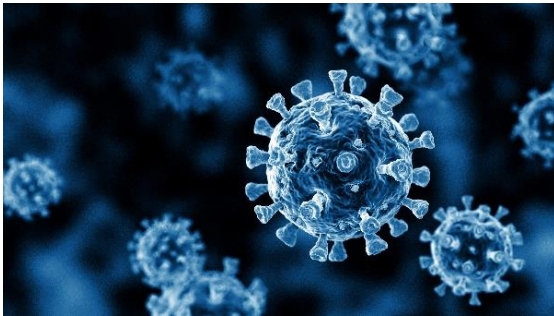


Herausforderungen und Chancen der Desinfektion mit UV-Licht

Dr. Simon Rankel



Die COVID-19 Pandemie richtete die Aufmerksamkeit auf die Desinfektions-Technologie: Sehr vielversprechend erscheint aktuell der Einsatz von UV-Strahlung. Lange schon wird die Möglichkeit genutzt, um krankheitserregende Mikroorganismen – beispielsweise bei der Desinfektion von Wasser – zu inaktivieren. Jetzt wird UV-Strahlung vermehrt eingesetzt, um eine Ansteckung mit Viren über die Luft oder verunreinigte Oberflächen zu verhindern. Allerdings sind ein umsichtiges

Vorgehen, ein grundsätzliches Verständnis der Technologie und das Wissen, was und vor allem wie gemessen werden sollte, entscheidend. Nur damit lassen sich verlässliche Ergebnisse erzielen.

Quellen der UV-Strahlung

Elektromagnetische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 200 und 280nm bezeichnet man als UV-C Teil der ultravioletten Strahlung. In der Natur ist die Sonne die Quelle der UV-Strahlung, wobei ein Großteil der UV-C Strahlung von der Ozonschicht rund um die Erde abgeblockt wird. Bislang erzeugte man UV-C Strahlung meistens mit Gasentladelampen, Quecksilberdampflampen dominierten den Markt. Die jüngsten Weiterentwicklungen im Bereich der LED-Technologie brachten nun UV-C-Lampen – insbesondere im Wellenlängenbereich zwischen 260 und 280 nm - ins Rennen. Obwohl die UV-C-LEDs noch verhältnismäßig teuer und weniger energieeffizient sind als herkömmliche UV-C-Quellen, können sie in clever designten Desinfektionsgeräten durchaus effizient genutzt werden. In der Anwendung überzeugen vor allem die Miniaturisierungsoptionen, ihre Robustheit, die einfachere Kontrolle des Wärmeflusses sowie das genauere Einstellen der Wellenlängen.

Krankheitserreger inaktivieren

Unter dem Begriff „Krankheitserreger“ werden unterschiedliche Mikroorganismen zusammengefasst: Bakterien, Viren, Pilze und parasitäre Protozoa. Seit mehr als 140 Jahren ist es schon bekannt, dass UV-Strahlung einen keimtötenden Effekt hat, sprich Mikroorganismen inaktivieren bzw. abtöten kann. Die UV-Strahlung zerstört deren Nukleinsäuren (DNA und RNA) auf photochemischem Weg. Die Mikroorganismen werden in der Regel nicht abgetötet, sondern vielmehr dadurch, dass sie sich nicht mehr vervielfältigen können, inaktiviert. Im Gegensatz zur Sterilisation, bei der jegliche Art mikrobiologischen Lebens zerstört wird, geht es bei der Desinfektion darum die Zahl der gefährlichen Keime bis zu einem gewissen Grad zu reduzieren bzw. zu inaktivieren. Sobald die Keime inaktiviert werden, können sie andere Organismen nicht mehr infizieren. Die Methode wird bezeichnet als Ultraviolet Germicidal Irradiation (UVGI) oder keimtötende UV-Bestrahlung. Doch welche Schlüsselparameter entscheiden darüber, ob die UV-Strahlung die Keime wirklich inaktiviert?

Der Prozess hängt ab von der Wellenlänge der Strahlung, der mikrobiologischen Empfindlichkeit der Keime und der Summe der Strahlungsenergie, der der Organismus ausgesetzt wurde. Abbildung 1 zeigt die Effizienzkurve der keimtötenden Wirkung von UV-Strahlung angewendet bei E. Coli Bakterien. Der Effizienz-Peak liegt klar bei 260 bis 265nm. Die Kurve verändert sich mit dem jeweiligen Mikroorganismus, häufig liegt die maximale Absorption der UV-Strahlung durch die DNA zwischen 250 und 280nm.

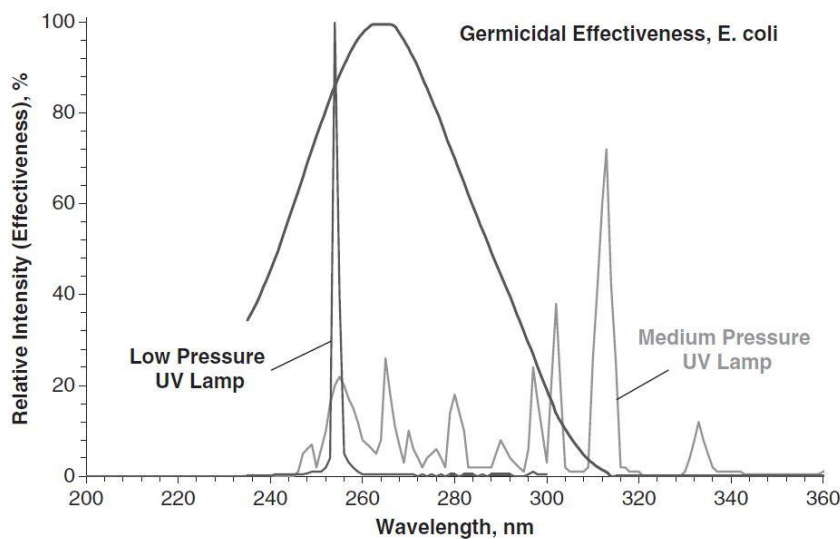


Abb 1: Die Kurve zeigt die Effektivität der UV-Strahlung in Hinblick auf die Minimierung der Keime. Quelle: *Ultraviolet Germicidal Irradiation Handbook*, W. Kowalski, 2009

Anwendungen der UV-C Desinfektion

UVGI bietet gegenüber der chemischen Desinfektion einen deutlichen Vorteil: UV-Strahlung hinterlässt keine gesundheitsschädlichen chemischen Rückstände oder Abfallprodukte. Damit eignet sich die Methode sowohl für die Desinfektion von Wasser, Luft als auch Oberflächen in vielen Anwendungen. Am weitesten entwickelt und weltweit akzeptiert ist UV-C zur Desinfektion von Wasser. Das Prinzip der Tröpfchenübertragung und die Nutzung von UVGI zur Desinfektion von Luft wurde erstmals in den 1930-er Jahre entdeckt (Quelle: *The History of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection*, N.G. Reed, *Public Health Rep.* 2010 Jan-Feb; 125 (1): 15-27). Heute wird das Verfahren auf unterschiedliche Art und Weise eingesetzt:

1. Die Luft im Raum wird bestrahlt (in Teilen oder insgesamt).
2. Die Luft wird bestrahlt, während sie durch ein Luftzirkulationssystem (wie ein Ventilator oder eine Klimaanlage) geleitet wird.

Für Keime, die über die Luft übertragen werden und sich dann auf Oberflächen absetzen, kommt die Desinfektion von Oberflächen ins Spiel. Idealerweise werden bei Methoden kombiniert genutzt, um die Keime umfassend zu bekämpfen.

Oberflächendesinfektion in der Praxis

Entscheidend für die Inaktivierung der Mikroorganismen ist die Energiemenge der UV-Strahlung, die sie trifft. Die Kernfrage dabei lautet: Welche Energiemenge trifft die Keime tatsächlich bzw. erreicht sie die Strahlung die Keime überhaupt? Um die UV-Strahlung zu quantifizieren, nutzt man unterschiedliche radiometrische Einheiten:

- Strahlungsleistung (radiant flux)
Sie berechnet aus der Strahlungsenergie, die in einer Zeiteinheit abgestrahlt wird (W).
- Bestrahlungsstärke (irradiance)
Sie gibt an, welche Leistung auf einer Oberfläche pro Flächeneinheit auftrifft (W/m^2).
- Bestrahlung (radiant exposure)
Die Strahlenexposition ist die Strahlungsenergie pro Flächeneinheit (J/m^2); sie wird auch als UV-Dosis bezeichnet und ist entscheidend für das Verständnis für UVGI Mechanismen.

Dosen zur UV-Inaktivierung von Keimen

Bei der antimikrobiellen Prüfung wird der Begriff Log-Reduktion verwendet, der sich auf das Ausmaß der Veränderung der Anzahl inaktivierter oder abgetöteter Mikroorganismen anhand einer logarithmischen Skala bezieht. 3-log-Reduktion bedeutet, dass die Anzahl der Mikroorganismen in einer Probe um den Faktor 1000 reduziert wurde und nach der Exposition mit einer bestimmten UV-Dosis nur noch 0,1 % der ursprünglichen Anzahl übrig blieben. Verschiedene Mikroben haben eine unterschiedliche Empfindlichkeit gegenüber UVGI und benötigen für den gleichen Anteil der Inaktivierung unterschiedliche Strahlungsdosen.

Microorganism	Applied dose (mWs/cm ²)	Inactivation (log)	Conditions	Reference
Bacteria				
Thermotolerant coliforms	30–45	3–5	Secondary and tertiary effluents	Lazarova et al. (1999)
Faecal streptococcus	30–45	3–5	ns	Lazarova et al. (1998)
Total coliforms	35	3		
Thermotolerant coliforms	35	3	Reference strain	Sommer et al. (1998)
Faecal Streptococcus	35	3		
<i>E. coli</i>	10	> 5		
<i>Bacillus subtilis</i>	60	3	Saline solution tests	Jiménez & Beltrán (2002); Maya Beltrán & Jiménez (2002)
Thermotolerant coliforms	15	3	Secondary effluents	
Faecal streptococcus	15	2		
Salmonella typhi	32	3		
<i>E. coli</i>	1.3–3.0	1	Reference strain Filtered water	Abbaszadegan et al. (1997)
<i>E. coli</i>	3–7	3	ns	US EPA (1999)
Viruses				
Bacteriophage MS2	17–200	2–5	Secondary and tertiary effluents	Lazarova et al. (1999)
Bacteriophage MS2	100	<5	ns	Lazarova et al. (1998)
Bacteriophage φx174	30	6		
Bacteriophage MS2	93	4	ns	US EPA (1999)
Bacteriophage MS2	30	2	Monochromatic light. Test in saline solution and phosphate buffer at room temperature	Shin, Linden & Sobsey (2000)
Hepatitis A	6–15	4	ns	US EPA (1999)
Protozoa				
<i>Acanthamoeba</i>	60	2	Secondary effluent	Maya Beltrán & Jiménez (2002)
<i>Giardia lamblia</i>	63	< 1	ns	US EPA (1999)
<i>Giardia muris</i>	82	1	ns	US EPA (1999)
	121	2		
<i>Giardia muris</i>	5–83	2–3	Medium pressure lamp. Potable filtered water at ambient conditions. Noninfectious	Craik et al. (2000)

Tabelle 1: Effekte der UV-Dosis auf den Grad der Keimreduzierung in Abhängigkeit von der Art des Mikroorganismus. Quelle: State of the Art Report Health Risks in Aquifer Recharge using Reclaimed Water, WHO Europe, 2003, Seite 53

Die Dosen und Inaktivierungsniveaus werden in der Regel im Labor bestimmt. Im realen Leben können diese Bedingungen abweichen, deshalb wendet man im Feld in der Regel höhere Dosen an. Gegenwärtig arbeiten viele Forscher an der Bestimmung der tödlichen UV-Dosis für das SARS-CoV-2-Virus, noch gibt es allerdings keine allgemein verfügbaren Laborergebnisse.

Ist die Dosis einer spezifischen logarithmischen Reduktion für einen Mikroorganismus bekannt, stellt sich die nächste Frage: Welches Reduzierungsniveau ist erforderlich, um die Ausbreitung des spezifischen Virus zu verhindern? Die EPA-Richtlinien zur Desinfektion besagen, dass erst eine Reduktion von mindestens 6 log in weniger als 10 Minuten erreicht werden muss, um als „Desinfektion“ in Bezug auf die genannten Pathogene zu gelten. Bleiben zu viele Krankheitserreger aktiv, besteht die Gefahr eines erneuten exponentiellen Wachstums.

Effizienz, Sicherheit und Messtechnik

Die zwei entscheidenden Aspekte im UV-C Desinfektionsprozess sind Effizienz und Sicherheit. Eine effiziente Desinfektion erfordert:

- Die Räume und Oberflächen,
- die Fähigkeiten und Beschränkungen der gewählten UV-Quelle und
- die zu bekämpfenden Krankheitserreger bis ins Detail zu kennen.

Kritisch bei der Bestrahlung der Oberflächen sind vor allem Schatten, da diese die Effizienz der UV-C Desinfektion deutlich reduzieren. Das gilt sowohl im makroskopischen (Keime hinter Objekten) als auch im mikroskopischen Bereich (winzige Keime, versteckt in Rissen im Material). In beiden Fällen lassen sich die Keime im Schatten nicht deaktivieren. Die folgende Skizze zeigt ein Desinfektions-Szenario in einem Krankenzimmer.

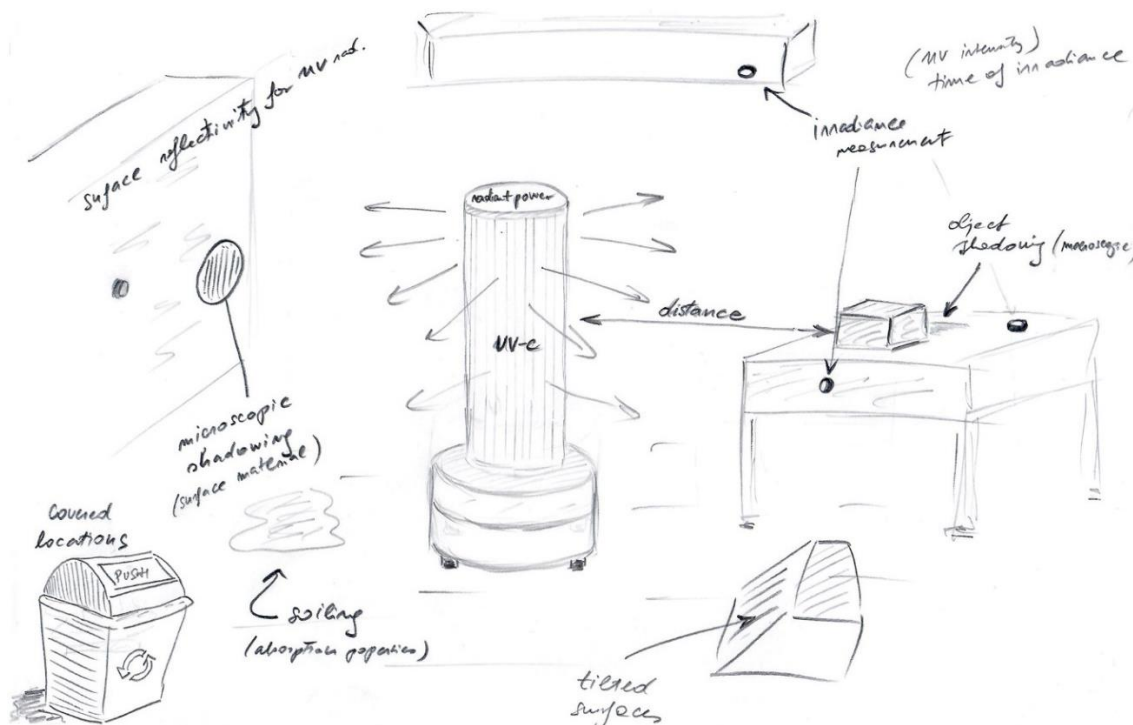


Abb. 2: Typische Situation beim Einsatz von UV-Strahlung in der Mitte eines Krankenzimmers.

Bei aller Effizienz muss natürlich die Sicherheit bei der Anwendung von UV-Strahlung gewährleistet werden, um niemand zu verletzen. Da eine direkte Bestrahlung mit UV-Licht Lebewesen schädigen kann, müssen diese vor Beginn der Behandlung den Raum verlassen. Darüber hinaus muss auch berücksichtigt werden, dass das Material im Raum bei einer häufigen UV-C Bestrahlung beschädigt werden könnte (insbesondere Polymere).

Um eine effiziente Desinfektion zu gewährleisten, müssen die Abstände zwischen UV-C Quelle und der zu bestrahlenden Oberfläche nicht zu groß sein. Zudem dürfen keine störenden Objekte Schatten bilden, in denen die Mikroorganismen nicht erreicht werden. Ebenso wichtig ist die Bestrahlungsdauer. Da die Strahlungsdichte antiproportional ist zum Quadrat der Entfernung von der UV-Quelle und die Strahlungsleistung der Quelle in der Regel konstant ist, entscheiden die Entfernung und die Bestrahlungsdauer darüber, ob die erforderliche Dosis erreicht wird. Diese Herausforderungen lassen sich durch mehrere UV-Quellen im Raum oder sich bewegende Robotersysteme bewältigen.

Kommt man zurück auf die Sicherheit der UVGI Anwendung, muss unterschieden werden zwischen dem biologischen Effekt und die Eindringtiefe der UV-Strahlung. Wellenlängen im UV-C Bereich sind biologisch die aktivsten Strahlen, dennoch sind sie weniger gefährlich für Menschen, da sie in der obersten Hautschicht (dead outer layer) absorbiert werden. UV-B und UV-A Strahlung dringt hingegen tiefer in die Haut ein. Ein Schutz gegen eine zu starke Bestrahlung mit einer Wellenlänge von 254 nm ist essential, da es ansonsten zu sonnenbrandähnlichen Effekten (Erythema) und schmerzhaften Augenverletzungen auch bekannt als „Schweißblende“ (Photokeratitis)¹ kommen kann.

Messtechnik für UV-Strahlung

Im Allgemeinen werden Bestrahlungsstärke und Strahlungsdosis im gewählten Spektralbereich mit einem UV-Radiometer – sie werden auch als Irradiance- und Dosage-Sensoren bezeichnet – gemessen. Zuverlässige Ergebnisse zu erhalten, hängt von der Wahl des geeigneten Sensors und dessen korrekter Anwendung ab. Eine Möglichkeit, um die Strahlungsleistung der UV-Quelle zu messen, bieten geeignete Ulbrichtkugeln, in Verbindung mit anderen Sensoren und einem Spektrometer. Ophir eine breite Palette an Messgeräten für unterschiedliche Anwendungen. Kontinuierlich werden neue Sensoren und Technologien - auch kundenspezifisch im OEM-Bereich - entwickelt.

Fazit

Krankheitserreger wie den SARS-CoV-2-Virus auf Oberflächen mittels UV-Strahlung zu inaktivieren kann eine effektive, sichere und umweltfreundliche Desinfektions-Methode sein. Entscheidend ist es aber eine umfassende Lösung zu erarbeiten, die alle Einschränkungen berücksichtigt. Grundlegende Regelungen bezüglich der Anwendung der UV-Strahlung sollten insbesondere in der Medizintechnik verbindlich getroffen werden. Die geeignete Messtechnik zu entwickeln und anzuwenden bildet dafür das Fundament.

Quelle 1: The History of Ultraviolet Germicidal Irradiation for Air Disinfection, N.G. Reed, Public Health Rep. 2010 Jan-Feb; 125 (1): 15-27