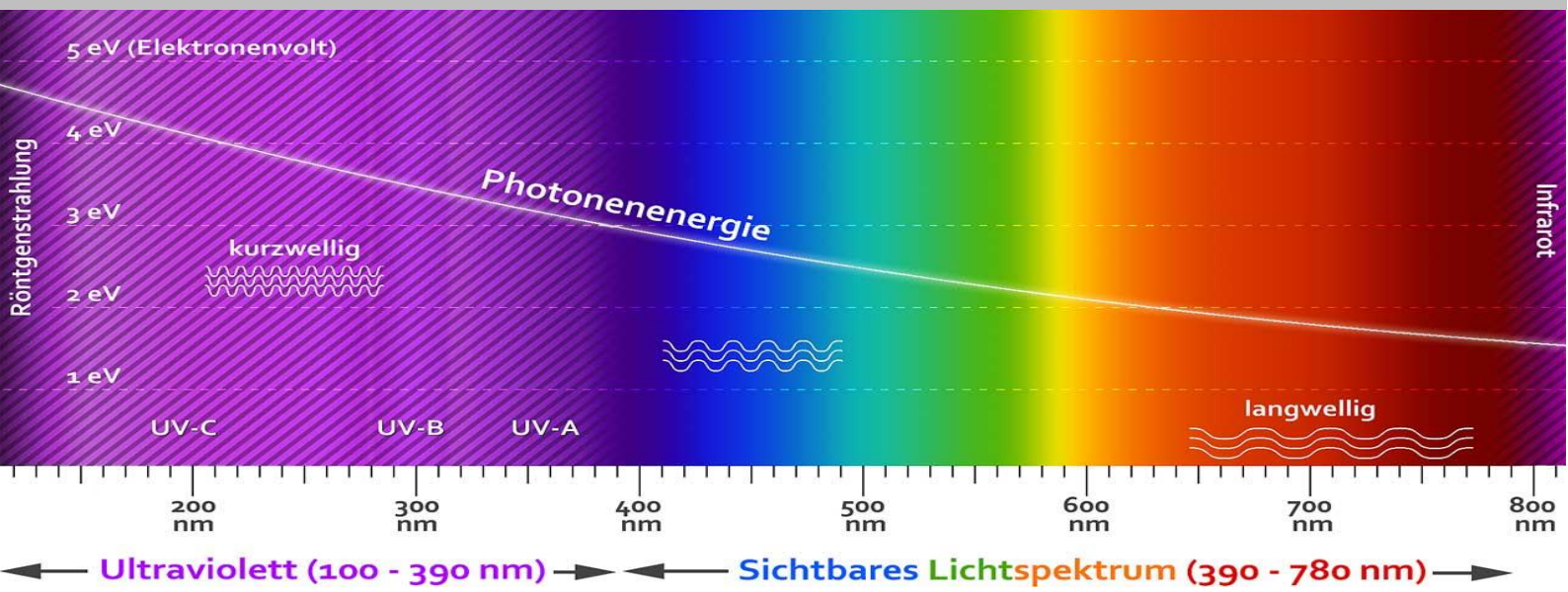
Fraunhofer
IOSB
INSTITUTSTEIL ANGEWANDTE SYSTEMTECHNIK AST



Far-UVC – Potentiale und Schwächen

Fraunhofer Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung

Innovationshub „Smarte UV-Systeme“

Am Vogelherd 90
98693 Ilmenau

Ansprechpartner:
Thomas Westerhoff
Telefon +49 3677 461-107
suvs@iosb-ast.fraunhofer.de
www.iosb-ast.fraunhofer.de

Einführung

Far-UVC erfährt aktuell, insbesondere in amerikanischen UV-Fachkreisen einen regelrechten Hype. Insbesondere getrieben durch die Corona-Pandemie wird dieser Wellenlängenbereich daher für die Luftdesinfektion als gute Lösung postuliert. Das vorliegende Dokument soll sachlich den aktuellen Stand der Forschung bezüglich Far-UVC sowie die aktuell zur Verfügung stehenden Strahlungsquellen einer kritischen Betrachtung unterziehen. Hierbei geht es um Vor- und Nachteile gegenüber anderen Wellenlängenbereichen und Technologien und die Betrachtung sowohl aus infektiologischer als auch wirtschaftlicher Sicht. Alle Aussagen in diesem Dokument beziehen sich auf den Stand Ende 2023.

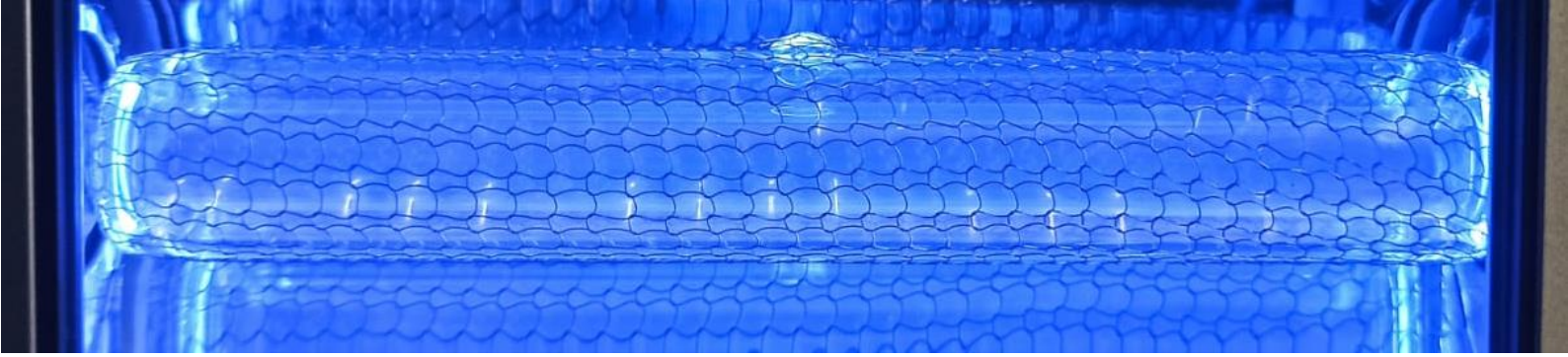
Was ist Far-UVC?

Zunächst anzumerken ist die bisher fehlende klare Begriffsdefinition von „Far-UVC“. Es hat sich aber im allgemeinen Sprachgebrauch etabliert, dass als Far-UVC (oder Fern-UVC) der spektrale Teilbereich der UVC-Strahlung von 200 – 230 nm bezeichnet wird. Im Gegensatz zur 254 nm-UVC-Emission von Quecksilberdampflampen kann Far-UVC-Strahlung Krankheitserreger inaktivieren und dabei den Menschen weniger schädigen. Trotz bisheriger und vielversprechender Studien ist jedoch noch weitere wissenschaftliche Arbeit notwendig, bevor eine eindeutige fundierte Aussage zum großflächigen Einsatz von Far-UVC getroffen werden kann. Langfristig gesehen könnten Far-UVC-Strahlungsquellen sehr wahrscheinlich aufgrund ihres augenscheinlich geringeren Risikos für Menschen neue Einsatzgebiete ermöglichen.

Seit Beginn der Coronapandemie im Dezember 2019 gehören Desinfektionsmaßnahmen und das Auftauchen immer neuer Ideen zur Eindämmung von (Corona-)Infektionen weltweit zum Alltag. Einige der geäußerten Vorschläge sind kurios oder sogar bedenklich und manches klingt zu gut, um wahr zu sein. So wurde z. B. diskutiert, ob es UVC-Strahlung (ultraviolette Strahlung mit einer Wellenlänge unter 280 nm) gibt, die nur Krankheitserreger wie Coronaviren inaktiviert, aber harmlos für Menschen ist.

Bisher wird UVC-Strahlung überwiegend von Quecksilberdampflampen erzeugt, die bei 254 nm emittieren. Es ist seit Jahrzehnten bekannt, dass diese Strahlung sehr stark antimikrobiell wirkt, weil sie die DNA und RNA der Erreger zerstört. Leider ist diese Strahlung aber auch sehr schädlich für menschliche Zellen, weshalb es Normen und Richtlinien gibt, die den Einsatz von UVC-Strahlung verbieten, wenn die Gefahr besteht, dass Menschen einer direkten Exposition dieser Strahlung ausgesetzt werden könnten oder zumindest hierfür sehr geringe Grenzwerte festlegen. Anwendungen in geschlossenen Systemen wie Wasserdesinfektionsreaktoren sind jedoch weit verbreitet.

Die Idee, dass es kurzwelligere UVC-Strahlung geben könnte, welche



Mikroorganismen deutlich stärker schädigt als Zellen höherer Lebewesen, wurde bereits 2004 zum ersten Mal präsentiert [1]. Etwa 10 Jahre später wurde der Ansatz erneut aufgegriffen und weiter untersucht [2, 3], aber außerhalb der Fachwelt kaum beachtet. Die Coronapandemie hat für eine erhöhte Aufmerksamkeit für diesen Vorschlag gesorgt, da wichtige neue Anwendungsmöglichkeiten vorstellbar wären, wie z. B. die Bestrahlung von Räumen oder Aufzügen während der Anwesenheit von Menschen.

Wirkweise

Wieso ist nun die 254 nm-Strahlung der Quecksilberdampflampe schädlicher als andere Wellenlängen im UVC-Bereich? Wie in Abbildung 1 zu erkennen ist, befindet sich der 254 nm-Emissionspeak in der Nähe eines DNA-Absorptionsmaximums. Dies ist der Grund für die starke antimikrobielle Wirkung dieser Strahlung. Im Vergleich zu kurzwelligerer UV-Strahlung ist die Absorption von Proteinen bei 254 nm jedoch gering und die Eindringtiefe in die Haut hierdurch recht hoch. Die stärksten zzt. kommerziell verfügbaren Strahlungsquellen sind Kryptonchlorid-Excimerlampen mit einer Peakwellenlänge von 222 nm (ebenfalls Abbildung 1). Die DNA-Absorption ist bei dieser Wellenlänge etwas geringer. Der große Unterschied liegt jedoch in der deutlich höheren Absorption dieser Strahlung durch Proteine. Die Auswirkung dieser starken Proteinabsorption wird anhand von Abbildung 2 deutlich. Die menschliche Haut besteht aus mehreren Schichten. Die oberste Schicht (Stratum corneum) aus verhornten Hautzellen enthält eine hohe Konzentration des Proteins Keratin. Keratin absorbiert Far-UVC-Strahlung, so dass nur ein sehr geringer Anteil davon in die tieferen Hautschichten mit vitalen Zellen gelangt. In einem Selbstversuch haben britische Forscher ihre eigene Haut mit einer Far-UVC-Dosis von 18.000 mJ/cm² bestrahlt, ohne dauerhafte Hautschäden zu beobachten [5]. Dieser Wert liegt um das 6.000-fache über der täglich maximal erlaubten 254 nm-Bestrahlung, einer Dosis von 3 mJ/cm² [6].

Sogar freie menschliche Zellen – ohne hohen Keratinanteil – sollen gegenüber Far-UVC unempfindlicher als bei 254 nm sein. Der DNA-haltige Zellkern ist in der Regel von Proteinen umgeben, die die Strahlung zumindest teilweise absorbieren, so dass die DNA einer deutlich reduzierten Strahlungsintensität ausgesetzt ist [7]. Eine weitere Studie hat die Hautschädigung bei Wellenlängen von 233 nm untersucht und ist zu dem Ergebnis gekommen, dass auch hier kaum eine Schädigung der Haut feststellbar ist [15].

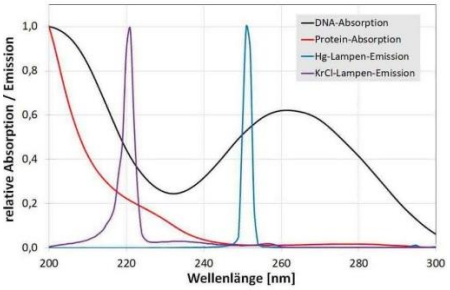


Abbildung 1: Emissionsspektren und Absorptionsraten

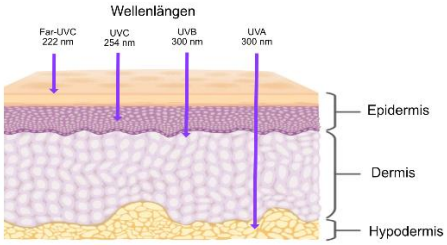


Abbildung 2: Eindringtiefen in die Haut

Diverse Krankheitserreger enthalten in der Regel auch Proteine und sind trotzdem nicht gegenüber Far-UVC geschützt. Die Ursache dafür liegt einerseits darin, dass sie keine Schutzschicht wie das Stratum corneum der menschlichen Haut besitzen und andererseits vor allem, dass sie sehr klein sind. Das Volumen eines Bakteriums ist im Schnitt ca. 10000-mal kleiner als das einer menschlichen Zelle und das Volumen eines Virus ist noch einmal 1.000-fach geringer als das eines Bakteriums. Damit findet kaum Far-UVC-Absorption durch Proteine statt. Die Mikroorganismen werden, wie bei einer Wellenlänge von 254 nm einfach durchstrahlt und dabei deren DNA und RNA geschädigt.

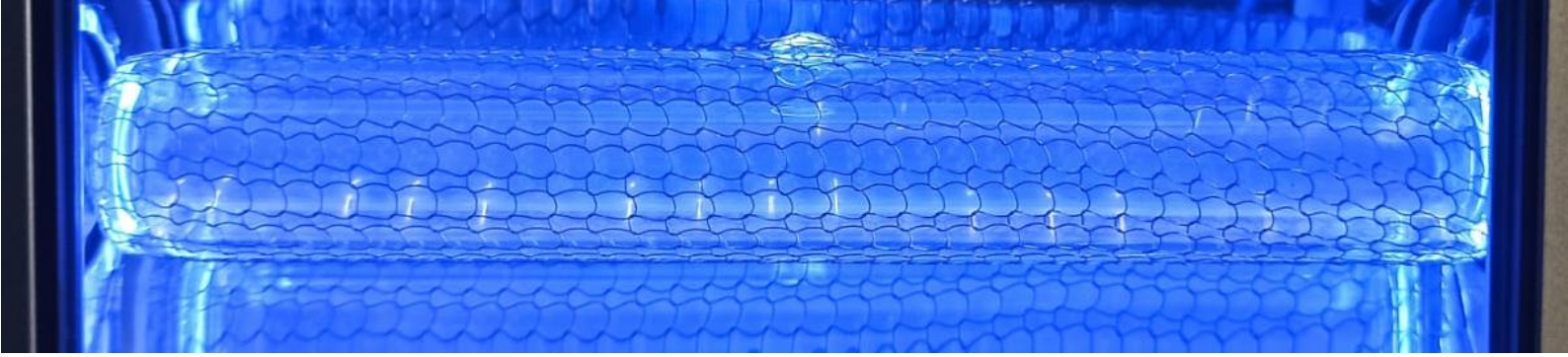
Zusammenhang Bestrahlungs-intensität, Bestrahlungsdosis und mikrobiologische Wirkung

Die Wirksamkeit einer UVC-Bestrahlung wird maßgeblich durch die applizierte Dosis bzw. Fluenz bestimmt. Die Dosis ergibt sich aus der Bestrahlungsintensität [W/m², mW/cm², µW/cm²] multipliziert mit der Bestrahlungszeit, über die diese Intensität auf den Mikroorganismus einwirkt. Die Dosis wird in [Ws/m², J/m², mJ/cm², µJ/cm²…] angegeben. Je höher die Dosis, umso mehr Mikroorganismen werden durch die Bestrahlung inaktiviert. Diese Inaktivierung wird als dekadischer Logarithmus angegeben. Eine Inaktivierung um eine Log-Stufe entspricht 90%. Nach der Bestrahlung sind demzufolge noch 10% der Mikroorganismen aktiv. Zwei Log-Stufen entsprechen 99% Inaktivierung und so weiter. Von einer Desinfektion spricht man ab einer Inaktivierung von mindestens vier Log-Stufen also 99,99 %. Erst ab dieser Inaktivierungsrate ist sichergestellt, dass von den meisten Erregern kaum eine Gefahr ausgeht. Von Sterilisation spricht man, wenn eine Inaktivierung von mindestens sechs Log-Stufen aller vorhandenen Erregerspezies erreicht ist (99,9999%). Von einer Million Mikroorganismen, die sich in dieser Menge durchaus auch auf einem Quadratzentimeter der menschlichen Haut finden lassen, wäre dann aber immer noch rechnerisch einer aktiv.

Die erforderlichen Bestrahlungsdosen sind zudem je nach Mikroorganismus unterschiedlich. Viren sind meist mit sehr geringen Bestrahlungsdosen inaktivierbar, da ihnen DNA-Reparaturmechanismen wie z.B. die Photoreaktivierung fehlen. Bakterien bedürfen schon einer höheren Bestrahlungsdosis und das obere Ende der Skala bilden Schimmelpilze und Hefen, die zum Teil die tausendfache Dosis eines Virus benötigen, um inaktiviert zu werden.

Stand der Forschung

Alle bisher genannten Informationen sprechen dafür, dass eine antimikrobielle Far-UVC-Bestrahlung in Anwesenheit von Menschen möglich ist und dass diese



Strahlung auch gegen Coronaviren oder andere aerosolgetragene Viren (z.B. Noro-, Rhino- oder Influenzaviren) eingesetzt werden könnte. Außer der Haut sind vor allem die Augen einer möglichen Far-UVC-Strahlung ausgesetzt. Aufgrund von Untersuchungen an Tieren ist anzunehmen, dass die Strahlung vom Tränenfilm und der äußeren Hornhautschicht absorbiert wird, ohne dass sie einen dauerhaften Schaden anrichtet [10]. Es existieren jedoch auch Studien mit Primaten und teils am menschlichen Auge mit Folge einer nachweisbaren Augenschädigung bereits ab 10 mJ/cm² [13]. Die Augen von Affen und Menschen sind sehr ähnlich aufgebaut, was besondere Vorsicht und weitere Untersuchungen bedingt. Neben diesen noch offenen wissenschaftlichen Fragen gibt es einige regulatorische Aspekte zu beachten. Die aktuellen Richtlinien zum Schutz vor Strahlung [6] erlauben nur eine maximale tägliche 222 nm-Far-UVC-Dosis von ca. 23 mJ/cm² (230 J/m²) innerhalb eines 8 Stundentages. Derzeit gibt es noch keine Prüfnorm für Far-UVC-Bestrahlungsgeräte, die es unabhängigen Prüfeinrichtungen erlaubt eine vergleichbare Prüfung solcher Geräte durchzuführen, um die zur Inaktivierung von Mikroorganismen nötigen Bestrahlungsdosen und die erforderlichen Sicherheitsaspekte für den Endanwender sicherzustellen.

Nachteile?

Neben den Vorteilen und dem Potential von Far-UVC gibt es auch Nachteile, die sich aus der Wellenlänge und den derzeitigen Möglichkeiten der Strahlungserzeugung ergeben und die nicht unterschlagen werden können.

Strahlungsquellen

Aktuell sind KrCl-Excimerlampen die einzigen Strahlungsquellen, mit denen sich Far-UVC Strahlung mit 222 nm erzeugen lässt. Hierbei handelt es sich um Gasentladungslampen, die mit einem Gasgemisch aus Krypton und Chlor gefüllt sind, welches durch eine externe, mit mehreren 100 kHz gepulste Hochspannung zu einer Emission angeregt wird. Im Gegensatz zu Quecksilberdampflampen gibt es weltweit nur recht wenige Hersteller wie die Firma Ushio aus Japan, deren Geräte auch für fast alle aktuellen Studien verwendet wurden. Ushio gilt de-facto als Marktführer und Monopolist im Bereich der KrCl-Excimerlampen. Kommen neue Geräte anderer Hersteller auf den Markt, muss überprüft werden, ob diese auch keine schädigende Wirkung auf Menschen zeigen. Kritisch sind insbesondere die ebenfalls bei KrCl entstehenden unerwünschten Emissionen über 230 nm, die tiefer in menschliche Haut eindringen und dort Zellen schädigen könnten [5, 8]. Diese unerwünschten spektralen Anteile müssen mit geeigneten Filtern geblockt werden. Da Ushio für diese Filter ein Patent hält, dürfte es für andere Anbieter schwer werden oder sogar unattraktiv sein, in den KrCl-Excimermarkt einzusteigen. UV-LEDs dringen zwar immer mehr in den kurzwelligen UVC-Bereich vor, erreichen jedoch aktuell bei weitem nicht die Wellenlängen (< 230 nm) und die nötigen Effizienzen, um KrCl-Excimern Konkurrenz zu machen. Dies dürfte sich aber in Zukunft ändern.

Effizienz von KrCl-Excimern

Grundsätzlich sind mehrere Arten von Effizienzen zu betrachten. Zunächst einmal gibt es die sogenannte Wall-Plug-Efficiency (WPE) oder auch elektrische Effizienz, die beschreibt, wie viel der zugeführten elektrischen Energie überhaupt in Strahlungsenergie umgewandelt wird und wieviel Energie bei diesem Prozess an Umwandlungsverlusten verloren geht. Betrachtet man im Falle von KrCl-Excimerlampen die WPE, so muss man feststellen, dass diese Lampen äußerst ineffizient sind. Lediglich 1-2 Prozent der elektrischen Energie wird in Strahlungsenergie umgesetzt. Gut 99 Prozent gehen also in Form von Wärme verloren. Eine Quecksilberniederdrucklampe erreicht WPEs zwischen 30 und 40 Prozent und selbst UVC-LEDs liegen aktuell bei gut 7-8 Prozent WPE (bei 270 nm). Aktuelle KrCl-Excimerlampen, bspw. für die Raumdesinfektion, haben durch diese geringe WPE in der Regel optische Ausgangsleistungen im zwei- bis dreistelligen Milliwattbereich und erreichen nur Bestrahlungsintensitäten von wenigen µW/cm². Zum Erreichen einer inaktivierungsrelevanten Dosis um mindestens 4 Log-Stufen (99,99%) wären daher sehr lange Bestrahlungszeiten von mehreren Stunden in einem Raum nötig.

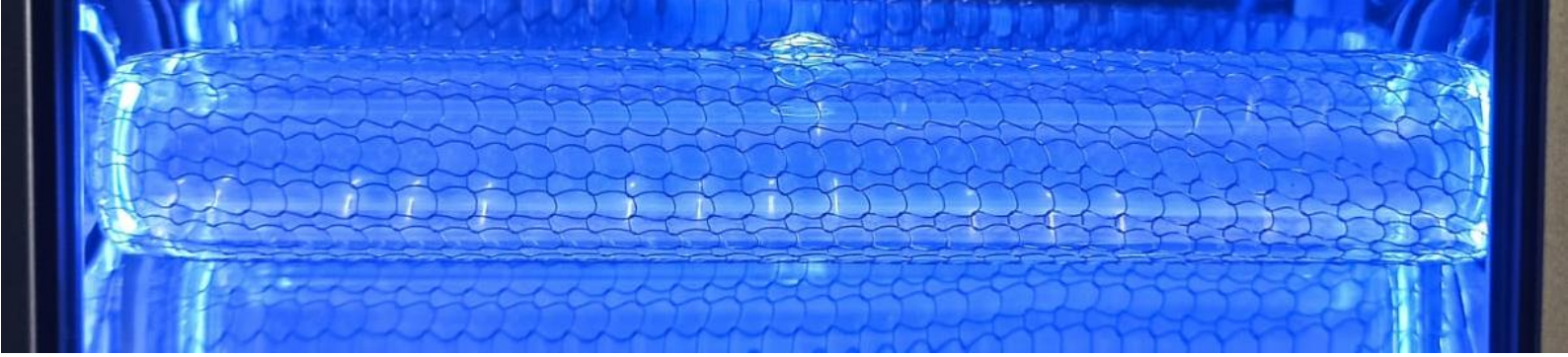
Die zweite wichtige Effizienz ist die mikrobiologisch wirksame Photonen-effizienz, d. h. wie wirksam die emittierten Photonen einer speziellen Wellenlänge, die dann oder andere Bestandteile des zu inaktivierenden Mikroorganismus schädigen. Hier zeigt sich ein zweigeteiltes Bild. Man kommt zu dem Ergebnis, dass sich viele Mikroorganismen mit 254 nm besser inaktivieren lassen als mit 222 nm [14]. Far-UVC benötigt hier also teilweise deutlich höhere Bestrahlungsdosen als dies mit klassischen UV-Lampen der Fall wäre. Es gibt aber auch untersuchte Mikroorganismen, wie zum Beispiel Pseudomonas, bei denen wiederum 222 nm leicht besser abschneidet. Um hier also eine klare Aussage zu treffen, welche Wellenlänge effizienter ist, muss auf den entsprechenden Mikroorganismus referenziert werden. Im Mittel aller in [14] untersuchten Mikroorganismen war bei 222 nm eine um den Faktor 1,89 höhere Bestrahlungsdosis für die gleiche log-Inaktivierungsrate nötig.

Kosten

Kr-Cl-Excimerlampen sind im Vergleich zu anderen UV-Strahlungsquellen extrem teuer. Preise für ein Komplettsystem aus Lampe und Stromversorgung für ein gefiltertes System beginnen bei etwa 2000 €. Durch die geringe Effizienz und die hohen Kosten ist der Einsatz von KrCl-Excimerlampen für die wenigsten Einsatzgebiete wirtschaftlich darstellbar.

Lebensdauer

Informationen in Bezug auf die Lebensdauer von KrCl-Excimerlampen im Vergleich zu anderen UV-Strahlungsquellen sind recht schwer zu finden und auch sehr vage. Man geht davon aus, dass sie durchaus mehr als 4000 h Lebensdauer erreichen [11]. Einige



andere Studien sprechen sehr unspezifisch von „einigen tausend Stunden". Wird eine solche Lampe im Dauerbetrieb eingesetzt, müsste sie also pro Jahr (entspr. 8760 h) etwa ein- bis zweimal ausgetauscht werden. Durch den hohen Preis und dieses kurze Wechselintervall bleibt es fraglich, ob hierdurch ein wirtschaftlich sinnvoller Betrieb überhaupt darstellbar ist.

Ozon

Bei der Erzeugung von UV-Strahlung unterhalb von 242 nm in einer sauerstoffhaltigen Atmosphäre entsteht durch Absorption der Photonen im Luftsauerstoff Ozon. Die Menge an entstehendem Ozon wird umso größer, je höher die Leistung der UV-Quelle und je geringer die Emissionswellenlänge ist. Metalloxide, Licht und Wärme beschleunigen die Zersetzung zu Sauerstoff. Ozon ist brandfördernd und ebenso ein Reizgas, welches eine sehr geringe Geruchsschwelle besitzt, also schon in geringsten Konzentrationen deutlich und unangenehm wahrnehmbar ist. Dabei variiert die individuelle Wahrnehmbarkeitsschwelle je nach Person sehr stark von 0,005 bis 470 ppb. Ozon wird über die Schleimhäute vom Atemtrakt (Nase, Rachen, Lunge) und Augen aufgenommen.

Mögliche Gesundheitsgefahren sind dann:

- Reizung und Schädigung der Schleimhäute von Atemtrakt (Heiserkeit, Husten, Nasenbluten, Bronchitis) und Augen;
- Lungenfunktionsveränderung;
- Störung der körperlichen Leistungsfähigkeit;
- in hohen Konzentrationen: Lungenödem, Kopfschmerzen, Übelkeit, Müdigkeit, Schwindelgefühl, Konzentrationsschwäche.

Es besteht der begründete Verdacht auf kanzerogenes Potenzial (krebserzeugend Kategorie 2 nach TRGS 905) [16]. Der MAK-Wert für Ozon betrug 0,2 mg/m³ bzw. 0,1 ml/m³. Da bisher noch kein AGW für Ozon festgelegt wurde [17], dienen der bisherige MAK-Wert [18] bzw. internationale Grenzwerte von 0,12 mg/m³ (BG ETEM-Infoblatt Nr. 526) als Orientierung für die Konzentration am Arbeitsplatz. Auch der DNEL kann als Orientierung dienen [19]. Er beschreibt den Expositionsgrenzwert, unterhalb dessen ein Stoff nach dem Kenntnisstand der Wissenschaft zu keiner Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit führt. Der DNEL für Ozon ist 0,024 mg/m³ (DNEL-Liste der DGUV). Ozon war bereits in der Vergangenheit problematisch. Insbesondere Fotokopierer und die ersten Generationen von Laserdruckern erzeugten Ozon, was zu Gesundheitsbeeinträchtigungen in Büros führte. Neuere Generationen dieser Geräte sind jedoch ozonfrei.

Die zeitliche Ozon-Konzentration, die eine KrCl-Lampe (Care222 80W elektrisch) mit zwei Excimerstrahlern in einem Prüfraum mit einem Volumen von 30 m³ entsteht, wurde am Fraunhofer IOSB-AST vermessen und ist in nachfolgender Abbildung 3 dargestellt. Der aktuelle MAK-Grenzwert von 120 µg/m³ wird bereits nach zwei Stunden überschritten.

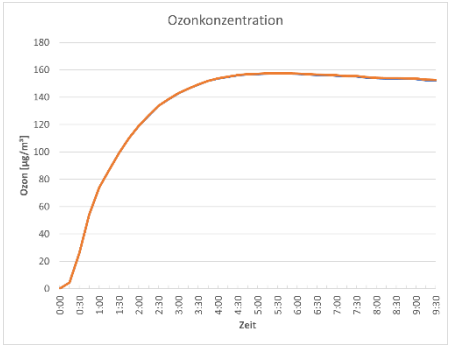


Abbildung 3: Ozonkonzentration

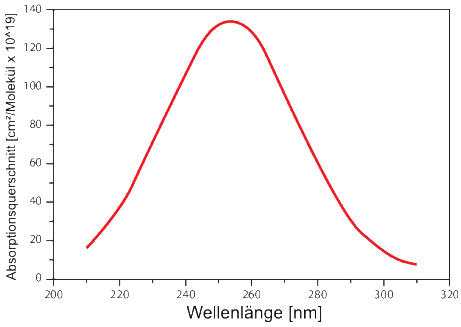


Abbildung 4: Wellenlängenabhängige Absorption des Ozons

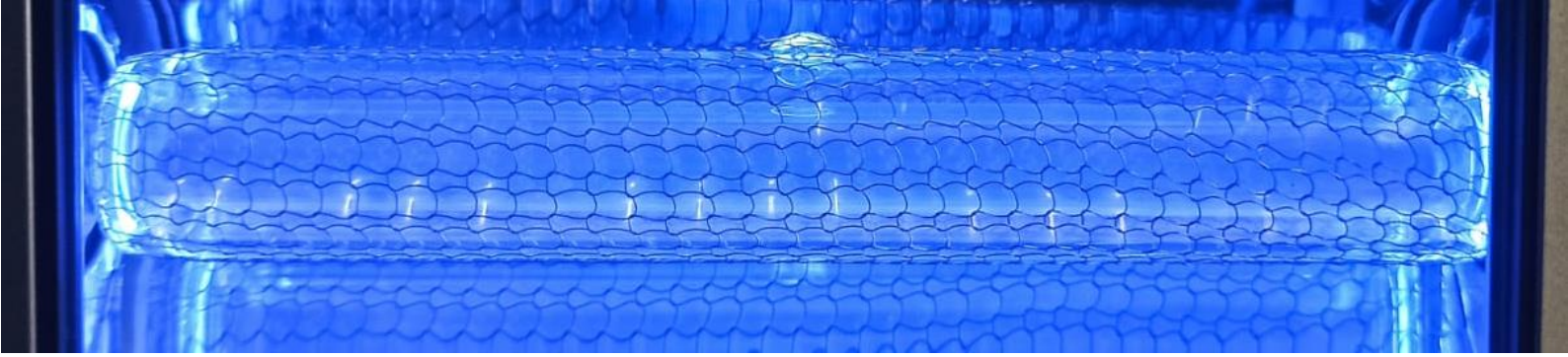
Neben den gesundheitlichen Aspekten von Ozon hat dieses auch Einfluss auf die Strahlungausbreitung selbst. Da Ozon nicht nur durch Far-UV entsteht, sondern in weiten Spektralbereichen UV selbst absorbiert, wirkt das an der Lampe entstehende Ozon als zusätzlicher „Filter", der die abgegebene UV-Strahlung und damit die Effizienz der Strahlungsquelle weiter verringert [Abbildung 4]. Auch ist der Abfall der Strahlungsleistung mit der Entfernung stärker als bei anderen UV-Wellenlängen, da das Ozon durch seine Absorptionseigenschaften die UV-Transparenz der Luft herabsetzt.

Materialschädigungen

Die Photonen einer UV-Strahlung besitzen eine wesentlich höhere Energie als die des sichtbaren Lichtes. Diese Energie ist umso höher, je geringer die Wellenlänge ist. Wenn die Photonenenergie der Bindungsenergie einer chemischen Bindung entspricht, so kann diese aufgespalten und das Molekül damit zerstört werden. Hierdurch kann es insbesondere bei Polymeren zu Schädigungen wie Verfärbungen, Veränderungen der Oberflächenstruktur oder der Elastizität kommen. Auch für Far-UVC wurden derartige Schädigungen von Materialien nachgewiesen [12].

Hautmikrobiom

Auf der menschlichen Haut befindet sich ein Mikrobiom aus verschiedensten Mikroorganismen. Das Hautmikrobiom erstreckt sich über die gesamte Haut am Körper mit Aufteilung in verschiedene Zonen. Je nach Hautgegebenheit und pH-



Wert charakterisiert sich die Zusammensetzung der Bakterien des Mikrobioms. Das Mikrobiom bildet eine Art Schutzschild für die Haut. Die Haut stellt die Verbindung zwischen dem Körper und der Außenwelt dar und bietet Schutz vor schädlichen Einflüssen aus der Umwelt. Eine gesunde Hautflora funktioniert quasi so, dass Feuchtigkeit in die Haut eindringen kann und schädliche Stoffe wie Krankheitserreger "draußen bleiben" müssen. Kommt es allerdings zu einem Ungleichgewicht der Population des Mikrobioms, so wird diese Schutzfunktion beeinträchtigt oder gestört. So kann es bspw. dazu kommen, dass Krankheitserreger in den Körper eindringen. Es kann zu einer erhöhten Hautempfindlichkeit, schnellerer Hautalterung, Elastizitätsverlust, Faltenbildung oder auch einer Entzündung kommen. Eine Schädigung des Mikrobioms kann zum Beispiel durch übermäßige Pflege oder die Verwendung falscher Kosmetikprodukte entstehen. Auch das ständige Händedesinfizieren und -waschen spielt eine große Rolle. Eine Bestrahlung der Haut mit Far-UVC führt ebenfalls zu einer Schädigung des Mikrobioms der Haut, deren Auswirkungen derzeit noch unzureichend erforscht sind. Die Auswirkungen der Bestrahlung auf das Mikrobiom dürften auch abhängig sein von der Größe der bestrahlten Fläche. Vielleicht ist eine Händedesinfektion oder eine Wunddesinfektion mit Far-UVC denkbar.

Schlussfolgerungen

Far-UVC ist aufgrund der geringeren Hautschädigung für den Menschen schonender als die bisher eingesetzte 254 nm-Strahlung von Quecksilberdampflampen, bei der eine Zellschädigung der Haut und insbesondere der Augen de facto vorprogrammiert ist.

Mikrobiologisch sind viele Erreger gegenüber Far-UVC jedoch weniger empfindlich als gegenüber 254 nm, wodurch sich längere Bestrahlungszeiten für eine log- Inaktivierung ergeben. Auch hier gibt es Ausnahmen.

Die derzeit verfügbaren Far-UVC-Quellen sind noch so leistungsschwach, dass Bestrahlungszeiten von mehreren Stunden nötig wären, um eine ausreichende Inaktivierung selbst extrem sensibler Erreger wie dem SARS-CoV2-Virus zu erreichen. Da eine Erregerübertragung vom Emittenten zum Rezipienten in der Regel deutlich schneller verläuft, lässt sich eine Infektionskette mit den aktuell im Far-UVC nötigen Bestrahlungszeiten von mehreren Stunden nicht schnell genug unterbrechen. Die Bestrahlung hat somit zwar sicher eine messbare Reduktion der Erregerzahl in der Luft und auf Oberflächen zur Folge, aber keinen Einfluss auf das Infektionsgeschehen. Durch die geringen Leistungen entsteht jedoch auch noch verhältnismäßig wenig Ozon. Leider korreliert die Menge des entstehenden Ozons mit der Desinfektionswirksamkeit.

Wenn sich in weiteren Untersuchungen der sichere Ausschluss einer Augenschädigung bestätigen sollte, könnten Far-UVC-Strahlungsquellen in Bereichen, in denen unter Aufsicht kontrolliert bestrahlt wird (bspw. medizinische Haut- und Wunddesinfektion), Einzug halten. Um den sicheren Einsatz von Far-UVC zu gewährleisten, sind noch Regulatorien anzupassen und eine Prüfnorm für derartige Geräte zu erarbeiten, damit eine ausreichende Inaktivierung von Mikroorganismen sichergestellt wird.

Noch bestehende Probleme wie die Entstehung von Ozon lassen sich, da physikalisch bedingt, zwar nicht verhindern jedoch zumindest technisch reduzieren.

Für die Dauerbestrahlung von Räumen dürfte Far-UVC aus organisatorischen und insbesondere finanziellen Gründen wegen der geringen Leistung der Strahlungsquellen und dem im Vergleich hierzu hohen Preis wenig geeignet sein. Die zur wirksamen Inaktivierung von Erregern nötigen Bestrahlungsdosen lassen sich nur mit sehr vielen Lampen in einer vertretbaren Zeit erreichen. Hier ist in Zukunft die Entwicklung leistungsfähigerer Far-UVC-Strahlungsquellen nötig.

Quellen

[1] Sosnin EA, Stoffels E, Erofeev MV, Kieft IE, Kunts SE. The Effects of UV Irradiation and Gas Plasma Treatment on Living Mammalian Cells and Bacteria: A Comparative Approach. IEEE Trans. Plasma Sci. 2004;32:1544–50. doi: 10.1109/TPS.2004.833401.

[2] Buonanno M, Randers-Pehrson G, Bigelow AW, Trivedi S, Lowy FD, Spotnitz HM, et al. 207-nm UV light - a promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. I: in vitro studies. PLoS ONE. 2013;8:e76968. doi: 10.1371/journal.pone.0076968.

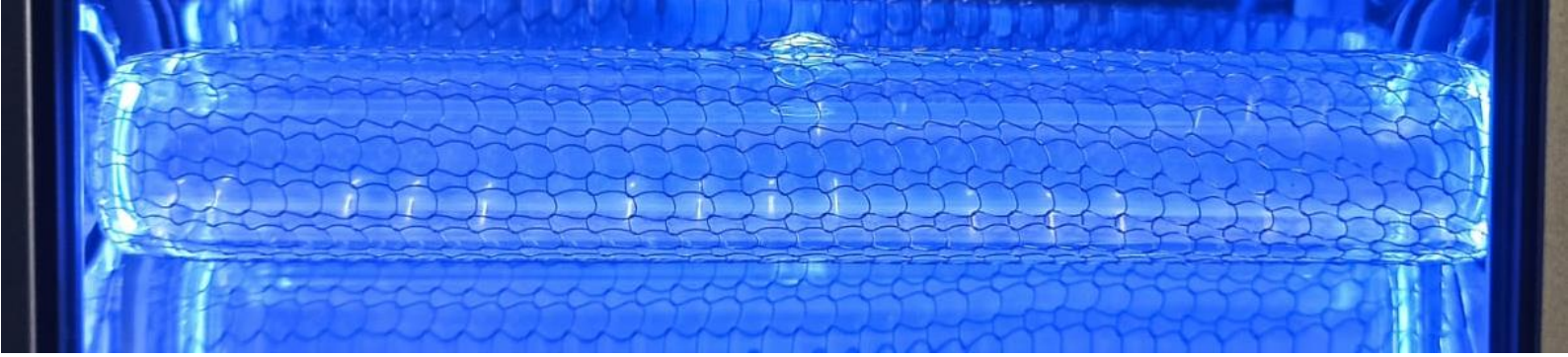
[3] Buonanno M, Stanislauskas M, Ponnaiya B, Bigelow AW, Randers-Pehrson G, Xu Y, et al. 207-nm UV Light-A Promising Tool for Safe Low-Cost Reduction of Surgical Site Infections. II: In-Vivo Safety Studies. PLoS ONE. 2016;11:e0138418. doi: 10.1371/journal.pone.0138418.

[4] Hessling M, Haag R, Sieber N, Vatter P. The impact of far-UVC radiation (200-230 nm) on pathogens, cells, skin, and eyes - a collection and analysis of a hundred years of data. GMS Hyg Infect Control. 2021;16:Doc07. doi: 10.3205/DGKH000378.

[5] Eadie E, Barnard IMR, Ibbotson SH, Wood K. Extreme Exposure to Filtered Far-UVC: A Case Study†. Photochem Photobiol 2021. doi: 10.1111/php.13385.

[6] Richtlinie 2006/25/EG über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung). In: Amtsblatt der Europäischen Union; 2006. 38-59.

[7] Coohill TP. Virus-cell interactions as probes for vacuum-ultraviolet radiation damage and repair. Photochem Photobiol.



1986;44: 359–63. doi:10.1111/j.1751-1097.1986.tb04676.x.

[8] Buonanno M, Welch D, Brenner DJ. Exposure of Human Skin Models to KrCl Excimer Lamps: The Impact of Optical Filtering†. Photochem Photobiol. 2021;97:517–23. doi:10.1111/php.13383.

[9] International Ultraviolet Association. Far UV-C Radiation: Current State-of Knowledge (White Paper). Chevy Chase (MD) USA; 2021.

[10] Kaidzu S, Sugihara K, Sasaki M, Nishiaki A, Ohashi H, Igarashi T, Tanito M. Re-Evaluation of Rat Corneal Damage by Short-Wavelength UV Revealed Extremely Less Hazardous Property of Far-UV-C†. Photochem Photobiol. 2021;97:505–16. doi: 10.1111/php.13419.

[11] Jun-Ying Zhang, Ian W. Boyd. Lifetime investigation of excimer UV sources, Applied Surface Science 168 (2000) 296-299

[12] Darius Drungilas, Mindaugas Kurmis et. al., Evaluating the Impact of 222 nm Far-UVC Radiation on the Aesthetic and Mechanical Properties of Materials Used in Public Bus Interiors, https://doi.org/10.3390/app13074141

[13] Pitts DG. The ocular ultraviolet action spectrum and protection criteria. Health Phys. 1973 Dec;25(6):559-66. DOI: 10.1097/00004032-197312000-00002

*[14] Investigation on Potential ESKAPE Surrogates for 222 and 254 nm irradiation experiments; A.-M.Gierke * ,M. Hessling, 2022*

[15] Glaab, J., Lobo-Ploch, N., Cho, H.K. et al. *Skin tolerant inactivation of multiresistant pathogens using far-UVC LEDs.* Sci Rep *11, 14647 (2021).* https://doi.org/10.1038/s41598-021-94070-2

[*16]*
TRGS 905: Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungs-gefährdender Stoffe

[17] maximale Arbeitsplatzkonzentration https://www.bfga.de/arbeitsschutz-lexikon-von-a-bis-z/fachbegriffe-j-r/mak-wert-fachbegriff/

[18] Arbeitsplatzgrenzwert des DGUV https://www.dguv.de/ifa/fachinfos/arbeitsplatzgrenzwerte/index.jsp

[19] GESTIS-DNEL-Liste, Gefahrstoffinformationssystem der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung https://www.dguv.de/ifa/gestis/gestis-dnel-liste/index.jsp