialmessungen herauszurechnen. Auf diese Weise lassen sich Verfälschungen des gemessenen spektralen Reflexionsgrades minimieren.

Grundsätzlich muss nach Zusammenhang 3.2.1.1 die gesamte auffallende spektrale Strahlungsleistung $\Phi(\lambda)$ gemessen werden, welche bei der Berechnung des spektralen Reflexionsgrades in Bezug zur reflektierten spektralen Strahlungsleistung gesetzt wird. Da das Messgerät für eine diffuse Messung des spektralen Reflexionsgrades konzipiert ist, wird der Sensor des verwendeten Messempfängers Jeti Specbos 1201 mit einem Diffusor-Aufsatz versehen. Für die Berechnung des Spektralen Reflexionsgrades für die Auswertung wird der Zusammenhang 3.3.0.1 eingesetzt. Der im mobilen Messsystem eingesetzte Empfänger Jeti Specbos 1201 gibt als Ausgabegröße die spektrale Bestrahlungsstärke $E_e(\lambda)$ in $\frac{W}{m^2}$ aus. Die gesamte auffallende spektrale Strahlungsleistung kann gemessen werden, indem eine Fläche mit maximalem Reflexionsgrad, also $\rho \approx 1$ bemessen wird. Hierfür wird ein speziell hergestelltes, mit Bariumsulfat-haltiger Farbe ($BaSO_4$) betupftes Referenznormal ($\rho_{BaSO_4} = 0,985$) verwendet, wobei der Reflexionsgrad des Referenznormals im Zuge der Messungen aufgenommen und bestimmt wird. Um den Einfluss der Wände der Ulbrichtkugel zu charakterisieren, muss ein Material bemessen werden, welches möglichst keinerlei Reflexionen zulässt, also den Reflexionsgrad von $\rho \approx 0$ hat. In einer Laborumgebung wird eine derartige Messung üblicherweise bei absoluter Dunkelheit und offener Materialöffnung durchgeführt. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass vom Probenfenster keinerlei Reflexionen ausgehen. Jegliche Reflexionen, die das Spektroradiometer bei diesem Messaufbau aufnimmt, sind also durch die Wände der verwendeten Ulbrichtkugel verursacht. Bei einer mobilen Anwendung, bei der keine Laborbedingungen inszeniert werden können, muss hierbei auf ein speziell hergestelltes Referenznormal, welches einen möglichst geringen Reflexionsgrad aufweist, zurückgegriffen werden. Es wird eine schwarze Materiallasche verwendet, die zusätzlich mit einer Lage schwarzen Filzes bedeckt ist. Um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten, müssen die Messungen möglichst unter gleichen Bedingungen erfolgen, was in diesem Kontext bedeutet, dass der Messaufbau abgeschirmt ist von äußeren Einflüssen wie beispielsweise äußerem Lichteinfall oder einem zu starken Temperaturunterschied bei der Durchführung der zu vergleichenden Messungen.

6.2.2 Messaufbau und Durchführung

6.2.2.1 Materialproben

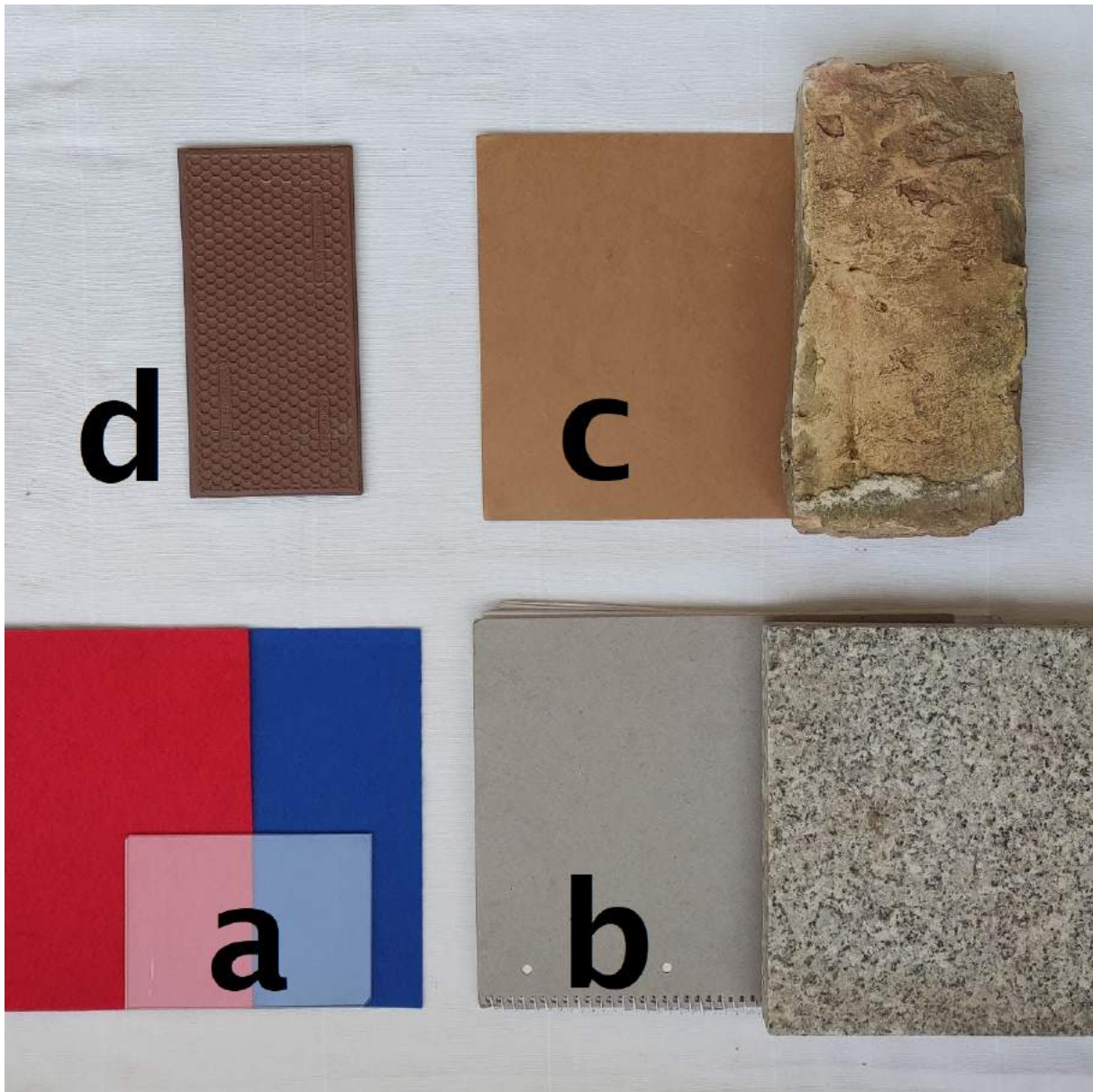


Abbildung 6.2.1: Für die Vergleichsmessung gewählte Materialien: rotes und blaues Filz und eine Glasplatte (a), ein grauer Stein mit idealisiertem Äquivalent (b), ein brauner Stein mit idealisiertem Äquivalent (c), die Rückseite einer italienischen Fliese mit Wabenstruktur (d)

Um einen sinnvollen Vergleich anstellen zu können, muss es sich selbstredend bei den zu vergleichenden Messungen um die Bemessung der selben Materialproben handeln. Da die Größen der Materialfenster beider Messsysteme verschieden sind, müssen die Materialproben vom Farb- und Materialverlauf so homogen wie möglich sein. Um das Betriebsverhalten möglichst gut charakterisieren, analysieren und vergleichen zu können, bietet es sich an, Extremwerte zu betrachten. Ein sinnvoller Ansatz ist daher das Bemessen der Ränder des Spektrums. Hierfür eignen sich eine rote und eine blaue Materialprobe. Zusätzlich wird zwischen glatten und rauen Materialien unterschieden. Es werden also jeweils zwei rote/ blaue Materialien bemessen, des-

sen Oberflächenbeschaffenheit rau und glatt ist. Für die Messung der rauen Materialien eignet sich Filz sehr gut, da es eine homogene Farb- und Strukturverteilung aufweist. Für die Messung eines glatten Äquivalents wird eine 2mm dicke Glasscheibe auf das Filz gelegt. Hierbei ist zu beachten, dass die verwendete Glasscheibe über eigene Reflexions- und Transmissionseigenschaften verfügt.

Um den Einfluss einer stark ausgeprägten Struktur zu untersuchen, wird die Rückseite einer italienischen Fliese bemessen. Diese weist eine Wabenstruktur auf, die homogen auf der Fläche angeordnet ist. Ergänzend werden eine graue Bodenplatte und eine brauner Bau-Stein bemessen, da dies Farben sind, die vermehrt in urbanen Szenarien aufzufinden sind. Um die Messung zu komplettieren, werden zu jedem der Steine ein idealisiertes Modell bemessen in Form einer Pappe, die den Farbton des jeweiligen Steins annähert. So kann eine weitere Untersuchung des Einflusses einer Oberflächenstruktur auf die Messung erfolgen. Abbildung 6.2.1 zeigt die verwendeten Materialproben.

6.2.2.2 Versuchsdurchführung

Grundsätzlich ist mit jedem der beiden Messsysteme eine Messreihe der zu bemessenden Materialien durchzuführen. Beide Durchführungen haben gemein, dass zunächst eine Korrekturlinie mithilfe eines Referenznormal mit dem Reflexionsgrad $\rho \approx 1$ aufgenommen werden muss, die als Bezug für die darauffolgenden Materialmessungen dienen wird. Für das Omega20 liegt ein professionell hergestelltes, mit Teflon beschichtetes Referenznormal vor (*Labsphere Certified Reflectance Standard*), für das mobile Messsystem wird eine mit Bariumsulfat betupfte Materiallasche als Referenznormal verwendet. Beide sind in Abbildung 6.2.2 zu sehen. Die Probenfenster beider Messsysteme weisen verschiedene Größen auf (Omega20: 2,5 cm Durchmesser, mobiles Messsystem 7,5 cm).

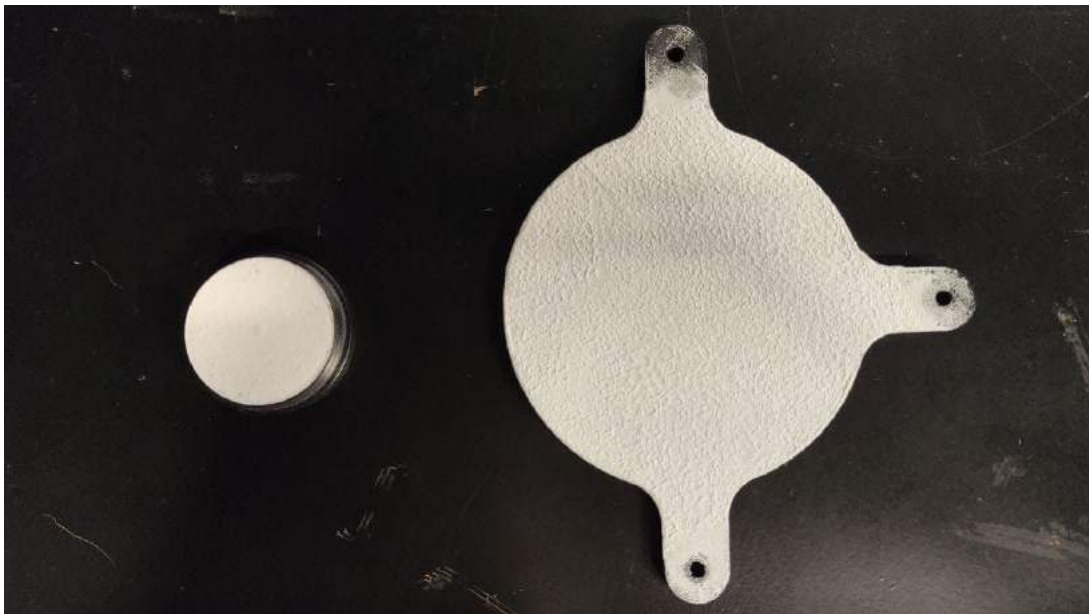


Abbildung 6.2.2: Links: Labsphere Certified Reflectance Standard (mit Teflon beschichtetes Referenznormal), rechts: als Referenznormal dienende mit Bariumsulfat betupfte Materiallasche. Beide Probennormalen entsprechen annähernd der Größe des zu bedeckenden Materialfensters.

Ebenso wird eine Messung durchgeführt, um den Einfluss des Kugelphotometers zu bestimmen. Hierfür wird $\rho \approx 0$ am Materialfenster inszeniert. Der klassische Ansatz ist es, während der Messung die Probenöffnung bei absoluter Dunkelheit offen zu lassen. So wird sichergestellt, dass keinerlei Reflexionen von der Materialöffnung ausgehen. Dies ist nur unter idealisierten Laborbedingungen möglich, die im das Omega20 beherbergenden Labor nicht umsetzbar sind. Daher wird auf den Ansatz zurückgegriffen, einen hohlen schwarzen Pappzylinder auf die Materialöffnung zu stellen und dessen Ränder mit einem schwarzen Tuch so gut wie möglich abzudecken. Abbildung 6.2.3(b) zeigt diesen Messaufbau.



(a) Omega20 Messplatz. Eingekreist ist das mit einem Gewicht abgedeckte Materialfenster. Das Kugelphotometer befindet sich in der darunterliegenden Box. (b) Inszenierung des Falles $\rho \approx 0$ am Omega20 Messplatz mithilfe eines hohlen schwarzen Pappzylinders und eines schwarzen Tuches zur Abschirmung von äußerem Lichteinfall.

Abbildung 6.2.3

Zum Messen der Materialien werden diese auf dem Materialfenster des Omega20 positioniert. Bei flachen Materialien wie dem roten und blauen Filz wird zusätzlich das in Abbildung 6.2.3 (a) markierte Gewicht auf das Materialfenster platziert, um sicherzustellen, dass kein äußerer Lichteinfall die Messung verfälscht. Zum Messen von Steinen oder unebenen Messobjekten wird die Oberfläche um die Materialöffnung mit schwarzem Filz bedeckt (Abbildung 6.2.4 (a) und (b)), um zum einen das Messgerät vor Beschädigungen zu schützen, und zum anderen eine optische Abdichtung zum Materialfenster zu schaffen. Um die Abdichtung zu kompletieren wird bei der Messung von Steinen oder unebenen Objekten ein schwarzes Tuch um die Ränder dieser gelegt, sodass äußere Einflüsse minimiert werden. Um das Kugelphotometer des Omega20 vor Verschmutzungen zu schützen wurden die zu bemessenden Materialien vor dem Messen gereinigt.

Das mobile Messsystem bietet ein 30 s langes Zeitfenster, in dem die Referenzleuchte aktiv ist. In diesem Betriebsintervall werden die Referenznormale $\rho \approx 1$ und $\rho \approx 0$, sowie die Materialprobe(n) vermessen. Da der verwendete Messempfänger pro Materialprobe eine maximale Messdauer von 0,5 s benötigt, können mehrere Materialien nacheinander bemessen werden, bevor sich die Referenzleuchte nach 30 s deaktiviert. Um eine zuverlässige Messung zu gewährleisten, werden zu Beginn jeder 30 s-Messreihe die $\rho \approx 1$ und $\rho \approx 0$ Messungen



(a) Materialfenster des Omega20. Um Beschädigungen zu vermeiden wurde die Oberfläche vor dem Platzieren der schweren Materialproben mit Filz ausgelegt. (b) Messung eines unebenen Steines. Der schwarze Filz dichtet zusätzlich den Rand zum Materialfenster teilweise gegen äußeren Lichteinfall ab. Für die Messung wird der Stein, insbesondere die Ränder, zusätzlich mit einem schwarzen Tuch abgedeckt.

Abbildung 6.2.4

durchgeführt.

Beide Systeme messen mit einer Auflösung von 1 nm im Wellenlängenbereich 380 nm - 780 nm. Insgesamt kann bei beiden Messsystemen die Durchführung zu drei Schritten zusammengefasst werden:

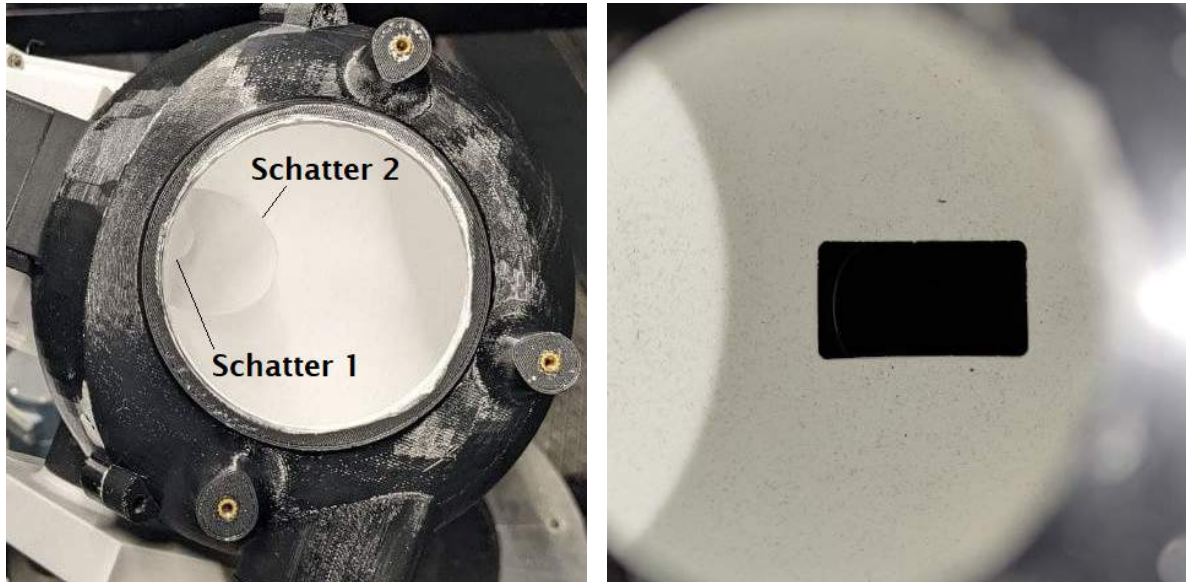
- Korrekturlinie ($\rho \approx 1$) aufnehmen
- Schwarz-Messung ($\rho \approx 0$) aufnehmen
- Materialmessung aufnehmen

Beide Systeme benötigen eine Anlaufzeit, um einen stabilen Betrieb zu gewährleisten. Das Omega 20 wird etwa 10 min vor der eigentlichen Messung in Betrieb genommen. Das mobile Messsystem wird 2x hintereinander für die jeweiligen 30 s aktiviert. So kann gewährleistet werden, dass die Komponenten beider Systeme eine als konstant anzunehmende Betriebstemperatur aufweisen.

6.2.3 Messergebnisse und Auswertung

6.2.3.1 Berechnung

Da die zu vergleichenden Messsysteme, wie in Abbildung 6.2.5 zu sehen, verschiedene Messgeometrien aufweisen, werden die Reflexionsgrade auf verschiedenen Wegen aus den gemessenen Daten berechnet, wie in Abschnitt 3.3 eingeführt.



(a) Blick das 7,5 cm breite Materialfenster des mobilen Messsystems: Die Schatten vor dem Messempfänger (Schatter 1) und vor der Referenzleuchte (Schatter 2) ist auf das Materialfenster gerichtet. Es handelt sich sind Indikatoren für eine auf diffuse Messungen ausgelegte Geometrie.

(b) Blick in das 2,5 cm breite Materialfenster des Omega20: Das Fenster zur Referenzleuchte (schwarz) hier um eine Messgeometrie, welche auf gerichtete Messungen ausgelegt ist. Die Messempfänger sind aus dieser Ansicht nicht zu erkennen, befinden sich jedoch auf der zur Ansichtsebene parallelen Äquatorlinie der Ulbrichtkugel.

Abbildung 6.2.5: Durch einen Blick in die Materialfenster beider Messsysteme sind die unterschiedlichen Messgeometrien zu erkennen

Mobiles Messgerät

Für die Berechnung der Reflexionsgrade aus den Messergebnissen des diffus messenden mobilen Messsystems ergibt sich nach Formel 3.3.0.1 die Herangehensweise

$$\rho_X(\lambda) = \frac{E_{X,\text{mess}}(\lambda) - E_0(\lambda)}{E_N(\lambda) - E_0(\lambda)} \cdot \frac{E_N(\lambda)}{E_{X,\text{mess}}(\lambda)} \cdot \rho_N(\lambda) \quad (6.2.3.1)$$

mit den gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken

- $E_N(\lambda)$ (Messung am Referenznormal $\rho \approx 1$)
- $E_0(\lambda)$ (Schwarz-Messung mit $\rho \approx 0$)

- $E_{X,\text{mess}}(\lambda)$ (Messung der Materialprobe)
- $\rho_N(\lambda)$ Reflexionsgrad des verwendeten Referenznormal

Der spektrale Reflexionsgrad des am mobilen Messsystem verwendeten Referenznormal wird im Zuge der Messungen mit dem Omega 20 gemessen und ermittelt, sodass dieser für die Auswertung der Messungen mit dem mobilen Messgerät hinzugezogen werden kann.

Berechnungen Omega20

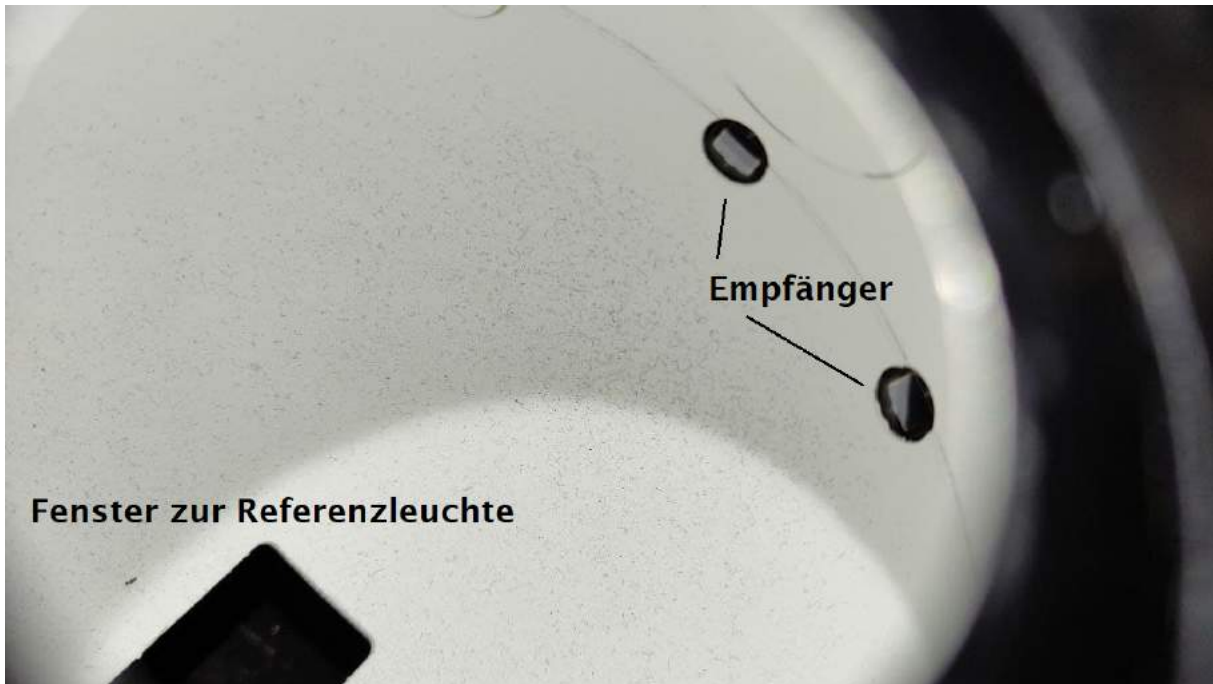


Abbildung 6.2.6: Innenansicht der Omega20 Messgeometrie durch das Probenfenster bei gekrümmten Winkel

Abbildung 6.2.6 zeigt eine Fotoaufnahme durch das Materialfenster des Omega 20 bei gekrümmtem Winkel, um die Empfänger, welche auf der Äquatorlinie der verbauten Ulbrichtkugel liegen, zu erfassen. Das Omega 20 weist eine Messgeometrie zur gerichteten Messung auf. Weder Referenzleuchte, noch Messempfänger sind mit Schattern versehen. Die gerichtete Messung mit dem Omega 20 wird nach 3.3.0.2 ausgewertet. Das Omega 20 gibt den Reflexionsgrad in der Form

$$\rho_{X,\text{mess}} = \frac{E_{X,\text{mess}}}{E_N} \quad (6.2.3.2)$$

aus. In dieser Gestalt hat der ausgegebene Reflexionsgrad noch keine Aussagekraft, es muss die Berechnung nach Formel 3.3.0.2 erfolgen. Hierfür wird der Zusammenhang 6.2.3.2 nach der spektralen Bestrahlungsstärke der Materialprobe $E_{X,\text{mess}}$ umgestellt:

$$E_{X,\text{mess}} = \rho_{X,\text{mess}} \cdot E_N \quad (6.2.3.3)$$

Mit der Umstellung nach der spektralen Bestrahlungsstärke für die Schwarz-Messung ergibt sich nach einsetzen in 3.3.0.2:

$$\begin{aligned}\rho_X &= \frac{E_{X,\text{mess}} - E_0}{E_N - E_0} \cdot \rho_N \\ \rho_X &= \frac{(\rho_{X,\text{mess}} \cdot E_N) - (\rho_0 \cdot E_N)}{E_N - (\rho_0 \cdot E_N)} \cdot \rho_N \\ \rho_X &= \frac{\rho_{X,\text{mess}} - \rho_0}{1 - \rho_0} \cdot \rho_N\end{aligned}\quad (6.2.3.4)$$

Die Ermittlung der spektralen Reflexionsgrade aus den Messergebnissen des Omega 20 erfolgt nach Formel 6.2.3.4. Zu beachten ist, dass alle Größen in der vorangehenden Berechnung eine Wellenlängenabhängigkeit aufweisen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde auf die Darstellung dieser verzichtet. Für den Reflexionsgrad ρ_N des verwendeten Labsphere Referenznormals liegen die spektralen Daten des Herstellers vor und werden zu den Berechnungen der Reflexionsgrade herangezogen.

6.2.3.2 Vergleich der Referenznormale und Schwarz-Messungen

Für beide Messsysteme werden verschiedene Referenznormale verwendet. Für die Auswertung der mit dem mobilen Messsystem erzeugten Messdaten wird der spektrale Reflexionsgrad des entsprechenden Referenznormals benötigt. Dieses wird hierfür als Materialprobe mit dem Omega20 bemessen und mithilfe des Zusammenhangs 6.2.3.4 ausgewertet. Der orangene Graph in Abbildung 6.2.7 zeigt den mit dem Omega20 gemessenen spektralen Reflexionsgrad des mit Bariumsulfat-haltiger Farbe betupften Referenznormals, welches für die Messungen mit dem mobilen Messsystem verwendet wird. Dem gegenüber steht der blaue Graph in der selben Abbildung. Dieser stellt den aus den Angaben des Herstellers extrahierten spektralen Reflexionsgrad des Teflon Referenznormals dar.

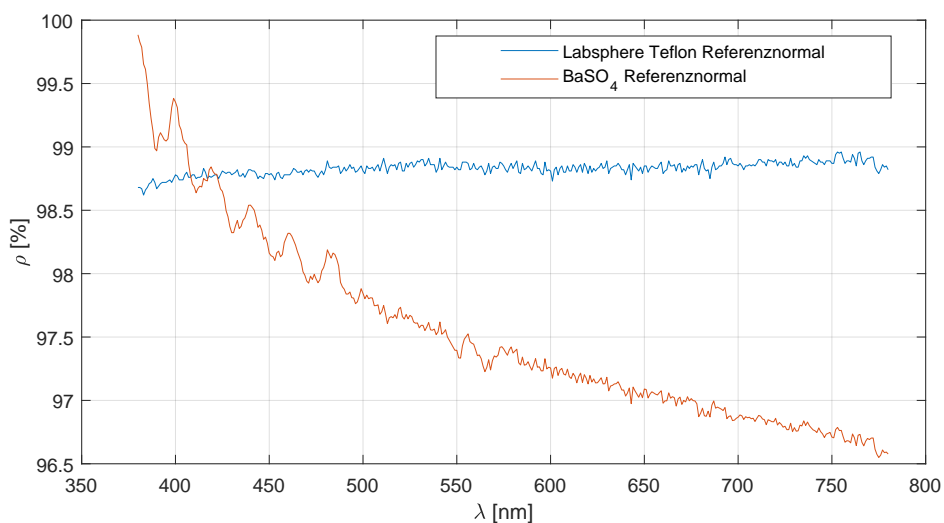


Abbildung 6.2.7

Zu erkennen ist der nahezu als konstant anzunehmende Verlauf des blauen Graphen um seinen Mittelwert $\rho = 98,83\%$. Dieser Wert könnte als vereinfachter Koeffizient innerhalb der

Berechnung 6.2.3.4 statt des spektralen Reflexionsgrades des Teflon Referenznormals verwendet werden. Der spektrale Reflexionsgrad des BaSO_4 -Referenznormals weist hingegen eine deutliche Wellenlängenabhängigkeit auf, weshalb er nicht zu einem einzelnen Koeffizienten zusammengefasst werden kann. Im Zuge der Auswertung werden für beide Referenznormale die spektralen Daten herangezogen, um möglichst präzise Ergebnisse zu erhalten.

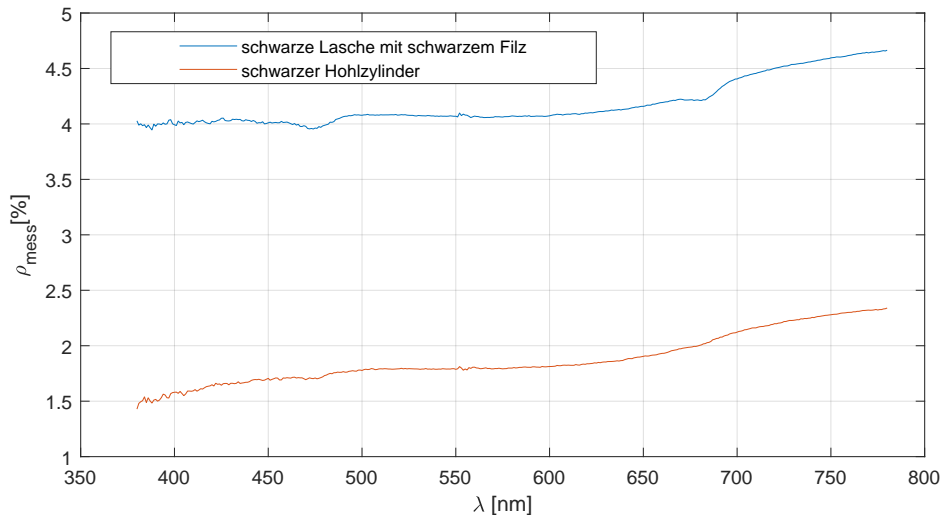


Abbildung 6.2.8: Mit Omega20 aufgenommene spektrale Reflexionsgrade der Anordnungen für $\rho \approx 0$ beider Messsysteme. Für die Messungen mit dem Omega20 wird ein Hohlzylinder aus Pappe über die Probenöffnung gestellt und dessen Ränder mit einem schwarzen Tuch abgedeckt, für das mobile Messgerät wird eine schwarze Materiallasche mit einer Lage schwarzen Filzes verwendet.

Abbildung 6.2.8 zeigt die mit dem Omega20 gemessenen spektralen Reflexionsgrade der Schwarz-Messungen beider Systeme. Die Schwarz-Messung wird zum Zweck der Determination des Einflusses der Ulbrichtkugel auf die Materialmessungen aufgenommen und berücksichtigt. Bei der mobilen Messung wird eine schwarze, mit schwarzem Filz bedeckte Kunststoffflasche verwendet. Der Reflexionsgrad dieser wurde mit dem Omega 20 gemessen und ist als blauer Graph in Abbildung 6.2.8 zu sehen. Dem gegenüber steht die in Abschnitt 6.2.2.2 beschriebene Konfiguration mit dem schwarzen Pappzylinder. Zu beachten ist, dass beide Reflexionsgrade in der Gestalt 6.2.3.2 vorliegen, sodass es sich bei dem Graphen des schwarzen, mit schwarzem Filz bedeckten Materials, nicht um den tatsächlichen Reflexionsgrad handelt. Hierfür hätte eine Auswertung nach 6.2.3.4 erfolgen müssen. In diesem Fall wäre jedoch eine Vergleichbarkeit beider Messungen nicht mehr gegeben. Aus diesem Grund verbleiben beide Messungen in der Gestalt nach Formel 6.2.3.2 und der in Abbildung 6.2.8 dargestellte spektrale Reflexionsgrad wird als ρ_{mess} bezeichnet. Es ist deutlich erkennbar, dass die Schwarz-Messung mit dem Zylinder durchschnittlich 2,5% geringere Reflexionen zulässt. Wird das schwarze Referenznormal verwendet, wird also nicht nur der Einfluss der Ulbrichtkugel gemessen, sondern auch vom schwarzen Referenznormal reflektierte Strahlung. Bei beiden Messungen ist zu erkennen, dass mit zunehmender Wellenlänge in beiden Konfigurationen der Reflexionsgrad leicht zunimmt, was als wellenlängenabhängiger Einfluss der im Omega 20 Messsystem verbauten Ulbrichtkugel gedeutet werden kann.

6.2.3.3 Messergebnisse

In den Abbildungen 6.2.9, 6.2.10, 6.2.11 und 6.2.13 sind die gemessenen und für das mobile Messsystem nach Vorschrift 6.2.3.1, für das Omega 20 nach Vorschrift 6.2.3.4 berechneten spektralen Reflexionsgrade für die in Abbildung 6.2.1 dargestellten Materialproben zu sehen. In violett ist jeweils der mit Omega 20, in blau der mit dem mobilen Messsystem ermittelte spektrale Reflexionsgrad zu sehen. Alle Messungen mit dem mobilen Messsystem haben gemein, dass bei den Wellenlängen 380 nm - 400 nm und 750 nm - 780 nm starkes Messrauschen aufgrund zu geringer Bestrahlungsstärke der Referenzleuchte in diesem Bereich auftritt. Auch weisen die Messergebnisse des mobilen Messgeräts insgesamt im Vergleich zu den Ergebnissen des Omega 20 ein Rauschen auf. Durch den Faktor der Multiplikation innerhalb der Berechnung verstärkt sich grundsätzlich jedes durch den Empfänger Jeti Specbos 1201 aufgenommene Rauschen. Im Messergebnis des Omega 20 ist keinerlei Rauschsignal zu verzeichnen. Das Omega 20 verfügt in seiner Messgeometrie über zwei Empfänger. Auch kann die Annahme getroffen werden, dass die mit dem Omega 20 in Verbindung stehende Messsoftware die Messwerte glättet.

Roter Filz und roter Filz mit Glasplatte

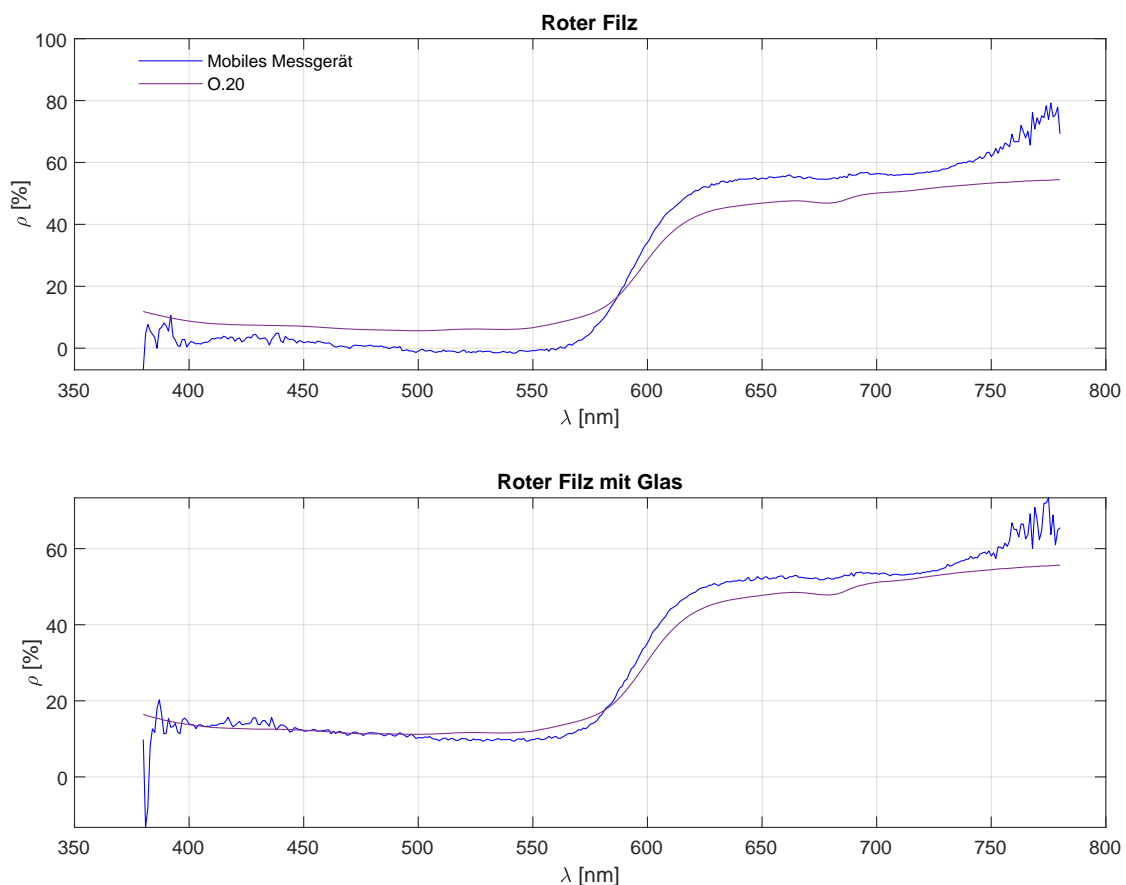


Abbildung 6.2.9: Spektraler Reflexionsgrad von rotem Filz (oben) und von rotem Filz durch eine Glasscheibe (unten).

In Abbildung 6.2.9 sind die Messergebnisse der Vergleichsmessung oben besprochener Messsysteme von rotem Filz und rotem Filz unter einer Glasplatte zu sehen.

Dass der mit dem Omega 20 aufgenommene spektrale Reflexionsgrad im Wellenlängenbereich 380 nm bis etwa 570 nm bei einem durchschnittlichen Reflexionsgrad von etwa 7%-11% aufweist, kann damit erklärt werden, dass das Omega20 eine gerichtete Messung ausführt, bzw. die Materialprobe direkt von der Referenzleuchte angestrahlt wird. Die Empfänger sind zwar nicht auf die Materialprobe gerichtet (sie sind in einem 90° Winkel zur Materialprobe angeordnet, Abbildung 6.2.6), sind aber auch nicht durch Schatter vom direkten Lichteinfall abgekoppelt. Die direkte Anstrahlung der Materialprobe bewirkt eine verstärkte Reflexion als bei einer diffusen Messung [Quelle]. Im Wellenlängenbereich 500 nm bis etwa 570 nm ist der mit dem mobilen Messsystem gemessene spektrale Reflexionsgrad annähernd 0. Im darunterliegenden Wellenlängenbereich gibt es eine leichte Steigung auf 3-4% zwischen 400 nm und 450 nm. Dies kann einer Materialeigenschaft zu Grunde liegen, da auch der Omega20 Graph einen leichten Anstieg zum linken Ende des Spektrums aufweist. Ab der Wellenlänge 570 nm beginnt der Anstieg beider Graphen auf ein Plateau ab etwa 630 nm (mobiles Messgerät bei 55%, Omega20 auf 45%). All das passt zu der mit dem Material in Verbindung stehenden Farbwahrnehmung (rot). Ab 720 nm weist der blaue Graph einen etwa quadratischen Anstieg auf. Dies findet keine Übereinstimmung mit dem Ergebnis des Omega20 Messsystems. Es muss sich daher um einen Messfehler handeln. Weshalb die Messung des Omega20 einen negativen Versatz im Wellenlängenbereich ab 590 nm zu der Messung mit dem mobilen Messgerät aufweist, ist an dieser Stelle nicht erklärbar. Insbesondere da diese Auffälligkeit im Rahmen anderer Materialien in dem selben Wellenlängenbereich nicht auftritt.

Der Unterschied, der durch das Auflegen einer Glasplatte auf den roten Filz entsteht, ist in Abbildung 6.2.9 (unten) zu sehen. Insgesamt ist für beide Messungen ein ähnlicher Verlauf der gemessenen spektralen Reflexionsgrade zu erkennen, jedoch hat sich die Diskrepanz zwischen den Verläufen verringert. Bei beiden Messungen ist zu erkennen, dass sich im Wellenlängenbereich 780 nm bis 590 nm ein positiver Versatz im Vergleich zur Messung ohne Glasscheibe ergeben hat. Bei der Messung mit dem mobilen Messsystem um etwa 10%, bei der Omega20 Messung um etwa 6%. Im Wellenlängenbereich ab 590 nm kehrt sich der Versatz in einen negativen Offset um. Im Vergleich zur Messung ohne Glasscheibe fällt ab 620 nm der spektrale Reflexionsgrad konstant um 2% (mobiles Messgerät) und 1% (Omega 20). Diese beiden Beobachtungen sind durch die Eigenschaften der Glasplatte zu erklären. An der Glasplatte wird trotz ihrer Transparenz ein geringer Anteil der auftreffenden Strahlung reflektiert. Dies erklärt den positiven Versatz zur Vorangehenden, ohne Glasscheibe auf dem Filz liegenden Messung im Bereich unterhalb 590 nm. Der Versatz reduziert sich mit der ansteigenden Flanke, also im Fall des Bereichs oberhalb von 580 nm. Dort durchdringt die Strahlung die Glasplatte bis zum roten Filz. Der rote Filz reflektiert diese im betreffenden Wellenlängenbereich, jedoch wird ein Teil der vom roten Filz reflektierten Strahlung von der Glasplatte erneut in Richtung Filz reflektiert, sodass weniger der vom Filz reflektierten Strahlung zurück ins Kugelphotometer gelangt. Dieser Prozess wiederholt sich mit der von der Glasscheibe auf den roten Filz zurückgeworfenen Strahlung, sodass als Resultat ein bestimmter Anteil der vom roten Filz reflektierten Strahlung verloren geht. Bei den Wellenlängen, bei denen der rote Filz keine Reflexion hervorruft, wird die von der Glasscheibe reflektierte Strahlung gemessen. Bei beiden Messreihen mit dem roten Filz gibt es bei der Messung mit dem Omega 20 eine kleine Einkerbung bei etwa 680 nm. Dies kann auf Instabilitäten im Spektrum der im Omega 20 verbauten Referenzleuchtensystem zurückgeführt werden. Dieses besteht aus einer Überlagerung unterschiedlicher Leuchte, deren zeitlich nacheinander angeordnetes Aufblitzen ein sich über den gesamten sichtbaren Bereich erstreckendes erzeugt. Die Einkerbungen sind an den Stellen zu finden, an denen die Einzelspektren zusammengefügt werden.

Blauer Filz und blauer Filz mit Glasplatte

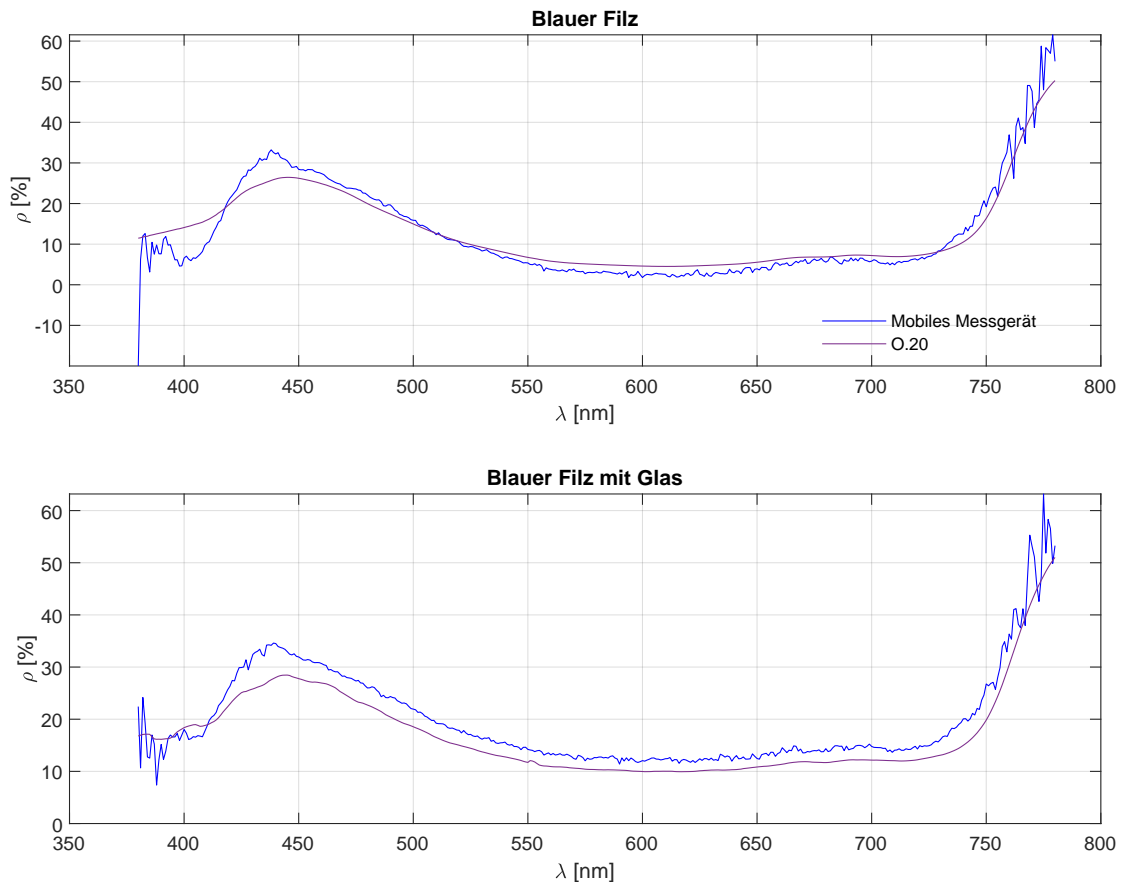


Abbildung 6.2.10: Spektraler Reflexionsgrad von blauem Filz (oben) und von blauem Filz durch eine Glasscheibe (unten).

Abbildung 6.2.10 zeigt die Messergebnisse der Messung von blauem Filz (oben) und dem selben blauen Filz mit einer Glasplatte bedeckt (unten) beider zu vergleichender Messsysteme. Der vom Omega 20 aufgenommene Verlauf (violett) des spektralen Reflexionsgrades hat ein Maximum bei etwa 445 nm (26%) und sinkt auf der linken Seite auf einen Wert von etwa 11% bei 380 nm, auf der rechten Seite auf ein Minimum-Plateau ab etwa 575 nm (5%) bis etwa 650 nm. Ab der Wellenlänge 640 nm steigt der Verlauf von 5% auf 8% bei 690 nm an. Zwischen 640 nm und 690 nm ist erneut die Einkerbung bei 680 nm zu sehen, jedoch nicht so stark ausgeprägt wie bei der Messung des roten Filzes. Ab der Wellenlänge von 720 nm steigt der spektrale Reflexionsgrad mit einem steilen Verlauf von etwa 7% auf 49%. Diese Flanke ist für ein Material, welches als blau wahrgenommen wird, überraschend, dieser Teil der Messung wird jedoch von der Messung mit dem mobilen Messsystem bestätigt, daher wird er den Materialeigenschaften der Probe zugeordnet. Der mit dem mobilen Messsystem aufgenommene Verlauf des spektralen Reflexionsgrades folgt dem violetten Graphen weitestgehend bis auf einen Versatz. Unterschiedlich ist jedoch das Maximum, welches beim blauen Graphen um etwa 5 nm, also bei 440 nm (33%) angesiedelt ist. Der gemessene spektrale Reflexionsgrad sinkt im Minimum auf 2% ab. Des weiteren ist das bereits erwähnte Messrauschen des mobilen Messsystems an den Rändern der Messung ausgeprägt.

Bei der Messung des blauen Filzes mit aufliegender Glasplatte kann ebenfalls der Versatz zur Messung ohne Glasscheibe erkannt werden, der im Bereich, in dem der Reflexionsgrad geringer

ausfällt, positiver Natur ist, und im Wellenlängenbereichen, die einen erhöhten Reflexionsgrad aufweisen, negativ ausfällt. Es sind ähnliche Ergebnisse wie in Bezug auf den roten Filz mit Glasplatte zu beobachten. Werden die Messungen beider Systeme miteinander verglichen, so deckt sich der Verlauf, allerdings liegt der blaue Graph konstante 2% über dem die Omega 20 Messung repräsentierenden Graphen. Weiterhin sind die Maxima beider Messungen um 5 nm zueinander verschoben. Bei den Ergebnissen des Omega 20 ist zu erkennen, dass sich im Wellenlängenbereich 380 nm bis etwa 500 nm ein welliger Verlauf einstellt, dessen Minima und Maxima im Reflexionsgrad etwa 1%, und in der Wellenlänge etwa 10 nm auseinander liegen. Die Ursache hierfür kann entweder bei den Eigenschaften des Glases liegen, oder den Eigenschaften des Omega 20 Messsystems, oder in der Wechselwirkung beider Aspekte miteinander. Bei der Wellenlänge 551 nm liegt erneut ein kleiner Messfehler in Form einer kleinen Ausbeulung, welche mit der Referenzleuchte des Omega 20 in Verbindung gebracht werden kann, da an dieser Stelle sich zwei der einzelnen Leuchten des Omega 20 spektral treffen.

Graue Pappe und graue Bodenplatte

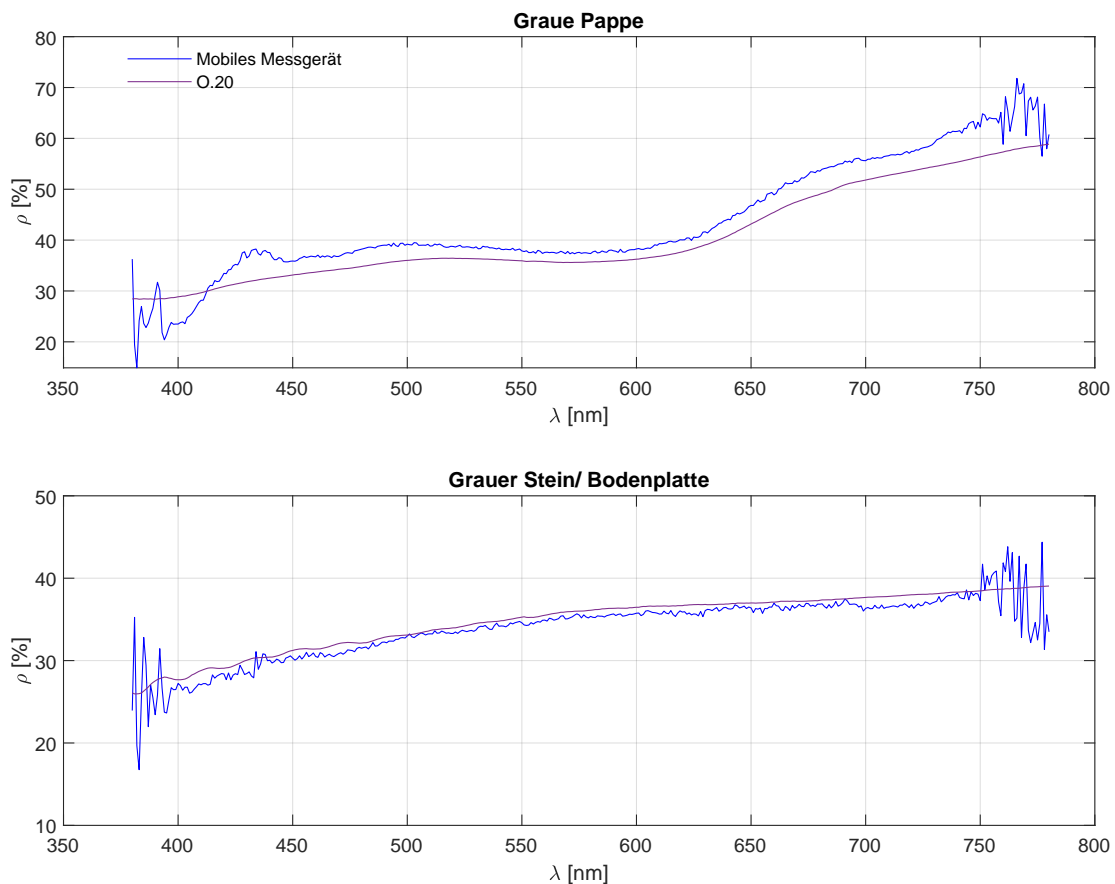


Abbildung 6.2.11: Spektraler Reflexionsgrad von einer grauen Bodenplatte (unten) und einer ihrem Farbton nachempfundenen grauen Pappe (oben).

In Abbildung 6.2.11 sind die gemessenen spektralen Reflexionsgrade einer grauen Bodenplatte (unten) und einer der Bodenplatte nachempfundenen grauen Pappe dargestellt. Der Verlauf des mit dem Omega 20 gemessenen spektralen Reflexionsgrades beginnt bei 380 nm mit etwa 28%, steigt auf einen Wert von 36% bei etwa 570 nm, sinkt auf etwa 35% bei 575 nm und steigt ab da auf einen Wert von 50% bei 685 nm. Ab dieser Wellenlänge verringert sich der An-

stieg leicht und endet bei etwa 57% bei einer Wellenlänge von 780 nm. Dass alle Wellenlängen bei dem gemessenen spektralen Reflexionsgrad einer grauen Pappe vertreten sind, entspricht den Erwartungen. Auch ist kein ausgeprägtes Maximum zu erkennen. Bei dieser Messung sind die bereits erwähnten kleinen Unregelmäßigkeiten bei 680 nm und 551 nm zu finden, jedoch in sehr schwachem Ausmaß. Der Verlauf des mit dem mobilen Messsystem aufgenommenen spektralen Reflexionsgrades folgt dem oben beschriebenen Verlauf des violetten Graphen im Bereich zwischen 450 nm bis etwa 735 nm. Bei 435 nm existiert ein Maximum mit dem Reflexionsgrad 38%, welches bei 400 nm auf 24% absinkt. Dies könnte durch eine Instabilität der Referenzleuchte verursacht worden sein. Zu bemerken ist hier, dass es einen konstanten Versatz von 3% zwischen den Messungen beider Systeme gibt (440 nm - 735 nm).



Abbildung 6.2.12: Nahaufnahme der bemessenen grauen Bodenplatte.

Der Verlauf der Messung an der grauen Bodenplatte weist bei der Messung mit dem Omega20 eine Welligkeit im Bereich 380 nm - etwa 490 nm auf, was an die Messung des blauen Filzes unter der Glasplatte erinnert. Ähnlichkeiten der die Welligkeit erzeugenden Materialien besteht insofern, dass die Bodenplatte aus zerschlagenen kleineren Steinen besteht, von denen ein bestimmter Typ stark glänzende Eigenschaften aufweist. Abbildung 6.2.12 zeigt einen vergrößerten Ausschnitt der Bodenplatte. Bei 551 nm ist erneut die kleine aus der Korrekturlinie resultierende Unregelmäßigkeit zu sehen. Mit zunehmender Wellenlänge nimmt die Intensität der Welligkeit des Graphen ab. Bei 380 nm beginnt der Reflexionsgrad bei 26% steigt abgesehen von der verstärkten Welligkeit auf 34,5% bei 550 nm an und steigt weiter, jedoch mit einer geringeren Steigung bis zur Wellenlänge 780 nm auf den Maximalwert 38% an. Auch dieser Verlauf stimmt mit der mit der Materialprobe in Verbindung stehenden Farbwahrnehmung überein. Bei der Messung mit dem mobilen Messsystem gibt es bis auf das Messrauschen des Graphen keine signifikanten Abweichungen von der Messung des Omega 20.

Braune Pappe, brauner Bau-Stein und braune Unterseite einer Fliese mit Wabenstruktur

Abbildung 6.2.13 zeigt die Messung brauner Materialien. Oben sind die gemessenen spektralen Reflexionsgrade einer braunen Pappe zu erkennen, in der Mitte sind die Graphen

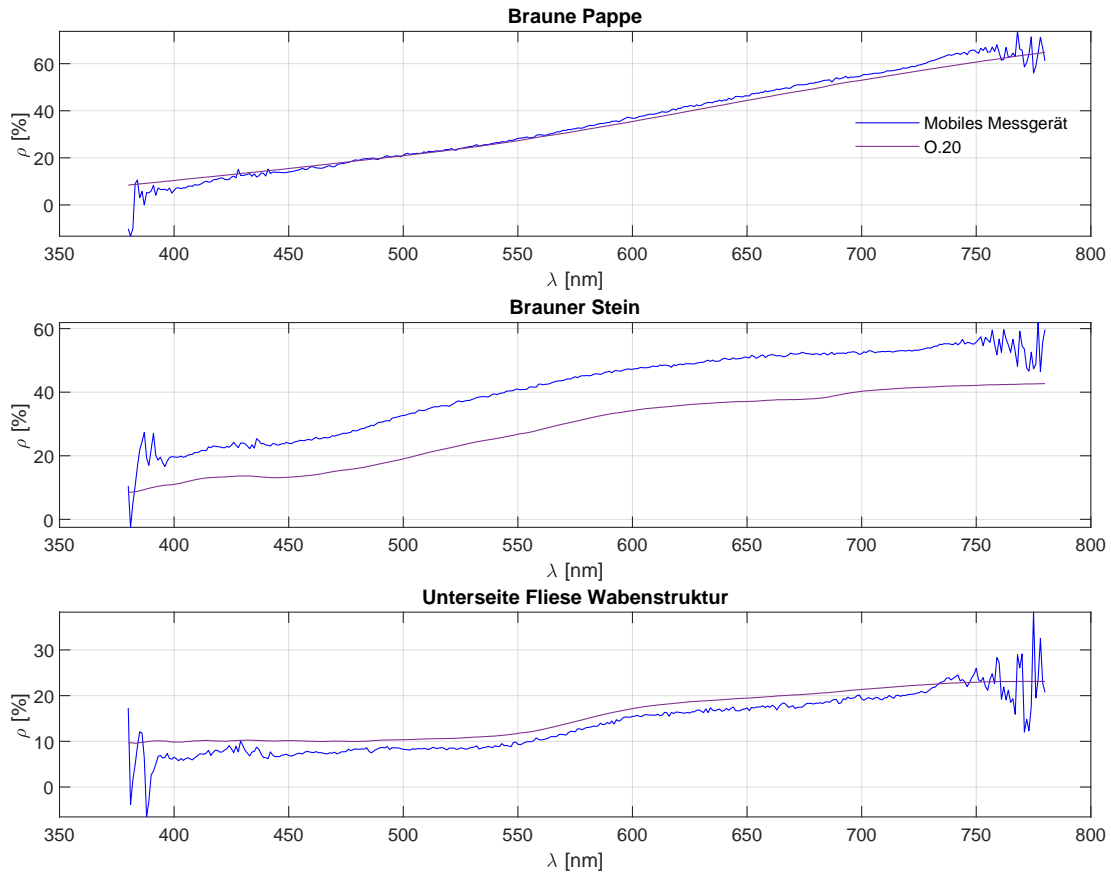


Abbildung 6.2.13: Spektraler Reflexionsgrad eines braunen Bau-Steins (mitte) und einer seinem Farbton nachempfundenen braunen Pappe (oben). Spektraler Reflexionsgrad der braunen Rückseite einer italienischen Fliese mit Wabenstruktur.

zur Messung eines braunen Bau-Steines sichtbar und unten sind die gemessenen Verläufe des spektralen Reflexionsgrades der Rückseite einer Fliese, welche eine homogene Wabenstruktur aufweist, dargestellt. Das Omega 20 hat für die braune Pappe einen spektralen Reflexionsgrad gemessen, der durch seinen kontinuierlichen, nahezu konstanten Anstieg charakterisiert ist. Die kleinen der Korrekturline zuzuschreibenden Unregelmäßigkeiten bei 551 nm und 680 nm sind sehr schwach ausgeprägt. Der Reflexionsgrad beginnt bei etwa 8% (380 nm) und steigt auf etwa 63% bei 780 nm an. Die Messung mit dem mobilen Messgerät folgt dem Verlauf, weist allerdings einen leicht steileren Anstieg auf. Der gemessene Reflexionsgrad beträgt hier 6% (400 nm) und steigt auf 65% bei 750 nm an.

Bei der Messung des Braunen Bau-Steines kommt ein signifikanter Versatz zwischen den Ergebnissen der verschiedenen Messsysteme zu Tage. Die Verläufe weisen bis auf den Versatz einen sehr Ähnlichen Verlauf auf. Der Versatz kann entweder dadurch verursacht worden sein, dass bei der Messung mit dem Omega20 eine zu große Lücke zwischen der unebenen Oberfläche der Materialprobe und der Ebene in der das Materialfenster eingearbeitet ist vorlag, und durch diese ein signifikanter Anteil der sich in der Ulbrichtkugel befindlichen Strahlung verloren ging. Dass eine andere Stelle der Materialprobe gemessen wurde, könnte grundsätzlich auch eine Ursache sein, ist jedoch aufgrund der annähernden Homogenität des Helligkeitsverlaufes der Materialprobe auszuschliessen. Trotzdem ist aufgrund der unterschiedlichen Größe der Materialfenster nicht auszuschliessen, dass unterschiedliche Bereiche der Materialprobe mit den

Messsystemen erfasst worden sind.

Die Farbe der bemessenen Unterseite der Fliese ist ein rötliches Braun, was sich im Verlauf der aufgenommenen spektralen Reflexionsgrade andeutet, der qualitativ an den gemessenen Verlauf des spektralen Reflexionsgrades des roten Filzes erinnert. Der spektrale Reflexionsgrad, der mit Omega 20 gemessen wurde, weist ein weiteres Mal eine Welligkeit im Bereich 380 nm bis etwa 500 nm auf, welche jedoch nicht sehr stark ausgeprägt ist. Dies kann der Beschaffenheit der Fliese zu Grunde liegen, welche ebenfalls über einen gewissen Grad an Glanz verfügt. Da die Fliese eine dunklere Farbe als die braune Pappe und der braune Stein aufweist, ist der spektrale Reflexionsgrad insgesamt entsprechend geringer als bei den anderen braunen Materialien. Das Omega 20 hat einen spektralen Reflexionsgrad von etwa 9,5% bei 380 nm gemessen, welcher bis auf die geringfügige Welligkeit bis 500 nm nahezu konstant bleibt, bis 550 nm auf 22% ansteigt, bis 600 nm auf 17% ansteigt und mit einem kontinuierlichen Anstieg bei 780 nm etwa 22% erreicht. Der mit dem mobilen Messgerät gemessene Verlauf weicht insofern vom violetten Graphen ab, dass es einen negativen Versatz von etwa 1% gibt. Auch liegt eine Welligkeit im Wellenlängenbereich 400 nm - 500 nm vor. Dies kann entweder an der Materialstruktur liegen, die zu Messfehlern führt, oder die Messung kann aufgrund von einer fehlerhaften Positionierung des Materialfensters verfälscht sein. Eine Instabilität der Referenzleuchte ist in diesem Fall unwahrscheinlich, da die Auffälligkeiten nicht an den typischen Wellenlängen für Instabilität der Referenzleuchte zu verorten sind.

6.2.3.4 Glättung der Messwerte

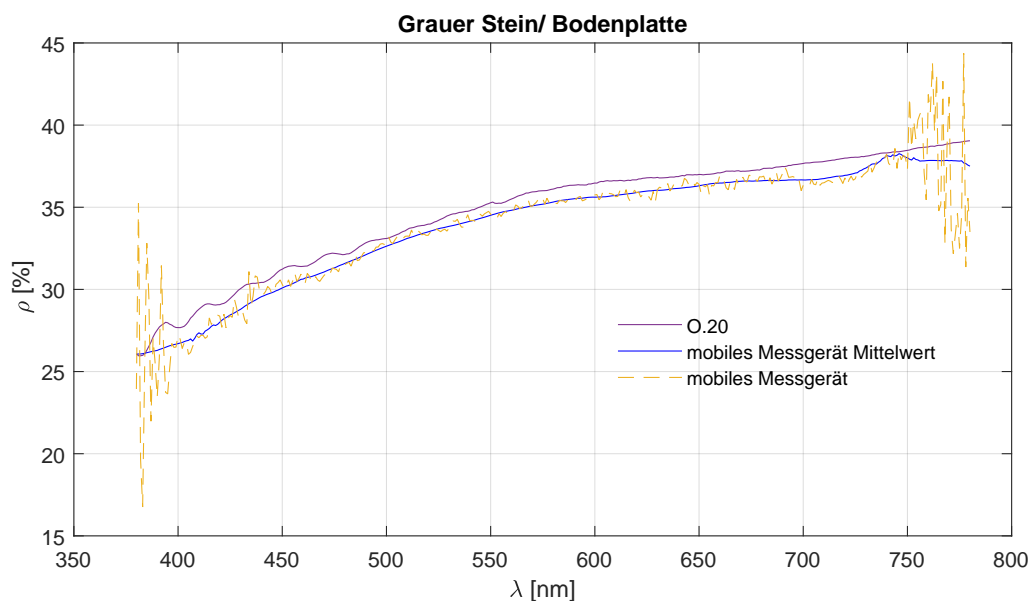


Abbildung 6.2.14

Da die aus den Messwerten des mobilen Messsystems berechneten Reflexionsgrade einem signifikanten Rauschen unterliegen, insbesondere in den Wellenlängenbereichen 380 nm - 400 nm und 750 nm - 780 nm, ist das Glätten des Graphen ein sinnvoller Ansatz. In Abbildung 6.2.14 ist beispielhaft der gleitende Mittelwert (*moving mean*) für den mit dem mobilen Messgerät ermittelten spektralen Reflexionsgrad der grauen Bodenplatte dargestellt. Bei dieser Mittelung werden lokale Mittelwerte über ein gleitendes Fenster einer bestimmten Länge über benachbarte Datenpunkte berechnet. An den Endpunkten wird die Fenstergröße automatisch abge-

schnitten, wobei dann nur die Datenpunkte gemittelt werden, die das Fenster füllen [9]. Der beispielhaft in Abbildung 6.2.14 gemittelte Datensatz wurde mit einer Fenstergröße von 50 Werten berechnet. Je größer das Fenster gewählt wird, desto "glatter" der Verlauf der Kurve. Zu sehen ist, dass der gemittelte Graph den mittels Omega 20 ermittelten Graphen bis auf ein Offset gut annähert. In welchem Ausmaß und unter welcher Parameterwahl die Glättung die repräsentativsten Ergebnisse liefert, bedarf einer genaueren Untersuchung, welche den Rahmen dieser Arbeit überschreitet.

6.3 Feldmessung

In diesem Abschnitt wird eine Feldmessung durchgeführt und beschrieben. Auf diese Weise wird nicht nur die Benutzbarkeit des im Rahmen dieser Arbeit erstellten Messsystems untersucht, sondern auch eine exemplarische Vorgehensweise zur Aufnahme von Messungen im Detail beschrieben. Im Anschluss daran werden die Messergebnisse exemplarisch mit der zur Auswertung erstellten automatisierten Arbeitsmappe ausgewertet.

6.3.1 Vorbereitung und Konzept

Für eine Messung im Aussenbereich sind einige Vorbereitungen zu treffen. Zunächst sollte sichergestellt werden, dass sowohl der zu benutzende Laptop, als auch die die Referenzleuchte des Messsystems betreibende Powerbank über ausreichend Ladekapazität verfügen. Auch muss darauf geachtet werden, dass die Wetterlage stabil ist.

Folgendes ist zur Messung mitzubringen:

- Laptop, vorzugsweise mit Tasche/ Hülle
- mobiles Messsystem (+Powerbank und USB Kabel für Powerbank)
- Jetti Specbos 1201 (+USB-Kabel)
- Probennormale weiß und schwarz
- gegebenenfalls eine Bürste, um Verschmutzungen der zu messenden Oberflächen grob zu entfernen

Eine gute Strategie ist es, Orte für die Messung zu suchen, in denen sich mehrere interessante Materialien in einem Radius von etwa 70 cm treffen, sodass diese in einer Messreihe erfassbar sind. Der Messradius ist durch das USB-Kabel bestimmt, welches den Rechner mit dem Messempfänger verbindet. Auch ist der Messradius dadurch bestimmt, ob eine assistierende Person die Messung am Rechner aktiviert, oder ob die messende Person dies selbst ausführt.

6.3.2 Messaufbau und Durchführung

Wird ein geeigneter Platz gefunden, so kann die Messung vorbereitet werden. Der Laptop wird mittels USB-Kabel mit dem im Messsystem verbauten Messempfänger, Jeti Specbos 1201, verbunden und die Software JETILiValV7.0.0 gestartet. Es wird sichergestellt, dass der Messmodus auf Bestrahlungsstärke (*irradiance*) gesetzt ist und der Diffusor-Aufsatz auf das Jeti Specbos 1201 gesteckt ist. Vorteilhaft ist es, die Messreihenfolge bereits im Voraus zu dokumentieren, um im Anschluss an die Messung die Datensätze korrekt beschriften zu können. Das weiße und das schwarze Referenznormal sollten griffbereit sein. Zunächst wird die Referenzleuchte über den Kippschalter aktiviert, sodass die Bereitschaft anhand der langsam blinkenden Indikator-LED erkennbar ist. Da vor jeder Messreihe zunächst das weiße, dann das schwarze Referenznormal vermessen werden muss, ist es empfehlenswert, vor Aktivieren des Betriebsintervalls das weiße Referenznormal bereits am Materialfenster zu positionieren. Um das Betriebsintervall zu aktivieren, wird der weiße Taster am Bedienfeld betätigt (etwa 1 s lang gedrückt), woraufhin die Indikator-LED 5x schnell blinkt, um der messenden Person die bevorstehende Messung anzukündigen, bevor die Referenzleuchte für 30 s aktiviert wird. In diesen 30 s sind die Materialmessungen durchzuführen. Ist das Materialfenster des Kugelphotometers vor dem zu bemessenden Material positioniert, so wird die Messung am Rechner in der Software JETILiValV7.0.0 ausgelöst. Da der Messempfänger für die Aufnahme der Messwerte maximal etwa 0,5 s (bei der Schwarz-Messung) benötigt, lassen sich während eines Betriebsintervalls mehrere Materialmessungen durchführen. Während die Referenzleuchte aktiv ist, leuchtet die Indikator-LED durchgehend. Sobald diese erloschen ist, kann keine weitere Messung aufgenommen werden, da die Referenzleuchte dann ebenso inaktiv ist. Die Feldmessung wird bei einer Außentemperatur von 2 Grad Celsius durchgeführt und es werden mehrere Feldmessungen durchgeführt.

6.3.3 Messergebnisse und Auswertung

Aufgrund der tiefen Temperatur von etwa 2°C liefert das mobile Messgerät keine zuverlässigen Ergebnisse angesichts des durch die niedrige Temperatur hervorgerufenen instabilen Spektrums der Referenzleuchte. Messung 1 wurde ausgeführt, als das Messgerät die Aussentemperatur noch nicht angenommen hat. Daher unterliegen die Messergebnisse an dieser Stelle noch nicht den extremen Verzerrungen, die sich im Verlauf der Feldmessung ergeben haben, können jedoch trotzdem nicht als valide angenommen werden. Eine Wiederholung der Feldmessung bei einer höheren Temperatur ist aufgrund der Beschaffenheit der vorliegenden Jahreszeit nicht möglich. Abbildung 6.3.1 zeigt die bemessenen Materialien. Die Ergebnisse werden beispielhaft mit der mittels VBA erstellten automatisierten Auswertungs-Arbeitsmappe ausgewertet. Die Korrektheit der Messwerte kann jedoch nicht gewährleistet werden, daher wird auf eine Diskussion dieser verzichtet.

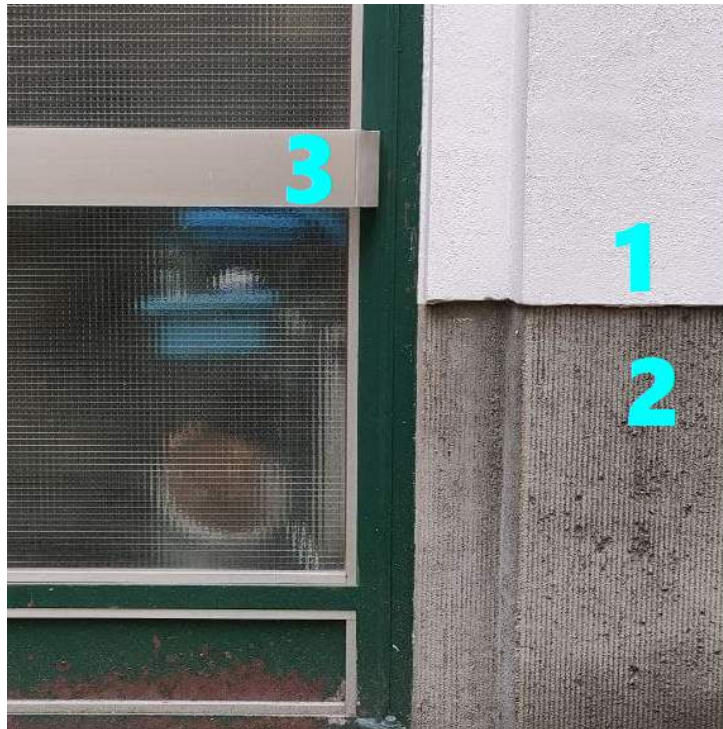


Abbildung 6.3.1: In Messrunde 1 vermessene Materialien: Weiße verputzte Wand (1), mit groben Rillen versehene Betonfassade (2), Aluminiumtürgriff (3)

Die Materialien 1,2 und 3 wurden innerhalb eines Betriebsintervalls gemessen, somit sind deren Messwerte in einer gemeinsamen CSV. Es wird die Arbeitsmappe *OutRSpecV1.0_Eval.xlsm* geöffnet. In Microsoft Excel ist die Ansicht wie in Abbildung 6.3.3 zu sehen. Die Arbeitsmappe besteht aus drei Tabellenblättern:

- **Evaluation** Hauptansicht
- **Imported data** In dieses Tabellenblatt wird die auszuwertende CSV importiert, auch wird es dazu genutzt, temporäre Variablen zu speichern. Im Tabellenblatt ist zu Berechnungszwecken der spektrale Reflexionsgrad des Referenznormals gespeichert.
- **Calculated RHO** Hier werden die berechneten spektralen Reflexionsgrade als Datensatz sowie als Graph ausgegeben.

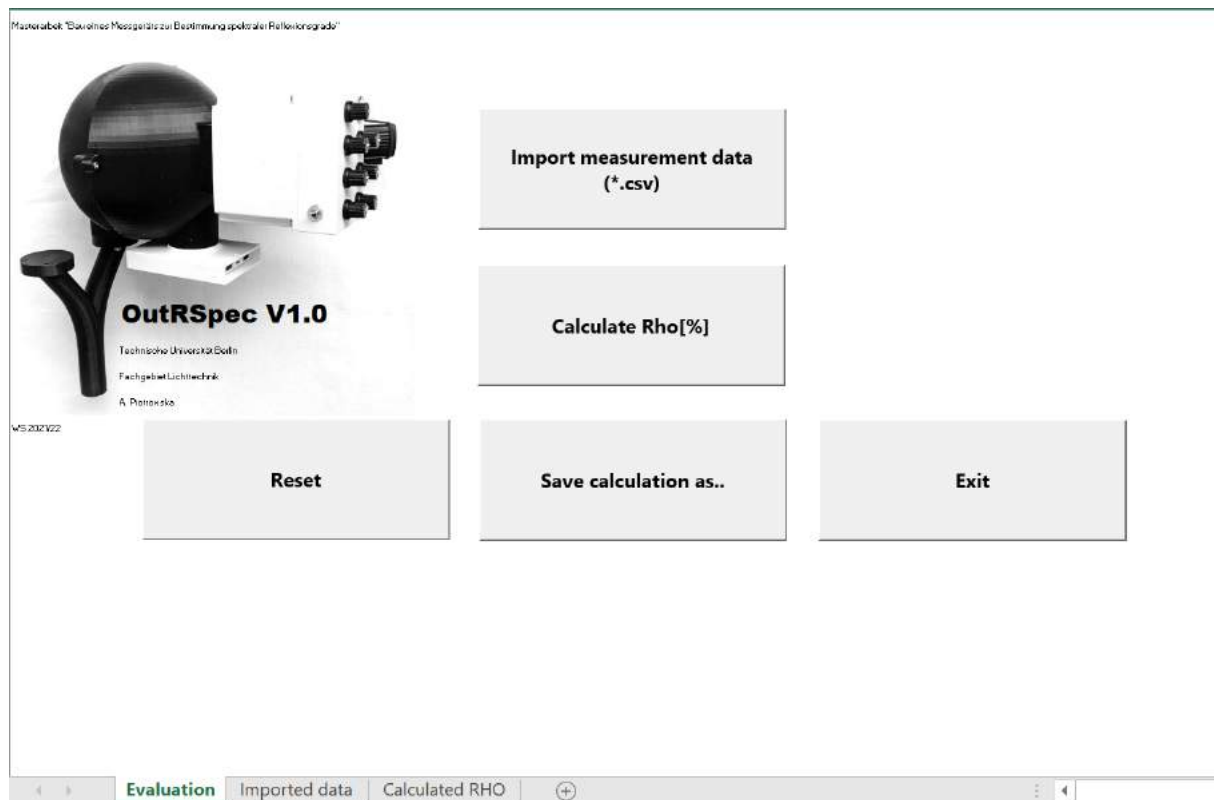


Abbildung 6.3.2: Benutzeroberfläche der automatisierten Auswertungsumgebung innerhalb Microsoft Excel.

Mit der Schaltfläche *Import measurement data (*.csv)* lässt sich die auszuwertende CSV importieren, mit der Schaltfläche *Calculate RHO [%]* werden daraus die spektralen Reflexionsgrade nach Vorschrift 3.3.0.1 berechnet. Es können bis zu 7 Materialmessungen aus einer Messung ausgegeben werden. Die ersten beiden Spalten der importierten CSV werden als die Messungen der Referenznormale angenommen, daher ist bei der Messung selbst darauf zu achten, zunächst das $\rho \approx 1$ Referenznormal zu bemessen, danach die Schwarz-Messung durchzuführen und dann erst die Materialmessungen. Das Betriebsintervall von 30 s lässt mehrere Materialmessungen zu, nachdem die Referenzmessungen durchgeführt wurden.

Es werden beispielhaft die Messdaten der Feldmessung importiert und ausgewertet. Abbildung 6.3.4 zeigt die Bildschirmansicht im für die Auswertung vorgesehenen Tabellenblatt. Es wurden 3 Messungen ausgewertet, die verbleibenden 4 Slots können vernachlässigt werden. Für eine weitere Bearbeitung lässt sich dieses Tabellenblatt als neues Tabellenblatt exportieren mittels Betätigung der Schaltfläche *Save calculation as..* im Tabellenblatt *Evaluation*. Soll eine weitere Messreihe ausgewertet werden, so können über *Reset* die Tabellenblätter *Imported data* und *Calculated RHO* zurückgesetzt werden und weitere Messdaten eingelesen sowie ausgewertet werden. Mittels *Exit* kann die Auswertung beendet werden. Die Excel Arbeitsmappe schließt sich, ohne dass Änderungen übernommen werden.

	A	B	C	D	E	F
1		weiss	schwarz	weisse fassade	graue rillen f.	alu Rahmen
2	Name	#1	#2	#3	#4	#5
3	Measuring m	Irradiance	Irradiance	Irradiance	Irradiance	Irradiance
4	Correction					
5	Date	05.01.2022	05.01.2022	05.01.2022	05.01.2022	05.01.2022
6	Time	11:54:40	11:54:47	11:54:54	11:54:59	11:55:04
7	Sync. frequen	0	0	0	0	0
8	T_int [ms]	197	508	249	450	316
9	Averages	1	1	1	1	1
10						

Abbildung 6.3.3: In der Importierten CSV können, sofern noch nicht in JETI LiVal geschehen, die bemessenen Materialien in der ersten Zeile benannt werden. Die Datensätze der ausgegebenen spektralen Reflexionsgrade werden nach Zeile 1 der importierten CSV benannt. Auch wird das Datum und die Uhrzeit aus der CSV übernommen, um eine spätere Identifikation der ausgewerteten Daten zu gewährleisten.

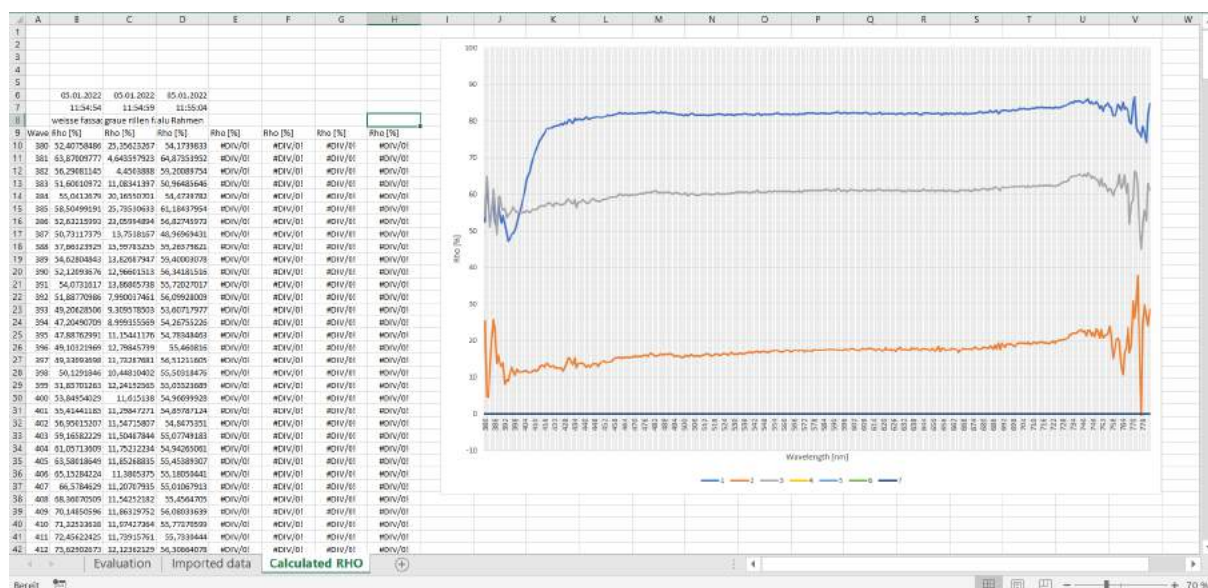


Abbildung 6.3.4: Tabellenblatt *Calculated RHO* mit ausgewerteten Daten. Die 4 nicht besetzten Auswertungs-Slots liefern keine Daten, da keine weiteren spektralen Reflexionsgrade in dieser Sitzung aufgenommen wurden.

7 Ergebnisse

Der folgende Abschnitt gibt eine Übersicht über die Gesamtergebnisse dieser Arbeit. Zunächst wird das gebaute Messgerät zusammenfassend präsentiert. Im Anschluss werden die technischen Daten gebündelt.

7.1 Messgerät



(a) Seitenansicht A



(b) Seitenansicht B.

Abbildung 7.1.1

Abbildung 7.1.1 zeigt das fertige Messgerät. Die Anforderung einen mobilen Betrieb zu gewährleisten wurde erfüllt. Die Referenzleuchte ist leistungsstark genug, um ein ausreichend kurzes Messintervall des Messempfängers zu ermöglichen, sodass das Messgerät nicht zu lange durch die messende Person stabilisiert werden muss. Trotz der Temperatureinschränkung für den Messbetrieb liefert das Messgerät insgesamt plausible Messergebnisse. Um die Stabilität der Referenzleuchte zu gewährleisten, muss die Referenzleuchte für 2 Betriebsintervalle aktiviert werden, sodass sich eine Betriebsstabilität einstellt. Das Gerät wird mit dem Arbeitsnamen **OutRSpec** versehen, da es die Messung des **spektralen Reflexionsgrads im Freien (outside)** ermöglicht.



(a) Über den Kippschalter lässt sich die Betriebsbereitschaft aktivieren. Der Taster leitet das Betriebsintervall ein. In Mittenstellung befinden sich die Potentiometer im Nennarbeitspunkt. In der oberen Reihe sind die LEDs mit Misch-Spektren angeordnet: v.l.n.r. PNK, PRP, LME. In der unteren Reihe sind die einfarbigen LEDs gemäß Position im Spektrum angeordnet: v.l.n.r. VB, BLU, CYN, FRD.



(b) Das Jeti Specbos 1201 wird mittels 2 Schrauben an der Ulbrichtkugel fixiert.

7.2 Technische Daten

spektraler Bereich	380 nm - 780 nm
Auflösung	1 nm
Leistungsaufnahme im Nennbetrieb	<3,5 W (5V DC * 0,7A)
Gewicht (inkl. Powerbank, ohne Jeti)	981g
Maße	31 cm x 23 cm x 31 cm (BxTxH)
Temperatur für Betrieb	15°C- 21°C

Tabelle 7.1: Technische Daten

8 Zusammenfassung

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein mobiles Messgerät zur Messung spektraler Reflexionsgrade gebaut. Es wurde basierend auf den sich aus der Randbedingung der Mobilität ergebenden Anforderungen, welche sich zusammenfassen lassen zu einer kompakten Größe und einer Spannungsversorgung mit der Niederspannung von 5 V, konzipiert. Als Messempfänger sollte das Spektroradiometer Jeti Specbos 1201 verwendet werden. Ein besonderer Fokus musste auf das Entwickeln und Planen einer ausreichend leistungsstarken und möglichst im gesamten Wellenlängenbereich abstrahlenden Referenzleuchte gelegt werden. Hierfür wurde der Ansatz gewählt, sich an dem Normlichtspektrum D65 zu orientieren. Es wurden spezielle, für den Gartenbau konzipierte High-Power-SMD-LEDs, die bestimmte Anteile des Tageslichtspektrums zum Zweck der Photosynthese bei Pflanzen nachbilden, ausgewählt, um aus einer Zusammensetzung ausgewählter LEDs dieser Art eine Annäherung an das D65 Normlicht zu erhalten. Um die periphere Schaltung der Referenzleuchte dimensionieren zu können, wurde mithilfe eines Simulationstools des LED Herstellers das gewünschte resultierende Spektrum simuliert und die Arbeitspunkte der Dioden aus der Datenblätter abgeleitet. Als Steuerungselement für die Referenzleuchte wurde der Mikrocontroller Arduino Leonardo ausgewählt, als energiever sorgendes Element eine handelsübliche Powerbank. Nachdem ein grober Testaufbau mit Lochrasterplatten aufgebaut, auf seine Funktion hin überprüft und leichten Änderungen unterzogen worden ist, wurde die finale Schaltung auf zwei für diese Schaltungen entworfene Platinen übertragen und der Mikrocontroller für die Steuerung der Referenzleuchte programmiert. Vom Fachgebiet für Lichttechnik der TU Berlin wurde ein mittels 3D Druck speziell für dieses Projekt hergestelltes Kugelphotometer zur Verfügung gestellt, welches vor der Montage mit Bariumsulfat lackiert werden musste. Nachdem das Messgerät in seiner Gesamtheit montiert worden ist, wurden erste Messungen des Spektrums der Referenzleuchte vorgenommen. Das von der Simulation stark abweichende Spektrum wurde an den geplanten Verlauf angepasst. Nach der Inbetriebnahme wurden Vergleichsmessungen mit einem stationären Messsystem am Fachgebiet für Lichttechnik der Technischen Universität durchgeführt. Hierfür wurde eine sinnvolle Komposition an Materialproben zusammengestellt. Die Vergleichsmessungen zeigten Instabilitäten im Referenzleuchterspektrum, sodass der D65 Ansatz verworfen werden musste, um einen stabilen Betrieb der Referenzleuchte zu gewährleisten. Nach der Stabilisierung der Referenzleuchte wurden die Vergleichsmessungen wiederholt. Um die Benutzbarkeit des Messgerätes zu testen, wurden Feldmessungen im Freien durchgeführt, welche in der Erkenntnis resultierten, dass das gebaute Messgerät nicht für den in der vorliegenden Jahreszeit vorherrschenden Temperaturbereich ausgelegt ist. Um eine Ausgabe des spektralen Reflexionsgrades zu erzielen, wurde in VBA eine automatisierte Arbeitsmappe programmiert, die aus den gemessenen Daten den spektralen Reflexionsgrad in tabellarischer sowie graphischer Form ausgibt. Die Messergebnisse der Vergleichsmessung mit dem System Omega 20 wurden ausgewertet und diskutiert. Zuletzt wurden die technischen Daten des gebauten Messgeräts gebündelt.

9 Fazit

In dieser Arbeit ist das Fundament gelegt worden für ein mobiles Messgerät zur Bestimmung spektraler Reflexionsgrade in Form eines Prototypen, der weiterentwickelt werden kann. Insgesamt ist das Ergebnis zufriedenstellend, denn anhand der Vergleichsmessung mit dem Labormessgerät Omega 20 konnte gezeigt werden, dass die mit dem erstellten Messgerät aufgenommenen Daten zuverlässige Ergebnisse liefern. Es wurde ein Messgerät gebaut, dass in seinem Betriebsbereich valide Ergebnisse liefert und mobil eingesetzt werden kann. Trotzdem ergeben sich gewisse Punkte, die zu einer signifikanten Verbesserung, bzw. zu einer Erweiterung des Betriebsbereiches führen könnten. Dazu zählen:

- Eine Stromstabilisierung pro LED-Strang damit die einzelnen Diodenströme voneinander abgekoppelt sind und sich nicht mehr gegenseitig beeinflussen. Damit würde sichergestellt, dass das Spektrum der Referenzleuchte auch bei tiefen Temperaturen stabil bleibt.
- Die für die benutzende Person zugängliche Potis könnten ein anderes Konzept verfolgen. Es könnte beispielsweise nur ein Poti verwendet werden, um die gesamte Strahlungsleistung bei Bedarf zu erhöhen. Geplant war, das Spektrum gegebenenfalls variabel zu halten, um Kompensationsspielraum bei Instabilitäten bestimmter LEDs zu gewährleisten. Würde eine Stromstabilisierung realisiert werden, so könnten alle Potentiometer zusammengefasst werden.
- Die Referenznormale könnten eine Form haben, die einfachere und schnellere Referenzmessungen ermöglicht. Da die Referenznormale genau die Ränder der Materialöffnung abdecken, muss sorgfältig und langsam beim Wechseln dieser vorgegangen werden.
- Die Referenzleuchte könnte um weitere LEDs erweitert werden, um die Ränder des Spektrums besser abzudecken.
- Powerbank schaltet nicht automatisch ab, da Arduino per USB einen erhöhten Stromverbrauch aufweist. Der Schalter ist besser zwischen dem USB-Anschluss und der Powerbank zu platzieren.
- Für die Auswertung der Messwerte könnte eine Benutzeroberfläche erstellt werden, die anwenderfreundlicher ist und die Auswertungsdaten über ein Glättungsverfahren der Messwerte optimiert.

Durch die Messung spektraler Reflexionsgrade verschiedener im Aussenbereich angesiedelter Materialien, kann durch Erfassen realer Messwerte eine Grundlage zum Vergleich und gegebenenfalls zur Weiterentwicklung von Tageslichtsimulationsverfahren im Rahmen von Stadtplanung und Architektur geboten werden. Dies ermöglicht es, die spektrale Dynamik des Tageslichts besser in die Planung urbaner Szenarien einzubeziehen.

Literatur

- [1] European Commission. Joint Research Centre. *Atlas of the Human Planet 2019: a compendium of urbanisation dynamics in 239 countries*. Publications Office, 2020. DOI: 10.2760/014159.
- [2] Priji Balakrishnan und Alstan J. Jakubiec. "Spectral Rendering with Daylight: A Comparison of Two Spectral Daylight Simulation Platforms". In: *Proceedings of Building Simulation 2019: 16th Conference of IBPSA*. Hrsg. von Vincenzo Corrado u. a. Building Simulation Conference proceedings. IBPSA, 2020, S. 1191–1198. DOI: 10.26868/25222708.2019.211158.
- [3] Hans-Jürgen Hentschel, Hrsg. *Licht und Beleuchtung: Grundlagen und Anwendungen der Lichttechnik*. 5., neu bearb. und erw. Aufl. Heidelberg: Hüthig, 2002. ISBN: 9783778528174.
- [4] Roland Baer, Meike Barfuß und Dirk Seifert. *Beleuchtungstechnik: Grundlagen*. 5. Auflage. Berlin: Huss-Medien GmbH, 2020. ISBN: 3341016481.
- [5] *DIN 5036-3:1979-11, Strahlungsphysikalische und lichttechnische Eigenschaften von Materialien; Meßverfahren für lichttechnische und spektrale strahlungsphysikalische Kennzahlen*. Berlin. DOI: 10.31030/1114192.
- [6] "DS236-luxeon-2835-color-line-datasheet". In: (). URL: <https://lumileds.com/wp-content/uploads/2021/10/DS236-luxeon-2835-color-line-datasheet.pdf>.
- [7] "DS237-luxeon-sunplus-2835-line-datasheet". In: (). URL: <https://lumileds.com/wp-content/uploads/files/DS237-luxeon-sunplus-2835-line-datasheet.pdf>.
- [8] <https://designtools.lumileds.com>. 26.01.2022. URL: <https://designtools.lumileds.com/>.
- [9] *Moving mean - MATLAB movmean - MathWorks Deutschland*. 26.01.2022. URL: <https://de.mathworks.com/help/matlab/ref/movmean.html>.

Tabellenverzeichnis

4.1	Tabelle zur Bestimmung der Arbeitspunkte der verwendeten LEDs. Aus dem Quotienten der sich aus der Simulation ergebenden Strahlungsleistungen und der in den Datenblättern zu findenden Nennstrahlungsleistungen werden die relativen Strahlungsfaktoren berechnet. Aus der <i>Normalized Photon Output - Forward Current</i> -Kennlinie der LEDs lassen sich die für die gewählten Arbeitspunkte nötigen Ströme entnehmen.	19
4.2	Erläuterung der in Abbildung 4.3.3 gekennzeichneten Komponenten der Ulbrichtkugel mit Gehäusekomponenten.	23
5.1	Der Arbeitspunkt soll auf die Mittenstellung der Potentiometer gelegt werden, jedoch darf $R_{v,min}$ nicht unterschritten werden. ΔR bezeichnet den zur Verfügung stehenden Widerstandsbereich für die Potentiometer in Mittenstellung. Da Potentiometer nur in bestimmten diskreten Werten zur Verfügung stehen, werden Trimmer verwendet, um die Differenz zwischen benötigtem $R_{pot,center}$ und den realen Potentiometerwiderständen in Mittenstellung auszugleichen. Die Trimmer-Widerstände werden anschließend mit $R_{v,min}$ zusammengefasst. .	26
7.1	Technische Daten	65

Abbildungsverzeichnis

1.0.1 Vergleich Tageslichtsimulationsverfahren ([2], S.1195)	6
3.1.1 Spektrale Strahlungsverteilung des Normlichts D65 nach CIE	9
4.2.1 Nicht nur zum Unterbinden des automatischen Abschaltens der Powerbank, sondern auch zum Betreiben der Indikator LED wird die hier abgebildete Impulslast-Schaltung in der Gesamtschaltung der Referenzleuchte als peripheres Element implementiert.	14
4.2.2 Auszüge aus den Datenblättern der verwendeten Produktserien <i>Lumileds LUXEON 2835 Color Line</i> ([6] S. 6) und <i>Lumileds LUXEON SunPlus 2835 Line</i> ([7] S. 5): Darstellungen der normailisierten Strahlungsleistungen der in den Produktserien enthaltenen LEDs über der Wellenlänge	15
4.2.3 Relative Strahlungsleistung über der Wellenlänge des D65 Normlichts mit eingezeichneten Stützstellen	16
4.2.4 Im Simulationstool simulierte relative Strahlungsleistung über der Wellenlänge der gewählten LED-Konstellation.	17
4.2.5 Datensatz zur simulierten Strahlungsleistung der gewählten LED-Konstellation. Aus diesem werden die Werte für die benötigten Lichtströme entnommen. . . .	17
4.2.6 Auszug aus dem Datenblatt <i>Lumileds Luxeon 2835 Color Line</i> [4]. Ermittlung des gewünschten Vorwärtsstromes aus der <i>Normalized Photon Output - Forward Current</i> -Kennlinie exemplarisch für <i>Cyan</i> -LED (cyan) und <i>Blue</i> -LED (blau). In grau markiert ist der Nenn-Arbeitspunkt.	18
4.2.7 Einzelner LED Strang mit Bipolartransistor als Schalter. Die einzelnen Schaltungskomponenten sind wie folgt farblich gekennzeichnet: Ersatzspannungsquelle, die den Ausgang des Arduino modelliert (cyan), ein Potentiometer in Minimalstellung durch einen Widerstand modelliert (violett), ein Vorwiderstand zur Begrenzung des Stromflusses in die Basis des Bipolartransistors und zur Arbeitspunkteinstellung (orange), ein als kontaktloser Schalter und Stromverstärker fungierender Bipolartransistor (grau), eine LED (grün), ein Vorwiderstand zur Begrenzung des Diodenstroms (blau) und die die Powerbank modellierende 5 V Spannungsquelle.	20
4.2.8 Gesamtkonzept 7 LED-Stränge	21
4.3.1 Nach DIN 5036 definiertes Schema für eine Ulbrichtkugel zur Messung des Reflexionsgrades bei diffusem Lichteinfall ([5]S. 3).	22
4.3.2 Ausschnitt aus dem CAD Modell: Zu sehen sind die Öffnungen für die Referenzleuchte (rechts), welche durch einen Schatter vom Messempfänger (linke Öffnung) abgekoppelt ist. Die Öffnung für den Messempfänger ist durch einen weiteren Schatter vom Materialfenster abgekoppelt. Zu sehen ist die mit einer TU-Prägung versehene Kunststoffflasche, welche durch aufbringen von BaSO ₄ -haltiger Farbe als Referenznormal gelten soll.	22

4.3.3 Ausschnitt aus dem CAD-Modell: Querschnitt des durch das Fachgebiet für Lichttechnik realisierten Kugelphotometers. Die Messgeometrie folgt DIN 5036 für eine Ulbrichtkugel mit Beleuchtungseinrichtung für diffusen Lichteinfall mit Referenzleuchte an der Kugelwand zur diffusen Messung vom spektralen Reflexionsgrad.	23
5.1.1	24
5.1.2 Testaufbau mit Lochrasterplatinen. Die Komponenten Arduino Leonardo Mikrocontroller (A), Bedienfeld (B), Transistorschaltungen der LEDs (C) und die LEDs (D) sind mit Pfeilen gekennzeichnet.	25
5.1.3 In <i>Autodesk Eagle</i> entworfene Platinen-Layouts	27
5.1.4 Fertige Platinen	27
5.1.5 Aufbau mit Platinen und Teilen des Gehäuses. Die Komponenten Arduino Leonardo Mikrocontroller (A), ins Gehäuse eingebautes Bedienfeld (B) aus Abbildung 5.1.6 (a), Transistorschaltungen der LEDs und Peripherie (C) und die LED-Platine (D) sind mit Pfeilen gekennzeichnet.	28
5.1.6	28
5.1.7	29
5.1.8	30
5.1.9	31
5.1.10 Zustandsdiagramm des zu implementierenden endlichen Automaten	31
6.1.1 Mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke über der Wellenlänge der LED-Referenzleuchte vor der Korrektur.	34
6.1.2 Steuerstrom regulierende Trimmer-Potentiometer	35
6.1.3 Mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessenes normiertes Spektrum der LED-Referenzleuchte nach der Korrektur.	36
6.1.4 Mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene normierte Spektren der LED-Referenzleuchte. Nach der Korrektur wurden während des 30s langen Betriebsintervalls unmittelbar nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen normierten Spektren sind übereinander aufgetragen. Zu sehen sind die Instabilitäten der LEDs FRD (720 nm), BLU (470 nm) und der VB (410 nm) in Form unterschiedlicher spektraler Verläufe. Farblich unterlegt ist die zeitlich letzte Messung, sodass zu erkennen ist, dass die Maxima an den Stellen 410 nm, 470 nm und 730 nm sich einem Sättigungswert annähern. Die normierte Ansicht lässt vermeintlichen Freiraum für Interpretationen, da dieser Verlauf ebenso durch eine Verringerung des Maximalwertes, welcher als Ankerpunkt für die Normierung fungiert, hervorgerufen werden könnte. In diesem Fall würde jedoch auch das Maximum bei 450 nm variieren.	37
6.1.5 Mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte. Nach 2 durchlaufenen 30s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen und liegen übereinander. Das Spektrum kann als stabil angenommen werden.	39

6.1.6 Mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte mit Potentiometern auf Maximalstellung . Nach 2 durchlaufenen 30 s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen.	40
6.1.7 Mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte mit Potentiometern auf Minimalstellung . Nach 2 durchlaufenen 30 s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen und weisen eine Instabilität auf.	41
6.1.8 Bei 6 °C mit JETI LiVal 7.0.0 Software am $\rho \approx 1$ Referenznormal gemessene spektrale Bestrahlungsstärke der LED-Referenzleuchte mit Potentiometern auf Maximalstellung. Nach 2 durchlaufenen 30 s Betriebsintervallen wurden im folgenden Betriebsintervall nacheinander 12 Messungen aufgenommen. Die gemessenen spektralen Bestrahlungsstärken sind übereinander aufgetragen. Die dünne schwarze Linie zeigt als Referenz das Ergebnis einer Messung bei 21°C . Die blauen Linien zeigen die Ergebnisse der 12 Messungen bei 6°C . Die dicke schwarze Linie zeigt eine Stabilisation des Spektrums bei 6 °C durch Maximieren der aller Potentiometer auf dem Bedienfeld.	41
6.2.1 Für die Vergleichsmessung gewählte Materialien: rotes und blaues Filz und eine Glasplatte (a), ein grauer Stein mit idealisiertem Äquivalent (b), ein brauner Stein mit idealisiertem Äquivalent (c), die Rückseite einer italienischen Fliese mit Wabenstruktur (d)	44
6.2.2 Links: Labsphere Certified Reflectance Standard (mit Teflon beschichtetes Referenznormal), rechts: als Referenznormal dienende mit Bariumsulfat betupfte Materiallasche. Beide Probennormalen entsprechen annähernd der Größe des zu bedeckenden Materialfensters.	45
6.2.3	46
6.2.4	47
6.2.5 Durch einen Blick in die Materialfenster beider Messsysteme sind die unterschiedlichen Messgeometrien zu erkennen	48
6.2.6 Innenansicht der Omega20 Messgeometrie durch das Probenfenster bei gekrümmten Winkel	49
6.2.7	50
6.2.8 Mit Omega20 aufgenommene spektrale Reflexionsgrade der Anordnungen für $\rho \approx 0$ beider Messsysteme. Für die Messungen mit dem Omega20 wird ein Hohlzylinder aus Pappe über die Probenöffnung gestellt und dessen Ränder mit einem schwarzen Tuch abgedeckt, für das mobile Messgerät wird eine schwarze Materiallasche mit einer Lage schwarzen Filzes verwendet.	51
6.2.9 Spektraler Reflexionsgrad von rotem Filz (oben) und von rotem Filz durch eine Glasscheibe (unten).	52
6.2.10 Spektraler Reflexionsgrad von blauem Filz (oben) und von blauem Filz durch eine Glasscheibe (unten).	54
6.2.11 Spektraler Reflexionsgrad von einer grauen Bodenplatte (unten) und einer ihrem Farbton nachempfundenen grauen Pappe (oben).	55
6.2.12 Nahaufnahme der bemessenen grauen Bodenplatte.	56

6.2.13	Spektraler Reflexionsgrad eines braunen Bau-Steins (mitte) und einer seinem Farbton nachempfundenen braunen Pappe (oben). Spektraler Reflexionsgrad der braunen Rückseite einer italienischen Fliese mit Wabenstruktur.	57
6.2.14	58
6.3.1	In Messrunde 1 vermessene Materialien: Weiße verputzte Wand (1), mit groben Rillen versehene Betonfassade (2), Aluminiumtürgriff (3)	61
6.3.2	Benutzeroberfläche der automatisierten Auswertungsumgebung innerhalb Microsoft Excel.	62
6.3.3	In der Importierten CSV können, sofern noch nicht in JETI LiVal geschehen, die bemessenen Materialien in der ersten Zeile benannt werden. Die Datensätze der ausgegebenen spektralen Reflexionsgrade werden nach Zeile 1 der importierten CSV benannt. Auch wird das Datum und die Uhrzeit aus der CSV übernommen, um eine spätere Identifikation der ausgewerteten Daten zu gewährleisten. . . .	63
6.3.4	Tabellenblatt <i>Calculated RHO</i> mit ausgewerteten Daten. Die 4 nicht besetzten Auswertungs-Slots liefern keine Daten, da keine weiteren spektralen Reflexionsgrade in dieser Sitzung aufgenommen wurden.	63
7.1.1	64

Anhang

Liste der Bauteile

Bezeichnung	Anzahl	Beschreibung
L128-CYN1003500000	1	LED Cyan
L128-FRD1003500000	1	LED Far Red
L128-BLU1003500000	1	LED Blue
L1SP-LME0002800000	2	LED Lime
L1SP-PRP2002800000	1	LED Purple (25% Blue)
L1SP-PNK1002800000	1	LED Horticulture White
ATS2012UV415	3	410 nm LED
TIP122	7	NPN-Darlington-Transistor
BC547B	7	NPN-Transistor
Arduino Leonardo	1	Mikrocontroller
3296W-104	7	Trimmer 100 k Ω
MFR50SFTE52-11R	10	11 Ω Metallschichtwiderstand
CCF073K00JKE36	1	3 k Ω Metallschichtwiderstand
CCF075K10GKE36	1	5,1 k Ω Metallschichtwiderstand
	3	5 k Ω Drehpotentiometer
	2	1 k Ω Drehpotentiometer
	1	10 k Ω Drehpotentiometer
	1	0.5 k Ω Drehpotentiometer
	1	Taster
	1	Kippschalter
MFR-25FBF52-1K	1	1 k Ω
OL6805E-R52	1	68 Ω