

# **Entwicklung eines einfachen Gerätes für die Untersuchung der UV-C Reflektivität von Konstruktionsmaterialien und -Beschichtungen unter Anwendungsbedingungen**

Klaus Wojczykowski, Bielefeld

Diese Arbeit wurde in privater Initiative durchgeführt, um ähnlich wie verschiedene andere Projekte von „Makern“ dazu beizutragen, die öffentliche Gesundheit während der COVID-19 Pandemie zu sichern und zu verbessern.<sup>[1]</sup>

## **Einleitung**

Während einer Pandemie zeigt sich die Bedeutung von Oberflächen und Objekten, die von vielen Personen berührt werden und dadurch eine Ursache für die Übertragung von Keimen und die Verbreitung einer Infektion sein können. Um die Übertragung von Keimen über Oberflächen zu verhindern ist es üblich, dort regelmäßig vor jedem Gebrauch Desinfektionsmittel aufzubringen. Der Einsatz von Desinfektionsmitteln kann beträchtliche Kosten verursachen, besonders in Zeiten hoher Infektionswerte, wenn die Versorgung knapp ist, da sie ein Verbrauchsgut sind und außerdem Abfall erzeugen (z.B. Einmal-Wischtücher und deren Behälter).

Eine weitere Möglichkeit, „Mehrbenutzer-Objekte“ (z.B. Einkaufswagen oder Körbe) routinemäßig zu desinfizieren ist, die Objekte keimtötender UV-C Strahlung auszusetzen während sie nicht benutzt werden. Durch Fortschritte in der Halbleiter-Entwicklung und Massenproduktion sind UV-C LEDs mittlerweile zu einem niedrigen Preis verfügbar.

## **UV-C Entkeimung**

Zur effizienten UV-C Entkeimung eines Gebrauchsgegenstandes ist es notwendig, eine ausreichende Strahlungsdosis an allen berührbaren Flächen zur Verfügung zu stellen. Weil es bei einem komplexen Gegenstand sehr schwierig ist, eine direkte Bestrahlung rundum zu gewährleisten, muss die Konstruktion des zur Entkeimung benutzten Gerätes eine geeignete Geometrie und ein geeignetes reflektierendes Wandmaterial aufweisen.<sup>[2]</sup>

Während ein physikalisch exakter Wert für die Reflektivität, der in einer einfachen UV-C Quelle --> Oberfläche --> Detektor Geometrie bestimmt wird, die Eignung eines Wandmaterials einer UV-C Entkeimungskammer zwar quantifizieren kann, ist es ebenso möglich, einen pragmatischen Ansatz zu verfolgen, um ein realistisches Bestrahlungs-Szenario zu erlauben und zu testen. Immerhin bewirkt eine vollständige direkte Reflexion in einer realen Umgebung möglicherweise nicht immer den größten Effekt. Ski-Sportler, die keine Sonnenbrille tragen können „schneeblind“ werden, nicht weil die Skipiste ein perfekter Spiegel ist, sondern weil frischer Schnee ein effektiver diffuser Reflektor für Sonnenlicht ist. Turner und Parisi haben die UV-C Reflektivität von Metalloberflächen und deren biologische Wirkung mithilfe der Albedo Zahl, einer einheitenlosen Zahl zwischen 0 und 1, untersucht.<sup>[3]</sup> Während Schnee ein perfekter UV-Reflektor mit einer Albedo Zahl nahe 1 sein kann, weisen metallische Oberflächen, obwohl sie glänzend erscheinen, eine Albedo Zahl von lediglich 0,2 - 0,3 auf. In einer Studie, in der die keimtötende Wirkung von UV-C Strahlung durch nur eine UV Quelle in einer Umgebung zu desinfizierender Objekte (Innenraum eines Rettungswagens) untersucht wurde, haben Lindsley et al. einen erheblichen Einfluss der Oberflächen-Reflektivität gefunden.<sup>[4]</sup>

Die tatsächliche Wirksamkeit einer reflektierenden Beschichtung wird in einem komplexen Szenario schwer mit einer einzelnen physikalische Größe abzuschätzen sein. Deswegen wurde eine genau definierte Messgeometrie wie in einer Euler-Wiege nicht als zwingend notwendig für die Charakterisierung und die Auswahl geeigneter reflektierender Materialien in UV-C Entkeimungs-Apparaten angesehen.

## **Bau des UV-Reflektometers**

Um die Eignung von Werkstoffen und Beschichtungen als Wandmaterial von UV-C Entkeimungs-Geräten zu untersuchen, wurde ein einfaches, kostengünstig und vollständig quelloffenes Instrument basierend auf einem UV-C LED Modul und einem Schottky-Dioden Sensor-Modul entwickelt.

UV-C Dioden sind (im Vergleich zu UV Röhrenlampen) schwach und benötigen zur effizienten Entkeimung eine längere Bestrahlungszeit, sind aber dennoch weit verbreitet in preiswerten Entkeimungsgeräten und haben das Potenzial, die routinemäßige UV-C Entkeimung in vielen Anwendungen zu etablieren.

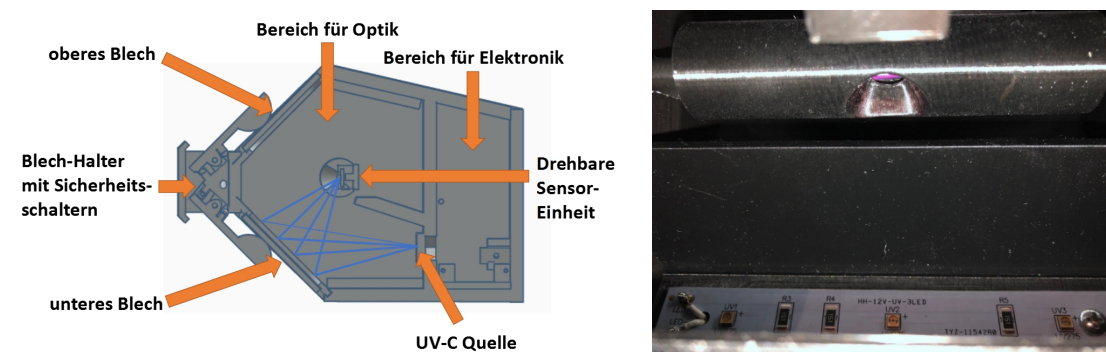
Indem die relativ schwachen UV-C Dioden in Kombination mit einer komplett geschlossenen Messkammer und einem Sicherheitsmechanismus, der ein Einschalten der UV-C Dioden nur bei eingesetzten Messblechen, die die Öffnungen der Kammer vollständig abdecken, erlaubt, ist dieses Gerät eine kostengünstige aber trotzdem sichere Lösung für den vorgesehenen Verwendungszweck.

Das UV-Reflektometer besitzt ein Gehäuse, das mithilfe der offenen CAD Entwicklungsplattform TINKERCAD<sup>[5]</sup> konstruiert und dann auf einem PRUSA i3 MK3S 3D-gedruckt wurde.

Das Gehäuse hat einen Bereich für die UV-Lichtquelle, den UV-Sensor und die Testbleche sowie einen Bereich für die Hauptplatine und den Mikroprozessor. Die Geometrie von UV-Lichtquelle, Sensor und reflektierenden Blechen lässt die direkte Reflexion von der UV-Lichtquelle (unteres Blech), sowie die indirekte Reflexion (oberes Blech) zu.

Das Messprinzip des Instruments besteht darin, die UV-Intensität verursacht durch die Reflexion über verschiedene Winkel durch Drehung der Sensor-Einheit über einen Bereich von 200° zu erfassen. Die 200° umfassen den gesamten Halbkreis, der die beiden reflektierenden Testbleche abdeckt, sowie 10° zusätzlich an beiden Enden des Messbereiches.

Abb. 1 zeigt den Aufbau des UV-Reflektometers mit dem Strahlengang von der UV Quelle zum Sensor.



**Abb. 1:** Schematischer Aufbau des UV-Reflektometers mit dem Strahlengang unter verschiedenen Winkeln (links) sowie eine Aufnahme des Inneren der Messkammer mit den UV-C LEDs und dem Sensor innerhalb des drehbaren Sensor-Trägers (rechts)

Das Reflektometer wurde für dünne, rechteckige Testbleche der Größe 70 mm x 100 mm ausgelegt. Dies sind die Dimensionen von „Hullzell-Blechen“, die für die Untersuchung von galvanischen Bädern benutzt werden<sup>[6]</sup> (--> inhomogene Stromdichte/Beschichtungseigenschaften), die jedoch ebenfalls als Substrate in regulären Test-Beschichtungen verwendet werden, bei denen ein homogenes Beschichtungsergebnis erzielt wird. Daneben können unbeschichtete Bleche, die als Testbleche für Hullzell-Untersuchungen in großer Anzahl verfügbar sind, oder aber einfach Bleche irgendeines Materials, die auf die gleiche Größe zugeschnitten sind, verwendet werden.

Die Sensor-Einheit wird durch einen Schrittmotor im Elektronik-Bereich über einen Steuerriemen gedreht. Der UV-C Sensor befindet sich auf einer Platine mit integrierter Verstärker-Schaltung. Es wurde gefunden, dass durch eine zusätzliche 10fache Verstärkung des Sensorsignals mit einer weiteren Verstärker-Schaltung im Elektronik-Bereich die Auflösung des A/D Wandlers optimal ausgenutzt wird. Das (verstärkte) Sensorsignal, der Schrittmotor-Treiber, das Relais zum Einschalten der UV Quelle sowie die Mikroschalter des Sicherheits-Mechanismus und des Endanschlages für die Sensor-Drehung sind mit einem ARDUINO NANO Mikrocontroller verbunden.

Die Firmware für die MCU wurde in C+ programmiert und die Software für die Datenerfassung, Auftragung und Auswertung auf einem PC wurde mithilfe der quelloffenen Plattform SCILAB entwickelt.<sup>[7]</sup>

Die gesamte Dokumentation über den Aufbau des Gerätes sowie die Quellcodes für Firmware und Software wurden in einem GITHUB Repository öffentlich zugänglich gemacht<sup>[8]</sup>

Die Bedienoberfläche und ein typischer UV-C Reflektivitäts-Scan sind in Abb. 2 zu sehen.

Die Verbindung der MCU des Reflektometers mit dem PC wird automatisch über eine USB Verbindung realisiert. Die Software erlaubt dann den korrekten Einbau des oberen und unteren Testbleches zu überprüfen, da sie bei nicht korrekt installierten Testblechen ein Einschalten der UV Quelle und die

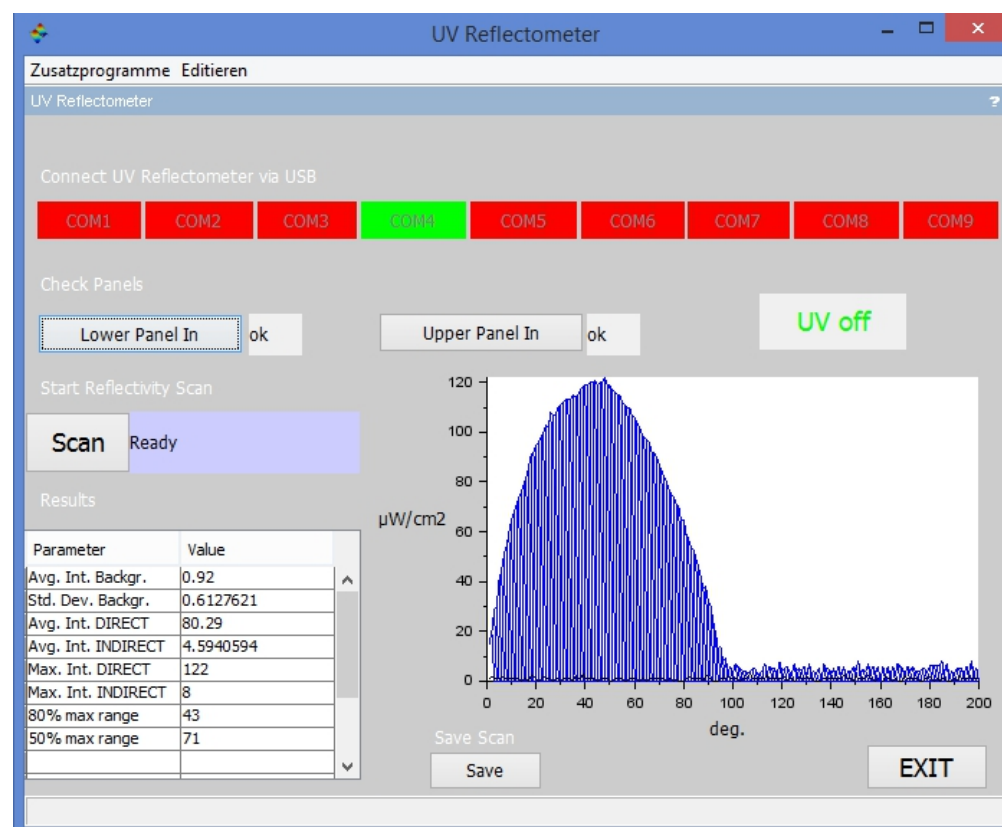
Durchführung des Scans verhindern würde. Dies ist eine Sicherheitsvorkehrung, weil nur mit korrekt installierten Testblechen die gesamte Messkammer abgeschlossen ist, und keine für den Bediener schädliche UV Strahlung austreten kann.

Nachdem die Messung gestartet wurde, führt die Software zunächst einen vollständigen Scan (0-200°) der Hintergrundintensität durch, wobei die UV-Quelle ausgeschaltet bleibt.

In dem unten gezeigten Beispiel (zwei unpolierte Aluminiumbleche) ergibt der Hintergrund-Scan eine durchschnittliche Intensität („Avg. Int. INDIRECT“) von 0.92 über den gesamten Scanbereich mit einer Standardabweichung von 0.62. Obwohl das Gerät nicht geeicht ist, kann abgeschätzt werden (aufgrund typischer publizierter Werte für den GUVA-S12D Sensor, der zusätzlichen Verstärkung und der Eingangssensitivität des Mikrocontrollers), dass die Intensitätswerte in etwa mit der Einheit  $1 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  korrelieren. Im Beispiel zeigt sich, dass die Hintergrundintensität nicht winkelabhängig und bezogen auf die Standardabweichung nicht signifikant ( $< 2\sigma$ ) ist. Sie kann deshalb als Rauschen angesehen werden. Nach dem Hintergrund-Scan wird die UV Quelle angeschaltet und der eigentliche UV Reflektivitäts-Scan durchgeführt.

In Abb. 2 sieht man das Ergebnis des UV-Scans (UV-Intensität gegen Drehwinkel) als Auftragung in blau. Der Scanbereich von 0-100° entspricht der Reflexion vom unteren Blech („direkte“ Reflexion) und ist winkelabhängig. Die maximale Intensität („Max. Int. DIRECT“) des gesamten Scans ist 122 ( $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ).

Zum Vergleich: Hamzavi et al. geben eine UV-C Dosis von  $1 \text{ J}/\text{cm}^2$  als ausreichend für die Sterilisation (log-3-Reduktion der Aktivität von Influenzaviren) von Gesichtsmasken an.<sup>[9]</sup> Das würde bedeuten, dass eine effektive Entkeimung durch direkte Reflexion von den hier untersuchten Aluminiumblechen und den eingesetzten UV-LEDs etwa drei Stunden dauern würde.



**Abb.2:** Bedienoberfläche des UV-Reflektometers mit den Ergebnissen eines Scans

Neben der Maximalintensität enthält die Tabelle der abgeleiteten Parameter auch Werte für den Winkelbereich, in dem mindestens 50% (bzw. 80%) der Maximalintensität erreicht werden („50% max range“ bzw. „80% max range“). Diese Winkelbereiche sind willkürlich gewählt, können aber als hilfreiche Parameter für die Konstruktion und Abschätzung der Effektivität von UV Sterilisations-Kammern dienen. Bei einer Sterilisations-Zeit von 3h für die höchste gemessene Reflektivität kann eine effiziente Entkeimung in 6h oder weniger für einen Winkelbereich von 71°

(„50% Bereich“) durch direkte Reflexion von den untersuchten Aluminiumblechen in der gegebenen Geometrie angenommen werden.

Der Scanbereich von 101 bis 200°, der die indirekte („diffuse“) Reflexion von der UV-Quelle abdeckt, zeigt ähnlich wie der Hintergrund-Scan keine klare Winkelabhängigkeit. Die durchschnittliche Signalintensität (4.6) ist signifikant über der Hintergrund-Intensität aber dennoch vergleichsweise schwach.

### Vergleich verschiedener Blech-Materialien

In einer kleinen Vergleichsstudie wurden einige Blechsarten, die leicht im Einzelhandel erhältlich waren, mit dem UV-Reflektometer untersucht.<sup>[10]</sup>



**Abb.3:** Testbleche: Alu (glatt), Alu (profiliert), Alu (anodisiert/gefärbt), Kupfer, verzinkter Stahl

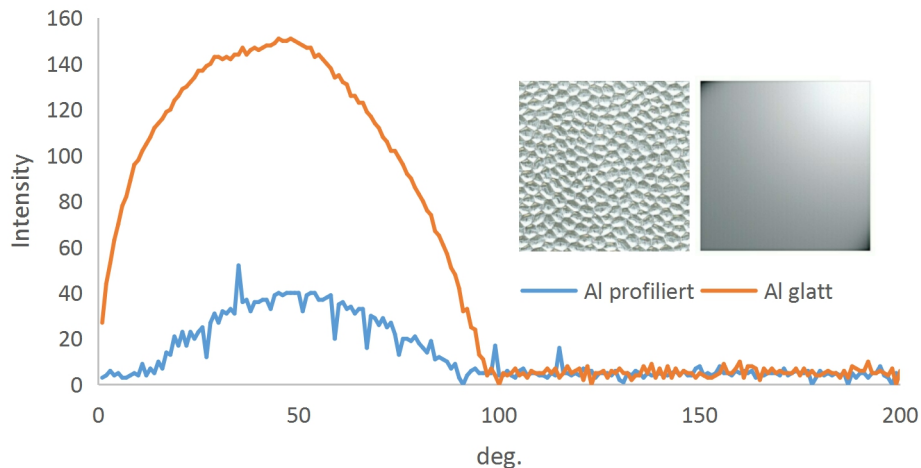
Einige Ergebnisse der Untersuchung der Bleche zeigt Tab. 1.

	Alu (glatt)	Alu (profiliert)	Alu (anodisiert/gefärbt)	Kupfer	verzinkter Stahl
Avg. Int. DIRECT	105.3	21.6	4.2	4.1	120.7
Avg. Int. INDIRECT	5.2	4.7	4.1	4.1	3.8
Max. Int. DIRECT	151	52	17	7	170
Max. Int. INDIRECT	10	16	14	8	11
50% max range	77	42	15	86	78

**Tab. 1:** UV-Reflektometer Scan-Ergebnisse verschiedener Paare von Blechen

Während diese erste Untersuchung von Materialien nur als Demonstration des Messprinzips des Gerätes dienen sollte, sind bereits einige Erkenntnisse aus den gesammelten Daten abzuleiten. Die Materialien, die silbern und „glänzend“ erscheinen, namentlich glattes Aluminium und verzinkter Stahl, weisen die höchste direkte Reflektivität auf. Kupferbleche, obwohl sie glänzend erscheinen, zeigen eine sehr geringe direkte Reflektivität. Dasselbe trifft auf matte, anodisierte und gefärbte Aluminium-Bleche zu. Ein interessanter Vergleich kann zwischen den glatten und den profilierten Aluminium-Blechen gemacht werden, die aus identischem Material mit ähnlichem Glanzgrad bestehen, aber in einem Fall eine aufgeprägte makroskopische Strukturierung aufweisen.

Ohne eine flache und glatte reflektierende Oberfläche ist die direkte Reflektivität der profilierten Bleche sehr viel (etwa 5x) geringer. Andererseits ist die Reflektivität um einiges höher (wiederum etwa 5x) im Vergleich zu den matten, anodisierten Blechen. Die Fluktuation der Intensität, die durch die wellige Textur verursacht wird, zeigt Abb. 4.



**Abb.4:** Reflektivitäts-Scans von glatten und von profilierten Blechen

Während die direkte Reflexion für die profilierten Aluminium-Bleche geringer ist kann angenommen werden, dass günstige Kombinationen von Einstrahlwinkeln, gegeben durch die Grate und Vertiefungen der Bleche zu Intensitäts-Spitzen führen, die in der indirekten Reflexion sogar die Intensität der glatten Bleche übersteigen.

#### Zusammenfassung

Es wurde gefunden, dass die Reflektivität von Materialien und Beschichtungen einen grossen Einfluß auf die Effizienz von UV-Entkeimungs-Apparaturen haben kann. Es konnte ein einfaches Gerät konstruiert werden, mit dem in praktischer Weise die UV-Reflektivität von Standard-Testblechen untersucht werden kann. Dieses Gerät und seine Software basieren auf quelloffenen Entwicklungsumgebungen und der Aufbau des Gerätes und die Quellcodes wurden öffentlich verfügbar gemacht. Eine erste Untersuchung von Testblechen konnte deutlich machen, dass verzinkte Stahlbleche die höchste Reflektivität unter den getesteten Materialien aufweisen.

#### Ausblick

Das entwickelte Gerät kann benutzt werden, um Materialien für das Innere von UV-C Entkeimungs-Apparaturen durch angepasste Textur und Oberflächenbearbeitung/-Beschichtung zu optimieren. Es scheint, dass glatte, silberne Oberflächen möglicherweise in Kombination mit einer gezielten makroskopischen Texturierung das höchste Potenzial für die Anwendung haben.

#### Literatur

- [1] <https://www.makervsvirus.org/>
- [2] Crystal IS, Inc., APPLICATION NOTE AN011, JUNE 2016:  
<https://www.klaran.com/using-uv-reflective-materials-to-maximize-sterilization> retrieved 10/12/20.
- [3] J. Turner, A. Parisi, Photochem. Photobiol. Sci. **8(1)**, 2009, 62-69.
- [4] W. G. Lindsley et al., J. Occup. Environ. Hyg. **15(1)**, 2018, 1-12.
- [5] <https://www.tinkercad.com/things/4fHqMrWtHtj>
- [6] R.O. Hull, Proc. Am. Electroplater's Soc. **(27)**, 1939.
- [7] <https://www.scilab.org/>
- [8] <https://github.com/wojczy/UV-Reflectometer>
- [9] I. H. Hamzavi et al., J. Am. Acad. Dermatol. **82(6)**, 2020, 1511-1512.
- [10] Prod. Nos. 10243458, 10244990, 10244749, 10244770, 10242916, BAUHAUS, Mannheim, Germany

#### Schlagwörter

UV-Entkeimung, UV-Reflektivität, UV-C LED, UV-C Sensor, Reflektierende Materialien, Reflektierende Beschichtungen