

# EIN NEUES WERKZEUG ZUR GEFÄHRDUNGSBEURTEILUNG VON UV-STRAHLUNG

Stefan Langer<sup>1</sup>, Dr. Niklas Papathanasiou<sup>1</sup>, Johanna Luise Krüger<sup>2</sup>,  
Gabriel Hopfenmüller<sup>1</sup>, Dr. Tilman Weiss<sup>1</sup>

<sup>1</sup> sglux GmbH, Richard-Willstätter-Str. 8, 12489 Berlin, Deutschland

<sup>2</sup> Technische Universität Bergakademie Freiberg, Akademiestraße 6, 09599 Freiberg

**Zusammenfassung** - Die industrielle Nutzung ultravioletter Strahlung erfordert neben der Beurteilung der Prozesswirksamkeit auch deren Bewertung hinsichtlich der Gefährdung des Bedien- und Wartungspersonals. Zu diesem Zweck sind Regelwerke entstanden, die die Durchführung der Strahlungsmessung und deren Bewertung hinsichtlich gesundheitlicher Gefahren beschreiben. Für diese Gefährdungsbeurteilung sind verschiedene Messgeräte am Markt erhältlich. Sie bestimmen die entsprechend der Norm gewichtete momentane Bestrahlungsstärke. Die Ermittlung der zulässigen maximalen täglichen Aufenthaltsdauer muss allerdings in nachfolgenden Rechenschritten erfolgen.

Ein neuartiger, mit diesem Konferenzbeitrag vorgestellter Ansatz basiert auf einem Sensor mit einer an die jeweilige Norm angepassten Empfindlichkeitscharakteristik, welcher mit einem Smartphone verbunden ist. Dort wird neben der Bestrahlungsstärke auch die zulässige Aufenthaltsdauer numerisch, graphisch und akustisch angezeigt. Weil für verschiedene Normen bzw. Strahlungsquellen spezifische Sensoren verwendet werden müssen, stellt das System sicher, dass der momentan angeschlossene Sensor zur Beurteilung der Strahlung nach der gewählten Norm geeignet ist. Dadurch werden der Aufwand und die Fehleranfälligkeit bei einer Gefahrenbewertung deutlich verringert und die Verwendung im Alltagsbetrieb gefördert.

**Summary** - Industrial application of ultraviolet radiation requires not only the evaluation of the effectiveness for the desired process but also an assessment of hazards for the operating personnel. Therefore rules and regulations have been established for the assessment and limitation of health-related threats. A variety of instruments are available on the market for this kind of risk assessment. These devices measure the radiation weighted according to applicable regulatory standards. But the final appraisal of risks such as maximum tolerable exposure time must still be computed manually afterwards.

The new approach presented here is based on a sensor with a spectral response characteristic tailored to a specific regulatory standard. This sensor is connected to a smart-phone. An application on the smart-phone will present the measurement value but also the maximum allowed exposure time in a graphical and acoustical manner. Each radiation source or regulatory guideline requires a specific sensor characteristic for an accurate risk assessment. Therefore the system extensively checks the requirements regarding the suitability of the connected sensor for the selected regulatory norm. These measures reduce the effort and the failure rate and also lower the burden for risk assessment in daily operation.

**Schlüsselwörter** - ICNIRP, TRO-IOs, UV-Gefahrenbewertung, UV-Radiometer

**Keywords** - ICNIRP, TROS-IOs, UV risk assessment, UV-Radiometer

# 1. Einleitung

Die Nutzung künstlicher UV-Strahlung nimmt kontinuierlich zu und ihre Anwendungen sind außerordentlich breit gefächert, beispielhaft seien erwähnt:

- die Luft- und Oberflächenentkeimung in der Nahrungsmittelproduktion (z. B. Arbeitstische, Transportbänder, Verpackungen, Raumluft)
- die Entkeimung von Oberflächen und Gegenständen in Operationssälen und allgemein im medizinischen Bereich und der Medikamentenherstellung
- die Entkeimung von Wasser (Trinkwasser, Brauchwasser, Ballastwasser)
- die Härtung von Klebern und Lacken (Automobil-, Möbel- und Halbleiter-Industrie)
- die Trocknung von Druckerzeugnissen

Allen Anwendungen ist gemein, dass neben dem eigentlich verfolgten Prozessziel stets der Schutz des Bedienpersonals vor schädlicher Strahlung zu gewährleisten ist.

Wesentliche Schädwirkungen für das menschliche Auge und die Haut sind in Tabelle 1 zusammengestellt.

*Tabelle 1: Wesentliche Schädwirkungen von UV-Strahlung und blauem Licht*

Organ	Reversible Effekte	Irreversible Folgen	Wellenlängenbereich in nm
Auge	Photokeratitis [2]	Linsentrübung	220 - 290
	Konjunktivitis [3]		240 - 310
	Photoretinitis [4], [5]	Makuladegeneration, Linsentrübung	300 - 700
Haut	Erythem [6]	Beschleunigte Hautalterung	200 - 400
		Hautkrebs	

Zur Bewertung der zuvor dargestellten Risiken von UV-Strahlung für den Menschen wurden und werden Richtlinien erlassen, deren Durchsetzung bereits bei der Konstruktion von UV-Bestrahlungsanlagen berücksichtigt werden sollte. Unabhängig von allen konstruktiven UV-Schutzmaßnahmen wird es folglich erforderlich, die Richtlinienkonformität von Anlagen auch im Hinblick auf den Schutz vor UV-Strahlung nachzuweisen.

Die teilweise sehr hohen Strahlungsdichten bzw. Bestrahlungsstärken in den Anlagen erfordern nicht nur die Betrachtung des vorgesehenen Betriebszustandes und von Strahlungslecks und Reflektionen in der Umgebung, sondern auch die kurzzeitige, unbeabsichtigte Exposition bei Fehlbedienung oder Fehlfunktion der UV-Anlagen, da auch hierbei bereits ein ernsthaftes Gesundheitsrisiko für den Menschen entstehen kann [1].

Dieser Nachweis soll nicht nur bei der Neuerrichtung von Anlagen sondern regelmäßig über deren gesamten Lebenszyklus hinweg geprüft werden, da z. B. Spaltmaße und Dichtungen durch Vibration, Strahlungsbelastung oder Temperaturzyklen nachgeben bzw. zersetzt werden können.

Die Durchsetzung dieses Ziels wird durch erschwingliche und leicht zu bedienende Messgeräte unterstützt, weil diese nicht nur den Anlagenerrichtern sondern auch den Anlagenbetreibern den Zugang zum passenden Prüfwerkzeug erleichtern.

## 2. Ein neues Werkzeug

Zum Nachweis der Einhaltung von UV-Schutz-Richtlinien werden neben integrierenden Radiometern auch Spektralradiometer eingesetzt.

Integrierende Radiometer mit einem Spektralkanal erlangen durch ihren günstigeren Preis und die einfache Bedienung eine hohe Akzeptanz, weisen aber auch höhere Risiken für unbemerkte Messfehler auf. Teurere Spektralradiometer erlauben zwar die exaktere Messung und den Ausschluss einiger Zuordnungsfehler, können aber wegen der komplexeren Bedienung und Auswertung trotzdem zu Fehleinschätzungen führen und aufgrund ihres höheren Preises im Alltagseinsatz weniger verfügbar sein.

### Erste Sensorversion

Die sglux GmbH hat ein neues und kostengünstiges Gerät zur Gefährdungsbewertung im UV-Bereich entwickelt.

Dieses Gerät besteht aus einem Sensor mit speziellen Eigenschaften und einem marktüblichen Smartphone mit Android-Betriebssystem als Anzeige- und Auswertungseinheit.

Diese Kombination stellt ein integrierendes Radiometer mit einem spektralen Kanal dar. Die erste verfügbare Sensorvariante wurde auf die von der ICNIRP in den „UV Guidelines (2004)“ angegebene Wirkfunktion  $S(\lambda)$  [7] hin optimiert.

Die vorliegende Sensorkonfiguration kann zur Gefährdungsbeurteilung bei der Entkeimung von Luft und Oberflächen in offenen Systemen (Raumluft, Fördereinrichtungen, Transportbehälter und Arbeitsoberflächen) genutzt werden.

Weil jedes aktuelle Smartphone mit dem Sensor zusammen genutzt werden kann, und der Sensor austauschbar ist, wird der Preis des Gesamtsystems niedrig gehalten und die Akzeptanz und tatsächliche Verfügbarkeit vor Ort gesteigert.

Die für Smartphones entwickelte Software entlastet den Benutzer von der manuellen Bewertung des Messwertes, indem die normenkonforme Bewertung automatisch berechnet und angezeigt wird. Die Anzeige erfolgt dabei sowohl als gewichtete Bestrahlungsstärke als auch als zulässige Aufenthaltsdauer unter der Annahme einer tolerierten Tagesdosis von 30 J/Tag [7],[8] und einer konstanten Bestrahlungsstärke.

Neben der numerischen Anzeige erfolgt auch eine optische und akustische Anzeige (Abbildung 2) und ggf. Warnung, wenn z. B. die zulässige Aufenthaltsdauer als sehr gering und somit die Gesundheitsgefahr als sehr hoch eingestuft wird.

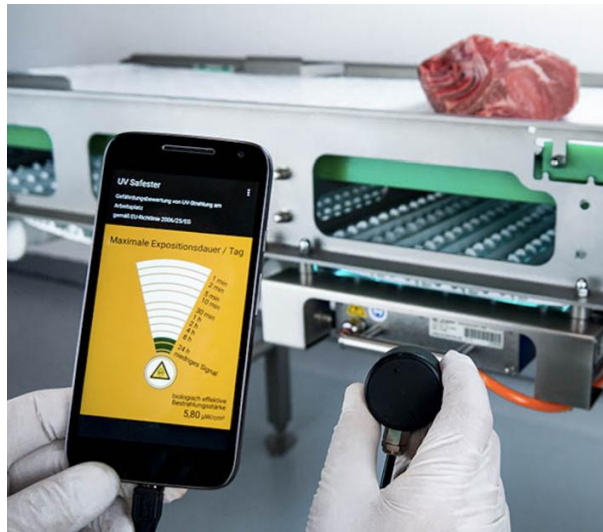


Abbildung 1: "Safester-UVC" im Einsatz an einem Zerlegeband (Quelle: orca GmbH)



Abbildung 2: Bildschirmansicht eines "Safester UVC" (Quelle: sglux GmbH)

Es wurde besonderes Augenmerk auf eine intuitive Bedienung und eine übersichtlich gestaltete Benutzeroberfläche gelegt. Ebenso können Softwareupdates auf dem für Android üblichen Weg über den „Play-Store“ bezogen und installiert werden. In Inselsystemen ist dies allerdings auch von einem PC aus per USB mit wenigen Handgriffen durchführbar.

Die Dokumentation wird durch eine Bildschirmfoto- und Data-Hold-Funktion mit automatischer Aufzeichnung unterstützt.

### **Sensortechnologie und Kalibrierung**

Die Software ist in der Lage, die Eignung des angeschlossenen Sensors für die Messaufgabe sicherzustellen, indem alle relevanten Sensoreigenschaften (z. B. spektrale Empfindlichkeit, Messbereich, Typ der Eintrittsoptik, Kalibrierdaten für mehrere Strahlungsquellen) aus dem Sensor ausgelesen und mit den Normanforderungen verglichen werden.

Diese Eigenschaften sind dabei als detaillierte Einzelinformationen hinterlegt, sodass die Eignung nicht nur anhand der Typenbezeichnung sondern auf Basis konkreter Parameter und Wertebereiche geprüft werden kann. Dadurch ergibt sich der Vorteil, dass zukünftige Programmvarianten (beispielsweise mit anderen Bewertungskriterien) mit bereits ausgelieferten Sensoren in neuen Anwendungsfällen eingesetzt werden können.

Die verwendete Sensortechnologie ist erprobt, bietet eine hohe Langzeitstabilität wegen des als Sensorelement eingesetzten SiC-Chips [9], weist eine hohe Linearität auf, besitzt einen weiten Messbereich und eine gute Kosinusanpassung.

Außerdem gehört zu jedem ausgelieferten Sensor eine Kalibrierung für bis zu 5 spezifische Strahlertypen, die mit einem Spektralradiometer im sglux-eigenen, PTB-rückführbaren UV-Kalibrierlabor durchgeführt wird.

Für dieses neue Messmittel kann grundsätzlich für jeden Strahlertyp oder jede spektrale Empfindlichkeit bzw. Bewertungsrichtlinie (im ultravioletten und sichtbaren Spektralbereich) ein angepasster Sensor hergestellt werden. Zusätzlich können auf einem Smartphone viele Programme für verschiedenste Bewertungsansätze koexistieren. Die Umstellung auf eine andere Bewertungsrichtlinie erfordert somit nur eine andere Softwarevariante und ggf. einen angepassten Sensor, das Anzeigergerät wird jedoch beibehalten.

Da es mit einem integrierenden Einzelsensor nicht möglich ist, den Strahlertyp selbsttätig zu erkennen, muss diese beherrschbare Fehlerquelle weiterhin vom Bediener ausgeschlossen werden. Durch die im Ausblick genannten Weiterentwicklungen kann dieses Fehlerrisiko zukünftig vermindert werden.

## Qualitätsbewertung

Das vorgestellte Gerät kann zusätzlich zur Gefahrenbewertung von Hg-Niederdruckstrahlern auch zur Bewertung von anderen schmalbandigen Strahlungsquellen im Wellenlängenbereich von 230 nm bis 270 nm (z. B. LED) genutzt werden, da der Verlauf der spektralen Empfindlichkeit des Sensors in diesem Bereich die von der ICNIRP geforderte Wirkfunktion  $S(\lambda)$  hinreichend genau nachbildet, siehe Abbildung 3.

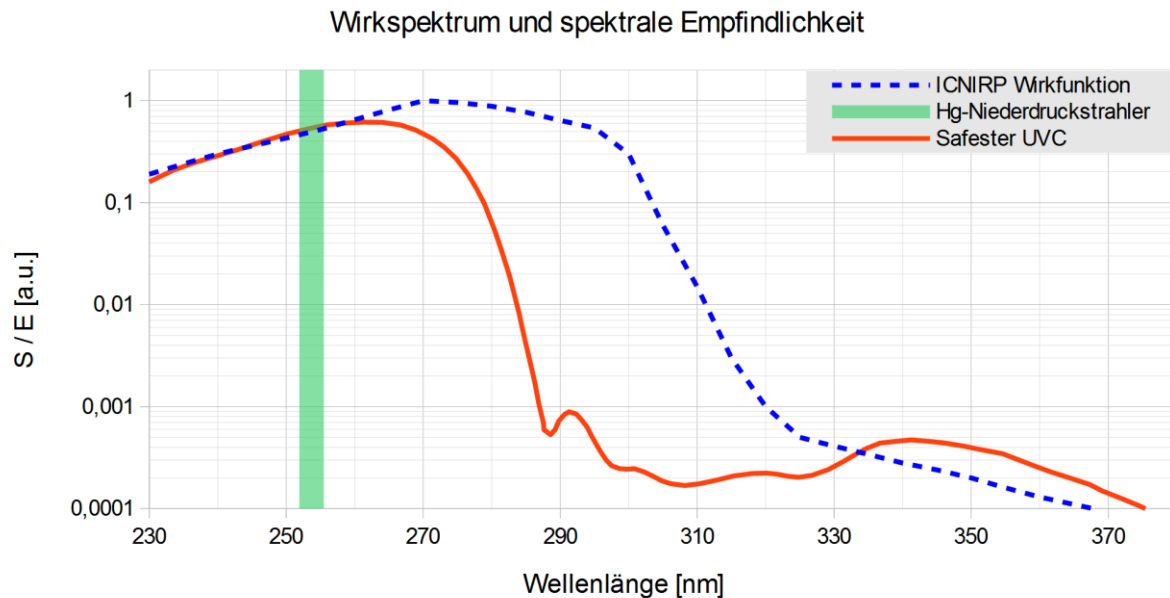


Abbildung 3: Relative spektrale Empfindlichkeit des Sensors im „Safester-UVC“ und Wirkspektrum  $S_\lambda$  nach ICNIRP

Das Diagramm in Abbildung 3 zeigt die normierte Bewertungsfunktion nach ICNIRP und die relative spektrale Empfindlichkeit des vorgestellten Sensors.

Für die detaillierte Qualitätsbewertung und den Vergleich von Radiometern für die UV-Gefährdungsbewertung kann z. B. die DIN 5031-11 herangezogen werden [10]. Diese definiert hilfreiche Indikatoren, die in Tabelle 2 aufgelistet werden.

Tabelle 2: Indikatoren zur Qualitätsbewertung von aktinischen Radiometern gemäß DIN 5031-11:20011-04

In DIN 5031-11:2011-04 eingeführte Kriterien		
Kenngröße	bewertete Geräteeigenschaft	Einstufung des neuen Werkzeugs
f <sub>1</sub>	spektrale Anpassung	gut
f <sub>2</sub>	Bestrahlungsstärke	gut
f <sub>3</sub>	(bzw. Kosinusanpassung)	gut, Dynamikbereich 103
f <sub>4</sub>	Nichtlinearität	nicht anwendbar
f <sub>5</sub>	Anzeigegerät (Ablesegenauigkeit bei analogen Anzeigen)	nicht feststellbar
f <sub>6</sub>	Ermüdung (Reversible Signaländerung bei Dauerbestrahlung)	gering
f <sub>7</sub>	Temperaturabhängigkeit	nur kontinuierliche Quellen
f <sub>8</sub>	Einfluss der Strahlungsmodulation	ungeklärt evtl. nicht relevant
f <sub>9</sub>	Einfluss von polarisierter Strahlung	gut
f <sub>11</sub>	ungleichmäßige lokale Empfindlichkeit	nicht vorhanden
f <sub>u</sub> , f <sub>o</sub>	Messbereichumschaltung	Mehrkanal-Sensoren bieten diese Möglichkeit
f <sub>kal</sub>	Antwort auf Strahlung außerhalb des Wirkungsbereiches (Fehlstrahlung)	gut
Nicht in der DIN quantifiziert, aber von Interesse		
undefiniert	Strahlungsfestigkeit (Alterung)	Rekalibrierung nach 1-2 Jahren

Die Gesamtbewertung für ein Radiometer  $f_{\text{total}}$  ergibt sich entsprechend als Summe der in Tabelle 2 benannten Einzelkenngrößen, wobei für jede der 4 Güteklassen für die Einzelkenngrößen wie auch für deren Summe Grenzwerte vorgegeben sind, siehe Tabelle 3.

Sollten einzelne Kenngrößen nicht relevant sein, werden diese in der Summierung als Null angenommen.

Tabelle 3: Abgrenzung der Güteklassen nach DIN5031-11:2010-04

Kenngröße	Güteklasse 1	Güteklasse 2	Güteklasse 3	Güteklasse 4
$f_1$	< 0,100	< 0,200	< 0,500	< 1,000
$f_2$	< 0,030	< 0,060	< 0,090	< 0,200
$f_3$	< 0,002	< 0,005	< 0,010	< 0,050
$f_4$	< 0,002	< 0,005	< 0,010	< 0,030
$f_5$	< 0,010	< 0,015	< 0,020	< 0,050
$f_6$	< 0,003	< 0,005	< 0,010	< 0,030
$f_7$	< 0,002	< 0,005	< 0,010	< 0,020
$f_8$	< 0,003	< 0,005	< 0,010	< 0,020
$f_9$	< 0,040	< 0,080	< 0,150	< 0,200
$f_{11}$	< 0,004	< 0,010	< 0,020	< 0,050
$f_u, f_o$	< 0,002	< 0,005	< 0,010	< 0,050
$f_{kal}$	< 0,050	< 0,100	< 0,150	< 0,250
$f_{total}$	< 0,25	< 0,5	< 1,0	< 2,0

Nach einer ersten Überprüfung der spektralen Anpassung und des absoluten Messfehlers durch die BAuA fällt das vorgestellte Messgerät für die Niederdruck-UVC Bewertung in die Güteklasse 1.

### 3. Ausblick

Andere Lichtquellen, die zusätzlich nennenswerte Leistung im UVB-, UVA- und Blaulicht-Bereich emittieren, können mit Mehrkanalsensoren zuverlässiger als mit Einkanalsensoren bewertet werden.

Mehrkanalsensoren weisen folgende Vorteile gegenüber Einkanalsensoren auf:

- Sie erlauben die Bewertung über einen noch breiteren Spektralbereich;
- Eine Bewertung nach mehreren Wirkfunktionen bzw. Richtlinien ist in einem Sensor vereinbar;
- Detektion von Fehlstrahlung in angrenzenden Spektralbereichen wird möglich, dadurch wird ggf. auch die automatische Erkennung der Eignung des Sensors für den untersuchten Strahler ermöglicht;
- Sensoren bleiben preislich günstiger als Spektrometer und in der Handhabung so einfach wie Einkanalsensoren;

Zur weiteren Erhöhung der Zuverlässigkeit der Messung, zum Ausschluss weiterer Fehlerquellen bei der Handhabung und der vereinfachten Dokumentation der Gefährdungsbewertung werden u.a. folgende Weiterentwicklungen vorangetrieben:

Tabelle 4: Möglichkeiten der Weiterentwicklung von integrierenden Radiometern

Maßnahme	Effekt
Mehrkanalsensoren	Erkennung von Fehlstrahlung, Erkennung ungeeigneter Lichtquellen
weitere spektrale Wichtungen	Anpassung an andere Lichtquellen (z. B. Blue-Light-Hazard) oder andere Wichtungsfunktionen (z. B. Erythem, Photokeratitis, Pflanzen)
integrierte Testlichtquelle	schneller Vor-Ort-Check der Funktionsfähigkeit
erweiterte Protokollierung	ausführliche Protokollierung gemäß diverser Handlungsleitfäden
erweiterte Benutzeranweisung	Benutzerführung durch eine Messung anhand von Handlungsleitfäden
vollständige Sensorspezifikation	Ermittlung und Spezifikation aller Kenngrößen nach DIN 5031-11:2010-04

#### 4. Literaturverzeichnis

- [1] BGV, „Inkohärente künstliche optische Strahlung – IOS“, Behörde für Gesundheit und Verbraucherschutz Amt für Arbeitsschutz, Billstraße 80, 20539 Hamburg, Leitfaden, 2016.
- [2] T. Axenfeld und H. Pau, Hrsg., *Lehrbuch und Atlas der Augenheilkunde*, 12., völlig neu bearb. Aufl. Stuttgart [usw.]: Fischer, 1980.
- [3] K. Walsh, „UV radiation and the Eye“, Johnson & Johnson Medical Ltd., Review, 2009.
- [4] E. L. Pautler, M. Morita, und D. Beezley, „HEMOPROTEIN(S) MEDIATE BLUE LIGHT DAMAGE IN THE RETINAL PIGMENT EPITHELIUM“, *Photochemistry and Photobiology*, Bd. 51, Nr. 5, S. 599–605, Mai 1990.
- [5] C. Grimm, A. Wenzel, T. P. Williams, P. O. Rol, F. Hafezi, und C. E. Reme, „Rhodopsin-Mediated Blue-Light Damage to the Rat Retina: Effect of Photoreversal of Bleaching“, Bd. 42, Nr. 2, S. 9, 2001.
- [6] CIE, *Rationalizing nomenclature for UV doses and effects on humans*. Vienna: CIE Central Bureau, 2014.
- [7] ICNIRP, „Guidelines on Limits of Exposure to Ultraviolet Radiation of Wavelengths between 180 nm and 400 nm (Incoherent Optical Radiation)“, *Health Physics*, Bd. 87, Nr. 2, S. 171–186, Aug. 2004.
- [8] ICNIRP, „ON PROTECTION OF WORKERS AGAINST ULTRAVIOLET RADIATION“, *Health Physics*, Bd. 99, Nr. 1, S. 66–87, Juli 2010.
- [9] S. Nowy u. a., „Characterization of SiC photodiodes for high irradiance UV radiometers“, in *Proceedings of NEWRAD2011*, Espoo, Finland, 2011, S. 203.
- [10] Normenausschuss Lichttechnik und DIN, Hrsg., „Teil 11: Radiometer zur Messung aktinischer Strahlungsgrößen - Begriffe, Eigenschaften und deren Kennzeichnung“, in *DIN 5031 „Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik“*, DIN, 2010.