



Oberflächendesinfektion in kleinen Räumen mittels optischer Strahlung - Szenario: Krankenwagen

**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

Mikroorganismen sind ubiquitär, das heißt sie kommen überall um uns herum vor. Jede Oberfläche, die Luft, der Boden sowie das Wasser in unseren Flüssen und Seen enthalten eine Unmenge an Mikroorganismen wie Viren, Bakterien und Pilze. Diese Mikroorganismen in ihrer Vielzahl unterschiedlichster Arten erfüllen unzählige wichtige Aufgaben, die das

Leben auf der Erde erst ermöglichen. Selbst wir Menschen könnten ohne sie nicht überleben. Jeder von uns trägt etwa 1-2 kg an Bakterien mit sich, insbesondere im Darm. Sie spalten Bestandteile unserer Nahrung auf und ermöglichen es unserem Körper, die dabei freiverdenden Nährstoffe aufnehmen zu können. Ihre Zahl übersteigt die Anzahl der menschlichen Zellen in unserem Körper. Auch auf unserer Haut befinden sich je nach Körperregion bis zu 1 Mio. Mikroorganismen pro cm². Die Mikroorganismen des Hautbioms sind ein wichtiger Schutzschild gegen Krankheitserreger.

Viele Produkte unserer Ernährung sind ohne Bakterien und Pilze nicht denkbar, manches wird durch sie erst bekömmlich: Joghurt, Kefir, Bier, Käse und Brot – hier sind Hefen beteiligt.

Pathogene Mikroorganismen

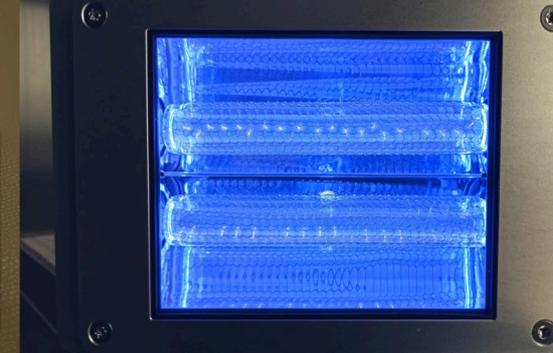
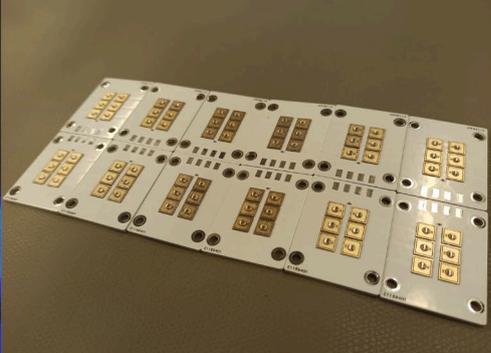
Neben den nützlichen Mikroorganismen gibt es welche, die schädlich für unseren Organismus sind oder Nützlinge, die bei Überhandnehmen schädlich wirken. Entweder schädigen sie unseren Körper, indem sie ihn direkt angreifen oder indem ihre Stoffwechselprodukte toxisch für unsere Zellen wirken. Pathogene

Mikroorganismen stellen eine zunehmende Gefahr dar, da viele von ihnen Resistenzen gegenüber bekannten Antibiotika entwickelt und damit deren Wirksamkeit zunehmend eingeschränkt ist.

Einer der bekanntesten dieser resistenten Erreger ist der Methicillin-resistente Staphylococcus aureus (MRSA). Bakterien der Art Staphylococcus aureus kommen auf der Haut und den Schleimhäuten von vielen gesunden Menschen vor. Diese Bakterien können gegen das Antibiotikum Methicillin und auch die meisten anderen Antibiotika resistent werden [6, 20].

Meist siedeln MRSA auf dem Menschen in Nasenvorhof, Rachen, Achseln und Leisten, ohne ihn krank zu machen. Erst wenn diese Bakterien über Wunden oder durch Schleimhäute in den Körper gelangen, kann eine Infektion ausbrechen. Da MRSA gegen viele Antibiotika unempfindlich (multiresistent) sind, kann die Erkrankung einen schweren Verlauf nehmen.

MRSA kommen insbesondere dort vor, wo häufig Antibiotika eingesetzt werden wie in Krankenhäusern. In Deutschland waren in früheren Jahren ca. 20 % aller in Krankenhäusern untersuchten Staphylococcus aureus - Bakterien multi-



resistent. In den letzten Jahren ist ein Rückgang des Anteils an MRSA zugunsten anderer Mikroorganismen zu verzeichnen.

Multiresistente gramnegative Bakterien (MRGN-Bakterien) ist eine Sammelbezeichnung für eine große Gruppe von verschiedenen Bakterien mit zum Teil unterschiedlichen Eigenschaften, die jedoch eines gemeinsam haben: sie sind resistent, das heißt unempfindlich gegen häufig eingesetzte Antibiotika. Unterschieden werden Bakterien, die gegen vier (4MRGN) oder gegen drei (3MRGN) bestimmte Gruppen von Antibiotika unempfindlich sind [35].

Je nach Bakteriengruppe befinden sich die Erreger im Magen-Darm-Trakt von Tier und Mensch oder auf der Haut; seltener im Nasen-Rachen-Raum, im Analbereich und auch in oder auf rohen Lebensmitteln. Resistente Bakterien treten besonders häufig dort auf, wo viele Antibiotika verwendet werden. Daher sind sie in den letzten Jahren zunehmend ein Problem bei der Behandlung von Krankenhauspatienten geworden. MRGN-Bakterien besiedeln inzwischen aber auch etwa 5 von 100 gesunden Menschen in der Allgemeinbevölkerung. Gesunde Menschen, die mit MRGN-Bakterien besiedelt sind, bezeichnet man als MRGN-Träger. Für diese stellen die Keime jedoch kein Problem dar, weil ein gesundes Abwehrsystem vor einer Erkrankung schützt. Eine Behandlung wird auch hier erst notwendig, wenn MRGN-Bakterien zum Beispiel von der Haut oder aus dem Darm in Wunden oder in die Blutbahn eindringen und eine MRGN-Infektion auslösen.

In letzter Zeit mehren sich Fälle von Infektionen mit Erregern einer anderen Mikroorganismengattung. Hefepilze der Gattung *Candida* werden in einigen Regionen der Welt, insbesondere in Südostasien, Indien und Südafrika zum Problem. Auch hierzulande sind bereits einzelne Fälle einer Infektion mit *Candida auris* zu verzeichnen [9]. *Candida auris* wird im Gegensatz zu allen anderen *Candida*-Arten regelmäßig im Krankenhaus von Patient zu Patient übertragen und

verursacht nosokomiale Ausbrüche. Die Fälle in Deutschland wurden meist importiert durch kolonisierte Personen. Dennoch gehen Experten davon aus, dass dieser Pilz in Zukunft auch hierzulande zum Problemfall wird, da er gegen Fluconazol resistent ist und auch gegen weitere Antimykotika (insbesondere Echinocandine) eine Resistenz entwickeln kann. *Candida auris* verdrängt zunehmend die bisher häufigsten Arten *Candida albicans* und *Candida glabrata*, die in der Regel endogene (von einer Besiedlung des Intestinaltrakts ausgehende) Infektionen verursachen. Eine direkte oder indirekte Übertragung von Patient zu Patient ist hier absolute Ausnahme [24] [15] [36] [26]. Ein großes Problem der Gattung *Candida* allgemein ist deren Langlebigkeit auf Oberflächen.

Eine weitere Gruppe von Erregern, gegen die kein Antibiotikum wirkt, sind Viren. Ihr Infektionsmechanismus ist völlig anders als der von Bakterien oder Pilzen, sie haben keinen eigenen Stoffwechsel und können sich auch nicht selbst vermehren. Sie sind *de facto* tot und bestehen aus DNA- oder RNA-Strängen, die oft in einer Proteinhülle verpackt sind. Sie sind für ihre Vervielfältigung auf Wirtszellen angewiesen, in die sie sich einschleusen und deren Stoffwechsel derart umprogrammieren, dass die Wirtszelle identische Kopien des Virus produziert. Viren werden sowohl durch Oberflächen als auch über Aerosole mit der Luft übertragen.

Es findet nicht zwangsläufig bei jedem Kontakt mit einem pathogenen Erreger eine Infektion statt. Die Infektiosität ist je nach Erreger unterschiedlich. Sie wird maßgeblich durch die Basisreproduktionszahl (R_0 -Wert) und die minimale Infektionsdosis, also die Menge an Erregern, die notwendig sind, um eine Infektion auszulösen, bestimmt. Bei Viren spielt auch die Anzahl neugebildeter Viren pro Wirtszelle („burst size“) eine Rolle. Ein humaner Norovirus kann bspw. schon mit 10-100 Viruspartikeln eine Infektion auslösen.

Hygiene in der Medizin

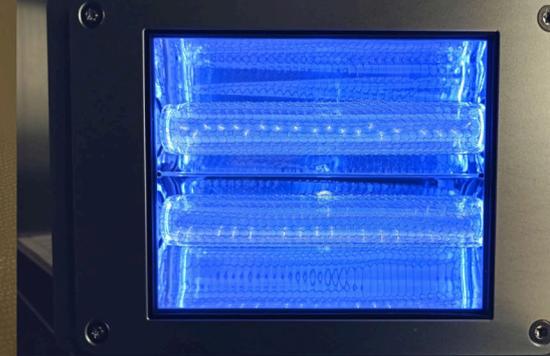
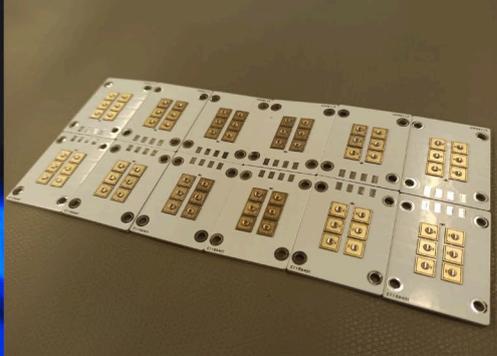
Im medizinischen Umfeld, in Kliniken, Arztpraxen, Pflegeheimen sowie Kranken- und Rettungsfahrzeugen stellen pathogene antibiotika- bzw. mykotikaresistente Mikroorganismen ein zunehmendes Problem dar. Die Resistenz dieser Erreger gegen immer mehr Wirkstoffklassen und die abnehmende Forschung nach neuen Antibiotika verschärfen das Problem. Viele Patienten haben aufgrund ihrer Erkrankung ein geschwächtes Immunsystem, was sie angreifbar macht. Das Immunsystem wird bspw. nach Organtransplantationen zur Verhinderung von Abstoßungsreaktionen des Körpers bewusst medikamentös ausgeschaltet. Derart immunsupprimierte Patienten sind besonders schutzbedürftige Personen. Es gilt, die Übertragung von potentiell gefährlichen Erregern auf diese Personen effektiv zu unterbinden. Dies kann nur durch ausreichende Hygiene- und Desinfektionsmaßnahmen erreicht werden. In [30] wurde belegt, dass es einen Zusammenhang zwischen kontaminierten Oberflächen und der Häufigkeit von nosokomialen Infektionen im klinischen Umfeld gibt.

Das Ziel jeder Hygienemaßnahme im medizinischen Umfeld ist somit die effektive Unterbrechung der Infektionskette.

Hierzu gibt es unterschiedlichste Möglichkeiten wie allgemeine Sauberkeit, die Desinfektion von Oberflächen und der Hände mittels Desinfektionsmittel, die thermische und chemische Aufbereitung von medizinischen Geräten oder auch die räumliche Isolation von Trägern pathogener Erreger sowie ein Patientenscreening bei der Aufnahme.

Grundlagen der Desinfektion durch optische Strahlung

Neben den vorgenannten Hygienemaßnahmen sind in den letzten Jahren auch Methoden in den Fokus der Forschung gerückt, die eine Inaktivierung von Erregern mittels optischer Strahlung bewirken [29]. Diese haben den Vorteil,



das sie ohne chemische Mittel auskommen und damit keine Auswirkungen auf unsere Umwelt haben sowie keine Verbrauchsmaterialkosten verursachen. Nachteilig ist, dass ihre Wirksamkeit nur dort gegeben ist, wo die Strahlung tatsächlich hingelangt. Das betrifft allerdings auch chemische Desinfektionsmittel.

In verschatteten Regionen kann optische Strahlung ihre Wirkung nicht entfalten.

Die Wirksamkeit einer Bestrahlung ist zudem von der Bestrahlungsdosis bzw. Fluenz abhängig. Diese ergibt sich aus dem Integral der Bestrahlungsintensität über die Bestrahlungszeit. Auch wie diese Dosis erreicht wird, spielt eine entscheidende Rolle. Es macht einen Unterschied, ob mit geringer Intensität kurz bestrahlt wird oder mit hoher Intensität für kurze Zeit. Ein weiterer Faktor der Wirksamkeit optischer Strahlung ist die verwendete Wellenlänge und der Wirkmechanismus, der durch diese Wellenlänge ausgelöst wird. Auch besitzen verschiedene Mikroorganismen eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber optischer Strahlung. So sind Viren am empfindlichsten, gefolgt von Bakterien, und sporenbildenden Bakterien. Am unempfindlichsten sind Hefen und Schimmelpilze. Sie benötigen die höchste Bestrahlungsdosis. Die Inaktivierungsrate, die eine optische Strahlung erreichen kann, wird in der Regel in dekadischen log-Stufen oder in Prozent angegeben. Eine Inaktivierung von 90 % entspricht einer log-Stufe (1-log), eine Inaktivierung von 99 % entspricht zwei log-Stufen (2-log) und so weiter. Die erreichbare Inaktivierungsrate ist zur Bestrahlungsdosis proportional. Bezüglich der Begrifflichkeiten für Keimreduktion, Desinfektion und Sterilisation gibt es klare Definitionen. Von einer Desinfektion spricht man erst, wenn mindestens 99,99 % der Erreger inaktiviert wurden (4-log). Alles darunter ist lediglich eine Keimreduzierung. Diese kann zwar das Infektionsrisiko etwas verringern, aber nicht gänzlich ausschließen. Im medizinischen Umfeld, insbesondere bei der Aufbereitung medizinischer Geräte wird eine Sterilisation gefordert. Diese ist definiert als eine

Inaktivierung aller vorhandenen Mikroorganismen um mindestens 99,9999%, also sechs log-Stufen (6-log). Von einer Million infektiösen Erregern darf nach der Sterilisation also maximal einer infektiös bleiben.

Ein weiterer wichtiger Faktor in der Infektionskette ist die Infektionszeit, also die Zeit des Erregerübertrittes vom Emittenten zum Rezipienten. Diese ist nicht zu verwechseln mit der Inkubationszeit (Zeit zwischen Infektion und Auftreten erster Symptome). Die Infektionszeit kann oft sehr kurz sein. Meist reicht die Berührung einer kontaminierten Fläche oder das Vorbeigehen an einem mit einem aerosolgetragenen Virus infizierten Menschen. Hier sind Infektionszeiten von Sekunden bis wenigen Minuten häufig.

Die nötige Bestrahlungsdosis unterscheidet sich auch dadurch, wo der Erreger inaktiviert werden soll. Während bei der Luft- und Wasserdesinfektion die Erreger durch die Eigenbewegung im Medium von allen Seiten bestrahlt werden können, sind die nötigen Dosen zum Erreichen einer bestimmten log-Stufe geringer als bei der Inaktivierung eines Erregers auf einer Oberfläche, wo dieser nur von einer Seite bestrahlt werden oder er sich in Vertiefungen der Oberfläche verschatten kann. Ein weiteres Problem bei der Oberflächendesinfektion sind mehrere Lagen von Erregern übereinander oder wenn diese in einen Fett-, Protein- oder Schmutzfilm eingebettet sind. Durch die Verringerung der Eindringtiefe der Strahlung mit sinkender Wellenlänge können tieferliegende Regionen einer derartigen Kontamination eventuell nicht oder nur unzureichend erreicht werden.

Hier sind dann meist deutlich höhere Bestrahlungsdosen anzusetzen. Dabei ist zu beachten, dass die Bestrahlungsintensität mit dem Quadrat der Entfernung zur Strahlungsquelle abnimmt. Je weiter eine zu bestrahlende Oberfläche von der Strahlungsquelle entfernt ist, umso länger muss diese bestrahlt werden, um die gleiche Dosis zu erreichen.

Eine Bestrahlungsdosis muss mindestens so hoch sein, dass die Erregerzahl innerhalb der Zeit, die ein Erreger zum Übertritt auf einen anderen Patienten benötigt, auf ein Maß reduziert wird, bei dem keine Infektion mehr stattfinden kann.

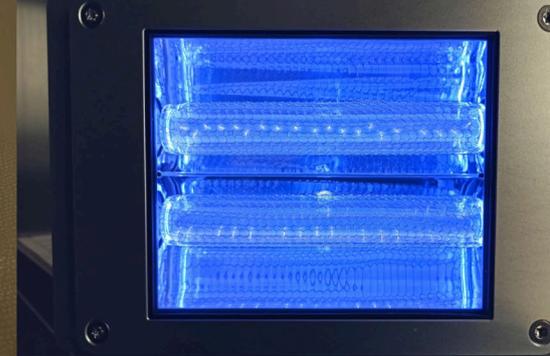
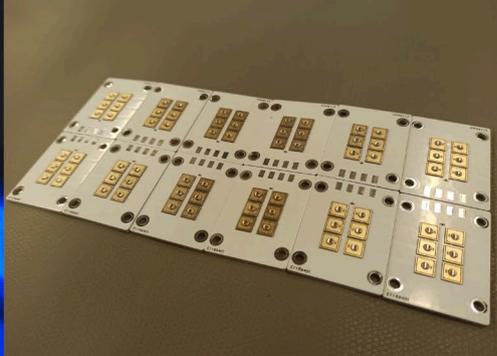
Diese Zeiten können bei der Oberflächen und Luftdesinfektion sehr kurz sein. Prinzipiell kann sofort nach einer Kontamination einer Oberfläche oder der Luft ein Erregerübertritt stattfinden. Kurze Desinfektionszeiten sind daher immer sinnvoller als lange. Eine Ausnahme bildet hier die Aufbereitung von Medizingeräten, die bisher nach dem Patientenkontakt in einem separaten Raum gereinigt und sterilisiert werden. Die Zeitspanne bis zum nächsten Einsatz des Gerätes am Patienten ist in der Regel ein rein ökonomischer Faktor für die medizinische Einrichtung.

Wellenlängenbereiche

Aus der Forschung ist bekannt, dass weite Teile des elektromagnetischen Spektrums geeignet sind, Mikroorganismen zu inaktivieren. Der Wellenlängenbereich reicht hier vom infraroten bis zum ultravioletten Bereich. Im Infrarot sind jedoch die Wirkungen sehr gering und langfristig, weshalb auf drei Bereiche mit kürzerer Wellenlänge genauer eingegangen werden soll. Es ist bekannt, dass sowohl Bestrahlung mit **blauvioletttem Licht** (400-450 nm) sowie ultravioletter Strahlung im Bereich des UVC (200-280 nm) Mikroorganismen in ihrem Wachstum hindern bzw. gänzlich inaktivieren kann. Im UVC-Bereich wird zudem zwischen **Germicidal-UV** (250-280 nm) sowie **Far-UV** (200-230 nm) unterschieden.

Wirkmechanismen

Die Desinfektionswirkung optischer Strahlung beruht im Gegensatz zu chemischen Desinfektionsmitteln oder Antibiotika auf physikalischen Prinzipien. Bei der Blaulichtbestrahlung weiß man zwar, dass es eine mikrobiozide Wirkung gibt, der dahinterliegende Wirkmechanismus ist jedoch noch nicht



vollständig entschlüsselt. Im UVC-Bereich sind verschiedene Mechanismen recht gut bekannt. Grundsätzlich beruhen alle diese Mechanismen auf der Aufspaltung chemischer Bindungen. Die Energie eines Photons ist abhängig von dessen Wellenlänge. Je kürzer diese ist, umso höher ist die Photonenenergie. Entspricht die Photonenenergie in etwa der Bindungsenergie einer chemischen Bindung, so kann diese Bindung durch diese Photonen aufgebrochen werden. Die Wasserstoffbrückenbindung zwischen der Nukleinbase Thymin, die ein Pyrimidin Grundgerüst besitzt, und Adenin in der DNA bzw. Uracil und Adenin in der RNA kann zum Beispiel im Bereich von UVC leicht gelöst werden. Weiterhin wird die UVC-Strahlung von der Doppelbindung im Pyrimidinring absorbiert und ermöglicht es, Reaktionen mit benachbarten Molekülen einzugehen. Hierdurch verbinden sich, sofern im DNA-Strang an dieser Stelle vorhanden, benachbarte Thymine zu einem Thymindimer. Dieser Dimer ist deutlich stärker gebunden und wird nicht mehr gespalten. Hierdurch ist eine Duplikation der DNA bzw. RNA nicht mehr möglich und der Mikroorganismus wird inaktiviert. Dieser Mechanismus ist sehr effizient. Bei anderen Wellenlängen sind auch Schädigungen von Proteinen und Enzymen bekannt [10], [17], [19].

Der Vorteil von optischer Strahlung zur Desinfektion liegt darin, dass laut aktuellem wissenschaftlichen Stand Mikroorganismen im Gegensatz zu Antibiotika keine Resistenzen entwickeln können.

Ist Dosis gleich Dosis?

Wie bereits erwähnt wurde, wird die Bestrahlungsdosis definiert als Integral der Bestrahlungsintensität über der Bestrahlungszeit. Dies führt zu der Frage, ob es egal ist, wenn man mit einer hohen Intensität für kurze Zeit oder mit einer niedrigen Intensität über eine lange Zeit

bestrahlt. Hier kann man je nach Erregertyp ein klares „Nein“ geben. Die Natur hat viele Mikroorganismen, abgesehen von Viren, mit teilweise sehr effizienten Reparaturmechanismen, ausgestattet. Einer dieser Reparaturmechanismen ist die sogenannte Photoreaktivierung.

Viele Erreger mit eigenem Stoffwechsel wie bspw. der Escherichia coli sind in der Lage, unter Lichteinfluss im Bereich zwischen 300-500 nm strahlungsinduzierte DNA-Schäden mittels des Enzyms DNA-Photolyase (auch als Photoreactivation Enzyme bezeichnet) zu reparieren. Die bei der Pyrimidin-Dimerbildung entstandene überschüssige Methylgruppe wird durch Methyltransferasen gebunden, sodass die DNA-Base wieder in ihrem ursprünglichen Zustand versetzt wird. Dieser Prozess wirkt den Effekten der mikrobioziden Bestrahlung entgegen. Ist die Bestrahlungsintensität zu gering, werden DNA-Schäden ggf. schneller repariert als neue entstehen. Eine Inaktivierung der Mikroorganismen über den Wirkmechanismus der DNA-Schädigung ist dann nicht mehr effizient gegeben. Andere Wirkmechanismen wie die Schädigung von Proteinen werden nach aktuellem Kenntnisstand hiervon nicht betroffen. Insbesondere bei Viren tritt die Schädigung der Spike-Proteine, mit denen sie sich in die Wirtszelle einschleusen, oft stärker zum Tragen als die Schädigung der DNA. Durch beide Wirkmechanismen und die geringe Größe von Viren, lassen sich diese in der Regel mit deutlich geringeren Bestrahlungsdosen inaktivieren, als dies bei Bakterien oder gar Schimmelpilzen der Fall wäre.

Kurze Bestrahlungszeiten mit hoher Intensität sind meist deutlich effizienter als lange Bestrahlungen mit geringer Intensität.

Weiterhin bedeutet die nur teilweise Schädigung der DNA eines Mikroorganismus, dass hier das Potential der Mutation gegeben sein kann. Der Mechanismus der Photoreaktion zeigt

deutlich, dass die Dauer der erforderlichen Bestrahlung nicht nur in Bezug auf die Übertragungsgeschwindigkeit eines Erregers auf den Patienten, sondern auch wegen möglicher Regenerationsprozesse des Mikroorganismus einen großen Einfluss haben kann. Lange Bestrahlungszeiten führen meist nur in Laborumgebungen ohne Einwirkung von Fremdlicht und damit ohne Photoreaktivierung zu befriedigenden Ergebnissen.

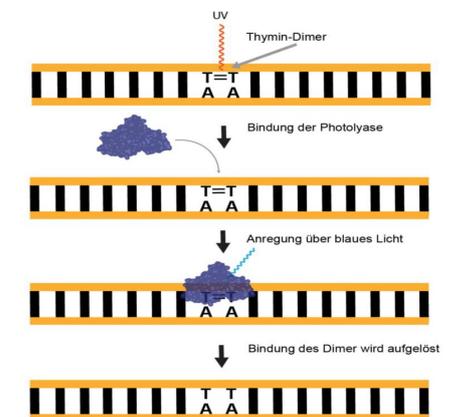


Abbildung 1 Wirkmechanismus der Photoreaktivierung

Effizienzen

Wenn man über die Desinfektion mittels optischer Strahlung spricht, so sind zwei Effizienzen zu betrachten, die voneinander unabhängig sind. Die erste wäre die sogenannte Wall-Plug-Efficiency (WPE) [37]. Sie beschreibt, wie gut eine Strahlungsquelle die zugeführte elektrische Energie in Strahlung umsetzt. Je größer deren Wert ist, umso geringer fällt auch die Verlustleistung, die in Form von Wärme abgeführt werden muss, aus. Die zweite Effizienz ist die mikrobiozide Effizienz, die unter anderem von der emittierten Peakwellenlänge und der Breite des Emissionspeaks (FWHM) im Spektrum abhängig ist. Weiterhin ist diese abhängig vom Mikroorganismus selbst. Sie beschreibt, wie stark sich ein spezieller Mikroorganismus bei einer definierten Bestrahlungsdosis inaktivieren lässt. Sie wird auch als Wirkungsspektrum oder im Englischen Wavelength Dependent Inactivation Efficiency bezeichnet.

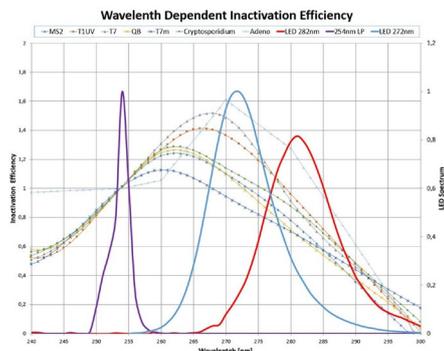
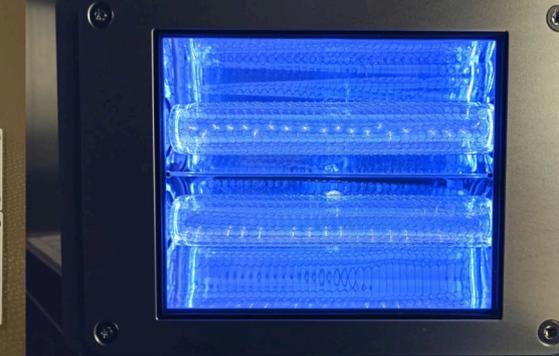
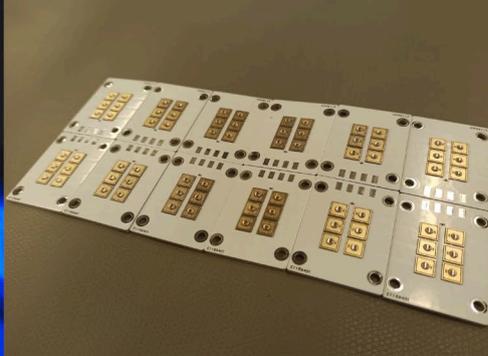


Abbildung 2 Wirkspektren einiger Mikroorganismen sowie Emissionsspektren von drei UVC-Strahlungsquellen

Ein weiterer Faktor bei der Desinfektion mittels optischer Strahlung ist die sogenannte „Dosis-Wirkungs-Kurve“ (engl. dose response curve). Sie beschreibt den Verlauf der Inaktivierung von Mikroorganismen zeitlich über die applizierte Bestrahlungsdosis. Sie ist meist durch einen sehr steilen Teil, bei dem am Beginn der Bestrahlung eine sehr rasche Inaktivierung erfolgt, gekennzeichnet, der dann aber in einen deutlich flacheren Teil übergeht, in welchem trotz weiterer Erhöhung der Bestrahlungsdosis nur noch eine geringe weitere Inaktivierung erfolgt.

Das Anwendungsszenario

Die drei vorgenannten Wellenlängenbereiche sollen in den nachfolgenden Abschnitten im Anwendungsszenario „Innenraumdesinfektion von Kranken- und Rettungsfahrzeugen“ bezüglich ihrer Eignung und Effizienz für die Oberflächendesinfektion in kleinen Räumen verglichen werden. Dieses Szenario wurde bewusst gewählt, da sich im Vergleich zu größeren Räumen wie Wartezimmern, oder Operationssälen eine höhere Bestrahlungsdosis innerhalb kürzerer Zeit erreichen lässt. Ein typischer Krankenwagen mit den Innenabmessungen 4 m x 2,5 m x 1,9 m (Länge x Breite x Höhe) hat eine Wandfläche von etwa 25 m² und ein Volumen von 19 m³. Weiterhin ist die maximal mögliche Entfernung von der Strahlungsquelle zu einer Oberfläche im Raum 5,085 m (Raumdiagonale). In Krankenwagen sind Desinfektion und Reinigung nach jedem Einsatz

vorgeschrieben und die zu desinfizierenden Flächen sowie deren Abstand zur Strahlungsquelle sind klar definiert und fix. Das macht die Verfahren vergleichbar. Grenzen der Verfahren sind klar erkennbar und auf Einsätze in größeren Räumen projizierbar.

Krankenwagen und Rettungsfahrzeuge zeichnen sich dadurch aus, dass zwischen den einzelnen Einsätzen der Patient wechselt. Wurde ein Patient transportiert, so ist durch geeignete Maßnahmen sicherzustellen, dass das Fahrzeug vor dem nächsten Einsatz sauber und „keimfrei“ ist. Dies erfolgt derzeit durch eine Nassreinigung mit nachfolgender Wischdesinfektion mittels chemischer Desinfektionsmittel. Das kann je nach Patient sehr zeitaufwändig sein und das Fahrzeug ist währenddessen für Folgeeinsätze blockiert. Weiterhin ist eine Wischdesinfektion nicht validierbar, da nicht geprüft werden kann, wie sorgfältig diese ausgeführt wird. Vorteilhaft wäre, wenn nur die Nassreinigung manuell erfolgen würde und die Desinfektion während der Fahrt zum nächsten Einsatz automatisiert erfolgen kann. Diese Möglichkeiten bietet die Desinfektion mit optischer Strahlung. Da ein Krankenwagen in Deutschland innerhalb von 13 Minuten am Einsatzort sein muss, nehmen wir im Szenario gerundet eine maximal verfügbare Bestrahlungszeit von 10 Minuten während der Fahrt an. Besonders wichtig bei der Desinfektion sind die Patiententrage mit direktem Patientenkontakt, die Arbeitsflächen, auf denen während des Einsatzes Arbeitsmaterialien abgelegt werden und die Wände, die ggf. durch Blutspritzer und andere Flüssigkeiten während der Patientenversorgung kontaminiert werden könnten.

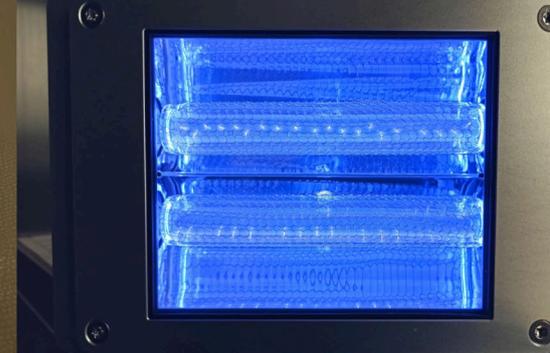
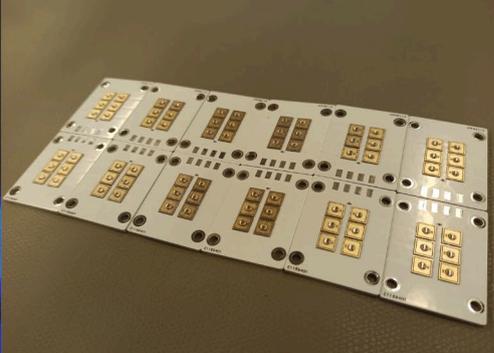
Luftdesinfektion?

Die Desinfektion der Luft im Fahrzeug spielt bei Krankenwagen keinerlei Rolle, da die Luft beim Öffnen der Türen ohnehin nahezu komplett ausgetauscht wird. Dieser Luftaustausch ist wesentlich effizienter zur Senkung der Aerosolbelastung als jedes optische Bestrahlungsverfahren.

Sollte ein Patient transportiert werden, der aerosolgetragene Erreger wie zum Beispiel SARS-CoV2 emittiert, so ist mit keiner der aktuell zur Verfügung stehenden Strahlungsquellen eine ausreichende Inaktivierung innerhalb der extrem kurzen Übertragungszeit von wenigen Sekunden dieser Erreger zu erreichen. Dies liegt darin begründet, dass durch den infizierten Patienten die Luft im Fahrzeug kontinuierlich mit immer neuen kontaminierten Aerosolen angereichert wird. Auch wenn im Labor gute Ergebnisse erreicht werden, so geht [8] davon aus, dass in Realen Szenarien diese Ergebnisse nicht ohne weiters anwendbar sind. Hier müssen andere Maßnahmen wie das Tragen eines effizienten Atemschutzes durch das medizinische Personal herangezogen werden. Das Tragen einer FFP2 Maske beim Personal sowie dem Patienten ist hier effizienter und vor allem deutlich preiswerter als eine optische Bestrahlung. Auch der Boden des Fahrzeuges ist hygienisch wenig relevant, da dieser mit dem ersten Betreten beim Einladen des Patienten wieder kontaminiert ist. Allgemeine Sauberkeit ist dennoch auch hier angebracht, Keimfreiheit nicht notwendig und auch nicht erreichbar.

Desinfektion mit Blaulicht

Aus der Literatur ist bekannt, dass sich auch schon mit blauem Licht bei Wellenlängen zwischen 400 nm und 450 nm Mikroorganismen inaktivieren lassen, diese also durch das blaue Licht geschädigt werden [11] [22] [12]. Blaues Licht kann heutzutage sehr preiswert mittels LEDs erzeugt werden. Blaue LEDs dienen als Basis für die in der Beleuchtungstechnik eingesetzten weißen LEDs. Bei diesen wird auf einer blauen LED ein fluoreszierendes Material aufgebracht, welches das Spektrum so verändert, das die LED weiß erscheint. Diese LEDs werden als Massenprodukt inzwischen milliardenfach zu sehr günstigen Preisen von teilweise wenigen Cent hergestellt. Als Vertreter in diesem Wellenlängenbereich wurden **Cree XP-E2 LEDs mit 450 nm und 550 mW** sowie **Nichia NCSU275 405 nm 370 mW** betrachtet [5, 27].



Die Umwandlungseffizienz von elektrischer in Strahlungsenergie - die sogenannte Wall-Plug-Efficiency - ist mit teilweise über 50% sehr hoch. Blaue LEDs haben inzwischen optische Ausgangsleistungen von mehreren hundert Milliwatt erreicht, was bei der kleinen aktiv emittierenden Fläche von 1 mm x 1 mm in einer theoretischen optischen Flächenleistung von bis zu 55 W/cm² (@450 nm) und 35 W/cm² (@405 nm) mündet (Abbildung 9). In der Realität ist der erreichbare Wert durch das etwas größere Package der LEDs geringer. Mit blauen LEDs lassen sich große, flächige Arrays mit hoher Strahlungsdichte preiswert herstellen. Dies ist in dem betrachteten Anwendungsszenario wichtig, da wie bereits erwähnt, Desinfektion mit optischer Strahlung nur dort wirkt, wo diese Strahlung auf eine Oberfläche auftreffen kann. Große LED-Arrays oder lange LED-Streifen, die im Fahrzeug angebracht werden, erzeugen eine sehr diffuse und homogene Strahlungsverteilung, die viele Flächen mit einer gleichmäßigen Intensität erreicht. Zudem können hierdurch leicht verschattete Bereiche einfacher über preiswerte Reflektoren ausgeleuchtet werden. Sehr dunkle Bereiche mit geringen Intensitäten und damit geringer Desinfektionswirkung wie bei einem Punktstrahler (Spot) treten hierbei nicht auf.

Wellenlängeneffizienz und Dosis

Während die WPE von blauen LEDs sehr hoch ist, ist deren mikrobiocide Wirkung sehr gering. Um zum Beispiel Mikroorganismen des recht strahlungsempfindlichen Bakteriums *Escherichia coli*, einem typischen Fäkalkeim, um 99,99 % zu inaktivieren, ist bei Blaulicht eine Bestrahlungsdosis zwischen 700 J/cm² @450 nm und 70 J/cm² @405 nm nötig [13] [25]. Die Werte schwanken zudem sehr stark je nach Studie.

Der Blaulicht-Einheiten-Trick

Hersteller von Blaulichtdesinfektionsanlagen verwenden die Einheit **J/cm²**. Hierbei sind die numerischen Dosiswerte ähnlich denen im UVC- und FarUV-Bereich, was leicht zu Verwechslungen bezüglich der Effizienz führt. In letzteren Bereichen wird

die Dosis allerdings immer in **mJ/cm²** oder **J/m²** angegeben.

Für den besseren Dimensionsvergleich mit den im nachfolgenden zu betrachtenden Wellenlängenbereichen wählen wir an dieser Stelle **mJ/cm²** als Einheit. Bei Blaulichtbestrahlung sind gemäß der vorgenannten Quellen also für den besten Fall 70 J/cm² (= 70.000 mJ/cm² bzw. 700.000 J/m²) als Bestrahlungsdosis für die sichere 4 log-Inaktivierung des *Escherichia coli* nötig.

Um eine derart hohe Dosis innerhalb von 10 Minuten auf einer Fläche von 1 m² zu erreichen, müsste diese Fläche mit einer optischen Leistung von 1.166 Watt kontinuierlich bestrahlt werden. Dies entspricht in etwa so viel Strahlungsleistung, wie die Sonne pro m² in Deutschland im Mittel über das gesamte elektromagnetische Spektrum einstrahlt (Globalstrahlung). Um die 25 m²-Innenwände eines Krankwagens innerhalb der Zeitvorgabe von 10 Minuten zu desinfizieren, sind rein rechnerisch 29 kW (25 m² x 1.166 W) Strahlungsleistung und bei einer WPE der LEDs [27] von 20 % stolze 145 kW elektrische Leistung nötig. Dies würde das elektrische Bordnetz des Fahrzeugs zusammenbrechen lassen. Hier der Hinweis, dass es sich bei den Abschätzungen um die effizientere der beiden Wellenlängen (405 nm) handelt. Bei 450 nm [5] wäre zwar die WPE mit 50% 2,5 mal, jedoch die nötigen Dosen 10 mal höher. Die damit korrespondierenden elektrischen Energien würden nochmals um den Faktor 4 steigen.

Die emittierten Wellenlängen liegen im Bereich, in dem auch die Photoreaktivierung wirksam ist (300 nm bis 500 nm). Dies bedeutet, dass bei Dauerbestrahlung mit geringer Intensität die Photoreaktivierung ggf. stärker wirkt als eine strahlungsinduzierte Schädigung des Mikroorganismus.

Außerdem werden bei einer angenommenen WPE von 50 % die restlichen 50 % der zugeführten elektrischen Energie in Wärme

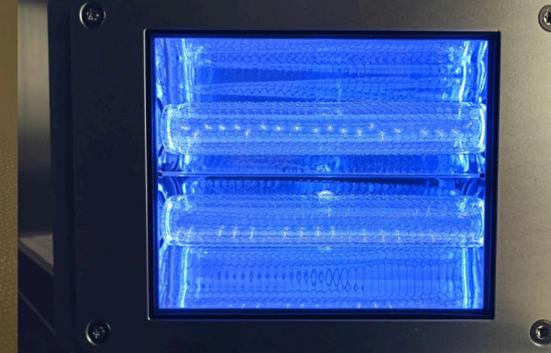
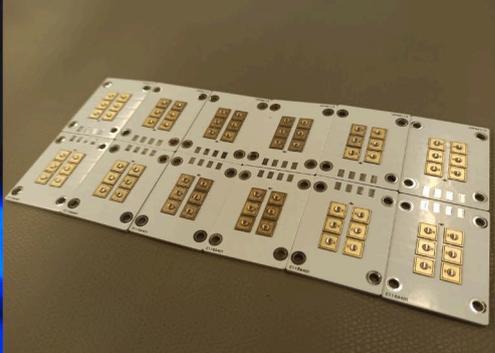
umgewandelt. Diese müsste zwingend abgeführt werden, was bei den genannten Dimensionen technisch kaum realisierbar ist. Um ein mikrobiologisch effizientes Blaulichtdesinfektionssystem in diesen Dimensionen aufbauen zu können, wären bei Verwendung von Cree XP-E2 SMD-LEDs mit einer Einzelleistung von 550 mW insgesamt fast 53.000 LEDs zu einem Stückpreis von 1,92 € nötig [5]. Die Kosten allein für die LEDs würden sich auf etwa 102.000 € belaufen.

Bei den hohen nötigen Bestrahlungsintensitäten sind Schäden am menschlichen Körper zu erwarten, da blaues Licht sehr tief in das Gewebe eindringt. Zwar wird in [4] nicht von einer Schädigung ausgegangen, jedoch wurden hier nur geringe Intensitäten untersucht. Die Bestrahlung dürfte nur in Abwesenheit von Personen erfolgen und die Fenster, insbesondere das zwischen Fahrerkabine und Behandlungsraum im Krankswagen, müssten während der Bestrahlung blickdicht verschlossen werden. Die Strahlungsquellen müssten in Anwesenheit von Personen automatisch abschalten. Dies wird bereits in den Guidelines von Herstellern dieser Systeme angegeben [3] und damit geworben, dass die Systeme über Bewegungsmelder abgeschaltet werden, wenn sich Personen im Raum befinden. In der gleichen Quelle wird allerdings auch mit der absoluten Sicherheit und Ungefährlichkeit dieses Verfahrens geworben, was in völligem Widerspruch zum vorgenannten Argument steht.

Desinfektion mit UVC-LEDs

Für die Strahlungserzeugung von UVC im Wellenlängenbereich zwischen 240 und 280 nm (Germicidal UV) stehen verschiedene Strahlungsquellen zur Verfügung. Neben klassischen Quecksilberdampflampen sind auch hier immer leistungsfähigere LEDs verfügbar.

Der Hauptvorteil von Quecksilberlampen ist ihr unschlagbarer niedriger Preis. Ein Watt UV-Strahlung ist hier bereits für wenige Euro erhältlich und liegt damit preislich im Bereich der blauen LEDs.



Quecksilberniederdrucklampen emittieren bei den Wellenlängen 254 nm und 185 nm, wobei letztere Wellenlänge meist aufgrund der durch sie bewirkten Ozonbildung durch dotierte Spezialgläser herausgefiltert wird. Die Leistungen von Quecksilberniederdrucklampen liegen im Bereich von wenigen Watt bis in den unteren dreistelligen Wattbereich. Nachteilig ist das Quecksilber, welches im Falle eines Bruches der Lampe trotz der geringen Menge von wenigen Milligramm das Fahrzeug kontaminieren würde. Die Glasbruchgefahr ist ein Hauptargument gegen den Einsatz dieser Lampen im mobilen Bereich, wobei sich diese mit geeigneten Maßnahmen wie Splitterschutz und gedämpfter Aufhängung technisch minimieren lässt. Auch haben diese Lampen eine Aufwärmphase von teilweise mehreren Minuten, bevor sie ihre maximale Leistung erreichen. Sie sind also eher für kontinuierliche Bestrahlungsszenarien geeignet. Ein getakteter Betrieb verringert zudem stark die Lebensdauer.

Seit einigen Jahren sind im UVC-Bereich zunehmend auch LEDs verfügbar. Die UVC-LED-Technologie ist noch recht jung, die optischen Leistungen sowie die WPE ist mit 7-8% im Vergleich zu Quecksilberlampen und blauen LEDs noch recht gering und der Preis relativ hoch. Es wurden als Vertreter dieser Strahlungsquellen LEDs des Typs **Bolb S6060 mit 265 nm und 100 mW** optischer Leistung betrachtet [1].

Die besten UVC-LEDs erreichen aktuell optische Leistungen von 100-130 mW (@265 nm) bei einer WPE von 7-8 % und Preisen ab 20 € pro LED bei Abnahme größerer Stückzahlen (Stand 01/2024). Ein Watt UV-Strahlung kostet hier also etwa 200 €. Bei einer Chipgröße von 1 mm x 1 mm sind derzeit theoretisch optische Flächenleistungen von 10-13 W/cm² (@265 nm) direkt an der Strahlungsquelle erreichbar. Die Leistung verfügbarer UVC-LEDs nimmt zudem mit der Emissionswellenlänge ab. Im Bereich kleiner 250 nm sind derzeit kaum UVC-LEDs mit ausreichender Leistung zu finden. Auch der Preis steigt hier stark an, was den Einsatz von LEDs kleiner 250 nm wirtschaftlich unattraktiv macht. Analog zu den blauen

LEDs lassen sich mit UVC-LEDs kompakte Strahlungsquellen mit sehr hoher Flächenleistung, die zu größeren LED-Arrays oder LED-Streifen verschaltet werden können, herstellen und so eine diffuse homogene Ausleuchtung eines Raumes erreichen. Auch hier tritt das bereits erwähnte Problem der starken Verschattung nicht auf.



Abbildung 3: 2.1 Watt UVC-LED Modul 265 nm (Fraunhofer IOSB-AST)



Abbildung 4: 14,4 W 272 nm UVC-LED Modul (wassergekühlt)



Abbildung 5: 600 mW UVC-LED Modul im Binz RESCUBE 3 (Fraunhofer IOSB-AST / Binz automotive)

Wellenlängeneffizienz und Dosis

Im Gegensatz zu blauen LEDs ist die mikrobiologische Wirksamkeit von UVC-LEDs wesentlich größer. Dies beruht auf der bereits genannten sehr effizienten Schädigung der DNA und Proteine in diesem Wellenlängenbereich. Der bereits bei den blauen LEDs verwendete Beispielerreger *Escherichia coli* benötigt für eine Inaktivierung um 99,99 % lediglich eine Bestrahlungsdosis von etwa 7 bis

9 mJ/cm² @265 nm [28]. Diese Dosis ist etwa um den Faktor 10³ geringer als bei blauen LEDs @405 nm und 10⁴ geringer @450 nm. Hieraus resultiert dann auch die Notwendigkeit einer deutlich geringeren optischen Gesamtleistung. Für die 10-minütige Bestrahlung eines Quadratmeters reichen 1,1 Watt somit für den gesamten Innenraum eines Krankenzimmers 27,5 Watt. Bei einer WPE von lediglich 7 - 8 % ist hierfür eine elektrische Leistung von 350-400 Watt nötig. Dies ist leicht aus dem Bordnetz des Fahrzeugs zu stemmen. Die aufgrund der geringen WPE erzeugte und abtransportierende Wärme von 92-93 % der zugeführten elektrischen Energie liegt bei etwa 320-370 W, was technisch keinerlei Probleme bereitet.

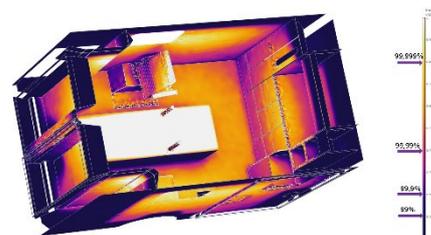
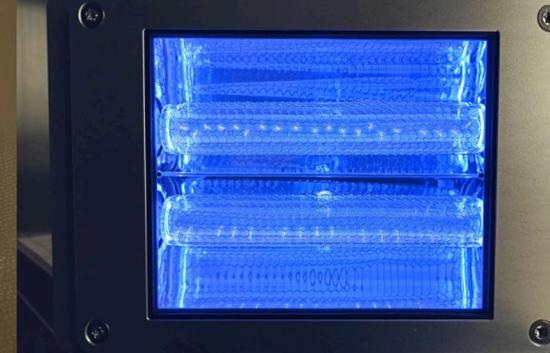
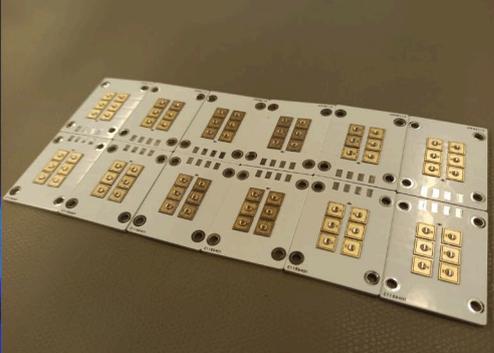


Abbildung 6: 10-Minuten-Inaktivierungssimulation mit 24W System im Binz RESCUBE 3 für *Candida auris* (Fraunhofer IOSB-AST)

Bei den Anfang 2024 zugrundeliegenden Preisen würden die UVC-LEDs für ein 27,5 W - System bei entsprechend hoher Abnahmestückzahl lediglich etwa 5.000 € kosten. Hinzu kämen allerdings noch Kosten für Ansteuerung, Sensorik und Systemintegration in die Bordelektronik sowie die mechanischen Komponenten wie Abdeckgläser für die Strahlungsquellen.

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. Für UVC wurden derartige Schädigungen von Materialien bei hohen Bestrahlungsdosen nachgewiesen. [38] Es ist beim Einsatz eines UVC-Bestrahlungssystems also darauf zu achten, dass spezielle UVC-stabile Materialien bspw. im Fahrzeuginnenraum eingesetzt werden.

Strahlenschutz

UVC-Strahlung im betrachteten Wellenlängenbereich ist schädlich für menschliche Zellen, weshalb eine Bestrahlung ausschließlich in Abwesenheit von Personen erfolgen darf. Neben Hautrötung (Erythem), Sonnenbrand, Konjunktivitis (Bindehautentzündung des Auges) wäre Hautkrebsbildung im Extremfall die Folge. Es sind daher zwingend Maßnahmen erforderlich, die sicherstellen, dass sich die Desinfektionsanlage nicht einschalten lässt, wenn sich noch Personen im Strahlungsfeld befinden. Dies kann über entsprechende Sensorik im Fahrzeuginnenraum auf einfache Weise sichergestellt werden. Die Fenster des Fahrzeugs brauchen bei Verwendung von UVC-Strahlungsquellen nicht verdunkelt zu werden, da UVC-Strahlung normales Glas und auch Polymerglasser wie Acrylglas nicht durchdringt.

Desinfektion mit Far-UVC

Seit einiger Zeit werden im Bereich der Desinfektion von Luft und Oberflächen auch Far-UV-Strahlungsquellen im Wellenlängenbereich zwischen 200 nm und 230 nm angeboten. Der Begriff „Far-UV“ ist international im Gegensatz zu UVC nicht definiert. Er wird aber inzwischen umgangssprachlich verwendet, um den unteren Teil des UVC-Bereiches zwischen 200 nm und 235 nm zu kennzeichnen. In diesem Wellenlängenbereich stehen aktuell keine LEDs kommerziell zur Verfügung. Es gibt zwar erste LED-Labormuster mit einer Emissionswellenlänge von 226 nm [23], diese haben optische Leistungen im einstelligen Milliwatt-Bereich und sind daher noch nicht für die praktische Desinfektion geeignet.

Die Strahlungsquellen der Wahl im Far-UV-Bereich sind derzeit sogenannte Excimerlampen, bei denen ein Gasgemisch aus einem Halogen und einem Edelgas, bspw. Krypton und Chlor, mittels einer Hochspannung zum Leuchten angeregt wird. Im Strahlungsquellenvergleich wurde ein **USHIO Care222 Modul mit 222 nm und 100 mW** optischer Leistung betrachtet da dieses in den gängigen verkauften Lampen häufig zum Einsatz kommt. [34]. Die WPE des KrCl-Excimer-Prozesses liegt bei lediglich 1 %. Ganze 99 % der zugeführten Energie gehen somit als Wärme verloren. Oft geben Hersteller daher nur die elektrische Leistung an, die um den Faktor 100 über der optischen Strahlungsleistung einer derartigen Strahlungsquelle liegt. Das Emissionsspektrum einer KrCl-Excimerlampe hat eine Hauptemission bei 222 nm, emittiert jedoch in deutlich geringerem Maße noch bis in den UVB-Bereich und könnte Hautschädigungen bis hin zu Hautkrebs hervorrufen. Daher wird dieser Wellenlängenbereich durch spezielle Filter herausgefiltert. Man spricht dann von „Filtered Far-UV“. Ein Vorteil dieser gefilterten Wellenlänge ist die geringe Eindringtiefe in die Haut. Nahezu die komplette Strahlung wird in der Hornschicht der Haut absorbiert und dringt nicht in lebendes Gewebe vor. In diversen Studien konnten keine oder nur vernachlässigbar kleine Schädigungen der Haut nachgewiesen werden. Die optische Leistung gängiger für die Raumbestrahlung angebotener KrCl-Excimerlampen liegt bei etwa 100 mW (~10W elektrisch) und ist daher mit der Leistung einer einzelnen UVC-LED bei 265 nm vergleichbar [1]. Bei einem Preis um die 1.500 € ist ein Watt Far-UV-Strahlung aus einer KrCl-Excimerlampe somit für rund 15.000 € erhältlich. Nicht nur die WPE einer Excimer-Lampe ist sehr gering, sondern auch ihre Strahlungsleistung pro Flächeneinheit. Ein typisches 59 mm x 44 mm großes Modul emittiert bei 100 mW mit einer Flächenleistung von lediglich 0,0038 W/cm² [34]. In einer Entfernung von einem Meter erreichen gängige Systeme aufgrund der entfernungsabhängigen Intensitätsabnahme daher lediglich Strahlungsintensitäten von wenigen µW/cm². Es sind deshalb deutlich

längere Bestrahlungszeiten nötig. Auch wenn die Studienlage darauf hinweist, dass Schädigungen der Haut und Augen kaum nachweisbar sind, gilt bisher ein Schwellengrenzwert (TLV) von 23 mJ/cm² für die Gesamtexposition während eines achtstündigen Arbeitstages. Getrieben durch die Hersteller von Far-UV-Strahlungsquellen wurde seitens der amerikanischen ACGIH vorgeschlagen, diesen Grenzwert für 222 nm auf 161 mJ/cm² für die Augen und 479 mJ/cm² für die Bestrahlung der Haut zu erhöhen [33]. Diese Änderungsvorschläge der ACGIH sind jedoch aufgrund internationaler Kritik noch nicht in die ISO 15858 (UV-C Devices – Safety information – Permissible human exposure) eingeflossen (Stand 06/2024).

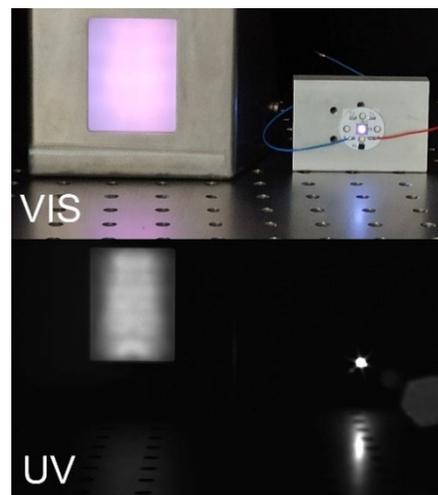
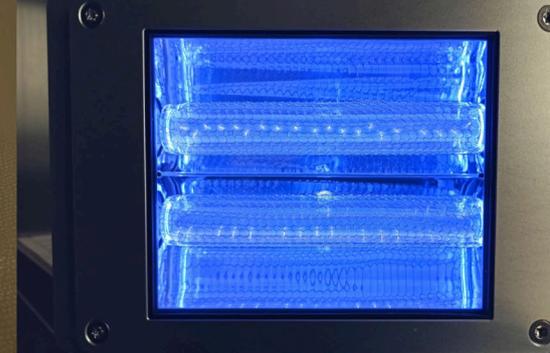
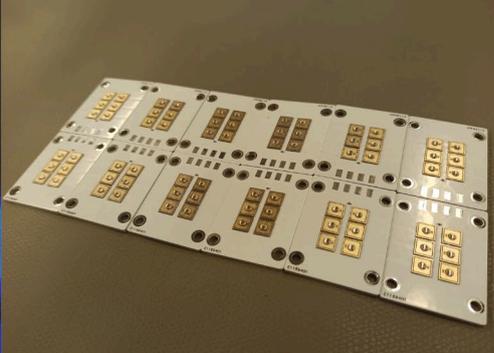


Abbildung 7 Vergleich Flächenstrahlungsleistung: Excimer vs. 265nm-LED (visuell oben, UV-Kamera unten)



Abbildung 8: Far-UVC Desinfektionsgerät zur Raumbdesinfektion (Aliexpress)



Wellenlängeneffizienz und Dosis

Im Far-UV-Bereich sind die mikrobioziden Effizienzen ähnlich hoch wie im UVC-Bereich um 265 nm. Für E.coli ist in [2] ein Wert von $10,3 \text{ mJ/cm}^2$ für eine 4-log Inaktivierung angegeben. Zwar gibt es einige Erreger, die im Far-UV deutlich empfindlicher sind, aber auch Erreger, die etwas weniger empfindlich als bei 265 nm auf die Strahlung reagieren. Empfindlicher sind insbesondere Viren, da hier die Schädigung der Proteinhülle im Far-UV Bereich stärker ausgeprägt ist als bei Bakterien oder gar Schimmelpilzen. Es können dennoch für die benötigte Dosis in etwa die gleichen Werte angenommen werden wie bei der Bestrahlung mit UVC-LEDs. Möchte man mit KrCl-Excimerstrahlern in einem Krankenwagen innerhalb von 10 Minuten 99,99 % des Beispielerregers Escherichia Coli inaktivieren, so kann man wieder etwa 20 W optische Gesamtstrahlungsleistung ansetzen. Aufgrund der WPE von 1 % sind hierfür dann 2.000 W elektrische Energie nötig. Dies ist deutlich mehr als bei den UVC-LEDs, aber immer noch sehr weit von dem entfernt, was bei blauen LEDs nötig wäre. 2.000 W elektrische Energie lassen sich in einem Krankenwagen-Bordnetz durchaus erzeugen.

Bei typischen Leistungen von 100 mW pro Lampe würde man für diese 20 W optische Strahlungsleistung jedoch 200 Lampen benötigen. Bei vorgenannten Kosten von 1.500 € für einer dieser Lampen stünden hier pro Fahrzeug Anlagenkosten von 300.000 € im Raum. Dies ist wirtschaftlich nicht sinnvoll darstellbar.

Die Hersteller von Far-UV Systemen postulieren in ihren eigenen Veröffentlichungen Desinfektionszeiten von mehreren Stunden bis Tagen und erreichen hier lediglich eine Keimreduktion ($\sim 1 \text{ log} = 90\%$) jedoch nicht ansatzweise die für eine Desinfektion nötigen 4 log-Stufen. Bei derart langen Bestrahlungszeiten spielt auch ähnlich wie bei blauen LEDs, die Photoreaktivierung eine Rolle. [19] [18] [16] [32]. Lediglich bei

der Inaktivierung von Viren lassen sich geringere Bestrahlungszeiten erreichen, aber auch hier dürfte nur eine Keimreduktion, nicht aber die geforderte Desinfektion in adäquater Zeit erreichbar sein.

Ein weiteres Problem stellen Verschattungen dar. Die beiden vorgenannten Verfahren können durch die Anordnung vieler LEDs im Raum eine homogene Bestrahlung mit geringen Verschattungen erzeugen. Bei Far-UV kommen meist nur sehr wenige Strahlungsquellen, in Krankenwagen oft nur eine einzige zum Einsatz. Alle Oberflächen, die nicht direkt von der Strahlungsquelle aus sichtbar sind, liegen in abgeschatteten Bereichen, in denen keine Reduktion der Keimbelastung erfolgt. Auch sinkt im Far-UV die Reflektivität von Materialien deutlich, was eine Ausleuchtung dieser Bereiche mittels Reflektoren schwierig gestaltet.

Da ebenso die Transmission von Materialien mit sinkender Wellenlänge abnimmt sind auch beim Einsatz von Far-UV die Scheiben des Fahrzeuges genau wie bei UVC-LEDs absolut intransparent und somit unproblematisch.

Ozon?

Ozon ist ein starkes und giftiges Oxidationsmittel, das bei Menschen und Tieren zu Reizungen der Atemwege und der Augen sowie Begünstigung von Atemwegserkrankungen führen kann. Es entsteht bei UV-Bestrahlung mit Wellenlängen unterhalb 242 nm. Der Energiewert der Photonen hat dann einen Wert erreicht, um die Sauerstoffmoleküle (O_2) in Sauerstoffatome (O) aufzuspalten. Reagieren die Sauerstoffatome mit einem Sauerstoffmolekül, so entsteht Ozon (O_3). Ozon entsteht also auch immer bei Far-UV Quellen. Dabei ist die Menge des entstehenden Ozons größer je geringer Wellenlänge und höher die Leistung der Strahlungsquelle ist. Im Nahbereich, insbesondere im Lampengehäuse selbst entsteht das meiste Ozon. Dieses ließe sich über einen Filter inaktivieren. Ozon entsteht aber auch durch die mit der Entfernung zur Strahlungsquelle

abnehmende Leistung auch in gewissen Mengen im Raum selbst.

Aufgrund der geringen optischen Leistungen angebotener Far-UV-Quellen ist neben der geringen Desinfektionswirkung auch diese Ozonbildung im Raum verhältnismäßig gering und damit tolerierbar. Dennoch ist sie schon bei einer einzigen Lampe nachweisbar. Kommen mehrere Lampen bzw. Lampensysteme mit höherer Leistung zum Einsatz, so wird in kleinen Räumen recht schnell der zulässige Grenzwert überschritten. Das bedeutet im Umkehrschluss, dass jeder Versuch, die Desinfektionszeit durch höhere Bestrahlungsleistungen zu verkürzen mit einer stärkeren Ozonbildung und potenziell schnelleren Grenzwertüberschreitung und Gesundheitsgefahr einhergeht.

Das im Raum entstehende Ozon könnte durch eine Belüftung des Raumes aus der Raumluft entfernt werden. Hierbei würden auch potenziell mit Viren kontaminierte Aerosole entfernt, was schlussendlich sogar deutlich effizienter und vor allem wesentlich kostengünstiger zu einer Senkung der Virenlast führt als die Far-UV-Bestrahlung selbst.

Wenngleich Studien darauf hinweisen, dass Far-UVC für die Haut unschädlich zu sein scheint, hält die Strahlenschutzkommission in Deutschland in Anbetracht der Neuartigkeit der Nutzung und der noch nicht zweifelsfrei geklärten potenziell schädigenden photobiologischen Wirkungen von Far-UV-Strahlung die derzeitige Datenlage für noch nicht ausreichend, um Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung durch den Einsatz von Fern-UVC-Strahlung völlig auszuschließen [31].

Der kontrollierte Einsatz von Far-UV-Strahlung im medizinischen Bereich, z. B. zur prophylaktischen Hautdesinfektion, ist aus Strahlenschutzgesichtspunkten vertretbar, da es sich hier um eine kontrollierte, vorübergehende Exposition des Menschen handelt, die nach vorhergehender Indikationsstellung und Abwägung von Nutzen und Risiken nach den Vorgaben des Medizinproduktegesetzes erfolgt.

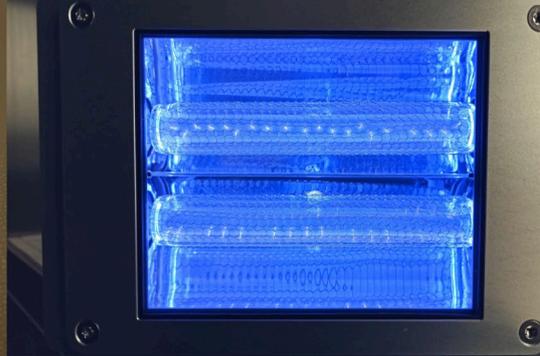
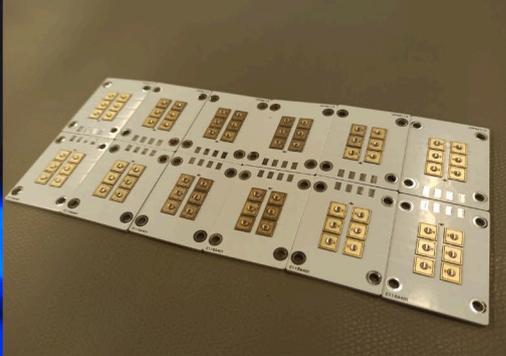


Diagramme und Tabellen

Die Daten in den Tabellen beziehen sich auf folgende beispielhafte Strahlungsquellen aus dem entsprechenden Wellenlängenbereichen

- Cree XP-E2 **450nm** 550mW [5]
- Nichia NCSU275 **405nm** 370mW [27]
- Bolb S6060-DR250-W265-P100, **265nm**, 100mW [1]
- Care222® Filtered Far UV-C Excimer Lamp Module **222nm** [34]

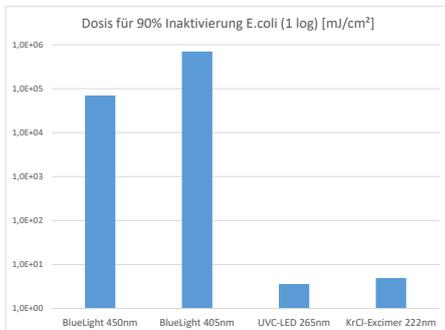


Abbildung 9: nötige Bestrahlungsdosis für 1-log Inaktivierung von Escherichia coli (90%)

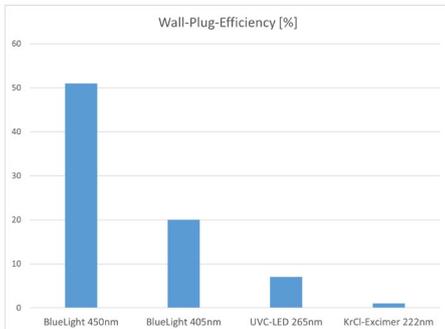


Abbildung 10: Typische Wall-Plug-Efficiency (Stand 2024)

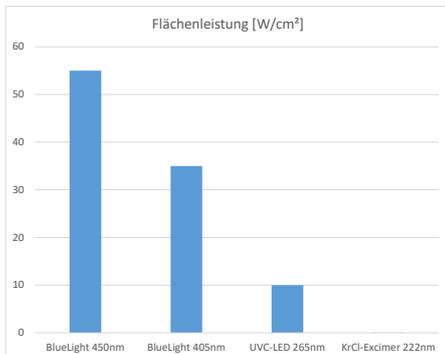


Abbildung 11: Flächenstrahlungsleistungen (Stand 2024)

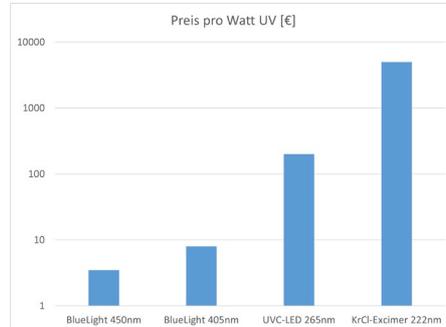


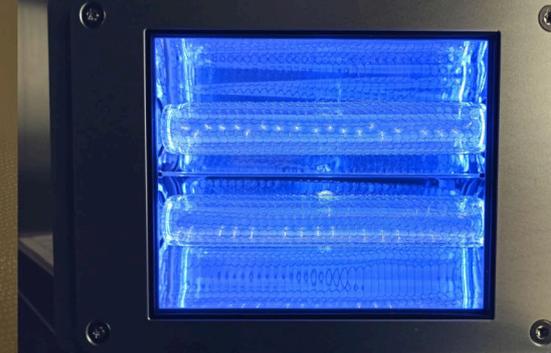
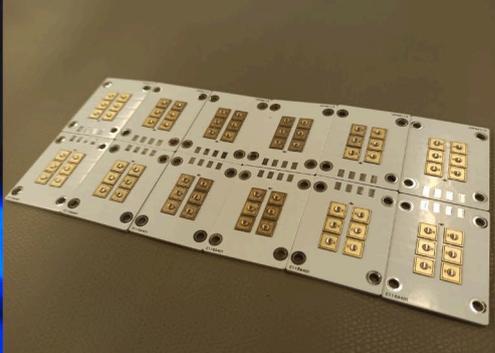
Abbildung 12: Preis pro Watt erzeugter optischer UV-Strahlungsleistung (Stand 2024)

Bakterium	Dauer der Persistenz (Spanne)
Acinetobacter spp.	3 Tage bis 5 Monate
Bordetella pertussis	3 bis 5 Tage
Campylobacter jejuni	bis 6 Tage
Clostridium difficile (spores)	5 Monate
Chlamydia pneumoniae, C. trachomatis	<= 30 Stunden
Chlamydia psittaci	15 Tage
Corynebacterium diphtheriae	7 Tage bis 6 Monate
Corynebacterium pseudotuberculosis	1 bis 8 Tage
Escherichia coli	1.5 Stunden bis 16 Monate
Enterococcus spp. incl. VRE und VSE	5 Tage bis 4 Monate
Haemophilus influenzae	12 Tage
Helicobacter pylori	<= 90 minutes
Klebsiella spp.	2 Stunden bis 30 Monate
Listeria spp.	1 Tag bis Monate
Mycobacterium bovis	> 2 Monate
Mycobacterium tuberculosis	1 Tag bis 4 Monate
Neisseria gonorrhoeae	1 bis 3 Tage
Proteus vulgaris	1 bis 2 Tage
Pseudomonas aeruginosa	6 Stunden bis 16 Monate
Salmonella typhi	6 Stunden bis 4 Wochen
Salmonella typhimurium	10 Tage bis 4.2 Jahre
Salmonella spp.	1 Tag
Serratia marcescens	3 Tage bis 2 Monate
Shigella spp.	2 Tage bis 5 Monate
Staphylococcus aureus, incl. MRSA	7 Tage bis 7 Monate
Streptococcus pneumoniae	1 bis 20 Tage
Streptococcus pyogenes	3 Tage bis 6.5 Monate
Vibrio cholerae	1 bis 7 Tage

Tabelle 1: Persistenzzeiten klinisch relevanter Bakterien auf Oberflächen [21]

Virus	Dauer der Persistenz (Spanne)
Adenovirus	7 Tage bis 3 Monate
Astrovirus	7 bis 90 Tage
Coronavirus	3 Stunden
SARS associated virus	72 bis 96 Stunden
Coxsackie virus	> 2 Wochen
Cytomegalovirus	8 Stunden
Echovirus	7 Tage
HAV	2 Stunden bis 60 Tage
HBV	> 1 Woche
HIV	> 7 Tage
Herpes simplex virus, type 1 und 2	4.5 Stunden bis 8 Wochen
Influenza virus	1 bis 2 Tage
Norovirus and feline calici virus (FCV)	8 Stunden bis 7 Tage
Papillomavirus	16 Stunden bis 7 Tage
Papovavirus	8 Tage
Parvovirus	> 1 Jahr
Poliovirus type 1	4 Stunden bis 8 Tage
Poliovirus type 2	1 Tag bis 8 Wochen
Pseudorabies virus	mehr als 7 Tage
Respiratory syncytial virus	bis 6 Stunden
Rhinovirus	2 Stunden bis 7 Tage
Rotavirus	6 bis 60 Tage
Vacciniavirus	3 Wochen bis 20 Wochen

Tabelle 2: Persistenzzeiten klinisch relevanter Viren auf Oberflächen [21]



Schlussfolgerungen

Für alle genannten Wellenlängenbereiche lassen sich im Labor mikrobiocide Wirkungen zweifelsfrei nachweisen. Entscheidend für den praktischen Einsatz ist jedoch die Effektivität und Wirtschaftlichkeit der Verfahren, um innerhalb kurzer Zeit eine Desinfektion von mind. 4 log-Stufen bzw. 99,99 % zu erreichen. Lange Desinfektionszeiten von mehreren Stunden sind keine Garantie, dass eine Infektionskette wirksam unterbrochen werden kann. Insbesondere bei hoher Frequentierung von Räumlichkeiten wie Wartezimmer, Krankenwagen etc. wird mit langen Desinfektionszeiten keine bzw. nur eine minimale Senkung der Erregerlast erreicht.

Optische Desinfektionsverfahren werden sich nur durchsetzen, wenn sie in Bezug auf Desinfektionsdauer, Inaktivierungsrate sowie der Anwendungsfreundlichkeit und Validierbarkeit Vorteile gegenüber der klassischen Wischdesinfektion aufweisen.

Auch wenn mit **Blaulicht** im Labor eine Desinfektionswirkung mit sehr hohen Bestrahlungsdosen nachgewiesen werden konnte, scheitert dieser Wellenlängenbereich aufgrund der geringen mikrobiociden Effizienz an der nötigen Strahlungsleistung und dem damit verbundenen enormen Energiebedarf. Die Hersteller verwenden Einheiten in ihren Datenblättern, die die numerischen Dosiswerte klein und damit hochwirksam erscheinen lassen. Die Strahlungsquellen sind jedoch die preiswertesten im Vergleich aller drei betrachteten Verfahren. Ein Blaulichtsystem ist allerdings bezogen auf den Energiebedarf und die hohe Anzahl an LEDs für eine wirksame Desinfektion sehr teuer. Im gleichen Wellenlängenbereich liegt zudem die Aktivierung der Photolyase und damit der Prozess der Photoreaktivierung, wodurch man vielen Mikroorganismen während der Bestrahlung das Werkzeug zur Reparatur seiner DNA-Schäden mitgibt. Das führt zur weiteren Reduzierung der Effizienz und stellt die Sinnhaftigkeit in Frage.

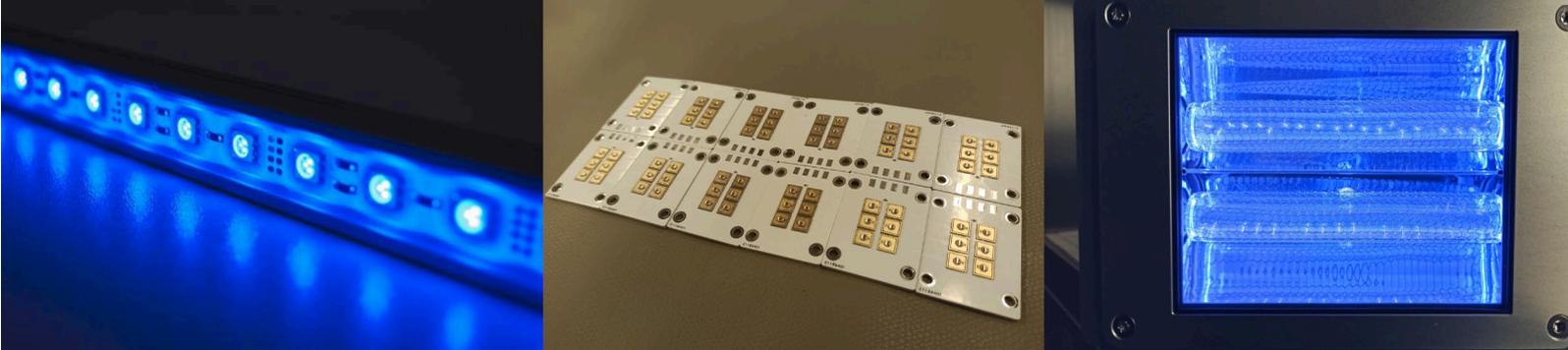
Far-UV Bestrahlung ist bezüglich der mikrobiociden Wirkung in ihrem Wellenlängenbereich der Baulichtbestrahlung deutlich überlegen und liegt im Mittel etwa bei der von UVC bei 265 nm. Allerdings sind die optischen Leistungen der verfügbaren Excimer-Strahlungsquellen derart gering, dass mit ihnen selbst in dem kleinen Raum eines Krankenwagens innerhalb der kurzen zur Unterbrechung der Infektionskette nötigen Zeit nur eine unzureichende Inaktivierung von Mikroorganismen erreichbar ist. Eine Inaktivierung von sehr UV-empfindlichen Viren wie dem SARS-Cov2-Virus ist mit mehreren Strahlungsquellen durchaus möglich. Die lange Desinfektionszeit bei Einzelquellen, der sehr hohe Preis, das bezogene auf die Ausgangsleistung sehr große Volumen und der durch die geringe WPE verursachte hohe Energiebedarf lässt einen wirtschaftlichen Einsatz dieses Wellenlängenbereiches mit Excimerstrahlern fraglich erscheinen. Bestrahlungszeiten von mehreren Stunden sind aus Sicht einer Fahrzeug-einsatzbereitschaft nicht akzeptabel und umsetzbar. Die Bestrahlung von größeren Räumen mit aktuellen Far-UV Quellen dürfte zwar eine gewisse nachweisbare Reduktion der Keimbelastung zeigen, ob diese jedoch zur Unterbrechung der Infektionskette führt, ist wissenschaftlich nicht belegt. Aufgrund der langen Bestrahlungszeiten ist auch hier der Effekt der Photoreaktivierung bei Anwesenheit von Tageslicht nicht vernachlässigbar. Die Ozonentstehung ist bei Far-UV-Quellen immer vorhanden.

Gleichwohl hat dieser Wellenlängenbereich ein großes Potential, da nach aktueller Studienlage eine Bestrahlung in Anwesenheit von Personen möglich scheint. Hier sind die Bedenken der Strahlenschutzkommission zu diesen Studien zu beachten. Wegen der geringen Strahlungsleistungen sind medizinische Anwendungen im Nahbereich der Strahlungsquelle wie Wundbestrahlungen oder präoperative Hautdesinfektionen durchaus denkbar und auch aus Strahlenschutzsicht tolerierbar. Für eine effiziente und wirtschaftliche Bestrahlung von ganzen Räumen oder weiter entfernten

Oberflächen sind im Far-UV-Bereich in Zukunft sehr deutlich leistungsfähigere und preiswertere Strahlungsquellen nötig.

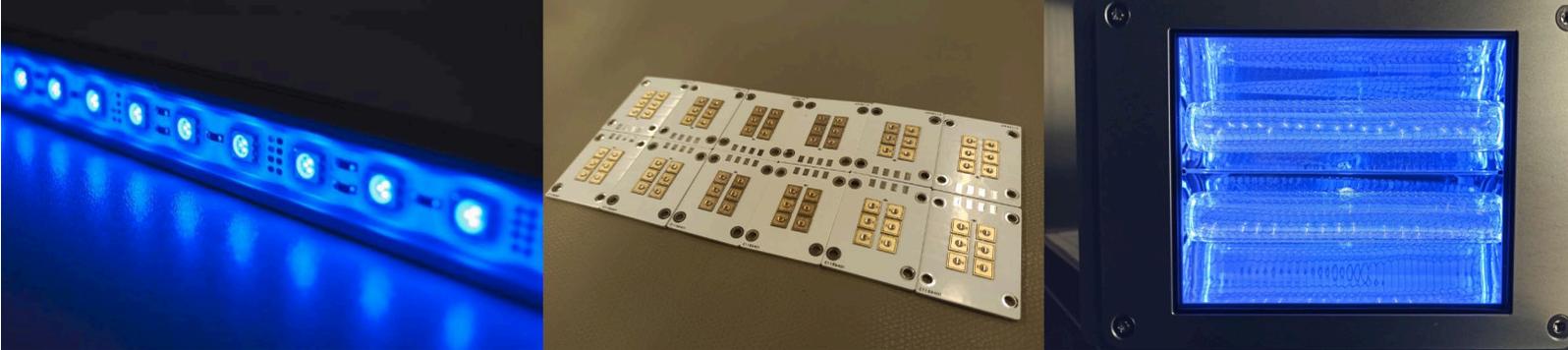
Die Desinfektion von Oberflächen im aufgezeigten Szenario mittels **UVC-LEDs** scheint aktuell die effizienteste Art der strahlungs-basierten Oberflächen-desinfektion, wenngleich sie aufgrund der photobiologischen Risiken nur in Abwesenheit von Personen oder bei deren Anwesenheit nur mit entsprechenden Schutzmaßnahmen erfolgen darf. Sowohl hinsichtlich der mikrobiociden Effizienz der Wellenlänge als auch hinsichtlich des Energieaufwandes sowie der erreichbaren Strahlungsleistungen ist UVC-LED-Bestrahlung aktuell und vermutlich zukünftig die effizienteste und im Vergleich kostengünstigste Variante aller drei betrachteten Verfahren. Die Preise für UVC-LEDs sind derzeit aufgrund geringer Stückzahlen im Markt noch vergleichsweise hoch, sanken aber in der Vergangenheit bereits deutlich und werden perspektivisch mit weiterer Marktdurchdringung UVC-LED-basierter Anwendungen noch weiter sinken. Das Entwicklungspotential der UVC-LED-Technologie ist bei Weitem noch nicht ausgereizt und erste Hersteller haben in ihren Roadmaps bereits Steigerungen der WPE auf bis zu 20 % und eine Halbierung des Preises bis Ende 2026 angedeutet.

Die aktuell preiswertesten UVC-Quellen, Quecksilberniederdrucklampen, wären zwar theoretisch auch in diesem Wellenlängenbereich einsetzbar, sind jedoch nur sehr eingeschränkt für getakteten Betrieb geeignet. Zudem dürften sie in den kommenden Jahren aufgrund der Minamata-Konvention der UN [14] sowie den daraus resultierenden Verbotverfahren von quecksilberhaltigen Strahlungsquellen in vielen Ländern [7] vom Markt verschwinden. Aktuell besteht in der EU noch eine Ausnahmeregelung für den Einsatz dieser Lampen bis 2027. Es ist fraglich, inwiefern sich Entwicklungsaktivitäten für Geräte auf dieser Lampenbasis für zukünftige Systeme noch lohnen.

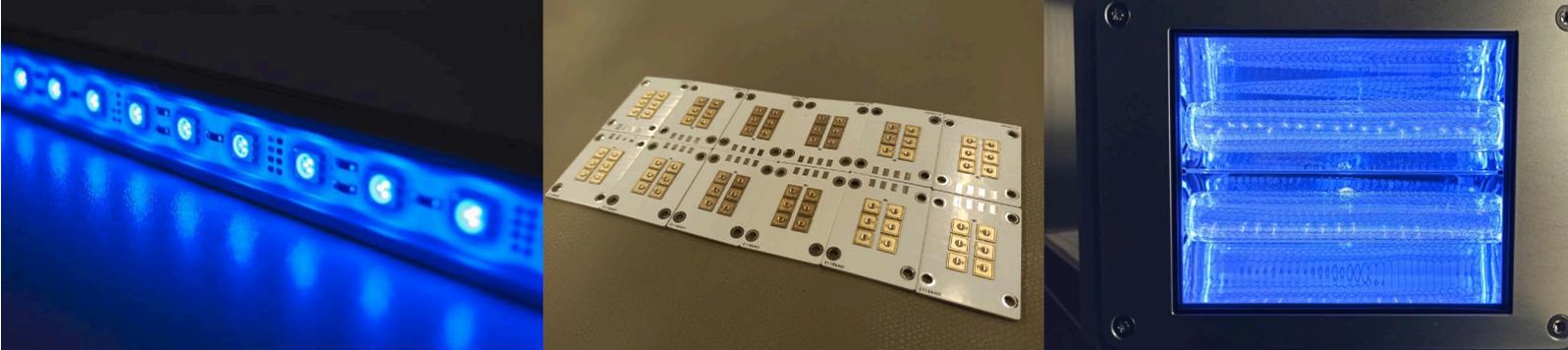


References

- [1] *Bolb S6060 UV-C SMD-LED, 100mW*. Retrieved May 31, 2024 from <https://www.leds.de/products/bolb-s6060-uv-c-smd-led-275nm-100mw-bolb-s6060-uv-c-smd-led-275nm-100mw-4062986002603-smd-leds-38259?variant=47528427454793>.
- [2] Marcus Clauß, Rolf Mannesmann, and Andreas Kolch. 2005. Photoreactivation of *Escherichia coli* and *Yersinia enterocolitica* after Irradiation with a 222 nm Excimer Lamp Compared to a 254 nm Low-pressure Mercury Lamp. *Acta hydrochim. hydrobiol.* 33, 6, 579–584. DOI: <https://doi.org/10.1002/ahch.200400600>.
- [3] *Continuous disinfection: Spectral Blue keeps facilities hygienic the w*. Retrieved May 23, 2024 from <https://spectral.blue/pages/continuous-disinfection-blue-light-keeps-facilities-hygienic-the-whole-day>.
- [4] Audrey Cougnard-Gregoire, Bénédicte M. J. Merle, Tariq Aslam, Johanna M. Seddon, Isabelle Aknin, Caroline C. W. Klaver, Gerhard Garhöfer, Alfredo G. Layana, Angelo M. Minnella, Rufino Silva, and Cécile Delcourt. 2023. Blue Light Exposure: Ocular Hazards and Prevention-A Narrative Review. *Ophthalmology and therapy* 12, 2, 755–788. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40123-023-00675-3>.
- [5] *Cree XP-E2 SMD-LED, 550mW, 450nm, royalblauOhne Platine*. Retrieved May 23, 2024 from <https://www.leds.de/products/cree-xp-e2-smd-led-550mw-450nm-royalblau?variant=42925296976057>.
- [6] Christiane Cuny, Franziska Layer, Sonja Hansen, Guido Werner, and Wolfgang Witte. 2019. Nasal Colonization of Humans with Occupational Exposure to Raw Meat and to Raw Meat Products with Methicillin-Susceptible and Methicillin-Resistant *Staphylococcus aureus*. *Toxins* 11, 4. DOI: <https://doi.org/10.3390/toxins11040190>.
- [7] *Delegated directive - 2022/280 - EN - EUR-Lex*. Retrieved May 23, 2024 from <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/en/TXT/?uri=CELEX:32022L0280>.
- [8] Ewan Eadie, Waseem Hiwar, Louise Fletcher, Emma Tidswell, Paul O'Mahoney, Manuela Buonanno, David Welch, Catherine S. Adamson, David J. Brenner, Catherine Noakes, and Kenneth Wood. 2022. Far-UVC (222 nm) efficiently inactivates an airborne pathogen in a room-sized chamber. *Scientific reports* 12, 1, 4373. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-022-08462-z>.
- [9] *Get the Facts About Candida auris (C. auris)*. Retrieved May 28, 2024 from https://www.health.ny.gov/diseases/communicable/c_auris/.
- [10] D. S. Goodsell. 2001. The molecular perspective: ultraviolet light and pyrimidine dimers. *The oncologist* 6, 3, 298–299. DOI: <https://doi.org/10.1634/theoncologist.6-3-298>.
- [11] M. Hessling, B. Spellerberg, and K. Hoenes. 2017. Photoinactivation of bacteria by endogenous photosensitizers and exposure to visible light of different wavelengths - a review on existing data. *FEMS microbiology letters* 364, 2. DOI: <https://doi.org/10.1093/femsle/fnw270>.
- [12] Martin Hessling, Bernhard Lau, and Petra Vatter. 2022. Review of Virus Inactivation by Visible Light. *Photonics* 9, 2, 113. DOI: <https://doi.org/10.3390/photonics9020113>.
- [13] Katharina Hoenes, Richard Bauer, Tobias Meurle, Barbara Spellerberg, and Martin Hessling. 2020. Inactivation Effect of Violet and Blue Light on ESKAPE Pathogens and Closely Related Non-pathogenic Bacterial Species - A Promising Tool Against Antibiotic-Sensitive and Antibiotic-Resistant Microorganisms. *Frontiers in microbiology* 11, 612367. DOI: <https://doi.org/10.3389/fmicb.2020.612367>.



- [14] 2024. *Homepage | Minamata Convention on Mercury* (May 2024). Retrieved May 23, 2024 from <https://minamataconvention.org/en>.
- [15] 2012. Hygienemaßnahmen bei Infektionen oder Besiedlung mit multiresistenten gramnegativen Stäbchen. Empfehlung der Kommission für Kranken-haushygiene und Infektionsprävention (KRINKO) beim Robert Koch-Institut (RKI). *Bundesgesundheitsblatt, Gesundheitsforschung, Gesundheitsschutz* 55, 10, 1311–1354. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00103-012-1549-5>.
- [16] A. KELNER. 1952. Experiments on photoreactivation with bacteria and other micro-organisms. *Journal of cellular physiology. Supplement* 39, Suppl. 1, 115–117.
- [17] Sang-in Kim, Seung-Gi Jin, and Gerd P. Pfeifer. 2013. Formation of cyclobutane pyrimidine dimers at dipyrimidines containing 5-hydroxymethylcytosine. *Photochemical & photobiological sciences : Official journal of the European Photochemistry Association and the European Society for Photobiology* 12, 8, 1409–1415. DOI: <https://doi.org/10.1039/c3pp50037c>.
- [18] Seisuke Kimura, Yasue Tahira, Toyotaka Ishibashi, Yoko Mori, Toshio Mori, Junji Hashimoto, and Kengo Sakaguchi. 2004. DNA repair in higher plants; photoreactivation is the major DNA repair pathway in non-proliferating cells while excision repair (nucleotide excision repair and base excision repair) is active in proliferating cells. *Nucleic acids research* 32, 9, 2760–2767. DOI: <https://doi.org/10.1093/nar/gkh591>.
- [19] William S. Klug, Michael R. Cummings, Charlotte A. Spencer, Michael A. Palladino, and Darrell J. Killian. 2020. *Concepts of genetics*. Pearson, New York, NY.
- [20] R. Köck and C. Cuny. 2020. Multiresistente Erreger bei Tier und Mensch. *Medizinische Klinik, Intensivmedizin und Notfallmedizin* 115, 3, 189–197. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00063-018-0487-x>.
- [21] Axel Kramer, Ingeborg Schwebke, and Günter Kampf. 2006. How long do nosocomial pathogens persist on inanimate surfaces? A systematic review. *BMC infectious diseases* 6, 130. DOI: <https://doi.org/10.1186/1471-2334-6-130>.
- [22] Leon G. Leanse, Carolina Dos Anjos, Sana Mushtaq, and Tianhong Dai. 2022. Antimicrobial blue light: A 'Magic Bullet' for the 21st century and beyond? *Advanced drug delivery reviews* 180, 114057. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2021.114057>.
- [23] Dong Liu, Sang J. Cho, Jeongpil Park, Jiarui Gong, Jung-Hun Seo, Rafael Dalmau, Deyin Zhao, Kwangeun Kim, Munho Kim, Akhil R. K. Kalapala, John D. Albrecht, Weidong Zhou, Baxter Moody, and Zhenqiang Ma. 2018. 226 nm AlGaIn/AlN UV LEDs using p-type Si for hole injection and UV reflection. *Applied Physics Letters* 113, 1. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.5038044>.
- [24] A-P Magiorakos, A. Srinivasan, R. B. Carey, Y. Carmeli, M. E. Falagas, C. G. Giske, S. Harbarth, J. F. Hindler, G. Kahlmeter, B. Olsson-Liljequist, D. L. Paterson, L. B. Rice, J. Stelling, M. J. Struelens, A. Vatopoulos, J. T. Weber, and D. L. Monnet. 2012. Multidrug-resistant, extensively drug-resistant and pandrug-resistant bacteria: an international expert proposal for interim standard definitions for acquired resistance. *Clinical microbiology and infection : the official publication of the European Society of Clinical Microbiology and Infectious Diseases* 18, 3, 268–281. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1469-0691.2011.03570.x>.
- [25] *Microbes tested with blue light disinfection*. Retrieved May 23, 2024 from <https://spectral.blue/pages/scientific-microbial-test-results-with-blue-light>.
- [26] A. N. Neely. 2000. A survey of gram-negative bacteria survival on hospital fabrics and plastics. *The Journal of burn care & rehabilitation* 21, 6, 523–527. DOI: <https://doi.org/10.1097/00004630-200021060-00009>.



- [27] Nichia NCSU275 UV SMD-LED Mit 10x10mm Platine, 370mW, 405nm. Retrieved May 31, 2024 from <https://www.leds.de/products/nichia-ncsu275-uv-smd-led-370mw-405nm-nichia-ncsu275-uv-smd-led-370mw-405nm-smd-leds-14330?variant=42921504702649>.
- [28] Kumiko Oguma, Ryo Kita, Hiroshi Sakai, Michio Murakami, and Satoshi Takizawa. 2013. Application of UV light emitting diodes to batch and flow-through water disinfection systems. *Desalination* 328, 24–30. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2013.08.014>.
- [29] 2024. *Optische Strahlung* (May 2024). Retrieved May 3, 2024 from https://www.bfs.de/DE/themen/opt/opt_node.html.
- [30] Jonathan A. Otter, Saber Yezli, and Gary L. French. 2011. The role played by contaminated surfaces in the transmission of nosocomial pathogens. *Infection control and hospital epidemiology* 32, 7, 687–699. DOI: <https://doi.org/10.1086/660363>.
- [31] *Risiken des Einsatzes von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen*. Retrieved May 23, 2024 from https://www.ssk.de/SharedDocs/Beratungsergebnisse/DE/2023/2023-12-08_Empf_Fern-UVC-Strlg_Desinfek.html.
- [32] I. Salcedo, J. A. Andrade, J. M. Quiroga, and E. Nebot. 2007. Photoreactivation and dark repair in UV-treated microorganisms: effect of temperature. *Applied and environmental microbiology* 73, 5, 1594–1600. DOI: <https://doi.org/10.1128/AEM.02145-06>.
- [33] David H. Sliney and Bruce E. Stuck. 2021. A Need to Revise Human Exposure Limits for Ultraviolet UV-C Radiation†. *Photochemistry and photobiology* 97, 3, 485–492. DOI: <https://doi.org/10.1111/php.13402>.
- [34] USHIO. 2022. *USHIO Care222 Filteres Far UV-C Excimer Lamp Module* (2022). Retrieved from <https://www.ushio.com/files/specifications/care222-filtered-far-uv-c-excimer-lamp-module.pdf>.
- [35] Johannes Wagener and Oliver Kurzai. 2019. Candida auris: Steckbrief eines neuen Pilzes. *Deutsches Ärzteblatt Online*. DOI: <https://doi.org/10.3238/PersInfek.2019.07.22.01>.
- [36] C. Wendt, B. Dietze, E. Dietz, and H. Rüden. 1997. Survival of *Acinetobacter baumannii* on dry surfaces. *Journal of clinical microbiology* 35, 6, 1394–1397. DOI: <https://doi.org/10.1128/jcm.35.6.1394-1397.1997>.
- [37] Wikipedia. 2024. *Wall-plug efficiency - Wikipedia* (May 2024). Retrieved May 23, 2024 from <https://en.wikipedia.org/w/index.php?oldid=1164648561>.
- [38] George Wypych, Ed. 2015. *Handbook of UV degradation and stabilization*. (2nd ed.). ChemTec Publishing, Toronto.