Strahlenschutzkommission

Geschäftsstelle der
Strahlenschutzkommission
Postfach 12 06 29
D-53048 Bonn

http://www.ssk.de

Risiken des Einsatzes von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen

Empfehlung der Strahlenschutzkommission

Verabschiedet in der 329. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 7./8. Dezember 2023

Vorwort

Ultraviolette (UV-) Strahlung wird seit vielen Jahrzehnten zur Desinfektion von Wasser, Raumluft oder Oberflächen eingesetzt, da sie in der Lage ist, Mikroorganismen und Viren zu inaktivieren oder abzutöten. Zu Desinfektionszwecken wird derzeit vor allem die Strahlung im UVC-Spektralbereich verwendet, insbesondere bei der Wellenlänge von 254 nm. Dabei muss eine Exposition von Menschen vermieden werden, weil diese Strahlung sowohl akute als auch langfristige Schädigungen der Augen und der Haut verursachen kann. Seit einiger Zeit und insbesondere seit Beginn der SARS-CoV-2-Pandemie wird der Einsatz von Fern-UVC-Strahlung (Spektralbereich von 200 nm bis 240 nm), meist bei Wellenlängen um 222 nm, zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen diskutiert. Aufgrund sehr geringer Eindringtiefe dieser kurzwelligen UVC-Strahlung in menschliches Gewebe wird häufig argumentiert, dass keine gesundheitlichen Folgen für Menschen zu erwarten sind. Vor diesem Hintergrund wurde die Strahlenschutzkommission beauftragt, eine Stellungnahme zu den Risiken der Anwendung von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen zu erarbeiten. Dabei sollten auch möglicherweise vulnerable Gruppen berücksichtigt werden, wie Kinder, ältere Menschen und Menschen mit Haut- und Augenerkrankungen. Zur Erstellung einer Stellungnahme mit einer wissenschaftlichen Begründung wurde die Arbeitsgruppe „Risiken des Einsatzes von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen“ des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen“ der Strahlenschutzkommission eingesetzt, der die folgenden Mitglieder angehören:

- Dr. Ljiljana Udovicic (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund), Vorsitzende der Arbeitsgruppe,
- Dr. Bernhard Brenner (Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, München),
- Dipl.-Phys. Martin Brose (Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse, Köln),
- Dr. Rüdiger Greinert (Elbe Klinikum Buxtehude),
- Prof. Dr. med. Caroline Herr (Bayerisches Landesamt für Gesundheit und Lebensmittelsicherheit, Landesinstitut für Arbeitsschutz und Produktsicherheit; umweltbezogener Gesundheitsschutz, Erlangen),
- Dr. Mathias Hoffmann † (Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz, Hannover-Hildesheim),
- Dr. Peter Sperfeld (Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Braunschweig),
- Dr. Beate Volkmer (Elbe Klinikum Buxtehude).

Des Weiteren wurde die Arbeitsgruppe durch Herrn Prof. Dr. Friedo Zölzer (Südböhmische Universität, České Budějovice, Mitglied der SSK) unterstützt.

Dr. Ljiljana Udovicic Vorsitzende der Arbeitsgruppe „Risiken des Einsatzes von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen“	*Dr. Beate Volkmer* Vorsitzende des Ausschusses „Nichtionisierende Strahlen“	*Prof. Dr. Ursula Nestle* Vorsitzende der Strahlenschutzkommission

INHALT

1 Einleitung 5

2 Empfehlung der SSK 6

3 Wissenschaftliche Begründung 9

3.1 UVC-Strahlung und ihre physikalischen Eigenschaften 9

3.1.1 Absorption von UVC-Strahlung 9

3.1.2 Strahlungsphysikalische Größen und Einheiten 12

3.1.3 Messung von UV-Strahlung 12

3.2 UVC-Geräte/Lampen bzw. Strahler und deren Anwendung 14

3.2.1 Strahlungsquellen 14

3.2.1.1 Quecksilber-Niederdruckstrahler 15

3.2.1.2 Quecksilber-Mitteldruckstrahler 15

3.2.1.3 Excimerstrahler 15

3.2.1.4 LEDs 16

3.2.2 Gerätetypen, Aufbau und Anwendung 17

3.2.2.1 Behandlung von Trinkwasser 17

3.2.2.2 Behandlung von Oberflächen 17

3.2.2.3 Behandlung von Raumluft 18

3.2.2.4 Anwendung im medizinischen Bereich 19

3.2.2.5 Weitere Anwendungen 19

3.3 Abtötung von Mikroorganismen und Inaktivierung von Viren durch UVC-Strahlung 19

3.4 Mögliche Wirkungen von Fern-UVC-Strahlung auf Auge und Haut 27

3.4.1 Eindringtiefe und Absorption von UV-Strahlung 27

3.4.2 Wirkungen von UVC-Strahlung 29

3.4.3 Untersuchungen zur Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf die Haut 30

3.4.4 Untersuchungen zur Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf das Auge 32

3.5 Schutz vor Gefährdungen durch UV-Strahlung aus künstlichen Quellen 44

3.5.1 Empfohlene Expositionsgrenzwerte der ICNIRP zum Schutz vor aktinischer UV-Gefährdung der Augen und der Haut 44

3.5.2 Gesetzliche Regelungen bezüglich inkohärenter UV-Strahlung aus künstlichen Quellen 47

3.5.3 Risikogruppen entsprechend der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 48

3.5.4 Neue Expositionsgrenzwerte der ACGIH 49

3.5.5 Anwendbarkeit der Expositionsgrenzwerte für vulnerable Gruppen (UV-schutzbedürftige Gruppen) 53

4 Offene Fragen und Forschungsbedarf 54

5 Weitergehende Fragen zum Einsatz von Fern-UVC-Strahlung 54

6 Literatur 57

7 Abkürzungsverzeichnis 71

1 Einleitung

UVC-Desinfektion ist eine über Jahrzehnte bewährte Methode zur Abtötung oder Inaktivierung krankheitserregender Mikroorganismen und Viren – in der Raumluft, im Wasser oder auf festen Oberflächen. Obwohl die diesbezüglichen UVC-Wirkungsspektren je nach Krankheitserreger variieren, ist allen ein ausgeprägtes Maximum um 260 nm gemeinsam: Die UVC-Strahlung dieser Wellenlänge verursacht am effektivsten Schäden an der Desoxyribonukleinsäure (DNA) bzw. Ribonukleinsäure (RNA) von Mikroorganismen und Viren, die zu ihrer Abtötung oder zur Inaktivierung führen. Zur Erzeugung von UVC-Strahlung werden vor allem Quecksilberdampflampen verwendet, die ein Emissionsmaximum bei 254 nm aufweisen, nahe der oben erwähnten Wellenlänge von 260 nm.

Die UVC-Desinfektionsmethode birgt allerdings auch Gefahren für Menschen. Die Risiken umfassen z. B. akute Schädigungen der Augen wie die Entzündung der Hornhaut (Photokeratitis) oder der Bindehaut (Photokonjunktivitis) sowie Hautkrebs als eine schwerwiegende Langzeitfolge. Bislang wurden stets alle Anstrengungen unternommen, um eine unbeabsichtigte Exposition von Menschen gegenüber UVC-Strahlung aus künstlichen Quellen zu vermeiden. Dort, wo bei der Arbeit die Exposition von Menschen nicht ausgeschlossen werden kann, sind die Expositionsgrenzwerte (EGW) einzuhalten, die auf Empfehlungen der *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) beruhen. Diese EGW waren über die letzten drei Jahrzehnte hinweg identisch mit den Expositionsgrenzwerten der *American Conference of Governmental Industrial Hygienist*s (ACGIH). Am Arbeitsplatz werden die Beschäftigten über Risiken informiert, die mit einer UVC-Exposition verbunden sind, und eine übermäßige Exposition wird durch eine Reihe von Schutzmaßnahmen – technischen, organisatorischen und persönlichen – verhindert. Für Beschäftigte, die zu den möglicherweise vulnerablen Gruppen gehören, weil sie besonders empfindlich gegenüber UV-Strahlung sind, reicht jedoch die Einhaltung der EGW nicht in jedem Fall aus. Deshalb sind für diese Beschäftigten individuell angepasste Schutzmaßnahmen vorgesehen.

Seit etwa zehn Jahren wird der Einsatz von UVC-Strahlung zur Desinfektion in einem Wellenlängenbereich unterhalb von 254 nm erforscht. Strahlung mit einer Wellenlänge im Teilintervall des UVC-Spektralbereiches zwischen 200 nm und 240 nm wird dabei als Fern-UVC-Strahlung bezeichnet. Zur Erzeugung der UVC-Strahlung in diesem Wellenlängenbereich werden z. B. Kryptonchlorid (KrCl)-Excimerstrahler mit einem Emissionsmaximum bei 222 nm oder Licht emittierende Dioden (LEDs) mit einem Peak um 233 nm benutzt. In einer Reihe der in den folgenden Kapiteln aufgeführten Studien wird angenommen, dass keine relevanten DNA-Schäden der Haut entstehen könnten, da aufgrund der geringen Eindringtiefe von Fern-UVC-Strahlung nur die obersten Schichten abgestorbener Haut betroffen seien. Zudem, so wird in diesen Arbeiten argumentiert, würde die stärkere Absorption von Fern-UVC-Strahlung im Tränenfilm, der den vorderen Teil des Augapfels bedeckt, das Risiko einer Photokeratitis oder Photokonjunktivitis erheblich verringern. Somit seien keine akuten und langfristigen gesundheitlichen Folgen für Menschen zu erwarten. Aufgrund möglicher Interessenskonflikte von Autorinnen und Autoren zahlreicher relevanter Studien besteht dabei allerdings Anlass zu einer gewissen Skepsis bezüglich der Schlussfolgerungen, die aus den Studien gezogen werden. Dennoch wurden die von der ACGIH zum Schutz der Augen und der Haut empfohlenen Expositionsgrenzwerte im Fern-UVC-Spektralbereich bereits geändert und erheblich erhöht (siehe Abschnitt 3.5.4).

Neben der desinfizierenden Wirkung von UVC-Strahlung im Allgemeinen wird aufgrund der geringen Eindringtiefe von Fern-UVC-Strahlung ihr Einsatz in Anwesenheit von Menschen, z. B. im öffentlichen Raum durch nicht abgeschirmte, offene Strahlungsquellen diskutiert. Besonders seit Beginn der SARS-CoV-2-Pandemie wird diese Methode als eine einfache

Lösung beworben, um Infektionen durch luftgetragene Krankheitserreger in Innenräumen zu verringern (Blatchley et al. 2023). Die mögliche Anwendung offener Strahlungsquellen in Anwesenheit von Menschen im öffentlichen Raum erfordert allerdings grundlegend neue Sicherheitsbetrachtungen, wie und mit welcher Expositionsdauer UVC-Strahlung eingesetzt werden kann.

Gemäß dem Beratungsauftrag des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) vom 10. Juni 2021 wurde die Strahlenschutzkommission gebeten, eine Stellungnahme zu den „Risiken des Einsatzes von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen“ zu erarbeiten. Dabei sollten auch möglicherweise vulnerable Personengruppen, wie etwa Kinder, ältere Menschen oder Menschen mit Haut- und Augenerkrankungen, berücksichtigt werden (vgl. Abschnitt 3.5.5). Die hier vorliegende Empfehlung der SSK beantwortet diesen Beratungsauftrag.

Um die Risiken des Einsatzes von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Innenräumen in Anwesenheit von Menschen einschätzen zu können, wurde in dieser Empfehlung der aktuelle Wissenstand erfasst und analysiert. In der natürlichen Umgebung des Menschen kommt die UVC-Strahlung der Sonne nicht vor, da sie in der Stratosphäre vollständig absorbiert wird. Weil Menschen bisher nur gelegentlich und versehentlich gegenüber UVC-Strahlung künstlicher Quellen exponiert waren, liegen in Bezug auf schädigende Wirkungen der UVC-Strahlung auf Augen und Haut der Menschen keine epidemiologischen Daten vor. Dargelegt wird der aktuelle Kenntnisstand in Bezug auf

- die Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf Mikroorganismen und Viren,
- die Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf die Haut (in Tierstudien, in Studien an menschlichen Hautmodellen bzw. der menschlichen Haut),
- die Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf das Auge (in Tierstudien, in Studien am menschlichen Auge),
- die Festlegung von Expositionsgrenzwerten im UVC-Spektralbereich und ihre Anwendbarkeit auf möglicherweise vulnerable Gruppen.

Die in der vorliegenden Empfehlung behandelten künstlichen Quellen, wie Quecksilberdampflampen, Excimerstrahler oder LEDs, sind ebenso wie die Sonne Quellen inkohärenter optischer Strahlung. Laser, die überwiegend kohärente optische Strahlung aussenden, werden in dieser Empfehlung nicht betrachtet.

2 Empfehlung der SSK

Die SSK empfiehlt, den Einsatz von Fern-UVC-Strahlung durch nicht abgeschirmte, offene Strahlungsquellen zur Abtötung oder Inaktivierung krankheitserregender Mikroorganismen und Viren **in Anwesenheit von Menschen im öffentlichen Raum** durch eine Rechtsnorm zu regeln, um eine mögliche Gesundheitsgefährdung der Bevölkerung abzuwenden. Zumindest empfiehlt die SSK, den Schutz der Bevölkerung auf dem Niveau von den derzeit empfohlenen Expositionsgrenzwerten der ICNIRP anzustreben, wie sie bereits in bestehenden Arbeitsschutzregelungen umgesetzt wurden. Darüber hinaus hält die SSK es für erforderlich, möglicherweise vulnerable Gruppen vor dem Einsatz von Fern-UVC-Strahlung besonders zu schützen.

Die SSK stellt dazu fest:

In Anbetracht der Neuartigkeit der Nutzung und der potenziell schädigenden photobiologischen Wirkungen von UVC-Strahlung hält die SSK die derzeitige Datenlage für nicht ausreichend, um Gesundheitsrisiken für die Bevölkerung durch den Einsatz von Fern-UVC-Strahlung auszuschließen.

- *Wichtige Aspekte zur Risikoabschätzung von Fern-UVC-Strahlung wurden in den derzeit vorliegenden Studien kaum untersucht.*
  Bis dato publizierte Studien zu den Risiken von Fern-UVC-Strahlung haben sich lediglich mit kurzzeitiger Exposition befasst, und chronische Expositionen wurden bisher nur in wenigen Studien untersucht. Die Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf das Auge wurde kaum untersucht und ist bisher hauptsächlich an Tiermodellen erforscht worden. Es gibt nur sehr wenige Untersuchungen, die das menschliche Auge direkt einbeziehen. Epidemiologische Daten zur Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf Augen und Haut liegen nicht vor. Ebenso gibt es keine Studien zur Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf verletzte oder geschädigte Haut.

- *Die Mehrheit der analysierten Studien weist Unklarheiten in Bezug auf die radiometrischen Messungen auf.*
  In der Mehrheit der Untersuchungen wird die Validität der angegebenen Bestrahlungsmesswerte (Dosis) nicht ausreichend belegt. Es fehlen häufig Angaben zu den Bestrahlungsstärken, Bestrahlungsdauern und Messmethoden für die radiometrischen Messungen. Teilweise muss aufgrund der Angaben zu den verwendeten Messgeräten in Frage gestellt werden, ob eine korrekte Bestimmung der angewandten Bestrahlungen überhaupt möglich war. Zukünftige Studien sollten die Art und Weise der radiometrischen Messungen ausreichend beschreiben, eine Validierung und Kalibrierung der Messgeräte nachweisen und ggf. standardisierte Messbedingungen anwenden.

- *Bei einer Vielzahl der analysierten Studien bestehen Interessenkonflikte der Autorinnen und Autoren.*
  In vielen Publikationen wurden Interessenkonflikte erklärt. Das Prinzip der gefilterten KrCl-Excimerstrahler, die derzeit überwiegend im Bereich von Fern-UVC-Strahlung zum Einsatz kommen, ist vom Hauptautor einiger Studien patentiert worden. Ausschließlich ein Hersteller bietet in Lizenz entsprechende Strahler an und hat diese für etliche Studien zur Verfügung gestellt sowie diese Studien zum Teil auch direkt gefördert. Daher befürchtet die SSK, dass hier ein relevanter Bias bezüglich der Schlussfolgerungen vorliegen könnte.

- *Es gibt keine Untersuchungen an* möglicherweise *vulnerablen Gruppen.*
  Es fehlen grundsätzlich Studien, die möglicherweise vulnerable Personengruppen einschließen. Angesichts der potenziell schädigenden Wirkungen von Fern-UVC-Strahlung ist ein Risiko für diese Personengruppen bei einer unkontrollierten Exposition im öffentlichen Raum nicht auszuschließen.

- *Die analysierten Studien beziehen sich hauptsächlich auf zelluläre DNA-Schäden, andere mögliche Angriffspunkte von Fern-UVC-Strahlung wurden kaum berücksichtigt.*
  Die geringe Eindringtiefe von Fern-UVC-Strahlung in biologisches Gewebe beruht auf der starken Absorption durch Proteine. Ein Teil der inaktivierenden Wirkung wird, insbesondere in Bezug auf Viren, auf die Schädigung von Proteinen zurückgeführt. Die Inhibition von Enzymen durch UVC-Strahlung ist bekannt und wird z. B. in der Lebensmittelindustrie eingesetzt. Auf den Tränenfilm mit seiner komplexen Zusammensetzung und seinen vielfältigen Aufgaben könnte sich die Inhibition von Enzymen negativ auswirken. Die Inhibition und der zugrundeliegende photochemische Mechanismus sind nicht hinreichend aufgeklärt.

- *Die schädigende Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf das Mikrobiom der Haut und der Augenoberfläche wurde unzureichend untersucht.*
  Bei der Exposition des Menschen durch Fern-UVC-Strahlung im öffentlichen Raum kann nicht ausgeschlossen werden, dass diese auch wegen ihres effektiveren Inaktivierungspotenzials z. B. im Vergleich zu UVA- und UVB-Strahlung zu einer Inaktivierung des Mikrobioms der exponierten Haut und der Augenoberfläche führt und somit zu einer „Überdesinfektion", wie sie z. B. auch bei der ständigen Nutzung von desinfizierenden Waschlotionen auftritt. Ein solcher Effekt sollte insbesondere in Bezug auf aktuelle Erkenntnisse über die große Bedeutung des Mikrobioms in und am Menschen besser untersucht werden.

- *Es existiert noch kein Konzept zur Überprüfung der Einhaltung von Expositionsgrenzwerten.*
  Die Anwendung der UVC-Strahlung in Anwesenheit von Menschen erfordert die Einhaltung der von der ICNIRP empfohlenen und für Beschäftigte gesetzlich festgelegten Expositionsgrenzwerte. Beim Einsatz von Fern-UVC-Strahlung in Anwesenheit von Personen im öffentlichen Raum kann allerdings eine Überschreitung der EGW nicht ausgeschlossen werden, weil die Exposition einzelner Personen nicht angemessen kontrolliert werden kann. Da die Gesamtbestrahlung von der Bestrahlungsdauer abhängig ist, kann es bei längeren oder wiederholten Aufenthalten zur Überschreitung der EGW kommen. Insbesondere für Beschäftigte, die bereits am Arbeitsplatz gegenüber UVC-Strahlung exponiert sind, würde eine Exposition gegenüber Fern-UVC-Strahlung im öffentlichen Raum eine zusätzliche UVC-Strahlungsbelastung bedeuten (Kumulation).

- *Expositionsgrenzwerte berücksichtigen vulnerable Gruppen nicht.*
  Die von der ICNIRP empfohlenen EGW gelten für Gefährdungen durch eine achtstündige Exposition gegenüber UVC-Strahlung. ICNIRP betont, dass die empfohlenen EGW zum Schutz der Beschäftigten gelten sollen und sich dies mit der gebotenen Vorsicht auch auf die Allgemeinbevölkerung übertragen ließe. Sie können jedoch nicht zum Schutz überdurchschnittlich photosensitiver Personen oder Personen, die photosensibilisierenden Substanzen ausgesetzt sind, angewandt werden. Somit können derzeit keine Vorsichtsmaßnahmen definiert werden, um schädliche Auswirkungen auf die Gesundheit möglicherweise vulnerabler Personengruppen (wie Kinder, ältere Menschen) zu minimieren oder zu vermeiden.

- *Grundlegende Strahlenschutzprinzipien werden nicht berücksichtigt.*
  Die ICNIRP unterstützt ausdrücklich den Grundsatz, dass jede Entscheidung, die die Expositionssituation ändert, mehr nützen als schaden sollte (ICNIRP 2020). Nach derzeitigem Kenntnisstand kann jedoch nicht davon ausgegangen werden, dass die Anwendung von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen diesem Grundsatz entsprechen würde. Es existieren bereits technisch und wirtschaftlich gleichwertige Alternativen, bei denen die UVC-Exposition von Personen minimiert ist. So gibt es z. B. Systeme, bei denen die UVC-Quelle in einer geschlossenen Einheit verbaut ist oder durch Abschirmung der Quelle sichergestellt wird, dass anwesende Personen keiner UVC-Strahlung ausgesetzt sind (siehe Abschnitt 3.2.2).

- *Die Überwachung der technischen Zuverlässigkeit der eingesetzten Geräte, wie z. B. die Filterung, ist nicht geregelt.*
  In mehreren Studien wurde nachgewiesen, dass für den Einsatz von KrCl-Excimerstrahlern zwingend eine optische Filterung vorzusehen ist, um den Anteil schädlicher UVB- und UVA-Strahlung zu minimieren. Die langfristige Zuverlässigkeit der Strahler und die dauerhaft effiziente Filterung sind jedoch noch nicht untersucht worden. Es existieren auch noch nahezu keine Normen oder Vorschriften zur Zertifizierung oder

Bauartzulassung und zur Überwachung der technischen Zuverlässigkeit von Fern-UVC-Systemen. Besonders im Privatbereich besteht daher die Gefahr der unkontrollierten Verbreitung ungefilterter oder technisch unzuverlässiger Geräte durch den Onlinehandel.

Der Einsatz von Fern-UVC-Strahlung **im medizinischen Bereich**, z. B. zur prophylaktischen Desinfektion, 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 erfolgen sollte. Hierbei sollten allerdings immer alternative Desinfektionsverfahren, wie die chemische Desinfektion, in einer Nutzen-Risikoanalyse, insbesondere in Bezug auf möglicherweise vulnerable Gruppen, berücksichtigt werden. Derartige Analysen liegen für Fern-UVC-Strahlung jedoch noch nicht vor.

3 Wissenschaftliche Begründung

3.1 UVC-Strahlung und ihre physikalischen Eigenschaften

Bei ultravioletter Strahlung (UV-Strahlung) handelt es sich um optische Strahlung im Wellenlängenbereich zwischen 100 nm und 400 nm. UV-Strahlung wird weiter unterteilt in UVA-Strahlung (315 nm bis 400 nm), UVB-Strahlung (280 nm bis 315 nm) und UVC-Strahlung (100 nm bis 280 nm) (CIE 2020). Teile der besonders energiereichen UVC-Strahlung verfügen über genug Energie, um DNA bzw. RNA zu schädigen. Aus diesem Grund kann die UVC-Strahlung auch für Desinfektionszwecke eingesetzt werden, es muss aber berücksichtigt werden, dass in diesem Wellenlängenbereich nicht nur mikrobielle, sondern auch menschliche DNA geschädigt werden kann.

Im Zusammenhang mit der vorliegenden Empfehlung wird der Spektralbereich von 200 nm bis 240 nm als „Fern-UVC-Strahlung“ bezeichnet. Eine eindeutige Definition gibt es international jedoch noch nicht. Während zur Desinfektion derzeit vor allem UVC-Strahlung mit einer Wellenlänge von 254 nm verwendet wird, wird im Fern-UVC-Spektralbereich derzeit die Wellenlänge von 222 nm bevorzugt eingesetzt.

Wenn Menschen UVC-Strahlung ausgesetzt sind, stammt diese ausschließlich aus künstlichen Quellen. Die UVC-Strahlung der Sonne wird vollständig durch Ozon- und Sauerstoffmoleküle in der Stratosphäre absorbiert und erreicht nicht die Erdoberfläche.

Viele künstliche UVC-Strahlungsquellen werden umgangssprachlich und in der Literatur häufig als Lampen bezeichnet, obwohl diese nicht der Beleuchtung mit sichtbarem Licht dienen. In diesem Dokument wird zur besseren Verständlichkeit nur bei Strahlern, die durch Modifikation auch zur Beleuchtung eingesetzt werden können (z. B. Gasentladungslampen), der Begriff Lampe verwendet. Strahlungsquellen, die ausschließlich UV-Strahlung emittieren, werden dagegen ohne Ausnahme als Strahler bezeichnet (z. B. KrCl-Excimerstrahler).

3.1.1 Absorption von UVC-Strahlung

Mit Blick auf die Fragestellung dieses Beratungsauftrages kommt der Absorption von UVC-Strahlung in der Luft in unserer Umgebung eine besondere Bedeutung zu. Diese setzt sich chemisch aus etwa 78 % Stickstoff und 21 % Sauerstoff zusammen. Edelgase (z. B. Argon, Helium) und auch Kohlendioxid, Methan, Wasserstoff nehmen einen Anteil von unter 1 % ein. In der Luft befinden sich auch Staubpartikel und Wasserdampf.

Der Hauptteil der Absorption von UVC-Strahlung in der Luft erfolgt durch Sauerstoff bzw. Ozon, allerdings ist dieser Effekt sehr stark wellenlängenabhängig. Abbildung 3.1 stellt eine

Berechnung der Transmission der UV-Strahlung in einer Luft- bzw. Sauerstoffschicht von einem Meter Dicke dar. Die Abbildung zeigt, dass Luft für UVC-Strahlung oberhalb von 190 nm nahezu transparent ist, während es bei kürzeren Wellenlängen Bereiche weitgehender Intransparenz gibt. Die Absorption von UVC-Strahlung bei kürzeren Wellenlängen führt zur Entstehung von Ozon. Die Frage der gesundheitsschädlichen Wirkungen von Ozon, das durch UVC-Strahlung erzeugt werden kann, wird gemäß dem Beratungsauftrag in der vorliegenden Empfehlung nicht thematisiert.

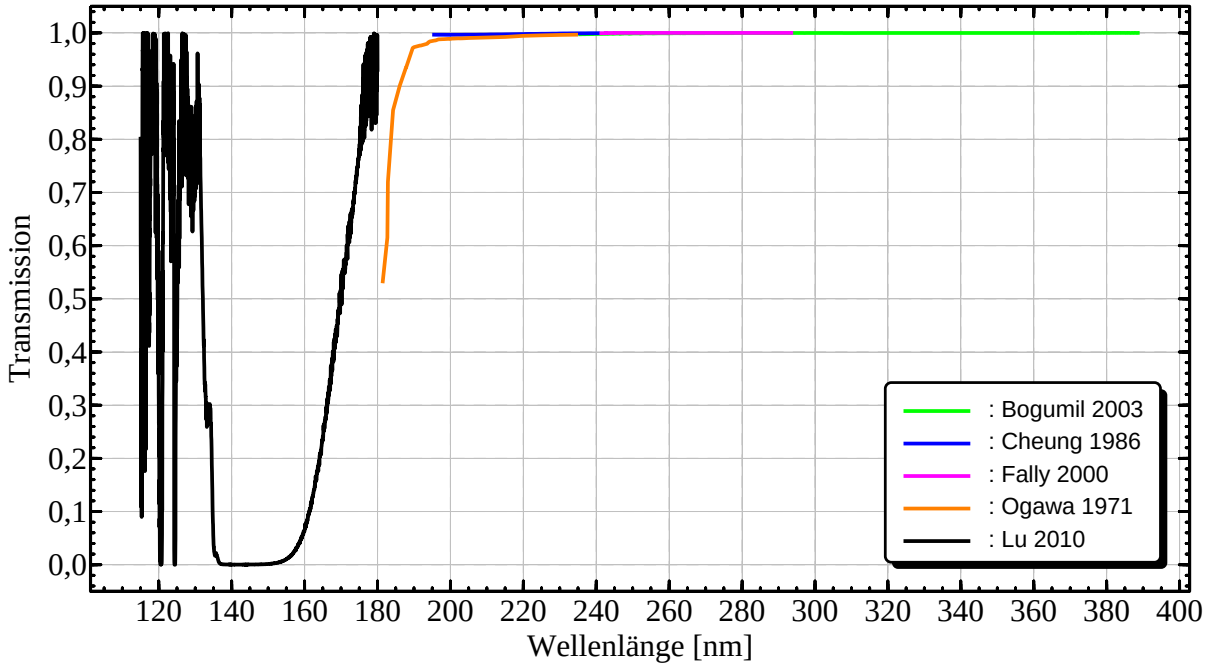


Abbildung 3.1: Spektrale Transmission im UVC-Spektralbereich in einer Luft- bzw. Sauerstoffschicht von einem Meter Dicke. Die Bestimmung der Transmission fand anhand von Daten über Absorptionsquerschnitte aus Keller-Rudek et al. (2013) nach den in der Legende aufgeführten Literaturquellen statt (Bogumil et al. 2003, Cheung et al. 1986, Fally et al. 2000, Ogawa 1971, Lu et al. 2010).

Des Weiteren wird die UVC-Strahlung auch im Wasser und durch organische Moleküle wie die DNA oder Proteine absorbiert.

In Abbildung 3.2 ist die spektrale Abhängigkeit des Absorptionskoeffizienten von purifiziertem Wasser ohne organische Verunreinigungen und ohne Sauerstoff (nach Quickenden und Irvin 1980) dargestellt. Da sich der Absorptionskoeffizient zwischen 196 nm und 320 nm um zwei Größenordnungen ändert (1,26 m^{-1} vs. 0,01 m^{-1}), ist die Transmission bei 196 nm mit 28 % deutlich kleiner als die Transmission bei 320 nm, die 99 % beträgt. Allerdings unterscheidet sich die Transmission in purifiziertem Wasser von 93 % bei 222 nm nicht wesentlich von der Transmission von 97 % bei 254 nm (Absorptionskoeffizienten 0,074 m^{-1} bzw. 0,035 m^{-1}).

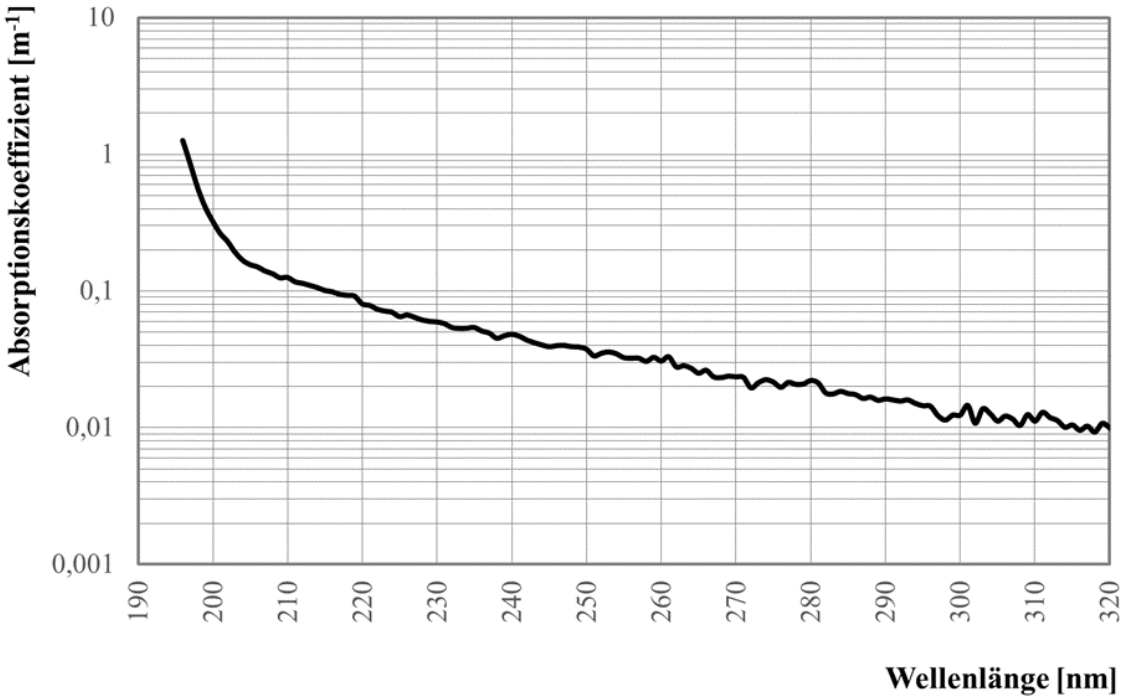


Abbildung 3.2: Spektrale Absorption des purifizierten Wassers ohne organische Verunreinigungen und ohne Sauerstoff (nach Quickenden und Irvin 1980)

In Abbildung 3.3 ist die auf 254 nm normalisierte Absorption der *Escherichia coli*-DNA und des Proteins Trypsin (Voet et al. 1963, Setlow und Doyle 1957) dargestellt. Die Abbildung zeigt eine verstärkte Proteinabsorption von Fern-UVC-Strahlung.

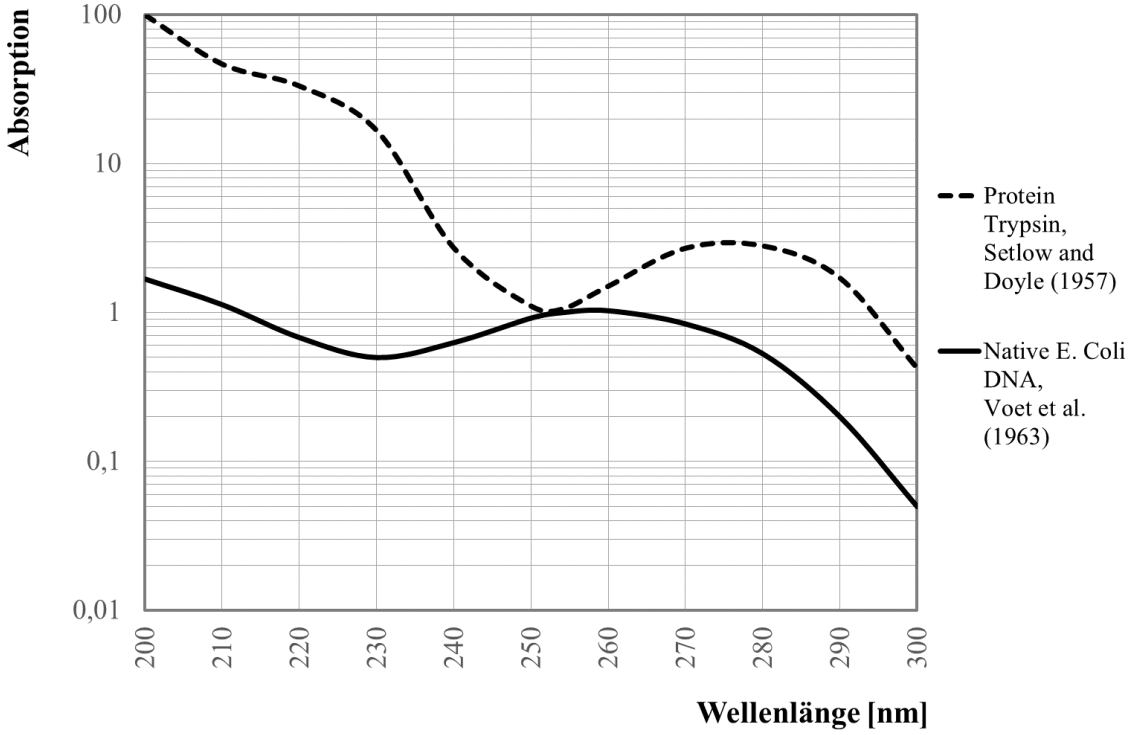


Abbildung 3.3: Spektrale Absorption der Escherichia coli*-DNA und des Proteins Trypsin (nach Voet et al. 1963, Setlow und Doyle 1957), normiert auf 254 nm.*

3.1.2 Strahlungsphysikalische Größen und Einheiten

Die Wirkung von UVC-Strahlung auf Mikroorganismen, organische und anorganische Substanzen und insbesondere menschliche Organe, wie Haut und Augen, ist abhängig von der eingestrahlten „Dosis“, die allerdings nicht wie im Falle von ionisierender Strahlung als absorbierte Energie pro Masse definiert ist. Vielmehr verwendet man den Begriff „Dosis“ in diesem Bereich für die Bestrahlung *H*, d. h. die pro Fläche auftreffende Energie der UVC-Strahlung, gemessen in der Einheit J m^{-2}. Die Bestrahlung ist das Produkt aus Bestrahlungsdauer *t* und mittlerer Bestrahlungsstärke *E*, definiert als Strahlungsleistung pro Fläche und gemessen in W m^{-2} (siehe Abschnitt 3.5.1). Streng genommen müsste differenziert werden, bei welcher Wellenlänge oder in welchem Wellenlängenbereich exakt die Bestrahlung erfolgt ist, da sich photobiologische Wirkungsfunktionen stark mit der Wellenlänge ändern können. Soweit bekannt, wird daher in der vorliegenden Empfehlung die bei der Bestrahlung dominante Wellenlänge als Index angegeben. Zur Anwendung kommen die Bereiche UVC_{254} für Quecksilberdampflampen mit einem Emissionsmaximum bei 254 nm, UVC_{222} für KrCl-Excimerstrahler mit einem Emissionsmaximum von 222 nm und UVC_{233} für UVC-LEDs mit einer Peak-Wellenlänge um 233 nm.

In der Literatur wird die gemessene Dosis meistens in mJ cm^{-2} (mJ/cm^2) angegeben, wobei gilt: 1 mJ cm^{-2} entsprechen 10 J m^{-2}. Durch die uneinheitliche Verwendung dieser Einheiten kann es zu Fehleinschätzungen von erreichten Dosen kommen. Daher sollte für den Vergleich unterschiedlicher Studien immer auf die gleiche Einheit zurückgerechnet werden.

3.1.3 Messung von UV-Strahlung

Die eingestrahlte Dosis *H* wird anhand der gemessenen Bestrahlungsstärke *E* und der Bestrahlungsdauer *t* bestimmt. Zur Messung der Bestrahlungsstärke kommen im Wesentlichen zwei Gerätetypen zum Einsatz: Breitbandradiometer und Spektralradiometer, die vor ihrem Einsatz radiometrisch kalibriert werden müssen. Seltener werden auch Filmdosimeter eingesetzt.

Breitbandradiometer
Breitbandradiometer besitzen eine spektrale Empfindlichkeit über einen festgelegten Spektralbereich. Sie bestehen in den meisten Fällen aus einer Photodiode und einem Spektralfilter. Die Kombination bestimmt den Spektralbereich, in dem die Geräte messen können. Sie sind jedoch nicht in der Lage eine spektral aufgelöste Messung durchzuführen. Ihre spektrale Empfindlichkeit ist nicht konstant, sondern nimmt überwiegend zu den Rändern des nutzbaren Spektralbereichs stark ab. Daher ist es erforderlich, dass Breitbandradiometer direkt an den Strahlertypen kalibriert werden, an denen sie später verwendet werden. Alternativ kann die spektrale Empfindlichkeit des Messgerätes an der dominanten Wellenlänge des zu vermessenden Strahlers kalibriert werden (z. B. bei 222 nm für KrCl-Excimerstrahler). Man berechnet dann jeweils entsprechende Korrekturfaktoren für die Anzeige des Breitbandradiometers und erhält die Bestrahlungsstärke *E*. Ein Gerät, das bei 172 nm kalibriert wurde, würde demnach bei 222 nm eine deutliche Fehlanzeige aufweisen.

Da für Breitbandradiometer meistens Si-Photodioden eingesetzt werden, die eine hohe spektrale Empfindlichkeit vom UV- bis in den nahen infraroten Spektralbereich besitzen, ist bei Messungen einer UVC-Bestrahlungsstärke eine effektive Abgrenzung des nutzbaren Spektralbereiches durch einen zusätzlich verwendeten Filter zwingend erforderlich. Hierbei ist zu beachten, dass insbesondere bedampfte Filter oftmals ab etwa 700 nm einen weiteren Durchlassbereich aufweisen können. Dadurch kann es durch vorhandene Infrarotstrahlung bei der Messung zu einem zusätzlichen Fehlsignal kommen und eine vermeintlich zu hohe UV-Bestrahlungsstärke angezeigt werden.

Spektralradiometer

Spektralradiometer sind in der Lage, eine spektral aufgelöste Messung der spektralen Bestrahlungsstärke $E_\lambda(\lambda)$ durchzuführen. Sie können dadurch einen größeren Spektralbereich abdecken und zur Vermessung unterschiedlichster Strahler verwendet werden. Das Integral der gemessenen spektralen Bestrahlungsstärke über der Wellenlänge ergibt hierbei die Bestrahlungsstärke E. Hierbei kommen im Wesentlichen zwei Gerätetypen zum Einsatz. Doppelmonochromatorsysteme können Spektren mit hoher Auflösung und maximaler Streulichtunterdrückung vermessen. Hierbei wird das Spektrum Wellenlänge für Wellenlänge abgetastet und erfasst. Derartige Systeme sind hochgenau, jedoch besitzen sie eine vergleichsweise lange Messzeit von mehreren Minuten für ein Spektrum und sind daher für die Bestimmung einer Dosis nur bedingt geeignet. Array Spektralradiometer können ein komplettes Spektrum in kurzer Zeit (einige Millisekunden bis wenige Sekunden) erfassen, indem die spektral aufgefächerte Strahlung simultan auf ein Array von Photodioden (meistens CCD- oder CMOS-Zellen) trifft. Die Geräte eignen sich daher gut zur schnellen Bestimmung der Bestrahlungsstärke. Durch ihre kompakte Bauform sind sie aber sehr anfällig für internes Streulicht. Hierbei treffen spektrale Anteile aus anderen Wellenlängen auf Bereiche des Arrays, die einen definierten anderen Spektralbereich erfassen sollen. Dieser Streulichtanteil ist bauartbedingt insbesondere im UV-Spektralbereich sehr hoch. Bei Halogenglühlampen, die häufig zur Kalibrierung der Array Spektralradiometer zum Einsatz kommen, kann infrarotes Streulicht besonders im Messbereich unter 300 nm einen Fehlstrahlungsanteil von mehr als 100 % der zu messenden Strahlung bewirken. Daher ist eine spektrale Streulichtkorrektur des Messsignals bei der Kalibrierung und Anwendung unerlässlich.

Die Bestimmung der eingestrahlten Dosis erfordert eine entsprechend angepasste Eingangsoptik der Geräte, die die Bestrahlungsstärke am Ort der Bestrahlung erfasst. Die Messgeräte haben daher an ihrer Vorderseite meistens einen Diffusor, der als bestrahlte Fläche oder Referenzebene dient. In einigen Fällen dient auch die Öffnung einer kleinen integrierenden Kugel als Referenzebene und das Messgerät ist an einer weiteren Austrittsöffnung der Kugel befestigt. Es ist auch möglich, dass die Eingangsoptik an einer Lichtleitfaser befestigt ist, deren anderes Ende zum Messgerät führt. Für alle Bauweisen gilt, dass die Geräte immer mit der für sie vorgesehenen Eingangsoptik für die Bestrahlungsstärkemessung kalibriert werden müssen. Eine Kalibrierung ohne Diffusor (beispielsweise direkt an einen Strahler angeschlossen) ist nicht nutzbar. Andere Eingangsoptiken mit optischen Linsen oder z. B. das nackte Ende einer Lichtleitfaser können nicht für die Messung der Bestrahlungsstärke verwendet werden, da diese keine bestrahlte Referenzebene besitzen.

Die Kalibrierung der Messgeräte insbesondere im Fern-UVC-Spektralbereich ist sehr aufwändig und kann mit großen Messunsicherheiten verbunden sein. Sie sollte daher durch akkreditierte Messlaboratorien durchgeführt werden.

Filmdosimeter

In der Dosimetrie von UVC-Strahlung kommen auch Filmdosimeter zum Einsatz. Wenn UVC-Strahlung auf ein Filmdosimeter trifft, kommt es zu einer dosisabhängigen Verfärbung des Films. Der Grad der Farbveränderung im Film kann dann verwendet werden, um die Dosis der UVC-Strahlung zu bestimmen, der das Filmdosimeter ausgesetzt war.

Ein Beispiel für ein Filmdosimeter für UVC-Strahlung ist der Gafchromic-EBT3-Film. Wenn dieser Film UVC-Strahlung ausgesetzt wird, wird eine irreversible Farbveränderung ausgelöst, die dann mit Hilfe einer speziellen Scanner-Software quantifiziert werden kann, um die Strahlendosis zu bestimmen. Ein weiteres Beispiel ist der Kodak-XV-2-Film. Wenn der Film UVC-Strahlung ausgesetzt wird, wird eine Farbänderung ausgelöst, die durch das Verschwinden der blauen Farbe im Film gekennzeichnet ist.

In beiden Fällen können die Farbumschläge im Film verwendet werden, um die Strahlendosis der UVC-Strahlung zu bestimmen. Ein ähnlicher Effekt wird auch auf sogenannten Farbkärtchen genutzt, die bei Bestrahlung einen Farbumschlag zeigen. Alle Filmdosimeter weisen eine sehr breitbandige spektrale Empfindlichkeit auf und müssen jeweils unter Verwendung der zu untersuchenden Strahlungsquellen mit Hilfe von anderen radiometrischen Methoden kalibriert werden.

In der Strahlentherapie wird häufig OrthoCromic-OC-1-Film eingesetzt, um z. B. die Strahlendosis zu ermitteln, die während der Behandlung auf den Patienten abgegeben wird. In einer Studie von Welch und Brenner (2021) konnte nachgewiesen werden, dass OrthoCromic-OC-1-Film auch für den Fern-UVC-Bereich eingesetzt werden kann, sofern eine entsprechende Kalibrierung erfolgt. Da die Verfärbung über einen längeren Zeitraum erfolgt, empfehlen die Autoren eine Auswertung der Verfärbung nach 48 Stunden. Die Autoren weisen außerdem darauf hin, dass der Film bei 254 nm eine höhere Empfindlichkeit hat als im Fern-UVC-Spektralbereich und dass eine Verfärbung des Films auch durch UVA- und UVB-Strahlung erfolgen kann. Daher ist bei der Verwendung auf die Vermeidung von Fremdstrahlung und insbesondere Sonnenstrahlung zu achten. Ungefilterte KrCl-Excimerstrahler bewirken zudem eine deutlich stärkere Verfärbung als gefilterte Strahler.

Allgemein ist festzustellen, dass radiometrische Messungen im Spektralbereich unter 250 nm mit hohen Messunsicherheiten verbunden sind. Für die korrekte Messung der Bestrahlung mit schmalbandiger Strahlung ist ein entsprechend hoher technischer Aufwand erforderlich und einschlägige Erfahrung auf dem Gebiet der UV-Radiometrie eine unabdingbare Grundvoraussetzung. Der tatsächliche Messaufwand wird in den meisten analysierten Studien der Abschnitte 3.3 und 3.4 nicht erwähnt, die Qualität der radiometrischen Messungen ist oft nicht abschätzbar und somit eine sinnvolle Einschätzung der Zuverlässigkeit der angegebenen radiometrischen Größen nicht möglich.

3.2 UVC-Geräte/Lampen bzw. Strahler und deren Anwendung

Die Verwendung von UVC-Strahlung zur Abtötung von Mikroorganismen und Inaktivierung von Viren ist mittlerweile in vielen Bereichen etabliert. Dabei kommen unterschiedliche Strahlungsquellen zum Einsatz, deren Hauptemissionen bisher im Spektralbereich um 254 nm liegen. Die Anwendung von Fern-UVC-Strahlung im Spektralbereich unterhalb 240 nm ist ebenso wie die Verwendung von UVC-LEDs eine Neuentwicklung der letzten Jahre (siehe Abschnitt 3.2.1).

Vor dem Einsatz von UVC-Entkeimungsgeräten am Menschen zur Selbstanwendung wird grundsätzlich gewarnt (BfS 2022). Daher wird bei vielen Gerätetypen und Anwendungen eine direkte Exposition mit UVC-Strahlung weitestgehend unterbunden (siehe 3.2.2).

3.2.1 Strahlungsquellen

Zur Inaktivierung von Mikroorganismen durch UVC-Strahlung werden hauptsächlich Gasentladungslampen und zunehmend auch LED-Strahler eingesetzt. Bei den Entladungslampen unterscheidet man zwischen den Quecksilber-Niederdruckstrahlern, den Quecksilber-Mitteldruckstrahlern und den Excimerstrahlern. Auch aufgrund der immer restriktiveren Beschränkung der Anwendung von Quecksilber in Elektro- und Elektronikgeräten durch die Richtlinie 2011/65/EU (EU 2011) und durch eine beschleunigte Entwicklung kommen immer mehr Produkte basierend auf UV-LEDs auf den Markt.

3.2.1.1 Quecksilber-Niederdruckstrahler

Gasentladungslampen basieren auf Anregung und Ionisierung von Atomen oder Molekülen durch Elektronenstöße in einem elektrischen Feld. Bei der Rekombination aus den angeregten Energiezuständen emittieren die Atome oder Moleküle ein charakteristisches Linienspektrum.

In einem Niederdruckplasma mit Gasdrücken kleiner als 1 mBar (< 100 Pa) strahlen zuvor verdampfte und angeregte Quecksilberatome hierbei im UV-Spektralbereich unter anderem bei den Wellenlängen 185 nm, 254 nm, 313 nm und 365 nm ab.

Die Emission bei 185 nm ist in der umgebenden Luft stark Ozon erzeugend. Niederdrucklampen mit Lampenkolben aus synthetischem Quarzglas können diesen Spektralbereich nutzen, um durch Oxidationsprozesse den Abbau von Schadstoffen, Geruch und Fett zu ermöglichen.

Für die Inaktivierung von Mikroorganismen werden Strahler mit beschichteten Quarzkolben verwendet, bei denen die Transmission von Strahlung im Fern-UVC-Bereich meist unterhalb 240 nm vollständig blockiert wird (ozonfreie Lampen). Derartige Quecksilber-Niederdrucklampen erreichen für die Hauptemissionslinie bei 254 nm einen Wirkungsgrad von 33 % bis 40 % der UV-Strahlungsleistung bezogen auf die elektrische Leistung. Strahler sind mit einer elektrischen Leistung von bis zu einigen hundert Watt verfügbar. Niederdruckstrahler, die statt reinen Quecksilbers mit einer Amalgamfüllung versehen sind, erreichen Lebensdauern bis 16 000 Stunden.

Quecksilber-Niederdruckstrahler sind in vielfachen Bauformen erhältlich und kommen in vielen technischen Anwendungen zum Einsatz.

3.2.1.2 Quecksilber-Mitteldruckstrahler

Gasentladungslampen mit einem Gasdruck zwischen 1 000 mBar bis 10 Bar (0,1 MPa und 1 MPa) erzeugen ein wesentlich heißeres Plasma, das ein verbreitertes Bandenspektrum vom UVC bis in den infraroten Spektralbereich liefert. Im UVC wird ein mit verbreiterten Spektrallinien überlagertes Spektrum bereits ab unterhalb 200 nm erzeugt. Die Strahler erreichen wesentlich höhere Leistungsdichten als Niederdruckstrahler, besitzen jedoch nur einen UV-Wirkungsgrad von etwa 10 % bezogen auf die elektrische Leistung.

Aufgrund der hohen Plasmatemperaturen erreichen die Lampenkolben Temperaturen bis 900 °C. Es werden Strahler mit einer elektrischen Leistungsaufnahme von bis zu 60 kW eingesetzt. Der Leistungsbereich der Strahler kann durch elektrische Vorschaltgeräte gedimmt werden, sodass die eingesetzte Strahlungsleistung an wechselnde Anforderungen angepasst werden kann.

Mitteldruckstrahler kommen in großtechnischen Anlagen bei der Aushärtung von Lacken und Druckerzeugnissen und zur Desinfektion in der Trinkwasserversorgung zum Einsatz. Zur Vermeidung der Erzeugung chemischer Beiprodukte durch hochenergetische Strahlung aus dem Fern-UVC-Spektralbereich muss hierbei durch die Beschichtung der Lampenkolben oder durch spezielle Lampenhüllrohre sichergestellt werden, dass Strahlung unterhalb 240 nm vollständig blockiert wird.

3.2.1.3 Excimerstrahler

In einem hochenergetischen Plasma können kurzlebige Verbindungen von Edelgasen oder von Halogenen mit Edelgasen erzeugt werden, die beim Zerfall nach wenigen Nanosekunden optische Strahlung emittieren. Die angeregten Dimere („excited dimer“, „Excimer“) können nur gebildet werden, wenn sich das Edelgas durch eine starke Plasmaentladung in einem angeregten Zustand befindet. Für den Betrieb von Excimerstrahlern werden daher hochfrequente Hochspannungsnetzgeräte eingesetzt. Die beim Zerfall des Dimers entstehende optische

Strahlung besitzt ein für die verwendeten Elemente charakteristisches Spektrum mit einer Hauptemissionslinie. Häufig verwendete Dimere sind Xe_2 mit einer Hauptemissionslinie von 172 nm, KrCl (222 nm) und XeBr (282 nm).

Das für Anwendungen im Fern-UVC-Bereich eingesetzte KrCl hat um 222 nm eine Hauptemission von 83 % (Fern-UVC-Strahlung, 200 nm – 230 nm) der Strahlungsleistung, emittiert jedoch im restlichen UVC (230 nm bis 280 nm) weitere 10 %, im UVB 3 % und im UVA 4 % der Strahlung (Hickerson et al. 2021). Um die Strahlung auf den Fern-UVC-Spektralbereich einzuschränken und DNA-Schädigungen durch längerwellige UV-Strahlung oberhalb 240 nm zu verhindern, müssen entsprechende Kurzpassfilter eingesetzt werden (Narita et al. 2022). Die langfristige Zuverlässigkeit der Strahler und insbesondere die zeitliche Beständigkeit der Filterung sind aktuell noch nicht untersucht worden. Bei Geräten, die auf den Markt gebracht werden, ist derzeit noch nicht sichergestellt, dass diese Filterung vorhanden und dauerhaft anwendbar ist. Eine Bauartzulassung und Zertifizierung von Strahlern im Fern-UVC-Spektralbereich kann im öffentlichen Bereich angezeigt sein, bevor dort Geräte in Umlauf gebracht werden. Besonders im Privatbereich besteht zudem die Gefahr der unkontrollierten Verbreitung nicht zertifizierter, ungefilterter oder technisch unzuverlässiger Geräte durch den Onlinehandel.

KrCl-Excimerstrahler können eine UV-Strahlungsleistung von bis zu 1,5 kW erreichen (Skakun et al. 2002). Die Strahler erreichen hierbei einen Wirkungsgrad von etwa 18 % der UV-Strahlungsleistung bezogen auf die elektrische Leistung.

Excimerstrahler kommen unter anderem bei der Ozongeneration, photochemischer Dissoziation, Oberflächenbehandlungen (UV-Curing), Aushärtung von Lacken und Druckerzeugnissen sowie seit kurzer Zeit für die Abtötung von Mikroorganismen und Inaktivierung von Viren zum Einsatz.

3.2.1.4 LEDs

UVC-LEDs sind schmalbandige Halbleiterstrahler basierend auf Galliumnitrid- und Aluminiumnitridlegierungen, deren Emissionsbanden durch unterschiedliche Legierungsverhältnisse spektral zwischen 210 nm und 400 nm durchgestimmt werden können (Kneissl et al. 2019).

LEDs, deren Strahlung für die Inaktivierung von Mikroorganismen und Viren geeignet ist, werden mit Peak-Wellenlängen zwischen 265 nm und 280 nm hergestellt. Einzelne LEDs erreichen Strahlungsleistungen von bis zu 100 mW, besitzen aber nur einen Wirkungsgrad von etwa 3 % bis 8 % bezogen auf die elektrische Leistung. Die Lebensdauer der Strahler liegt im Bereich von bis zu 1 000 Stunden, nimmt aber für LEDs mit hohen Strahlungsleistungen und hin zu kürzeren Peak-Wellenlängen deutlich ab.

LEDs mit einer Peak-Wellenlänge um 230 nm können im Fern-UVC-Bereich eingesetzt werden. Derzeit werden für Einzel-LEDs dieser Bauart jedoch nur Strahlungsleistungen von etwa 3 mW und Lebensdauern deutlich unter 100 Stunden erreicht.

Die Produktion von UVC-LEDs unterliegt (noch) einer großen Schwankungsbreite entscheidender Produktparameter. So erfolgt bei LEDs ein sogenanntes Binning[1] z. B. nach ihrer Peak-Wellenlänge oder der abgegebenen Strahlungsleistung. Diese Einteilung in abgestufte

[1] Binning bezieht sich auf den Prozess, bei dem UV-LEDs während oder nach der Herstellung in Gruppen oder „Bins“ sortiert werden, basierend auf ihren elektrischen und optischen Eigenschaften wie z. B. Leistungsaufnahme, Strahlungsleistung oder Peak-Wellenlänge. So wird sichergestellt, dass die UV-LEDs innerhalb einer bestimmten Gruppe oder eines Bins in Bezug auf ihre Leistung und Eigenschaften konsistent sind.

Klassen (Bins) besitzt Toleranzen, die beispielsweise bei einem Bin auf 230 nm ± 5 nm zulassen, so dass LEDs mit Peak-Wellenlängen von 225 nm bis 235 nm zur Anwendung kommen. Der spektrale Verlauf von UVC-LEDs ist zudem im Allgemeinen unsymmetrisch um die Peak-Wellenlänge und läuft auf der längerwelligen Seite weiter aus. Dadurch ist es möglich, dass die aktinische Wirkung von LEDs eines Bins mit unterschiedlichen Peak-Wellenlängen deutlich unterschiedlich ausfallen kann. Dieses wäre bei der Auslegung und Beurteilung von Strahlern, die zumeist aus vielen LEDs eines Bin bestehen, zu berücksichtigen.

Durch die kompakte Bauform von wenigen Millimetern Kantenlängen können UV-LEDs in größerer Stückzahl zu beliebigen technischen Anwendungen kombiniert werden. Hierbei ist jedoch zu beachten, dass aufgrund der noch geringen Effizienz ein hoher Kühlungsaufwand der Bauteile erforderlich ist. Aufgrund der hohen Einzelkosten und der vergleichsweise geringen Lebensdauer sind großtechnische Anwendungen von UVC-LEDs, z. B. in der Trinkwasserentkeimung, noch in der Entwicklung. Im Verbraucherbereich gibt es jedoch bereits einige kleintechnische Anwendungen, z. B. bei der Wasserentnahme oder für die Desinfektion von Smartphones und Tablets.

3.2.2 Gerätetypen, Aufbau und Anwendung

Je nach Anwendung kommen unterschiedliche Gerätetypen und Bauformen zum Einsatz. Bei den Bauformen unterscheidet man zwischen geschlossenen Systemen, die nahezu vollständig verhindern, dass Personen mit der UVC-Strahlung in Berührung kommen, halboffenen und offenen Systemen. Die Anwendungen zur Inaktivierung von Mikroorganismen können unterschieden werden in die Bereiche Desinfektion von Trinkwasser, Oberflächen, Raumluft und im medizinischen Bereich. Zusätzlich gibt es technische Anwendungen von UVC, bei denen Menschen im Arbeitsumfeld mit Reststrahlung in Berührung kommen können.

3.2.2.1 Behandlung von Trinkwasser

Zur Desinfektion des Trinkwassers im Wasserwerk kommen geschlossene Systeme zum Einsatz, bei denen keine Strahlung nach außen dringt. Als Strahler werden Quecksilber-Niederdruckstrahler und Systeme mit Mitteldruckstrahlern eingesetzt. Die Strahlungsleistung kann je nach Wasserdurchfluss so geregelt werden, dass immer eine Mindestbestrahlungsdosis überschritten wird. Durch die geschlossene Bauweise wird eine direkte Gefährdung des Menschen ausgeschlossen. Im Wartungsfall und Messfall können die EGW schon in wenigen Sekunden überschritten werden, sodass hier strenge Arbeitsschutzmaßnahmen angezeigt sind (DGUV 2016).

Für Kleinverbraucher kommen geschlossene Geräte z. B. direkt am Wasserhahn oder zur Entkeimung von Teichen und Swimmingpools zum Einsatz. Hier werden hauptsächlich Niederdruckstrahler und neuerdings auch UVC-LEDs verwendet.

3.2.2.2 Behandlung von Oberflächen

Für die Desinfektion von Oberflächen kommen alle Bauweisen zum Einsatz. Als Strahler werden hauptsächlich Quecksilber-Niederdrucklampen und zunehmend UVC-LEDs verwendet.

Zur Desinfektion von kleinen Geräten und Gebrauchsgegenständen können geschlossene Geräte in Form von Kästen und Schränken verwendet werden, in die die Gegenstände zu platzieren sind und bei denen die Strahlung erst nach Schließen der Klappen und Türen einschaltbar ist.

Ebene großflächige Oberflächen können durch Geräte mit halboffener Bauweise behandelt werden. Hier tritt die Strahlung nur an einer Seite des Gerätes aus, die über die zu desinfizierende Oberfläche geführt wird. Diese Geräte können eine automatisierte Notabschaltung

besitzen, falls sie keine Oberfläche berühren, andernfalls sollten sie nur von geschultem Personal mit persönlicher Schutzausrüstung bedient werden.

Die Bestrahlung von Oberflächen kann auch mit offenen Systemen durchgeführt werden, wenn sich keine Personen im Raum befinden oder diese mit einer entsprechenden Schutzausrüstung versehen sind. Dazu werden die Geräte mitten in den Raum gestellt, hängen als Lampen unter der Raumdecke oder werden motorisiert durch den Raum geführt. Hierbei kommen auch Desinfektionsroboter zum Einsatz, die Räumlichkeiten in Abwesenheit von Menschen autonom befahren und mit UVC-Strahlung Oberflächen und Raumluft bestrahlen. Anwendungen sind z. B. die Desinfektion von Oberflächen in Krankenzimmern, Flugzeugkabinen oder in der Lebensmittelindustrie.

Es gibt Bestrebungen, für all diese Anwendungen bei gleichzeitiger Anwesenheit von Personen im Raum zukünftig auch Excimerstrahler einzusetzen.

3.2.2.3 Behandlung von Raumluft

Zur Inaktivierung von Mikroorganismen in der Raumluft kommen ebenso alle Bauformen zum Einsatz, und auch hier werden hauptsächlich Quecksilber-Niederdruckstrahler eingesetzt. Die Verwendung von UVC-LEDs ist in diesem Bereich noch in der Entwicklung.

In fest verbauten raumlufttechnischen (RLT)-Anlagen können UV-Bestrahlungskammern eingebaut werden, die eine Entkeimung der Umluft vor der erneuten Abgabe an den Raum vornehmen können. Die Kammern sind im Lüftungssystem integriert und komplett geschlossen, sodass abgesehen von einer Notabschaltung beim Öffnen der Kammern im Betrieb keine weiteren Schutzmaßnahmen für Personen erforderlich sind. Zusätzlich gibt es Komponenten für RLT-Anlagen, in denen das Wasser zur Befeuchtung der Raumluft vor dem Verstäuben mittels UVC-Strahlung entkeimt wird.

Für die nachträgliche oder flexible Ausstattung von Räumen wurden mobile Umluftgeräte entwickelt, bei denen die angesaugte Raumluft in einer Bestrahlungskammer entkeimt und anschließend dem Raum wieder zugeführt wird. Bauformen sind vom kleinen Tischgerät bis hin zum Umluftschrank möglich. Diese geschlossenen Systeme sollten so ausgelegt sein, dass bei Einmaldurchgang eine ausreichend hohe Bestrahlungsdosis erreicht wird und dass keine nennenswerte Strahlung aus dem Gerät austritt.

Es kommen auch halboffene Systeme zum Einsatz, bei denen die Strahlung in einen Bereich des Raumes abgegeben wird, der von Personen nicht erreicht werden kann. Derartige Geräte werden in meist großer Höhe aufgehängt (sog. Upper-Air-Geräte) und es muss durch Vorortmessungen sichergestellt werden, dass keine nennenswerte Strahlung in Verkehrsbereiche gelangt.

Offene Systeme sind ähnlich aufgebaut wie bei der Desinfektion von Oberflächen und kommen in der Regel bisher nur zum Einsatz, wenn sich keine Personen im Raum befinden. Es werden hierbei auch Systeme entwickelt, die sich bei Näherung einer Person automatisch abschalten (UV-Vorhang). Insbesondere bei offenen Systemen wird der Einsatz von Excimerstrahlern angestrebt, der dann zukünftig auch bei gleichzeitiger Anwesenheit von Personen im Raum stattfinden soll.

Bei allen Anwendungen zur Inaktivierung von Mikroorganismen und Viren in der Raumluft muss physikalisch sichergestellt sein, dass mit Mikroorganismen oder Viren belastete Luft an oder in die Geräte gelangt. Das kann bei Upper-Air-Geräten oder offenen Geräten an der Raumdecke durch Konvektion geschehen oder wird bei RLT-Anlagen oder Umluftgeräten durch eine stetige Umwälzung der Raumluft realisiert. Insbesondere offene Systeme sind im Kontext dieser Empfehlung relevant.

3.2.2.4 Anwendung im medizinischen Bereich

Im medizinischen Bereich wird, zum Teil für Studienzwecke, der Einsatz von Fern-UVC-Strahlung diskutiert. Ausschließlich zur oberflächlichen antiseptischen Behandlung von Wundrändern, Haut und Schleimhäuten sowie im Einsatz gegen eine Besiedlung mit Keimen könnten nach Zulassung als sog. Sanierungstherapie alternativ zu antibiotisch oder antiseptisch wirksamen Salben, Shampoos und Spülungen Excimerstrahler oder UVC-LEDs zum Einsatz kommen. Im Wundbereich können die UVC-Strahler auch zur Vorbeugung und Therapie von postoperativen Entzündungen im Bereich von Implantaten, sogenannte Periimplantitiden, verwendet werden (Bonneß 2007). Zu Periimplantitiden kann es, insbesondere bei immunsupprimierten Patienten und Patientinnen, nach dem Einsetzen eines Implantates, beispielsweise einer Zahnprothese in den Kiefer, kommen.

Bei solchen und ähnlichen Anwendungen im medizinischen Bereich können medizinisches Personal, Patienten und Patientinnen unbeabsichtigt und beabsichtigt UVC-Strahlung ausgesetzt werden. Die möglichen Risiken beim Einsatz von UVC- und insbesondere Fern-UVC-Strahlung am Menschen sind Gegenstand gegenwärtiger Forschung und müssen auch zukünftig näher evaluiert werden.

In medizinischen Einrichtungen wird UVC-Bestrahlung z. B. von Behandlungsräumen als Alternative zur chemischen Wischdesinfektion angewandt. Da nicht auszuschließen ist, dass UVC-Desinfektionssysteme in Räumen eingesetzt werden, während sich dort Personen aufhalten, sorgen Infrarot-Bewegungssensoren in manchen Geräten für eine sofortige Sicherheitsabschaltung der Geräte. Bei der Verwendung von Fern-UVC-Quellen ist vorgesehen, diese auch bei Anwesenheit von Personen im Raum einzusetzen. Auf weitere *medizinische* Anwendung im Rahmen der Medizinprodukteverordnung geht dieses Dokument nicht ein.

3.2.2.5 Weitere Anwendungen

UVC-Strahlung wird mittlerweile bei vielen technischen Anwendungen in der Oberflächenbehandlung und UV-Strahlenhärtung von Lacken und Druckfarben eingesetzt. Hierbei kommen zumeist geschlossene Systeme (Kammern) oder halboffene Systeme (Bandbestrahlung) zum Einsatz, bei denen Maßnahmen des Arbeitsschutzes (OStrV 2010) beachtet und die geltenden EGW eingehalten werden müssen.

3.3 Abtötung von Mikroorganismen und Inaktivierung von Viren durch UVC-Strahlung

Ziel einer Desinfektion ist die Verminderung der Keimzahl in Bezug auf Mikroorganismen wie Bakterien und Pilze und die Verminderung der Infektiosität von Viren. Als Maß für den Abtötungseffekt wird für Bakterien und Pilze die Fähigkeit zur Koloniebildung (Maß hierfür ist die Anzahl von „colony forming unit“, CFU) unter geeigneten Kulturbedingungen von behandelten im Vergleich zu unbehandelten Organismen bestimmt. Als Maß für die Infektiosität von Viren wird die „50 % tissue culture infectious dose“ ($TCID_{50}$), also die notwendige Dosis, um in 50 % der Zellkulturen eine Infektion auszulösen, dargestellt, oder es wird die Anzahl der Areale mit cytotoxischen Effekten („plaque forming units“, PFU) in geeigneten Zellkulturen bestimmt. Die Werte werden üblicherweise in logarithmischer Form angegeben. Der Desinfektionseffekt wird dann als „log reduction“ quantifiziert, wobei z. B. eine „log 4 reduction“ einer Keimreduktion um 99,99 % entspricht. Die antimikrobielle Wirkung von UVC-Strahlung ist bekannt und wird routinemäßig zur Oberflächendesinfektion in Reinräumen oder auch sterilen Werkbänken und zur Sterilisation medizinischer Instrumente verwendet (vergleiche Rudhart et al. 2022). Hierbei kommen üblicherweise Quecksilberdampflampen mit einem Emissionsmaximum im UVC-Bereich bei 254 nm (UVC_{254}) zum Einsatz. Die Abtötung von Mikroorganismen

durch UVC-Strahlung beruht vorwiegend auf der Induktion von prämutagenen Schäden in der DNA (z. B. Cyclobutan-Pyrimidin-Dimere, CPD). Mit abnehmender Wellenlänge steigt die Absorption durch Proteine an (siehe Abbildung 3.3), sodass im Spektralbereich der Fern-UVC-Strahlung auch die Schädigung von Proteinen einen Anteil an der Abtötung haben kann (Hessling et al. 2021). Aufgrund der verstärkten Proteinabsorption und Streuung mit abnehmender Wellenlänge nimmt die Eindringtiefe in biologisches Gewebe ab (Zwicker et al. 2022). Aufgrund der starken Absorption und Streuung insbesondere von Fern-UVC-Strahlung in biologischem Material kann es, je nach Versuchsbedingungen, z. B. durch die Anwendung unterschiedlicher Kulturmedien oder Wundsekret, zu einer abgeschwächten Exposition der Mikroorganismen kommen, die deutlich von der messtechnisch bestimmten Bestrahlungsdosis abweicht. Die Expositionsbedingungen in verschiedenen Studien müssen deshalb berücksichtigt werden.

Narita et al. (2020) untersuchten die Inaktivierung von Bakterien, Bakteriensporen, Pilzen und Viren durch Bestrahlung mit UVC_{222} im Vergleich zu UVC_{254}. Für die Bestrahlung wurden jeweils 0,5 ml Suspension (Bakterien, Bakteriensporen und Pilze) bzw. 0,2 ml Suspension (Viren) in eine 35 mm Kulturschale überführt. Neben der Bestrahlung mit UVC-Strahlung wurde zu Vergleichszwecken auch die Wirkung einer Inkubation in Ethanol (10 s) getestet. Untersucht wurden übliche Umwelt- und Krankenhauskeime. Die verschiedenen Bakterienstämme reagierten unterschiedlich sensitiv, wobei *Staphylococcus aureus* und *Campylobacter jejuni* am empfindlichsten reagierten, während *Salmonella enterica* und *Bacillus cereus* unempfindlicher waren. Für alle untersuchten Bakterienstämme konnte nach einer Bestrahlung mit 36 mJ cm^{-2} UVC_{222} keine Koloniebildung mehr nachgewiesen werden. UVC_{222} und UVC_{254} waren ähnlich effektiv in Bezug auf die Inaktivierung von Bakterien. Eine detailliertere Auflistung der Ergebnisse kann Tabelle 3.1 entnommen werden. Nach Inkubation mit Ethanol konnte keine Koloniebildung mehr detektiert werden. Endosporen erwiesen sich erwartungsgemäß als strahlenresistenter. Für Endosporen von *Bacillus cereus* und *Clostridium sporogenes* konnte nach Bestrahlung mit 96 mJ cm^{-2} UVC_{222} keine Koloniebildung mehr nachgewiesen werden. Für *Clostridiodes difficile* wurde der gleiche Effekt schon bei einer Dosis von 50 mJ cm^{-2} erreicht. Alle Endosporen reagierten unempfindlicher auf eine Bestrahlung mit UVC_{254} (s. Tabelle 3.1). Ethanol hatte keinen Abtötungseffekt.

Auch die von Narita et al. (2020) untersuchten Pilzstämme zeigten Unterschiede bezüglich der Strahlensensitivität. In Untersuchungen am Hefepilz *Candida albicans* konnten nach Bestrahlung mit einer Dosis von 72 mJ cm^{-2} UVC_{222} oder UVC_{254} keine lebenden Zellen mehr nachgewiesen werden. Zur Abtötung von Pilzsporen können weit höhere Dosen zur vollständigen Abtötung notwendig sein. So wird dieser Effekt für *Aspergillus niger*-Sporen erst bei einer Dosis von 500 mJ cm^{-2} UVC_{222} erreicht, während *Trichophyton rubrum* bereits bei einer Dosis von 72 mJ cm^{-2} UVC_{222} abgetötet wird. UVC_{254} war bei diesen Untersuchungen wesentlich effektiver als UVC_{222}. Neben Pilzsporen untersuchte die Autorschaft auch das Wachstum der Pilze anhand der Hyphenbildung. Auch hier erwies sich UVC_{254} als wesentlich effektiver als UVC_{222}. So war bereits bei einer Dosis von 250 mJ cm^{-2} UVC_{254} in *Aspergillus niger* das Wachstum der Hyphen stark inhibiert, während bei Einsatz von UVC_{222} selbst mit einer Dosis von 1 000 mJ cm^{-2} nur ein sehr geringer Effekt auf das Hyphen-Wachstum beobachtet werden konnte. Auch bei der Bestrahlung von Pilzhyphen der Art *Trichophyton rubrum* war nach einer Dosis von 72 mJ cm^{-2} UVC_{254} das Wachstum stark eingeschränkt, während eine Dosis von 250 mJ cm^{-2} UVC_{222} keinen Effekt auf das Wachstum hatte. Nach Inkubation mit Ethanol konnten bei keinem der untersuchten Pilzstämme Kolonien oder Pilzhyphen nachgewiesen werden.

Die zwei untersuchten Virusstämme zeigten ebenfalls eine sehr unterschiedliche Sensitivität sowohl gegenüber UVC_{222}- als auch gegenüber UVC_{254}-Strahlung. Während das *feline Calicivirus* (FCV, unbehülltes Virus) mit einer Dosis von 36 mJ cm^{-2} UVC zwar inhibiert, aber nicht

vollständig abgetötet wurde, war nach Bestrahlung des *Influenza*-Virus A (behülltes Virus) bereits bei einer Dosis von 6 mJ cm^{-2} UVC kein pathogener Effekt mehr nachweisbar. In diesen Fällen waren UVC_{222} und UVC_{254} gleich wirksam. Die Inkubation mit Ethanol hatte nur für das *Influenza*-Virus A einen inaktivierenden Effekt.

In einem anderen Setting wurde die Virusinhibition durch UVC_{222} untersucht (Buonanno et al. 2020, Buonanno et al. 2021b). Zwei humane Coronaviren-Spezies (behüllte Viren), *alpha HCoV-229E* und *beta HCoV-OC43*, die über eine Infektion der Atmungsorgane Niesen und Husten auslösen, wurden als Aerosol mit UVC_{222} bestrahlt. Als Maß für die Infektiosität der Proben wurde in Zellkultur die $TCID_{50}$ bestimmt. Eine Abtötung der Viren zu 99,9 % wurde dabei bereits bei einer Dosis von 1,7 mJ cm^{-2} (*alpha HCoV-229E*) bzw. 1,2 mJ cm^{-2} (*beta HCoV-OC43*) erreicht.

Um die bakterizide Wirkung von UVC_{222} in Bezug auf das Infektionsrisiko bei Hautwunden zu untersuchen, wurden von Narita et al. (Narita et al. 2018a; Narita et al. 2018b) eine In-vivo-Studie in *BALB/c* Mäusen mit Methicillin-resistenter *Staphylococcus aureus* (MRSA)-Infektion auf gesunder Haut und in Wunden durchgeführt. Die Bestrahlung der Haut mit 75 mJ cm^{-2} UVC_{222} führte zu einer Keimminderung um ca. zwei Zehnerpotenzen (4,5 log CFU auf < 2,8 log CFU). Die nicht inaktivierten Keime auf der Haut sind vermutlich auf Abschattung in den Hautfurchen (sulci cutis) oder in Haarfollikeln zurückzuführen. Die Bestrahlung infizierter Wunden führte ebenfalls zu einer Verminderung der Keimlast. Mit einer Verminderung um 0,9 log CFU nach Bestrahlung mit 75 mJ cm^{-2} UVC_{222} war die Inhibition allerdings im Vergleich zur intakten Haut geringer. Auch bei einer Dosis von 1500 mJ cm^{-2} UVC_{222} wurde nur eine Verminderung von 1,6 log CFU erreicht. Der verminderte Effekt beruht vermutlich auf der absorbierenden Wirkung des stark proteinhaltigen Wundexsudates. Ab einer Dosis von 150 mJ cm^{-2} konnte bis zu zwölf Tagen nach Bestrahlung, also während der Wundheilung, noch eine Keimreduktion gemessen werden. UVC_{254} erwies sich häufig als etwas effektiver als UVC_{222}, allerdings wurden nach der Bestrahlung durch UVC_{254} neben der Keimreduktion auch DNA-Schäden (gemessen anhand gebildeter CPD) in den Zellen des Wundgrundes beobachtet, die nach Bestrahlung mit UVC_{222} nicht auftraten.

In einem weiteren Setting untersuchten Ponnaiya et al. (2018) in *SKH1* Mäusen MRSA-infizierte Hautareale nach Bestrahlung mit UVC_{222} und UVC_{254}. Allerdings ist zu beachten, dass hier die Bakterien auf eine Folie aufgebracht wurden, die ein Eindringen in die Epidermis vor der Bestrahlung verhinderte. In den infizierten Arealen wurde eine Inzision gesetzt und sofort mit einer Naht verschlossen. Auch hier wurde für beide Bestrahlungsqualitäten eine signifikante Keimreduktion an Tag 2 und Tag 7 nach der Bestrahlung beobachtet.

In einer klinischen Studie untersuchten Fukui et al. (2020) an 20 Versuchspersonen den bakteriziden Effekt von UVC_{222}. Bestrahlt wurde ein Areal auf dem Rücken mit einer Dosis von 500 mJ cm^{-2} UVC_{222}. Vor Bestrahlung und 5 Minuten bzw. 30 Minuten nach Bestrahlung wurde die Haut abgestrichen und die Koloniebildung aus den Eluaten bestimmt. Die mittlere Kolonienzahl sank von 7,21±7,48 vor Bestrahlung auf 0,05±0,23 fünf Minuten nach Bestrahlung ab. 30 Minuten nach Bestrahlung wurde ein Mittelwert von 0,79±2,53 Kolonien ermittelt. Die Bestimmung von DNA-Schäden (CPD-Bildung) mit einem ELISA-Test ergab einen gering, aber signifikant erhöhten Wert in bestrahlten Hautbiopsien. In diesem Zusammenhang sollte erwähnt werden, dass der in dieser Studie beschriebene inaktivierende Effekt auf das Mikrobiom der Haut auch bei dem Einsatz von Fern-UVC-Strahlung in öffentlichen Räumen nicht auszuschließen ist. Welche Konsequenzen die potenzielle Inaktivierung des Mikrobioms durch eine dauerhafte Exposition für die Hautgesundheit hat, wurde bisher nicht ausreichend untersucht. Die oben beschriebenen Daten aus In-vitro- und In-vivo-Untersuchungen belegen den keimtötenden Effekt von UVC_{222}, der durchaus mit der Wirkung von UVC_{254} vergleichbar ist. Dies wird auch von Hessling et al. (2021) in einer Übersichtsarbeit,

die Veröffentlichungen zum Einsatz von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion aus den letzten 100 Jahren berücksichtigt, bestätigt. Laut Hessling et al. deuten die Veröffentlichungen darauf hin, dass eine Dosis von 100 mJ cm^{-2} UVC_{222} alle Krankheitserreger um mehrere Größenordnungen reduziert. Es sei an dieser Stelle bemerkt, dass diese Dosis etwa viermal höher als der EGW zum Schutz vor aktinischer UV-Gefährdung der Augen und der Haut von 22,7 mJ cm^{-2} bei 222 nm ist (siehe Abschnitt 3.5.1). Deutlich wird aber auch, dass Mikroorganismen, deren Inaktivierung gewünscht ist, große Unterschiede in der Strahlungsempfindlichkeit aufweisen. Diese Unterschiede können abhängig von der Größe des Genoms, aber z. B. wie bei Viren auch durch die Existenz einer Virenhülle (behüllte und unbehüllte Viren) bestimmt sein. Auch die Pigmentierung der Mikroorganismen, wie z. B. bei dem Pilz *Aspergillus niger*, kann Grund für eine verminderte Sensitivität gegenüber UVC-Strahlung sein. Da UVC_{222} sehr stark von Proteinen und anderen biologischen Substanzen absorbiert und gestreut wird, sind diese Effekte bei der Anwendung von UVC_{222} besonders ausgeprägt. Aus dem gleichen Grund ergeben sich vermutlich auch die sehr unterschiedlichen Dosen, die in den beschriebenen In-vitro- und In-vivo-Settings zur effektiven Inaktivierung von Mikroorganismen benötigt wurden (Hessling et al. 2021, Hessling et al. 2022). In einer kürzlich erschienen Studie von Zwicker et al. (2022) werden diese Effekte sehr ausführlich beschrieben. So konnte gezeigt werden, dass Schweiß, Albumin oder Wundexsudat als Medium, in dem die Mikroorganismen bestrahlt werden, die inaktivierende Wirkung von UVC_{222} im Vergleich zu UVC_{254} stark reduzieren. Wurde, wie üblich, Kochsalzlösung als Medium verwendet, war UVC_{254} nur wenig effektiver. Die Autoren und Autorinnen untersuchten darüber hinaus auch die Wirkung von UVC_{233} und konnten zeigen, dass hier Schweiß den Inaktivierungseffekt fast gar nicht verminderte. Allerdings kam es bei der Bestrahlung von Hautbiopsien mit UVC_{233} stärker als bei UVC_{222} zur Induktion von DNA-Schäden in Zellen in den oberen Epidermisschichten. Tabelle 3.1 fasst die oben genannten Studien zur Wirkung von UVC-Strahlung auf Mikroorganismen zusammen. In allen dort genannten Veröffentlichungen erklären die Autoren und Autorinnen Interessenkonflikte.

Genau wie chemische Desinfektionsmittel, die für die Anwendung am Menschen zugelassen sind (z. B. Ethanol, Propanol, Povidion-Iod, Octenidin und Chlorhexidin), wirkt Fern-UVC-Strahlung unspezifisch auf die meisten Mikroorganismen und nicht alle Erreger werden mit der gleichen Effektivität inaktiviert. Aufgrund der unspezifischen Wirkung sind aber beide Methoden dazu geeignet, auch (multi)-resistente Keime zu inaktivieren. Dieser Umstand ist für die Keimreduktion als Prophylaxe wichtig und wird dazu genutzt, das Infektionsrisiko von Patienten und Patientinnen bei medizinischen Eingriffen zu senken und insbesondere eine Infektion mit multiresistenten Keimen zu vermeiden. Die oft hervorgehobene Eigenschaft von Fern-UVC-Strahlung, auch multiresistente Keime zu inaktivieren, trifft also auch auf herkömmliche, chemische Desinfektionsmittel zu.

Fazit

Zusammenfassend zeigen die Daten, dass der inaktivierende Effekt von UVC_{222} prinzipiell mit der Wirkung von UVC_{254} vergleichbar ist. Allerdings muss bei dem Einsatz berücksichtigt werden, dass UVC_{222} sehr stark von Proteinen und anderen biologischen Substanzen absorbiert und gestreut wird. Dies kann die inaktivierende Wirkung stark einschränken und ist vermutlich auch der Grund für eine zum Teil sehr unterschiedliche Strahlungsempfindlichkeit der Mikroorganismen, die inaktiviert werden sollen. Dabei besteht die Möglichkeit, dass bei dem Einsatz von Fern-UVC-Strahlung in öffentlichen Räumen auch das Mikrobiom der menschlichen Haut und der Augenoberfläche in Mitleidenschaft gezogen wird. Daten zum Einsatz von UVC_{233} belegen eine bessere Eindringtiefe aufgrund der geringeren Absorption durch Proteine, die mit einer im Vergleich zu UVC_{222} erhöhten DNA-Schädigung in epidermalen Zellen unterhalb der Hornschicht einhergeht. Grundsätzlich sollte auch vor dem routinemäßigen Einsatz von Fern-UVC-Strahlung, z. B. zur Desinfektion vor medizinischen Eingriffen, eine Nutzen-Risiko-

Analyse, insbesondere unter Einbeziehung möglicherweise vulnerabler Personen, durchgeführt werden. Berücksichtigt werden sollte dabei auch, dass chemische Desinfektionsmittel bei der Oberflächendesinfektion eine gute Wirkung zeigen. Die oft hervorgehobene Eigenschaft von Fern-UVC-Strahlung, auch multiresistente Keime zu inaktivieren, trifft auch auf herkömmliche, chemische Desinfektionsmittel zu.

Tabelle 3.1: Übersicht der Untersuchungen zur Wirkung der UVC-Strahlung auf Mikroorganismen. Die angegebenen Werte der Bestrahlung H (Dosis) beziehen sich auf die in den Literaturquellen angegebenen Bedingungen. Bestrahlungsdauer und Bestrahlungsstärke werden darin zumeist nicht angegeben.

Veröffentlichung	Untersuchungsobjekt	Medium, in dem exponiert wurde	UV-Quelle / Wellenlänge (ggf. Filterung)	Bestrahlung *H* (Dosis)	Effekt
Narita et al. 2020 *	Bakterienstämme *Staphylococcus aureus, Pseudomonas aeruginosa, Echerichia coli, Campylobacter jejuni, Salmonella enterica, Bacillus cereus*, *Clostridium sporogenes*	0,5 ml Suspension in einer 35 mm Kulturschale	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	36 mJ cm^{-2}	Keine Koloniebildung mehr bei allen untersuchten Bakterienstämmen, Empfindlichkeit der Bakterienstämme sehr unterschiedlich
			Quecksilberdampflampe / 254 nm		Effektiv wie 222 nm, nur für *Clostridium sporogenes* waren noch wenige Kolonien nachweisbar
	Endosporen von *Bacillus cereus* und *Clostridium sporogenes*		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	96 mJ cm^{-2}	Keine Koloniebildung mehr
			Quecksilberdampflampe / 254 nm		Lebende Endosporen konnten nachgewiesen werden
	Endosporen von *Clostridiodes difficile*		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	50 mJ cm^{-2}	Keine Koloniebildung mehr
			Quecksilberdampflampe / 254 nm	30 mJ cm^{-2}	Reduktion der lebenden Endosporen erreichte ein Plateau
	Hefepilz *Candida albicans*		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	72 mJ cm^{-2}	Keine lebenden Zellen mehr
			Quecksilberdampflampe / 254 nm		
	Pilzsporen *Aspergillus niger*		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	500 mJ cm^{-2}	Vollständige Abtötung
			Quecksilberdampflampe / 254 nm	250 mJ cm^{-2}	Vollständige Abtötung
	Pilzsporen *Trichophyton rubrum*		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	72 mJ cm^{-2}	Vollständige Abtötung
			Quecksilberdampflampe / 254 nm	36 mJ cm^{-2}	Vollständige Abtötung
	Pilzhyphen *Aspergillus niger*		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	1000 mJ cm^{-2}	Ein sehr geringer Effekt auf das Wachstum von *Aspergillus niger*
			Quecksilberdampflampe / 254 nm	250 mJ cm^{-2}	Wachstum stark eingeschränkt

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

	Pilzhyphen *Trichophyton rubrum*		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	250 mJ cm^{-2}	Ein sehr geringer Effekt auf das Wachstum von *Trichophyton rubrum*
			Quecksilberdampflampe / 254 nm	72 mJ cm^{-2}	Wachstum stark eingeschränkt
	Virusstamm Felines *Calicivirus* (unbehülltes Virus)	0,2 ml Suspension in einer 35 mm Kulturschale	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	36 mJ cm^{-2}	Inhibiert, aber nicht vollständig abgetötet
			Quecksilberdampflampe / 254 nm		Gleich wirksam wie 222 nm
	Virusstamm *Influenza*-Virus A (behülltes Virus)		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	6 mJ cm^{-2}	Kein zellpathogener Effekt mehr nachweisbar
			Quecksilberdampflampe / 254 nm		Gleich wirksam wie 222 nm
Buonanno et al. 2020 *, Buonanno et al. 2021b	Coronavirus (behüllt) *alpha HCoV-229E*	Aerosol	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	1,7 mJ cm^{-2}, (Bestrahlungsstärke 100 μW cm^{-2})	Abtötung der Viren zu 99,9 %
	Coronavirus (behüllt) *beta HCoV-OC43*			1,2 mJ cm^{-2}, (Bestrahlungsstärke 100 μW cm^{-2})	Abtötung der Viren zu 99,9 %
Narita et al. 2018a *, Narita et al. 2018b	In-vivo-Studie in BALB/c-Mäusen mit MRSA-Infektion auf gesunder Haut	Maushaut, in vivo	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	75 mJ cm^{-2}	Keimminderung um 2 log CFU, aber 2,5 log CFU verblieben auf der Haut
	In-vivo-Studie in BALB/c-Mäusen mit MRSA-Infektion in Wunden		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	75 mJ cm^{-2}	Keimminderung um 0,9 log CFU
			KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	1500 mJ cm^{-2}	Keimminderung von 1,6 log CFU
			Quecksilberdampflampe / 254 nm		Etwas effektiver als 222 nm, allerdings auch DNA-Schäden in den Zellen des Wundgrundes

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

Ponnaiya et al. 2018 *	MRSA-infizierte Hautareale in *SKH1*-Mäusen	Maushaut, in vivo	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	40 mJ cm^{-2} und 300 mJ cm^{-2}	Signifikante Keimreduktion an Tag 2 und Tag 7 nach der Bestrahlung, ohne Hautschäden
			Quecksilberdampflampe / 254 nm		Signifikante Keimreduktion an Tag 2 und Tag 7 nach der Bestrahlung
Fukui et al. 2020 *	Versuchspersonen, ein Areal auf dem Rücken	Menschenhaut, in vivo	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	500 mJ cm^{-2}	Die mittlere Kolonienzahl sank von 7,21±7,48 vor Bestrahlung auf 0,05±0,23 fünf Minuten nach Bestrahlung ab und auf 0,79±2,53 dreißig Minuten nach Bestrahlung. Signifikant erhöhter Wert der CPD in bestrahlten Hautbiopsien.

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

3.4 Mögliche Wirkungen von Fern-UVC-Strahlung auf Auge und Haut

3.4.1 Eindringtiefe und Absorption von UV-Strahlung

Für gesundheitsrelevante Wirkungen von UV-Strahlung ist die Eindringtiefe in Haut und Auge von besonderer Bedeutung (siehe Abbildung 3.4 und Abbildung 3.5). Die Eindringtiefe bezeichnet die Wegstrecke, nach der die optische Strahlungsenergie beim Eindringen in ein bestimmtes Medium auf 37 % (1/e) abgeschwächt wird. Sie ist von der Wellenlänge und dem Medium abhängig. Die Haut stellt das größte Organ des Menschen dar und ist durch ihre Struktur (siehe Abbildung 3.4) zugleich physikalische Barriere für die Einwirkung von Umweltnoxen auf den Organismus. Sie kann aber auch selber (als Organ) von den schädigenden Einflüssen (z. B. UV-Strahlung) betroffen sein. Die Dicke der Haut und der einzelnen Hautschichten ist sehr variabel und hängt unter anderem von der Lokalisation der betrachteten Hautareale ab. Die oberste Schicht der Haut, die Epidermis (50 µm bis 150 µm), ist ein mehrschichtiges, verhornendes Plattenepithel, das hauptsächlich von Keratinozyten gebildet wird. Ausgehend von der Basalzellschicht differenzieren Keratinozyten aus, bilden dabei die Stachelzellschicht (Stratum spinosum), die Körnerzellschicht (Stratum granulosum) sowie als kernlose Zellen die Hornschicht (Stratum corneum, 8 µm bis 20 µm) und werden schließlich als Hornschuppen abgestoßen. Auf diesem Weg erneuert sich die Epidermis etwa alle vier Wochen. Es wird davon ausgegangen, dass die Ursprungszellen für Hautkrebs in der Basalzellschicht und in den Haarfollikeln lokalisiert sind (Blanpain 2013, Gaggioli und Sahai 2007, Garcia et al. 2011). Längerwellige UV-Strahlungsanteile, wie UVB- und UVA-Strahlung, dringen tiefer in die Haut ein (37 % der UV-Strahlung bei 300 nm beziehungsweise 340 nm erreichen eine Tiefe von 15 µm beziehungsweise 54 µm) als UVC-Strahlung (Finlayson et al. 2022). Messungen haben gezeigt, dass 82 % der Energie einer UVC_{254}-Bestrahlung durch 20 µm Hornschicht absorbiert wird (Bruls et al. 1984), dennoch werden bei dieser Wellenlänge noch DNA-Schäden in epidermalen Zellen induziert (Starzonek et al. 2019). Im Fern-UVC-Spektralbereich wird die Hornschicht kaum durchdrungen, weil die Strahlungsenergie von Proteinen, insbesondere von Peptidbindungen, stark absorbiert wird (Preiss und Setlow 1956).

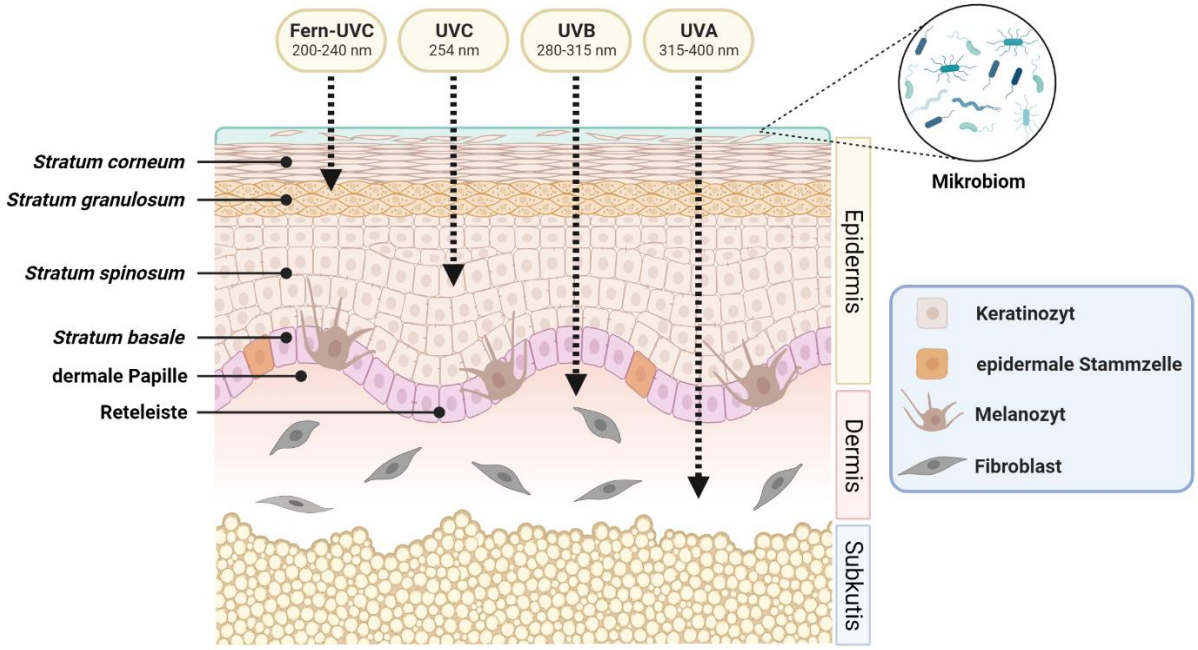


Abbildung 3.4: *Schematische Darstellung der prinzipiellen Eindringtiefen optischer Strahlung in die Haut des Menschen bei verschiedenen UV-Wellenlängen (erstellt mit BioRender).*

Am Auge bildet die Tränenflüssigkeit auf dem Epithel der Hornhaut (Cornea) die äußere Barriere zum Schutz des Auges vor schädlichen Umwelteinwirkungen (Masoudi 2022, Peter et al. 2023, Robciuc et al. 2014). Die präkorneale Tränenflüssigkeit ist eine komplexe Mischung aus spezifischen residenten Mikroorganismen, Proteinen, Lipiden, Metaboliten und Elektrolyten. Sie ist grob in drei Schichten unterteilt: die oberflächliche Lipidschicht, eine wässrige Mittelschicht und die innerste Muzinschicht. Die Proteine in der wässrigen Mittelschicht sind für die Erfüllung von Aufgaben zuständig, die die Immun- und Entzündungsreaktionen sowie die Wundheilung umfassen. Am Auge wird Fern-UVC-Strahlung nur zu einem geringen Teil in der Tränenflüssigkeit absorbiert. Es sei in diesem Zusammenhang darauf hingewiesen, dass unter bestimmten Umständen etwa 80 % der Fern-UVC-Strahlung in der Lage ist, die Tränenflüssigkeit zu durchdringen, obwohl die zugrunde liegende Literatur keine Angabe zur Schichtdicke der untersuchten Tränenflüssigkeit macht (Michalos et al. 1994).

Die oberflächlichen Flügelzellen fungieren wie das Stratum corneum der Haut als Schutzschild für das darunterliegende Hornhautepithel. Das Hornhautgewebe mit dem größten Absorptionskoeffizienten für UV-Strahlung ist die Bowman-Membran, gefolgt vom Endothel, und, aufgrund seiner großen Schichtdicke, das Stroma (Peris-Martinez et al. 2021; vgl. Abbildung 3.5). Über die gesamte Dicke des Hornhautstromas werden 70 % bis 75 % der UV-Strahlung im Wellenlängenbereich < 310 nm absorbiert (Kolozsvari et al. 2002). Die für eine Krebsauslösung empfindlichen Stammzellen des Hornhautepithels sind in der Basalzellschicht des Hornhautlimbus lokalisiert und werden durch mindestens drei Zellschichten abgeschirmt (Lavker et al. 2004). Im Hornhautepithel wird nahezu die gesamte UVC-Strahlung absorbiert. Die Absorptionsraten werden auf hohe Anteile an Tryptophanresten in den Proteinen des Stromas (Mitchell und Cenedella 1995) und auf hohe Ascorbinsäuregehalte im Epithel zurückgeführt (Ringvold 1997, Ringvold 1998, Brubaker et al. 2000).

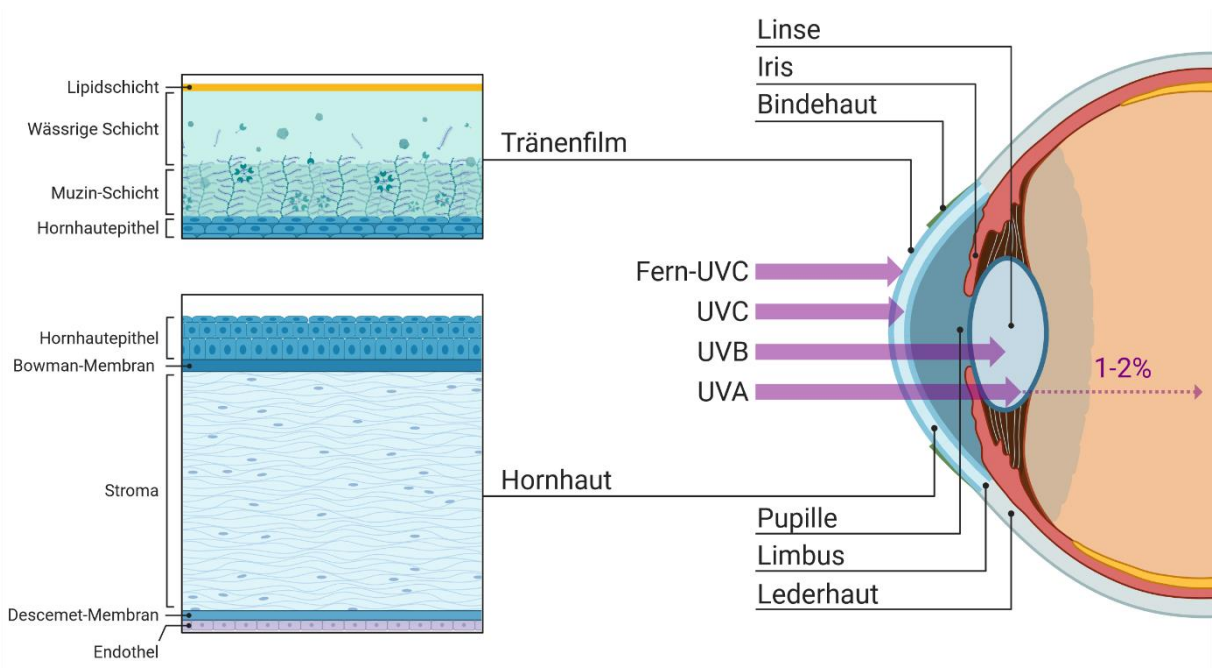


Abbildung 3.5: Schematische Darstellung der prinzipiellen Eindringtiefen optischer Strahlung in das Auge des Menschen bei verschiedenen UV-Wellenlängen (erstellt mit BioRender).

Während sowohl die UVB-Strahlung als auch die UVA-Strahlung mit Wellenlängen unter 365 nm von der Augenlinse vollständig absorbiert werden, erreichen 1 % bis 2 % der UVA-Strahlung oberhalb von 365 nm noch die Netzhaut (Glickman 2011, Krutmann et al. 2014, Mainster und Turner 2010).

Die äußerste Schutzbarriere von Haut und Augenoberfläche bilden deren Mikrobiota, die sich aus spezifischen residenten Mikroorganismen zusammensetzen, die in einem Mikrobiom vorkommen (Masoudi 2022, Wang et al. 2022, Azzimonti et al. 2023). Die Schutzbarrieren bieten einen Schutz vor verschiedenen Umweltnoxen und sind andererseits z. B. der UV-Strahlung unmittelbar ausgesetzt. Durch entsprechende Exposition können sich die Mikrobiota verändern (Burns et al. 2019, Patra et al. 2019).

3.4.2 Wirkungen von UVC-Strahlung

Für schädigende Wirkungen von UVC-Strahlung ist entscheidend, ob und inwieweit durch die kurzwellige energiereiche Strahlung natürliche Schutzbarrieren beeinträchtigt oder überwunden werden. In Abschnitt 3.3 wurde beschrieben, dass Mikroorganismen auf der Haut durch den Einsatz von Fern-UVC-Strahlung inaktiviert werden können. Es kann nicht ausgeschlossen werden, dass bei Einsatz von Fern-UVC-Strahlung im öffentlichen Raum – auch wegen ihres effektiveren Inaktivierungspotenzials z. B. im Vergleich zu UVA- und UVB-Strahlung – das Mikrobiom der exponierten menschlichen Haut und der Augenoberfläche beeinträchtigt werden kann. Ein gestörtes Mikrobiom, die sogenannte Dysbiose, wird auch mit oxidativem Stress in Verbindung gebracht und beides ist an der Pathogenese verschiedener Krankheiten, einschließlich bösartiger Hauterkrankungen, beteiligt (Peter et al. 2023, Azzimonti et al. 2023).

Es gibt aber gute Gründe für die Annahme, dass auch humane Zellen in der Haut und im Auge an sensiblen Endpunkten wie der DNA geschädigt werden. Die kurzwellige energiereiche UVC-Strahlung hat im Vergleich zur UVB-Strahlung zwar eine geringere Eindringtiefe, aber eine höhere Potenz für die Bildung von prämutagenen Läsionen wie Cyclobutan-Pyrimidin-Dimeren (CPD) und Pyrimidin(6-4)-Pyrimidon-Photoprodukten (6-4PPs). Das Wirkungsspektrum für das DNA-Photoprodukt CPD ähnelt dem UV-Spektrum, das ein Erythem auslöst, und dem Spektrum, das in der menschlichen Haut zur Melanogenese und damit zum natürlichen UV-Schutz durch Pigmentierung führt (Young et al. 1998, Parrish et al. 1982). Bei der DNA liegt die maximale Energieabsorption (100 %) im UVC-Spektralbereich bei 260 nm, während im UVB-Spektralbereich bei 290 nm 20 % und bei 300 nm nur noch 3 % der Strahlungsenergie absorbiert werden (Cadet und Douki 2018).

Auf zellulärer Ebene wird Fern-UVC-Strahlung durch Absorption im Zytoplasma erheblich abgeschwächt, bevor sie den Zellkern erreicht (Green et al. 1987). In einer Untersuchung von Ong et al. (2022) wurden Monolayer-Zellkulturen (Keratinozyten und Retinazellen) UVC-Strahlung verschiedener Wellenlänge (277 nm, 254 nm und 222 nm) und gleicher Bestrahlungsstärke ausgesetzt. Nach sechzigminütiger Bestrahlung mit UVC_{254} und UVC_{277} war kein Zellwachstum mehr zu beobachten und Apoptosemarker sowie die Induktion von CPD wurden nachgewiesen. Auch nach Bestrahlung mit UVC_{222} wurden zelluläre Effekte beobachtet: Es zeigte sich ein im Vergleich zur unbestrahlten Kontrolle immer noch deutliches, aber vermindertes Zellwachstum. Jedoch wurden keine Apoptosemarker und keine CPD nachgewiesen, obwohl die Anzahl an γH2AX-positiven[2] Zellen auf eine Schädigung der DNA schließen ließ.

[2] H2A ist ein Histonmolekül, das zusammen mit den Histonen H1, H2A, H2B, H3 und H4 das Chromatingerüst der DNA bildet. Die Phosphorylierung von H2A zu γH2AX ist Teil der zellulären Reaktion auf einen DNA-Schaden (DNA-Damage-Response, DDR). Während γH2AX-Foci im Zellkern einen Marker für Doppelstrangbrüche darstellen, weist eine pan-nukleäre Induktion von γH2AX auf genotoxischen Stress der Zelle hin (de Feraudy et al. 2010, Stope 2021).

Die Daten zeigen eindrücklich, dass auch UVC_{222} in Zellen eindringen kann und eine zelluläre Strahlenantwort hervorruft, wenn wie hier der schützende Effekt einer Hornschicht (Haut) fehlt.

Es ist bekannt, dass in Zellen durch UV-Strahlung dosisabhängig reaktive Sauerstoffspezies (ROS) gebildet werden, die ihrerseits oxidative Schäden an Proteinen, DNA und Lipiden verursachen können (Bose et al. 2020, de Jager et al. 2017, Volatier et al. 2022). In einem 3D-Hautmodell konnten Tavares et al. (2023) zeigen, dass auch Fern-UVC dosisabhängig ROS erzeugt.

3.4.3 Untersuchungen zur Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf die Haut

Epidemiologische Studien über Hautkrebs zeigen eindeutig, dass solare UV-Strahlung (UVB- und UVA-Strahlung) weltweit als Risikofaktor für die Entstehung von Hautkrebs anzusehen ist (Moan et al. 2015, Lucas et al. 2019). In Deutschland erkrankten im Jahr 2017 22 900 Menschen erstmals an einem malignen Hautmelanom (RKI und GEKID 2021). Im Jahr 2016 wurden in Deutschland 230 000 Neuerkrankungen an nicht-melanozytären Hautkrebsformen registriert (RKI und GEKID 2019). In-situ-Karzinome (auf die Epidermis begrenzte bösartige Tumore) sind in diesen Zahlen nicht berücksichtigt. Während pro Jahr ca. 3 000 Sterbefälle auf eine Melanomerkrankung zurückzuführen waren, verstarben ca. 1 000 Erkrankte am nicht-melanozytären Hautkrebs (Destatis 2020). Mit einem Anteil von etwa 10 % an allen Hautkrebserkrankungen ist das maligne Melanom für drei Viertel der Sterbefälle verantwortlich. Obwohl der ursächliche Faktor der Umgebungsstrahlung in erster Linie auf die UVB-Komponente zurückzuführen ist (de Gruijl und Forbes 1995), kann auch UVA-Strahlung allein kanzerogen wirken (Wischermann et al. 2008, Jin et al. 2022). Es wird angenommen, dass hier oxidativer Stress beteiligt ist. Die oxidative Modifikation der DNA ist ein wichtiger Mechanismus der UVA-induzierten Hautschädigung und Krebsentstehung. Obwohl die Hautkarzinogenese generell in erster Linie auf UV-bedingte DNA-Schäden zurückgeführt wird, wird zunehmend auch die bedeutende Rolle der durch ROS ausgelösten Entzündung bei der UV-induzierten Karzinogenese gesehen. So haben chronische Entzündungsprozesse in der Haut, die selbst UV-getriggert sein können, einen promovierenden Effekt auf UV-induzierte Hauttumoren. Insbesondere das Plattenepithelkarzinom und das Basalzellkarzinom weisen wichtige entzündliche Komponenten auf (Landsberg et al. 2012, Neagu et al. 2019). Inwiefern Fern-UVC-getriggerte ROS-Induktion entzündliche Reaktionen auslöst und zur Krebsentstehung beitragen kann, muss noch weiter untersucht werden.

Fern-UVC-Strahlung wird im Stratum corneum stärker abgeschwächt als die längeren UVC-Wellenlängen oder UVB-Strahlung. Nur sehr geringe Anteile der Fern-UVC-Strahlung durchdringen die oberflächlichen Schichten der Epidermis, und die tieferen Epidermisschichten bis hin zur Basalzellschicht werden praktisch gar nicht erreicht. Daher gehen einige Autoren davon aus, dass Fern-UVC-Strahlung bei gesunder Haut kein relevantes Krebsrisiko darstellt. Z. B. wird das Risiko der Photokarzinogenese aufgrund einer chronischen Exposition gegenüber 222 nm von Nishigori et al. (2023) ca. sieben Größenordnungen niedriger geschätzt als das Risiko aufgrund einer Exposition gegenüber 300 nm oder 254 nm. Diese Einschätzung basiert allerdings auf Messungen der UV-Transmission der Haut für Wellenlängen über 235 nm (Yamano et al. 2021), bei denen die Transmission für Wellenlängen unter 235 nm außerhalb des Messbereichs lag und daher nur geschätzt werden könnte.

Es gibt eine Reihe experimenteller In-vitro- und In-vivo-Untersuchungen über die Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf die menschliche Haut (z. B. Buonanno et al. 2017, Hickerson et al. 2021, Fukui et al. 2020, Buonanno et al. 2021a, Zwicker et al. 2022, Tavares et al. 2023) und die Haut haarloser Mäuse (z. B. Buonanno et al. 2016, Yamano et al. 2020, Forbes et al. 2021). Obwohl hier viel höhere Dosen verwendet wurden, als in einem Expositionsszenario für den

Menschen zulässig wäre, hat die überwiegende Mehrheit der Studien keine messbaren negativen Auswirkungen und keine Hinweise auf die Induktion von Hautkrebs gezeigt (Welch et al. 2023, Blatchley et al. 2023).

In einer Studie aus dem Jahr 2015 (Woods et al. 2015) wurden bei zwei von vier gesunden Versuchspersonen der Hautphototypen I und II Anzeichen für eine Hautrötung und CPD gefunden. Verwendet wurde hier ein ungefilterter UVC-Strahler mit einer Peak-Wellenlänge von 222 nm im Dosisbereich unterhalb der Schwelle für die bakteriostatische Wirkung. Der UV-Emissionsanteil im Wellenlängenbereich > 250 nm lag bei 3 %. Eine Schädigung der Zellen in der Basalzellschicht wird von den Autoren und Autorinnen auf diese Exposition mit langwelligen UVC-Emissionsanteilen zurückgeführt, wenn über den Spitzen der dermalen Papillen[3] (siehe Abbildung 3.4) liegende Basalzellen nicht ausreichend durch das darüber liegende Gewebe abgeschirmt wurden. Diese Untersuchung wurde bei ähnlichen und höheren Dosen von Fukui et al. (2020) wiederholt unter Verwendung optisch gefilterter Strahlung aus Excimerstrahlern ohne UVC-Emissionsanteile oberhalb von 230 nm (UVC_{222}). Hier konnten keine Anzeichen eines Erythems festgestellt werden. Es konnte jedoch eine kleine, aber signifikante Erhöhung der CPDs im Vergleich zu unbestrahlter Haut beobachtet werden. Auch Eadie et al. (2021) haben bei Exposition des Unterarms der menschlichen Haut Typ II durch UVC_{222}-Strahlung mit einer kumulativen Dosis von 1 500 mJ cm^{-2} keinen kutanen Effekt beobachtet. Erst eine Bestrahlung von 6 000 mJ cm^{-2} führte zu einer schwachen vorübergehenden gelblichen Verfärbung der exponierten obersten Schicht der Epidermis. Hier wurde bei Expositionen bis zu 18 000 mJ cm^{-2} kein Erythem beobachtet. CPDs wurden nicht untersucht. Buonanno et al. (2021a), die ein In-vivo-Hautmodell (EpiDerm) verwendeten, konnten nach Exposition mit 125 mJ cm^{-2} gefilterter Fern-UVC-Strahlung keine signifikant erhöhten Prämutagene (CPD) und keine anderen DNA-Läsionen beobachten; erst bei einer Exposition mit 500 mJ cm^{-2} wurde ein leichter Anstieg festgestellt. Einer Fern-UVC-Strahlungsdosis (UVC_{222}-Strahlung) von 500 mJ cm^{-2} setzten Yamano et al. (2020) zwei Genotypen von haarlosen Mäusen, die sehr anfällig für Karzinogenese sind, aus. Für diese Mäuse ergab sich ein schwacher Nachweis von erhöhten prämutagenen Läsionen, allerdings nur in den obersten Zellen der Epidermis. Dieses Ergebnis konnte in In-vivo-Studien an der menschlichen Haut verifiziert werden (Hickerson et al. 2021). Zwicker et al. (2022) konnten zeigen, dass eine Bestrahlung der exzidierten menschlichen Haut im UVC_{233}-Bereich mit 40 mJ cm^{-2} zu einer CPD-Bildung direkt unter dem Stratum corneum führt und nach 24 h keine CPDs mehr nachgewiesen werden konnten. Hier wurde darauf hingewiesen, dass eine akute Schädigung der oberflächlichen Schichten der Epidermis keine Rolle bei verzögerten Effekten spielt, da diese Zellen innerhalb weniger Tage absterben. In einer aktuellen Studie von Tavares et al. (2023) zeigten Untersuchungen an rekonstruierter menschlicher Haut (RHS) nach einmaliger Bestrahlung mit 500 mJ cm^{-2} und 1500 mJ cm^{-2} UVC_{222} keine signifikante Induktion von CPD oder 6,4-PP-Photoprodukten. Allerdings wurde 48 Stunden nach Bestrahlung mit der höchsten Dosis eine Verdickung der Epidermis beobachtet. Bei der Untersuchung des Proteoms zeigte eine Pathway-Analyse für die meisten Pathways keine Änderungen im Vergleich zur unbestrahlten Kontrolle. Lediglich für Regenerationsprozesse der Haut ergaben sich Hinweise auf eine mögliche Inhibition nach Bestrahlung mit UVC_{222}. Allerdings konnte in den RHS-Proben durch UVC_{222}-Bestrahlung eine erhöhte Expression der Matrix-Metalloproteinasen MMP-1 und MMP-9 nachgewiesen werden, die im

[3] Epidermis und Dermis sind miteinander verzahnt. Die Ausstülpungen der Epidermis in die Dermis werden als Reteleisten bezeichnet. Die Ausstülpungen der Dermis in die Epidermis werden als dermale Papillen bezeichnet. Die oberste Spitze der dermalen Papillen ragen weit in die Epidermis hinein, sodass die darüber liegenden Basalzellen der Hautoberfläche sehr nahekommen können (vgl. Abbildung 3.4).

Zusammenhang mit UV-induzierter Hautalterung stehen. Gleichzeitig wurde auch die verstärkte Expression des Inhibitors dieser Metalloproteinasen (TIMP-1) nachgewiesen. Zusammen mit einer ebenfalls detektierten Induktion von ROS wurden demnach in der RHS durch UVC_{222} induzierte Strahleneffekte beobachtet. In chronisch bestrahlten Mäusen wiederum wurden nach 40 Tagen, mit einer täglichen achtstündigen Strahlenexposition (25 mJ cm^{-2} UVC_{222}) keine strahlenbedingten strukturellen, histologischen Veränderungen gefunden. Bei der Untersuchung der Matrix-Metalloproteinasen zeigte nur MMP-9 eine leicht erhöhte Expression. Weder nach akuter noch nach chronischer Bestrahlung wurden durch UVC_{222} DNA-Schäden induziert.

Die Ergebnisse der ersten Studie zur Abschätzung des Hautkrebsrisikos und nichtkanzerösen Hautläsionen bei einer Langzeit-Exposition (15,2 Monate) gegenüber UVC_{222} ergaben keine Anzeichen auf ein erhöhtes Hautkrebsrisiko bei haarlosen Mäusen (Welch et al. 2023). Die in Gruppen gehaltenen 96 Tiere wurden fünf Tage pro Woche täglich acht Stunden inhomogenen Bestrahlungsstärken (Dosen 55 mJ cm^{-2} bis zu 400 mJ cm^{-2}) über 66 Wochen ausgesetzt. Die Dosimetrie in der Studie wurde mit einem Filmdosimeter (OrthoChromic-OC-1-Film) durchgeführt. Die Autorschaft fand auch keine Hinweise auf eine durch Fern-UVC-Strahlung verursachte Zunahme von nichtkanzerösen Hautläsionen.

Da Wirkungen in der Haut im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber Fern-UVC-Strahlung weitgehend von der Stratum corneum-Dicke (SCT) abhängen, ist zu berücksichtigen, dass die SCT nicht signifikant unterschiedlich ist zwischen Personen mit normaler Haut und empfindlicher Haut (Richters et al. 2017) und im Allgemeinen unabhängig von Geschlecht, Abstammung/Herkunft und Alter, wobei hier Haut älterer Menschen (durchschnittlich 50 Jahre alt) mit Haut jüngerer Menschen (durchschnittlich 29 Jahre alt) verglichen wurde (Tagami 2017). Unterschiede in der SCT sind statistisch nicht signifikant zwischen Personen, die an Hautkrebs erkrankt sind, und gesunden Personen (Lock-Andersen et al. 1997). Bei Säuglingen allerdings sind das Stratum corneum 30 % und die Epidermis 20 % dünner als bei Erwachsenen. Die Korneozyten sind 20 % und die Zellen der Körnerschicht 10 % kleiner als die von Erwachsenen, was auf einen schnelleren Zellumsatz bei Säuglingen hindeutet. Auch Dichte und Größenverteilung der Hautpapillen sind unterschiedlich. Eine ausgeprägte direkte strukturelle Beziehung zwischen der Morphologie des Stratum corneum und den dermalen Papillen wurde ausschließlich bei Säuglingshaut beobachtet (Stamatas et al. 2010).

Belastbare Erkenntnisse über Wirkungen regelmäßiger oder länger andauernder Exposition durch Fern-UVC-Strahlung, z. B. an verletzter oder geschädigter Haut oder auf empfindliche Personengruppen wie Kinder, liegen noch nicht vor (BfS 2022).

3.4.4 Untersuchungen zur Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf das Auge

Die Exposition des menschlichen Auges gegenüber UVB- und UVA-Strahlung wurde durch Labor- und epidemiologische Studien gut untersucht und ein Zusammenhang mit altersbedingten Augenerkrankungen des vorderen Augenabschnitts wie Pterygium (Threlfall und English 1999), Tröpfchenkeratopathien (Gray et al. 1992) und kortikaler Katarakt (Threlfall und English 1999) hergestellt. Es gibt auch Hinweise auf einen Zusammenhang von UVC- und UVB-Strahlung und Hornhautentzündung (Photokeratitis) sowie der Bindehautentzündung (Photokonjunktivitis) bei akuter Einwirkung und Hauttumoren der Augenlider (Basalzellkarzinome und Plattenepithelkarzinome) und maligne Melanome der Augenlider und der Bindehaut bei Langzeitexposition (Hampel et al. 2022). An den Augenlidern ist ca. ein Fünftel der zu 80 % im stark UV-exponierten Kopf-Hals-Bereich auftretenden Basalzellkarzinome lokalisiert (Shi et al. 2017). Das Basalzellkarzinom ist mit rund 90 % der häufigste maligne Lidtumor; demgegenüber liegen die Anteile für Augentumoren mit Metastasierungspotenzial, die des

Plattenepithelkarzinoms der Lider bei 5 bis 10 %, des Talgdrüsenkarzinoms bei 1 bis 5,5 %, des Melanoms bei < 1 % und des Merkel-Zell-Karzinoms bei ca. 0,5 % (Gniesmer et al. 2023).

Die Auswirkungen einer Exposition des Auges gegenüber Strahlung einer Wellenlänge unterhalb von 254 nm untersuchten bislang nur wenige Studien (Sliney et al. 1991, Kaidzu et al. 2019, Pitts 1974, Pitts und Tredici 1971, Sugihara et al. 2023). Den Schwellenwert für Photokeratitis an der Kaninchenhornhaut haben Sliney et al. (1991) bei einer Wellenlänge von 193 nm mit einem Excimerlaser ermittelt. Die Autoren schlussfolgern, dass die Eindringtiefe der verwendeten kurzwelligen Strahlung in die Epithelzellschicht beschränkt ist und ein intakter Tränenfilm helfen kann, die Hornhaut vor der schwachen gestreuten Laserstrahlung zu schützen. Pitts und Tredici (1971) haben festgestellt, dass die Hornhaut bei 270 nm am empfindlichsten auf eine UV-Strahlenexposition mit Symptomen einer Photokeratitis reagiert. Für Photokeratitis ermittelten Kaidzu et al. (Kaidzu et al. 2019, Kaidzu et al. 2021) mittels Spaltlampen-Biomikroskopie, Färbung und Oberflächenkartierung an einem Rattenaugenmodell Schwellenwerte 24 Stunden nach Exposition gegenüber vier UVC-Wellenlängen (207 nm, 222 nm, 235 nm und 254 nm) sowie einer Wellenlänge im UVB-Spektralbereich (311 nm). Ein Effekt auf die Hornhaut wurde hier für 207 nm und 222 nm ab den Schwellenwerten 15 000 mJ cm^{-2} bzw. 5 000 mJ cm^{-2} nachgewiesen. Diese Expositionen liegen jedoch weit über den aktuell gültigen Expositionsgrenzwerten (etwa 300- beziehungsweise 220-mal höher). Kaidzu et al. (Kaidzu et al. 2019, Kaidzu et al. 2021) nahmen auch eine histologische Beurteilung der Hornhaut vor, wobei CPD als Marker für DNA-Schäden verwendet wurde. Die Tiefe der beobachteten CPD variierte mit der Wellenlänge; bei 207 nm und 222 nm wurde der CPD-Biomarker nur in den oberen oberflächlichen Zellen, die im normalen Lebenszyklus des Hornhautepithels innerhalb weniger Tage abgestoßen werden, beobachtet. Beim Auge befinden sich die für eine Krebsauslösung empfindlichen Zellen der Hornhaut im Limbus, der Übergangszone zwischen der Hornhaut und Lederhaut (Sklera). UV-Strahlung der Wellenlängen 311 nm und 254 nm dringt bis in das Hornhautendothel ein, 235 nm in den mittleren Teil des Hornhautstromas, 222 nm und 207 nm in den äußeren Teil des Hornhautepithels (Kaidzu et al. 2019, Kaidzu et al. 2021). Auch in der Hornhaut von Schweinen, die in Größe und Struktur der des menschlichen Auges ähnelt, erreichte UVC-Strahlung der Wellenlänge 222 nm nur die oberflächliche Schicht des limbalen Epithels; folglich werden auch hier keine schädigenden Wirkungen auf Stammzellen im basalen Teil des Hornhautlimbus angenommen (Kaidzu et al. 2023). Die von Kaidzu et al. (Kaidzu et al. 2019, Kaidzu et al. 2021) berichteten Schwellenwerte für Hornhautverletzungen durch Fern-UVC-Strahlung sind deutlich höher als die von Pitts berichteten, der die Expositionsdaten von 39 menschlichen Augen mit Kaninchen- und Primatendaten verglich (Pitts 1974).

In einer Studie mit 6 Probanden, die der UVC_{222}-Strahlung über 12 Monate etwa 6,7 Stunden pro Woche ausgesetzt waren, konnten Sugihara et al. (2023) keine akuten oder chronischen Schädigungen der Augen beobachten. Dabei überstieg die Dosis von etwa 2,8 mJ cm^{-2} pro Tag nicht den EGW zum Schutz vor aktinischer UV-Gefährdung der Augen bei 222 nm von 22,7 mJ cm^{-2} (siehe Abschnitt 3.5.1). Da Wirkungen in der Hornhaut im Zusammenhang mit der Exposition gegenüber Fern-UVC-Strahlung auch von der Tränenfilmdicke abhängen, ist es von Bedeutung, dass in einer Studie zur Tränenfilmdicke bei 49 Testpersonen kein signifikanter interindividueller Unterschied in der Dicke des muko-wässrigen Tränenfilms oder des Lipid-Tränenfilms bei gesunden Menschen und im Vergleich zu Patientinnen und Patienten mit trockenem Auge gefunden wurde (Segev et al. 2020). Laut Masoudi (2022) würde eine weiterführende Untersuchung des „normalen“ Tränenprofils und der davon abhängigen Funktionalität des Tränenfilms die Beteiligung eines breiten Spektrums von Stichprobenpopulationen erfordern, wobei Alter, Ethnie, Geschlecht, geografische und Umweltparameter berücksichtigt werden müssten.

Fazit zu den Untersuchungen an Haut und Auge

In gesunde menschliche Haut dringt Fern-UVC-Strahlung nur bis in die äußerste Schicht der Haut ein, die aus abgestorbenen Zellen besteht (Hornschicht, Stratum corneum). Voraussetzung ist, dass längerwellige Strahlenanteile zuverlässig herausgefiltert werden. Bei gefilterter UVC_{222}-Strahlung konnten prämutagene Läsionen nur in den obersten Zellen der Epidermis nachgewiesen werden, die innerhalb weniger Tage ohnehin abgestoßen werden. Voraussetzung für den Schutzeffekt ist eine gut ausgebildete intakte Hornschicht, deren Dicke auch altersabhängig variieren kann und die bei Säuglingen noch sehr dünn ist. Bisherige Studien zeigen, dass die suprabasalen Zellen und Zellen der Basalschicht der humanen Epidermis nicht geschädigt werden. In Bezug auf die Dicke der Hornschicht liefern die verfügbaren Daten keine Evidenz dafür, dass es signifikante Untergruppen von Personen gibt, die aufgrund von Alter, Geschlecht, Gesundheitszustand oder der Genetik systematisch empfindlicher gegenüber einer UVC-Exposition sind als der Durchschnitt. In Übereinstimmung mit Mäusestudien wird deshalb nicht von einem erhöhten Hautkrebsrisiko durch die Einwirkung von Fern-UVC-Strahlung auf die Haut ausgegangen. Epidemiologische Studien zur Hautkarzinogenese durch UVC-Strahlung liegen allerdings bisher nicht vor.

Zur Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf das Auge sind nur wenige Untersuchungen verfügbar. Im Gegensatz zur Haut besteht die äußerste Schicht der Augenhornhaut auch aus intakten Epithelzellen. Der Tränenfilm oberhalb des Hornhautepithels absorbiert Fern-UVC-Strahlung nur geringfügig, sodass ein intakter Tränenfilm bei diesen Wellenlängen nur einen sehr begrenzten Schutz bietet. Eine Schädigung der tieferliegenden Zellen durch Fern-UVC-Strahlung konnte in Tierversuchen bislang nicht nachgewiesen werden.

Bei der Bewertung der Effekte von Fern-UVC-Strahlung auf Haut und Augen und damit deren Einsatz in Anwesenheit von Menschen muss berücksichtigt werden, dass belastbare Erkenntnisse über Wirkungen regelmäßiger oder länger andauernder Exposition durch Fern-UVC-Strahlung, z. B. an verletzter oder geschädigter Haut oder auf empfindliche Personengruppen, wie Kinder, nicht vorliegen. Trotzdem kann aufgrund der starken Absorption von Fern-UVC-Strahlung durch Proteine und möglicherweise durch die ROS-Bildung eine schädigende Wirkung nicht ausgeschlossen werden. Dieser Effekt könnte insbesondere die Proteine der Tränenflüssigkeit des Auges betreffen, was gesundheitliche Folgen z. B. für den immunologischen Schutz vor Krankheitserregern haben kann (Masoudi 2022). Die Schädigung von Proteinen durch Fern-UVC-Strahlung und die daraus resultierende mögliche inhibierende Wirkung auf enzymatische Prozesse ist bisher kaum untersucht. Hier besteht Forschungsbedarf (siehe Kapitel 4). Neben möglichen schädigenden Effekten für Zellen muss auch der Effekt von Fern-UVC-Strahlung auf das Mikrobiom der Haut und der Augen untersucht werden.

Es ist zu betonen, dass in vielen Veröffentlichungen, die sich mit der Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf Haut (fünf von elf Studien) und Augen (alle Studien) befassen, Interessenkonflikte erklärt wurden (siehe Tabelle 3.2 und Tabelle 3.3). Daher befürchtet die SSK, dass die jeweils gezogenen Schlussfolgerungen einem Bias unterliegen.

Tabelle 3.2: Untersuchungen zur Wirkung der UVC-Strahlung auf die Haut.

Veröffentlichung	**Untersuchungs-objekt**	**UV-Quelle / Wellenlänge**	**Bestrahlung *H* (Dosis)**	**Effekt**		
				DNA-Schädigung		**Weitere Endpunkte**
				CPD	**6-4PP**	
Fukui et al. 2020 *	Versuchs-personen, ein Areal auf dem Rücken	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	500 mJ cm^{-2}	Kleine aber signifikante Erhöhung von CPD		Keine Anzeichen eines Erythems
Eadie et al. 2021	In vivo, Hauttyp II nach Fitzpatrick, Innenseite der Unterarme eines Probanden (Selbstversuche)	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	1 500 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 6,1 mW cm^{-2})			Keine sichtbare Hautveränderung
			6 000 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 6,1 mW cm^{-2})			Gelbfärbung der Haut, rückgängig innerhalb 24 h
			bis 18 000 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 6,1 mW cm^{-2})			Kein Erythem
Buonanno et al. 2021a *	In-vitro-3D-Modell der menschlichen Haut EpiDerm-FT	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	23 mJ cm^{-2} bis 150 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,59 mW cm^{-2})	Keine signifikante Zunahme von CPD	Keine signifikante Zunahme von 6-4PP	
			500 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,59 mW cm^{-2})	Kleine, aber statistisch signifikante Zunahme von CPD in der obersten Epidermisschicht	Keine signifikante Zunahme von 6-4PP	
		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, ungefiltert	23 mJ cm^{-2} bis 500 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,85 mW cm^{-2})	CPD Bildung	Bildung von 6-4PP	

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

Yamano et al. 2020 *	Zwei Genotypen von haarlosen Albinomäusen (Wildtyp und lichtempfindlicher *Xpa*-Knockout-Typ)	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	Wildtyp: 500 mJ cm^{-2}, Bestrahlung dreimal wöchentlich; *Xpa*-knockout-Typ: 50 mJ cm^{-2} und 100 mJ cm^{-2}, Bestrahlung zweimal wöchentlich (Dauer 10 Wochen, Bestrahlungsstärke 1 mW cm^{-2})			Nach 15-wöchiger Beobachtung keine Hauttumoren und Hornhautschäden
			Beide Genotypen 500 mJ cm^{-2}	CPD Bildung in der äußersten Schicht der Epidermis		Kein Erythem und Ohrenschwellung
Hickerson et al. 2021	Menschliches Ex-vivo-Vollhautmodell	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	6 100 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsdauer 1 000 s)	Minimale CPD-Bildung, beschränkt auf die obere Schicht der Epidermis		
		Schmalbandige UVB-Lampe / Emissionsmaximum bei 311 nm	515 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsdauer 188 s)	CPD-Bildung überall in der Epidermis		
	In vivo, Unterarme von zwei Probanden (Autoren der Studie)	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	6 100 mJ cm^{-2}	Minimale CPD-Bildung, beschränkt auf die obere Schicht der Epidermis und wenige CPD-positive Zellen bei den Probanden mit dem dickeren Stratum corneum		
Zwicker et al. 2022	Exzidierte menschliche Haut / rekonstruierte Äquivalente der menschlichen Haut	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert ab 230 nm	40 mJ cm^{-2}, (Bestrahlungsstärke 3,34 mW cm^{-2})	(0,5 ± 0,5) % CPD-positive Keratinozyten		
		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert ab 230 nm	80 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 3,34 mW cm^{-2})	nicht beobachtet	nicht beobachtet	

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

		LED-Array / 233 nm, FWHM 12 nm, gefiltert ab 240 nm	20 mJ cm^{-2} bis 60 mJ cm^{-2}, (Bestrahlungsstärke 0,041 mW cm^{-2})	vernachlässigbar (oberflächlich direkt unter dem Stratum corneum)		
		LED-Array / 233 nm, FWHM 12 nm, gefiltert ab 240 nm	80 mJ cm^{-2}, (Bestrahlungsstärke 0,041 mW cm^{-2})	(18,3 ± 3,0) % CPD-positive Keratinozyten (oberflächlich direkt unter dem Stratum corneum)		
		Quecksilberdampf-lampe / 254 nm	40 mJ cm^{-2}, (Bestrahlungsstärke 0,54 mW cm^{-2})	(44,2 ± 3,7) % CPD-positive Keratinozyten (bis hinunter zu den Basalzellen)	(21,5 ± 1,9) %	
		UVB-Lampe mit einem kleinen UVA-Anteil / 280 nm – 400 nm	3 mJ cm^{-2}, (Bestrahlungsstärke 0,041 mW cm^{-2})	94 % CPD-positive Keratinozyten (bis hinunter zu den Basalzellen)		
Tavares et al. 2023	In-vitro-rekonstruierte menschliche Haut (RHS)	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	1 500 mJ cm^{-2}	Keine signifikante Induktion von CPD	Keine signifikante Induktion von 6-4PP	Ablösung des Stratum corneum und Verdickung der Epidermis 48 Stunden nach der Bestrahlung Induktion von ROS Mögliche Inhibition der Regenerations-prozesse der Haut Erhöhte Expression der Matrix-Metalloproteinasen MMP-1 und MMP-9 Verstärkte Expression des Inhibitors dieser Metalloproteinasen (TIMP-1)

		Quecksilberdampf-lampe / 254 nm				Ablösung des Stratum corneum und der Granulosaschicht 48 Stunden nach der Bestrahlung Erhöhte Expression der Matrix-Metalloproteinasen MMP-1 und MMP-9 Starke Induktion von ROS
	In-vivo-HRS/J-Mausmodell	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	1 500 mJ cm^{-2}	Keine signifikante Induktion von CPD	Keine signifikante Induktion von 6-4PP	Leichte Schädigung der Haut Keine histologischen Veränderungen. Leicht erhöhte Expression von MMP-9
		Quecksilberdampf-lampe / 254 nm		Induktion von CPD	Induktion von 6-4PP	
		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	25 mJ cm^{-2} pro Tag, Dauer 40 Tage			Kein Sonnenbrand oder Abschuppung der Rückenhaut Expression der MMP-9, allerdings weniger effektiv als bei 254 nm Starke Induktion von ROS
		Quecksilberdampf-lampe / 254 nm	6 mJ cm^{-2} pro Tag, Dauer 40 Tage			Kein Sonnenbrand oder Abschuppung der Rückenhaut Erhöhte Expression der MMP-9 Induktion von ROS

Welch et al. 2023	Haarlose SKH-1 Albinomäuse	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	Mittlere Dosen 55 mJ cm^{-2} bis 130 mJ cm^{-2} und 400 mJ cm^{-2} (inhomogen), täglich acht Stunden, fünf Tage pro Woche und über 66 Wochen (15,2 Monate)			Kein Hautkrebs und keine nicht kanzerogenen Hautläsionen
Buonanno et al. 2016 *	Haarlose Mäuse	KrBr-Excimerstrahler / 207 nm, gefiltert	157 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsdauer 7 h)	Keine signifikant erhöhten CPD	Keine signifikant erhöhten 6-4PP-Dimere	Epidermisdicke – kein Unterschied im Vergleich mit der Haut nicht exponierter Mäuse Hautgewebedifferenzierung – kein statistischer Unterschied im Vergleich mit nicht exponierter Haut
		Quecksilberdampf-lampe / 254 nm		35-fache Zunahme von CPD	26-fache Zunahme von 6-4PP-Dimeren	2,8-fache Erhöhung der durchschnittlichen Epidermisdicke Differenzierung der Keratinozyten – 3-fach erhöhte Synthese von K6A
Buonanno et al. 2017 *	Haarlose Mäuse	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	157 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsdauer 7 h)	Keine signifikante Zunahme von CPD	Keine signifikante Zunahme von 6-4PP-Dimeren	Epidermisdicke – kein statistischer Unterschied im Vergleich mit nicht exponierten Mäusen Differenzierung der Keratinozyten – kein statistischer Unterschied im Vergleich mit nicht exponierter Haut

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

		Quecksilberlampe / 254 nm	157 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsdauer 7 h)	Zunahme von CPD	Zunahme von 6-4PP-Dimeren	Erhöhung der durchschnittlichen Epidermisdicke Differenzierung der Keratinozyten – 3-fach erhöhte Synthese von K6A
	In-vitro-3D-Modell der menschlichen Haut EpiDerm-FT	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	Bis 150 mJ cm^{-2}	Keine signifikante Zunahme von CPD	Keine signifikante Zunahme von 6-4PP-Dimeren	
		Quecksilberlampe / 254 nm		Zunahme von CPD	Zunahme von 6-4PP-Dimeren	
Ong et al. 2022	Menschliche Zellkulturen (HEK-A-Keratinozyten und ARPE-19-Retinazellen)	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	60 min (Bestrahlungsstärke 73 $\mu W\ cm^{-2}$)	Keine		Zellen behielten ihre Fähigkeit, ohne die Aktivierung von Apoptose zu wachsen. Jedoch zeigte sich eine dosisabhängige Reduktion der Zellviabilität. Die Tumorsuppression ein bis drei Tage nach der Exposition wurde herunterreguliert.
		Quecksilberdampf-lampe / 254 nm		CPD-Bildung		Durch Apoptose induzierter Zelltod.
		LED / 277 nm, 5 x 5 Array		CPD-Bildung		Durch Apoptose induzierter Zelltod.

***** *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

Tabelle 3.3: Untersuchungen zur Wirkung der UVC-Strahlung auf das Auge

Veröffentlichung	Untersuchungsobjekt	UV-Quelle / Wellenlänge	Bestrahlung *H* (Dosis)	Effekt	
				Augenschädigung	CPD
Kaidzu et al. 2019 *	Albino-Ratten	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	30 mJ cm^{-2}, 150 mJ cm^{-2}, 600 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 5,7 mW cm^{-2})	Keine Hornhautschädigung	
		Quecksilberdampflampe / 254 nm	30 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 1,1 mW cm^{-2})	Keine Hornhautschädigung	
			150 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 1,1 mW cm^{-2})	Keratitis	
			600 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 1,1 mW cm^{-2})	Erosion der Hornhaut	
Kaidzu et al. 2021 *	Albino-Ratten	KrBr-Excimerstrahler / 207 nm, gefiltert	30 mJ cm^{-2} bis 15000 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,83 mW cm^{-2})	Hornhautschädigung ab 15 000 mJ cm^{-2}	Nur in der obersten Schicht der Hornhaut
		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	30 mJ cm^{-2} bis 5000 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 4,2 mW cm^{-2})	Hornhautschädigung ab 5 000 mJ cm^{-2}	Nur in der obersten Schicht der Hornhaut
		Xenonlampe / 235 nm, gefiltert	10 mJ cm^{-2} bis 300 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,077 mW cm^{-2})	Hornhautschädigung ab 300 mJ cm^{-2}	In den Zellen der mittleren Schichten des Hornhautepithels
		Quecksilberdampflampe / 254 nm	10 mJ cm^{-2} bis 300 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 1,3 mW cm^{-2})	Hornhautschädigung ab 20 mJ cm^{-2}	In allen Zellen der Hornhaut
		Schmalbandige UVB-Lampe / 311 nm	30 mJ cm^{-2} bis 600 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 2,3 mW cm^{-2})	Hornhautschädigung ab 600 mJ cm^{-2}	In allen Zellen der Hornhaut

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

Kaidzu et al. 2023 *	Albino-Ratten **	KrBr-Excimerstrahler / 207 nm, gefiltert	1 500 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,18 mW cm^{-2} - 0,25 mW cm^{-2})		Keine CPD-positiven Zellen in Basalzellen des Limbus
			2 500 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,25 mW cm^{-2})		Schwach CPD-positive Zellen im Limbus
			10 000 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,86 mW cm^{-2} - 0,91 mW cm^{-2})		Stark CPD-positive Zellen im gesamten Limbus, einschließlich der Basalzellen
		KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	1 500 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 4,2 mW cm^{-2} - 5,0 mW cm^{-2})		Etwas stärker CPD-positive Zellen im Bereich der oberen Schicht
			2 500 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 4,2 mW cm^{-2})		Mäßig CPD-positive Zellen im gesamten Limbus
			5 000 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 4,2 mW cm^{-2})		Stark CPD-positive Zellen im gesamten Limbus, einschließlich der Basalzellen
		Xenonlampe / 235 nm, gefiltert	30 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,079 mW cm^{-2} - 0,16 mW cm^{-2})		Schwach CPD-positive Zellen bis zur mittleren Schicht
			300 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,11 mW cm^{-2} - 0,17 mW cm^{-2})		Zellen in der oberen Schicht noch stärker CPD-positiv
			600 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 0,082 mW cm^{-2})		Zellen in der mittleren Schicht stark CPD-positiv und Zellen in der Basalschicht schwach CPD-positiv
		Quecksilberdampflampe / 254 nm	20 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 1,1 mW cm^{-2})		Stark CPD-positive Zellen in der mittleren Schicht, Basalzellen schwach CPD-positiv

***** *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

****** *CPD im oberen Limbus, 24 Stunden nach der Bestrahlung*

			100 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 1,1 mW cm^{-2})		Alle Zellen im Limbus CPD-positiv, auch die Basalzellen
			300 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 1,1 mW cm^{-2})		Noch stärker CPD-positive Zellen
		Schmalbandige UVB-Lampe / 311 nm	30 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 2,0 mW cm^{-2} - 2,3 mW cm^{-2})		Keine CPD-positiven Zellen
			150 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 2,0 mW cm^{-2} - 2,3 mW cm^{-2})		CPD-positive Zellen in der mittleren Schicht und im Bereich der Basalzellschicht
			600 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 2,0 mW cm^{-2} - 2,3 mW cm^{-2})		CPD-positive Zellen im gesamten Limbus
	Schweineaugen ***	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	600 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsdauer 120 s)		CPD-positive Zellen in der obersten Schicht
		Quecksilberdampflampe / 254 nm	600 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsdauer 546 s)		CPD-positive Zellen der oberen Schicht und 50 μm - 100 μm tief, aber nicht in der Basalschicht
Sugihara et al. 2023 *	Mensch (6 Probanden, davon 5 Brillenträger)	KrCl-Excimerstrahler / 222 nm, gefiltert	Die Strahler waren abwechselnd 200 s an und 1600 s aus. Maximale Bestrahlungsstärke am Auge der Probanden 0,002 mW cm^{-2} 12 Monate, mittlerer Aufenthaltsdauer 6,7 h pro Woche (ungefähr 1 h pro Tag, Bestrahlung 2,8 mJ cm^{-2} pro Tag)	Keine akuten oder chronischen Effekte	

* *Die Autoren und Autorinnen erklären einen Interessenkonflikt.*

*** *CPD im Limbus unmittelbar nach der Bestrahlung*

3.5 Schutz vor Gefährdungen durch UV-Strahlung aus künstlichen Quellen

3.5.1 Empfohlene Expositionsgrenzwerte der ICNIRP zum Schutz vor aktinischer UV-Gefährdung der Augen und der Haut

Die ICNIRP analysiert und bewertet den wissenschaftlichen Kenntnisstand zur gesundheitlichen Wirkung nichtionisierender Strahlung – sowohl optischer Strahlung als auch elektromagnetischer Felder. Bei der Erarbeitung von Empfehlungen beachtet die Kommission die Prinzipien, auf denen Schutzmaßnahmen begründet sein sollten, wobei die Zuständigkeit, geeignete Regeln und Anwendungsvorschriften zu erstellen, den verschiedenen internationalen und nationalen Behörden bzw. Institutionen überlassen bleibt. Die in den ICNIRP-Guidelines empfohlenen Expositionsgrenzwerte (EGW) sind Grundlage einiger europäischer Richtlinien, wie z. B. der EU-Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (EG 2006).

In ihren Guidelines aus dem Jahr 2004 hat ICNIRP (ICNIRP 2004) Empfehlungen für EGW zum Schutz der Augen und der Haut vor schädigenden Wirkungen inkohärenter UV-Strahlung aus künstlichen und natürlichen Quellen veröffentlicht. Die Empfehlungen wurden auf Wellenlängen über 180 nm beschränkt – der UV-Strahlung mit Wellenlängen unter 180 nm wurde nur geringe praktische biologische Bedeutung beigemessen, da sie bereits in der Luft absorbiert wird (siehe Abschnitt 3.1.1).

Empfohlene EGW gelten für Gefährdungen durch eine achtstündige Exposition gegenüber UV-Strahlung. ICNIRP merkt an, dass die empfohlenen EGW zum Schutz der Beschäftigten gelten sollen und sich dies mit der gebotenen Vorsicht auch auf die Allgemeinbevölkerung übertragen lässt. Sie können jedoch nicht zum Schutz überdurchschnittlich photosensitiver Personen oder Personen, die photosensibilisierenden Substanzen ausgesetzt sind, angewandt werden. Des Weiteren gelten die EGW für kontinuierliche und gepulste inkohärente UV-Strahlung, wenn die Expositionsdauer nicht kürzer als 1 μs ist.

Die von der ICNIRP für den Wellenlängenbereich 180 nm bis 400 nm festgelegte spektrale Wirkungsfunktion für die aktinische UV-Gefährdung der Augen und der Haut $S(\lambda)$ (Abbildung 3.6) bestimmt die effektive Bestrahlungsstärke E_{eff}, die zur Beurteilung einer Gefährdung der Augen und der Haut herangezogen werden kann und durch folgende Formel gegeben ist:

$$E_{\mathrm{eff}} = \sum_{\lambda=180\ \mathrm{nm}}^{\lambda=400\ \mathrm{nm}} E_{\lambda}(\lambda) \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \qquad (1)$$

Dabei ist
$E_{\lambda}(\lambda)$ die gemessene spektrale Bestrahlungsstärke,
$S(\lambda)$ die spektrale Wirkungsfunktion für aktinische UV-Gefährdung und
$\Delta\lambda$ die Schrittweite der Messung.

Ist die Bestrahlungsstärke während des betrachteten Zeitraums t konstant, kann die effektive Bestrahlung H_{eff} berechnet werden:

$$H_{\mathrm{eff}} = E_{\mathrm{eff}} \cdot t \qquad (2)$$

Zum Schutz der Augen und der Haut vor aktinischer UV-Gefährdung wird im Wellenlängenbereich zwischen 180 nm und 400 nm ein EGW der effektiven Bestrahlung H_{eff} von

$$H_{\mathrm{eff}} = 30\ \mathrm{J\ m^{-2}} \qquad (3)$$

empfohlen. Dieser EGW gilt für einmalige oder wiederholte Einwirkungen während des Zeitraums von acht Stunden (30 000 s). Die zulässige Expositionsdauer t_{max} in Abhängigkeit von E_{eff} für Zeiten kürzer als 30 000 s kann anhand folgender Formel berechnet werden:

$$t_{\mathrm{max}} = \frac{30\ \mathrm{J\ m^{-2}}}{E_{\mathrm{eff}}} \tag{4}$$

Tabelle 3.4 listet die EGW der effektiven Bestrahlung H_{eff} für einige Wellenlängen monochromatischer Strahlungsquellen sowie die spektrale Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ im Wellenlängenbereich zwischen 180 nm und 280 nm. Abbildung 3.7 zeigt die EGW der ICNIRP Guidelines zum Schutz der Augen und der Haut vor aktinischer UV-Gefährdung für monochromatische Strahlungsquellen.

Tabelle 3.4: Auszug der spektralen Wirkungsfunktion für die aktinische UV-Gefährdung $S(\lambda)$ im Wellenlängenbereich zwischen 180 nm und 280 nm (nach ICNIRP 2004, ergänzt um die Wellenlängen 207 nm, 222 nm und 233 nm nach DIN 5031-10:2018-03) sowie exemplarische EGW der effektiven Bestrahlung H_{eff} für monochromatische Strahlungsquellen (in mJ cm^{-2}).

λ [nm]	$S(\lambda)$	EGW[mJ cm^{-2}]
180	0,012	250
190	0,019	160
200	0,030	100
207	**0,0606**	**49,5**
210	0,075	40
220	0,120	25
222	**0,132**	**22,7**
230	0,190	16
233	**0,220**	**13,6**
240	0,300	10
250	0,430	7
254	0,500	6
260	0,650	4,6
270	1,000	3,0
280	0,880	3,4

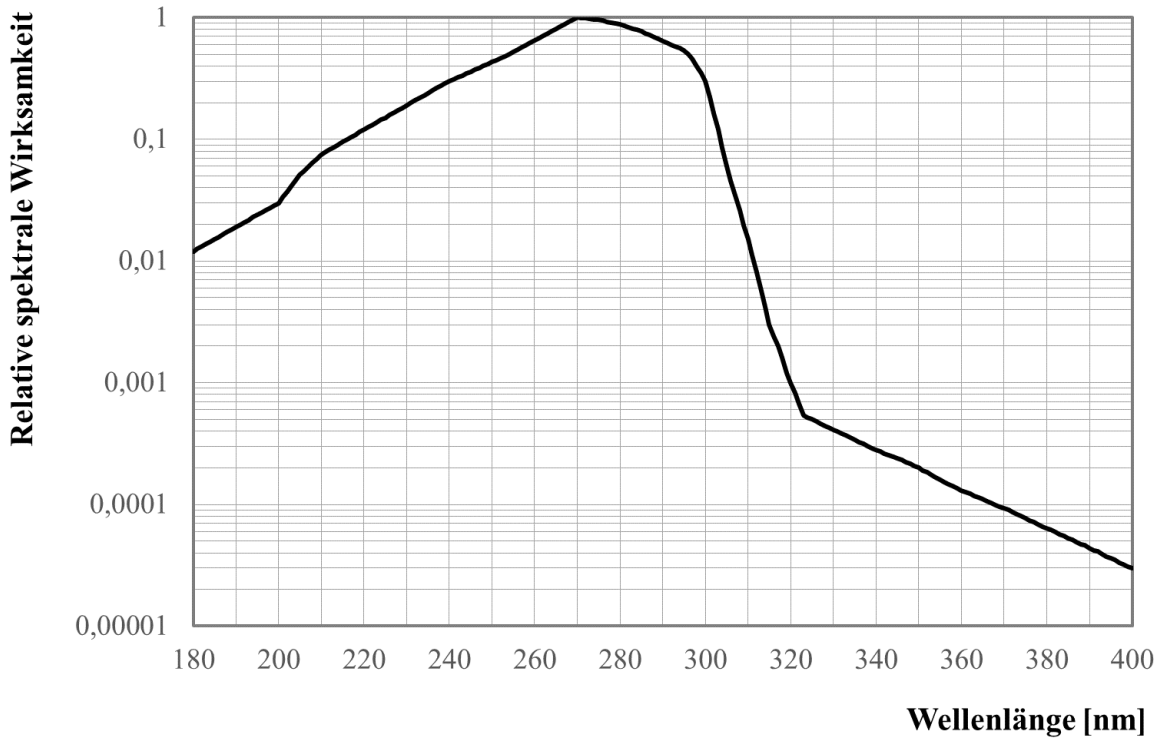


Abbildung 3.6: Relative spektrale Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ für die Gefährdung der Augen und der Haut durch UV-Strahlung nach ICNIRP 2004. Das Maximum der Wirkungsfunktion liegt bei 270 nm und ist auf 1 normiert.

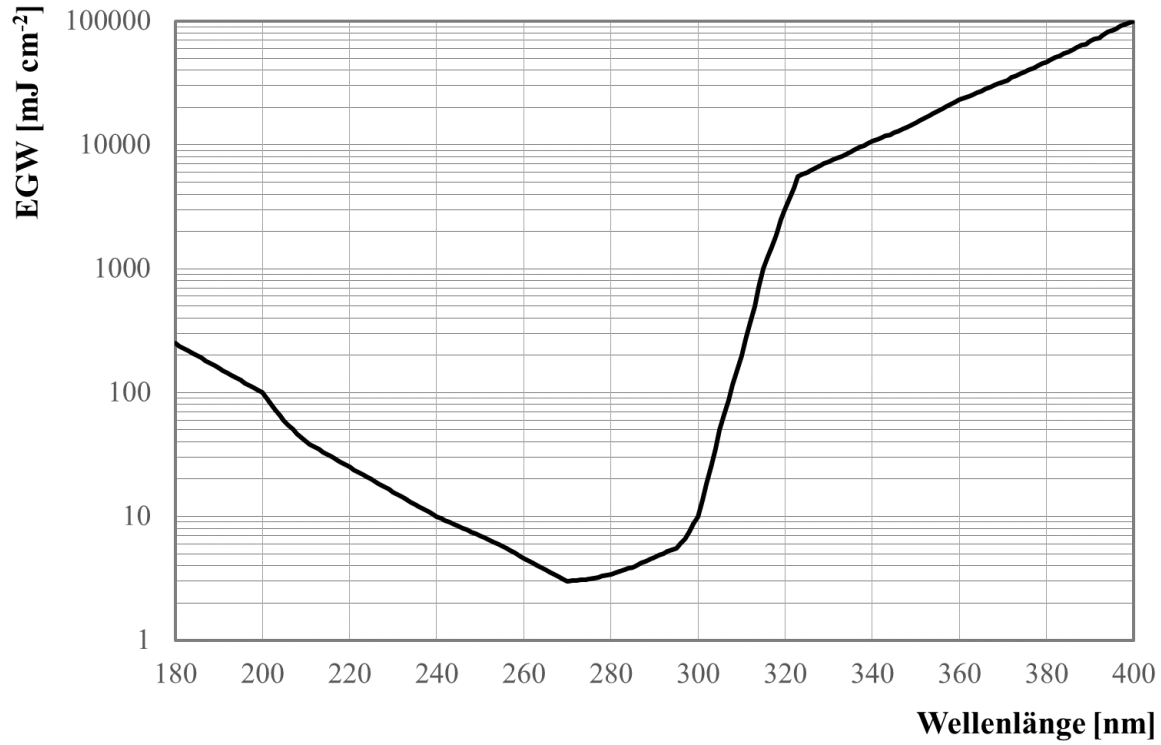


Abbildung 3.7: EGW der ICNIRP Guidelines für monochromatische Strahlungsquellen (ICNIRP 2004, vgl. dort Tabelle 1) zum Schutz der Augen und der Haut vor aktinischer UV-Gefährdung.

3.5.2 Gesetzliche Regelungen bezüglich inkohärenter UV-Strahlung aus künstlichen Quellen

Mit der Europäischen Richtlinie 2006/25/EG (EG 2006) wurden in den EU Mitgliedsstaaten die Mindestanforderungen für den Schutz von Beschäftigten vor Gefährdungen durch die Einwirkung künstlicher optischer Strahlung während der Arbeit festgelegt. Die Richtlinie enthält die EGW für die Exposition durch inkohärente optische Strahlung beziehungsweise Laserstrahlung. Die EGW werden als maximal zulässige Werte bei einer Exposition der Augen oder der Haut durch künstliche optische Strahlung definiert und beruhen auf den von der ICNIRP veröffentlichten Guidelines, im Falle inkohärenter UV-Strahlung auf den obengenannten ICNIRP-Guidelines aus dem Jahr 2004 (ICNIRP 2004). Die EGW für inkohärente optische Strahlung sind im Anhang I der EU-Richtlinie 2006/25/EG aufgelistet (EG 2006). Während die Richtlinie die Mindestanforderungen für den Schutz von Beschäftigten festlegt, haben die EU-Mitgliedstaaten bei der nationalen Umsetzung die Möglichkeit, auch strengere Bestimmungen beizubehalten oder zu erlassen, insbesondere niedrigere EGW festzulegen.

Die EU-Richtlinie 2006/25/EG (EG 2006) wurde mit der Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV) (OStrV 2010) in deutsches Recht umgesetzt. Die Bestimmungen der OStrV beziehen sich nicht nur auf die Beschäftigten, sondern auch auf Schülerinnen und Schüler, Studierende und sonstige in Ausbildungseinrichtungen tätige Personen, die bei ihren Tätigkeiten künstlicher optischer Strahlung ausgesetzt sind. Eine allgemeine Regelung zum Schutz der Allgemeinbevölkerung existiert allerdings nicht.

In der OStrV (OStrV 2010) wird auf die EGW für inkohärente UV-Strahlung verwiesen, die in den Anhängen der EU-Richtlinie 2006/25/EG (EG 2006) enthalten sind. Mit der nationalen Umsetzung der EU-Richtlinie durch die OStrV sind die in der Richtlinie festgelegten EGW auch in Deutschland rechtsverbindlich.

Die OStrV (OStrV 2010) enthält die wesentlichen Anforderungen zum Schutz von Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung, sie ist aber nicht konkret genug, um in der betrieblichen Praxis eine Gefährdungsbeurteilung durchführen und geeignete Schutzmaßnahmen festlegen zu können. Es wurden daher Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS) erarbeitet, welche die Anforderungen der OStrV u. a. für inkohärente optische Strahlung konkretisieren (TROS IOS 2013). Die Anwendung der TROS IOS gibt dem Arbeitgeber Rechtssicherheit, da sie die sogenannte Vermutungswirkung auslöst: Bei Anwendung der TROS IOS kann davon ausgegangen werden, dass – bezogen auf die inkohärente optische Strahlung – die Vorschriften der OStrV und die festgelegten EWG eingehalten werden.

Falls Beschäftigte am Arbeitsplatz UV-Strahlung aus künstlichen Quellen ausgesetzt sind, hat der Arbeitgeber alle hiervon ausgehenden Gefährdungen für die Gesundheit und Sicherheit der Beschäftigten zu beurteilen. Er hat die Exposition durch künstliche optische Strahlung zu ermitteln und zu bewerten. Für die Beschäftigten ist eine potenzielle Gefährdung gegeben, wenn die EGW überschritten werden könnten. Bei der Gefährdungsbeurteilung können Herstellerdaten herangezogen werden, z. B. durch die Einteilung in Risikogruppen nach der Norm DIN EN 62471 „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“ (DIN EN 62471:2009) (siehe Abschnitt 3.5.3).

Bei einer möglichen Überschreitung der EGW sind entsprechende Schutzmaßnahmen festzulegen. An erster Stelle steht hierbei der Ersatz durch weniger gefährliche Verfahren oder Geräte, danach kommen technische Schutzmaßnahmen, die Vorrang vor organisatorischen Maßnahmen haben. Persönliche Schutzausrüstung ist erst dann einzusetzen, wenn technische oder organisatorische Maßnahmen nicht ausreichen oder nicht umsetzbar sind. Der Arbeitgeber hat

Arbeitsbereiche zu kennzeichnen, in denen die EGW überschritten werden können. Bei Gefährdungen der Beschäftigten stellt der Arbeitgeber sicher, dass die betroffenen Beschäftigten eine Unterweisung erhalten, die auf den Ergebnissen der Gefährdungsbeurteilung beruht. Diese Unterweisung muss vor Aufnahme der Tätigkeit, danach in regelmäßigen Abständen, mindestens jedoch jährlich erfolgen.

3.5.3 Risikogruppen entsprechend der Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471

In der international gültigen Norm IEC 62471:2006 „Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen“ (IEC 62471:2006), die unverändert in die nationale deutsche Norm DIN EN 62471 (DIN EN 62471:2009) übernommen wurde, wird beschrieben, auf welche Weise die photobiologische Sicherheit von künstlichen Quellen inkohärenter optischer Strahlung bewertet werden kann.

In Deutschland ist die Produktsicherheit durch das Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (ProdSG 2021) geregelt. Mit diesem Gesetz wurde die europäische Richtlinie 2001/95/EG über die allgemeine Produktsicherheit (EG 2001) in nationales Recht umgesetzt. Das ProdSG hat eine große Bedeutung sowohl für den Schutz der Verbraucher, als auch für den Arbeitsschutz und umfasst eine breite Palette von Produkten, einschließlich der Lampen und Lampensysteme. Nach dem ProdSG dürfen Hersteller, Einführer oder Händler nur Produkte auf den Markt bringen, die so beschaffen sind, dass bei ihrer bestimmungsgemäßen oder vorhersehbaren Verwendung die Sicherheit und Gesundheit von Personen nicht gefährdet werden kann. Im ProdSG ist eine Reihe von europäischen Richtlinien in deutsches Recht umgesetzt worden, unter anderem auch die Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU (EU 2014).

Der Hersteller eines Produkts für den europäischen Binnenmarkt hat gemäß der Richtlinie 2001/95/EG (EG 2001) eine Konformitätsbewertung durchzuführen, um damit die Sicherheit des Produkts zu bestätigen. Bei der Konformitätsbewertung müssen die Sicherheitsanforderungen der EU-Richtlinien eingehalten werden. Da diese Richtlinien meistens allgemein gefasst sind, müssen konkrete technische Anforderungen aus Regelwerken abgeleitet werden, die die allgemein anerkannten Regeln der Technik widerspiegeln. Eine Konformitätsvermutung besteht insbesondere, wenn vom Hersteller harmonisierte Normen verwendet wurden. Das sind europäische Normen, die durch die europäischen Normungsorganisationen im Auftrag der Europäischen Kommission erarbeitet werden. Die Harmonisierung von Normen wird im Amtsblatt der Europäischen Union bekannt gegeben. Alle europäischen harmonisierten Normen müssen als nationale Normen umgesetzt werden. Die harmonisierten Produktnormen werden unter den EU-Richtlinien gelistet. So ist die Lampensicherheitsnorm DIN EN 62471 (DIN EN 62471:2009) eine harmonisierte Produktsicherheitsnorm, die unter der Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU (EU 2014) gelistet ist.

Da beim Hersteller die zukünftigen Expositionsbedingungen (Abstand zur Quelle, Expositionsdauer) unbekannt sind, erfolgt die Bewertung anhand der von einer Lampe ausgehenden Emission. Für diese gibt es nach der Norm DIN EN 62471 (DIN EN 62471:2009) Emissionsgrenzwerte (maximal zulässige effektive Bestrahlungsstärken in einem bestimmten Abstand), die sich auf festgelegte Expositionsdauern beziehen.

Entsprechend ihres Gefährdungspotenzials erfolgt eine Klassifizierung von Lampen in unterschiedliche Risikogruppen. Jeder Risikogruppe werden maximale vorhersehbare Expositionsdauern in einem Referenzabstand zugeordnet, die je nach Art der photobiologischen Gefährdung unterschiedlich sind. Je höher die Risikogruppe ist, desto kürzer ist die erlaubte Expositionsdauer. Die sich aus den maximal zulässigen Bestrahlungszeiten der Risikogruppen ergebenden Emissionsgrenzwerte (effektive Bestrahlungsstärken) wurden gemäß Gleichung 4 (siehe Abschnitt 3.5.1) auf Basis der jeweils veröffentlichten ICNIRP-Empfehlungen im zuständigen Normungsgremium ermittelt. Die Emissionsgrenzwerte für Dauerstrichlampen

gemäß DIN EN 62471 (DIN EN 62471:2009) zum Schutz vor aktinischer UV-Gefährdung der Augen und der Haut sowie die entsprechenden Expositionsdauern der Risikogruppen sind in Tabelle 3.5 wiedergegeben. Der Referenzabstand für UVC-Quellen beträgt 20 cm.

Tabelle 3.5: Maximale Expositionsdauern und sich daraus ergebende Emissionsgrenzwerte der Risikogruppen für Dauerstrichlampen zum Schutz vor aktinischer UV-Gefährdung nach der Norm DIN EN 62471 (DIN EN 62471:2009). Falls der Emissionsgrenzwert der Risikogruppe 2 überschritten wird, wird die UV-Quelle in die Risikogruppe 3 eingestuft.

Photobiologische Gefährdung	**Emissionsgrenzwert / Expositionsdauer**	**Risikogruppe 0 (Freie Gruppe)**	**Risikogruppe 1**	**Risikogruppe 2**
Aktinische UV-Gefährdung	Effektive Bestrahlungsstärke [mW cm^{-2}]	0,0001	0,0003	0,003
	Expositionsdauer [s]	30 000 (8 h)	10 000 (2,78 h)	1 000 (0,28 h)

3.5.4 Neue Expositionsgrenzwerte der ACGIH

In ihrer Veröffentlichung aus dem Jahr 2021 vertreten Sliney und Stuck (2021) die Auffassung, dass bei der Festlegung von EGW im UVC-Spektralbereich ein sehr konservativer Sicherheitsfaktor verwendet wurde. Sie diskutieren die Notwendigkeit, die EGW im UVC-Spektralbereich zu überarbeiten, da mehrere neue Studien darauf hindeuten würden, dass die Schwellenwerte für die Haut und die Augen in diesem Wellenlängenbereich deutlich höher sind (Sliney et al. 1991; Buonanno et al. 2017; Narita et al. 2018c, Yamano et al. 2020; Fukui et al. 2020; Kaidzu et al. 2019; Kaidzu et al. 2021; Eadie et al. 2021) als die Schwellenwerte in der Studie von Pitts (1974). Da in dieser Studie ein Bogenlampen-Monochromator mit großer spektraler Bandbreite verwendet wurde, wird angenommen, dass das abgeleitete Wirkungsspektrum stark abgeflacht war. Aufgrund der oben aufgeführten neuen Studien (bei denen zum Teil Selbstversuche durchgeführt wurden) haben die Autoren für Wellenlängen unter 300 nm unterschiedliche Verläufe der spektralen Wirkungsfunktionen für die Haut und die Augen vorgeschlagen, die eine teilweise deutliche Erhöhung der EGW sowohl für die Haut als auch für die Augen nahelegen. Die spektrale Wirkungsfunktion für die Haut gilt, wenn die Augen nicht exponiert sind.

Die ACGIH hat Ende 2021 (ACGIH 2022) die beiden zuvor genannten neuen spektralen Wirkungsfunktionen übernommen und ihre EGW geändert. Sie weicht damit signifikant von den EGW und der spektralen Wirkungsfunktion $S(\lambda)$ der ICNIRP Guidelines (ICNIRP 2004) für UVB- und UVC-Strahlung ab. Abbildung 3.8 stellt die neuen relativen spektralen Wirkungsfunktionen der ACGIH (ACGIH 2022) für die Haut und die Augen der spektralen Wirkungsfunktion für die aktinische UV-Gefährdung $S(\lambda)$ von ICNIRP 2004 gegenüber. In Abbildung 3.9a und Abbildung 3.9b sind die neuen EGW für monochromatische Strahlung gemäß ACGIH 2022 für die Haut und die Augen im Vergleich mit den entsprechenden EGW der ICNIRP 2004 dargestellt. Zusätzlich werden Messergebnisse einiger Studien dargestellt, die nach der Interpretation von Sliney und Stuck (2021) den Verlauf der neuen EGW untermauern sollen. In Tabelle 3.6 sind die EGW der ICNIRP 2004 und die neuen EGW der ACGIH 2022 für monochromatische Strahlung an ausgewählten Wellenlängen gegenübergestellt.

Die ACGIH weist eindeutig darauf hin, dass die Kurven nicht gesetzlich normativ sind und seitens der ACGIH auch nicht für eine derartige Verwendung befürwortet werden. Des Weiteren weist die ACGIH darauf hin, dass alle angegebenen Grenzwerte als Leitlinien oder

Empfehlungen zum Schutz der Beschäftigten am Arbeitsplatz und für keinen anderen Zweck bestimmt sind. Dennoch werden sie vielfach bereits als neue geltende Grenzwerte von einigen Herstellern betrachtet und neue Produkte entsprechend mit der Einhaltung der EGW nach ACGIH 2022 beworben.

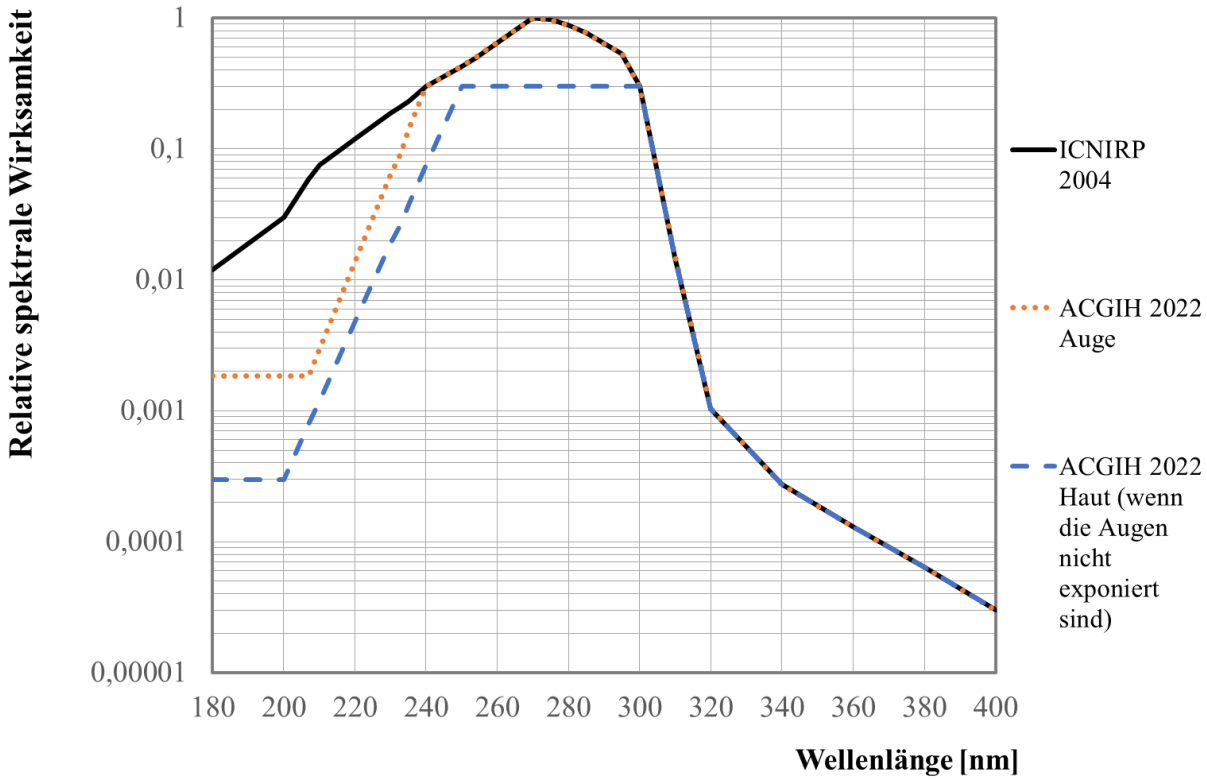
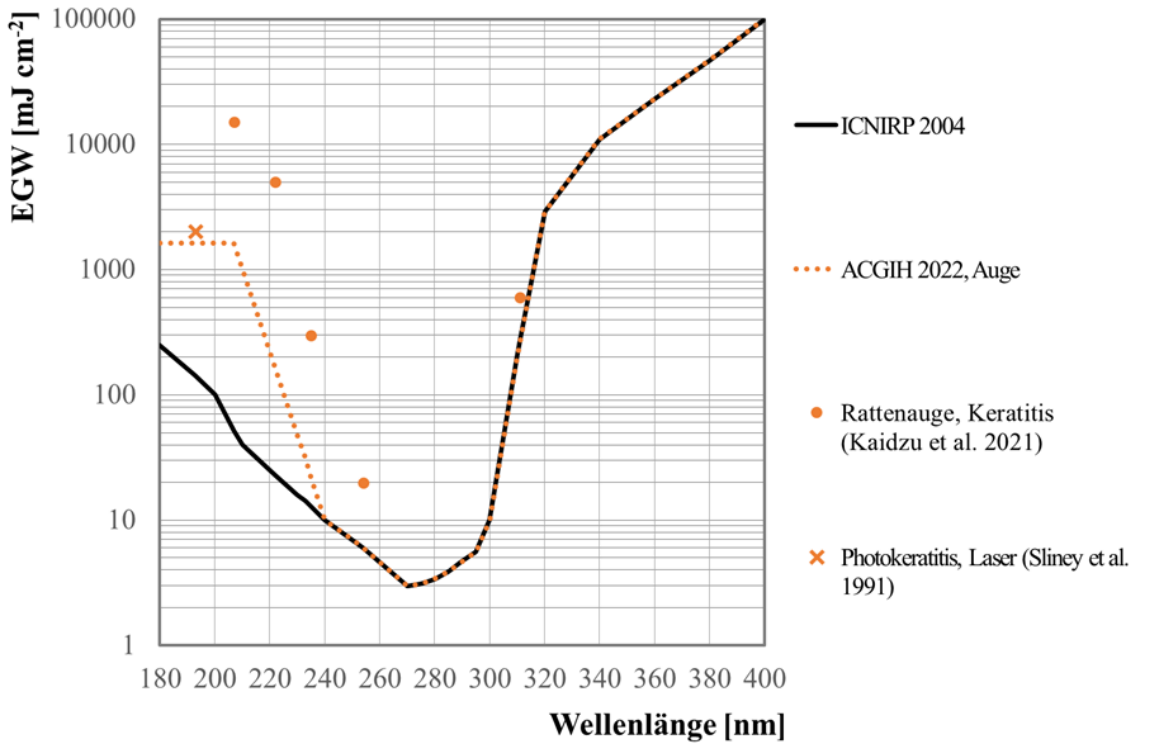
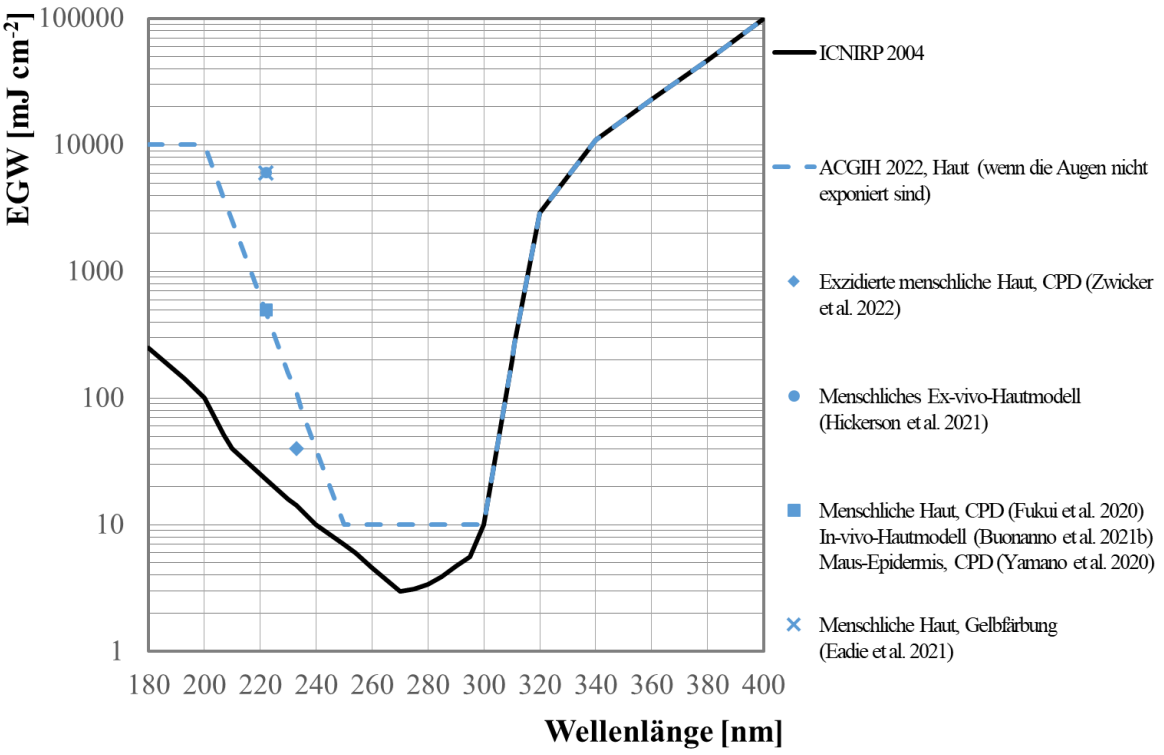


Abbildung 3.8: Relative spektrale Wirkungsfunktionen der ACGIH 2022 für die Haut (wenn die Augen nicht exponiert sind, gestrichelt) und die Augen (gepunktet) im Vergleich zur spektralen Wirkungsfunktion für die aktinische UV-Gefährdung S(λ) von ICNIRP 2004 (durchgezogen).



a



b

Abbildung 3.9: Die EGW für monochromatische Strahlung nach ACGIH 2022 zum Schutz der Augen (a, gepunktet) und der Haut – wenn die Augen nicht exponiert sind (b, gestrichelt) im Vergleich mit den EGW, die sich gemäß ICNIRP 2004 ergeben (durchgezogen). Zusätzlich sind die maximalen Dosiswerte einiger Studien angegeben, bei denen keine nennenswerte Schädigung durch UV-Strahlung beobachtet wurden.

Tabelle 3.6: Die EGW der ACGIH 2022 und der ICNIRP 2004 zum Schutz der Augen und der Haut für monochromatische Strahlung an ausgewählten Wellenlängen.

λ [nm]	**EGW [mJ cm^{-2}] (ICNIRP 2004)**	**EGW Auge [mJ cm^{-2}] (ACGIH 2022)**	**EGW Haut [mJ cm^{-2}] (ACGIH 2022)**
180	250	1626	10 000
190	160	1626	10 000
200	100	1626	10 000
207*	**49,5**	**1626**	**3802**
210	40	1023	2512
220	25	218	631,0
222*	**22,7**	**160,7**	**479**
230	16	46,8	158,5
240	10	10	39,8
250	7	7,0	10
254	6	6,0	10
260	4,6	4,6	10
270	3,0	3,0	10
280	3,4	3,4	10

* Werte entnommen aus Sliney und Stuck (2021)

Fazit

Die These von Sliney und Stuck (2021), wonach bisherige EGW insbesondere aufgrund der unzureichenden Datenlage mit hohen Messunsicherheiten sehr konservativ eingeschätzt wurden, erscheint zunächst berechtigt. Die SSK ist jedoch der Auffassung, dass die von den Autoren angeführten neueren Studien die Datenlage nicht ausreichend verbessern. Bei einigen Studien muss in Frage gestellt werden, ob die radiometrischen Messungen korrekt ausgeführt wurden. So wurde z. B. bei Kaidzu et al. (2021) angegeben, dass für die Messungen bei 222 nm ein Breitbandradiometer (Typ USHIO VUV S172) verwendet wurde, welches vom Hersteller üblicherweise bei 172 nm kalibriert wird. In anderen Studien wurden Selbstversuche durchgeführt (Eadie et al. 2021) oder es wurde nur eine geringe Anzahl von Probanden untersucht (Fukui et al. 2020).

Sliney und Stuck (2021) geben an, dass es nahezu keine aktuellen Untersuchungen zur Wirkung von UVC-Strahlung auf das Auge gibt. Es wird daraufhin ein Selbstversuch beschrieben, der bei hohen Dosen zu Augentrockenheitsgefühl und schließlich zu Tränenproduktion führte. Die Autoren haben zwei Kurven vorgeschlagen, die von der ACGIH übernommen wurden. Beide Kurven sind allerdings bisher nicht von ausreichend belastbaren Daten gestützt. Für die Einschätzung der Gefährdung durch UV-Strahlung im Fern-UVC-Bereich sind weiterhin umfangreiche Studien, insbesondere für die Wirkung auf das Auge, unabdingbar.

3.5.5 Anwendbarkeit der Expositionsgrenzwerte für vulnerable Gruppen (UV-schutzbedürftige Gruppen)

Menschen, die aufgrund ihrer körperlichen Entwicklung, Genetik, (Vor-)Erkrankungen oder aus anderen Gründen besonders empfindlich gegenüber UV-Strahlung sind, zählen zu den vulnerablen Gruppen. Dies betrifft die folgenden, gegenüber UV-Strahlung, empfindlichen Personengruppen (UV-schutzbedürftige Personen nach der Technischen Spezifikation DIN/TS 67506:2022-02, Abschnitt 10.4) und schließt auch eine mögliche Vulnerabilität gegenüber Fern-UVC-Strahlung nicht aus:

- Kinder: Augen und Haut der Kinder sind allgemein gegenüber UV-Strahlung empfindlicher als die Erwachsener. Eine detaillierte Darstellung dieser Unterschiede ist in der SSK-Empfehlung „Schutz des Menschen vor den Gefahren solarer UV-Strahlung und UV-Strahlung in Solarien“ (SSK 2016) zu finden. Für die von UVC-Strahlung betroffene Hornhaut der Augen und Hornschicht der Haut zeigen Studien, dass die Hornhaut-Dicke bei Kindern in Abhängigkeit unterschiedlicher Faktoren stark schwanken und ab Geburt bis zum ungefähr 4. Lebensjahr dünner als die von Erwachsenen sein kann (Fiethen 2019). Bezüglich der Hornschicht der Haut zeigt eine Studie, dass bei Säuglingen das Stratum Corneum 30 % und die Epidermis 20 % dünner als bei Erwachsenen sein kann (Stamatas et al. 2010). Darüber hinaus kann die Basalmembran der Epidermis bei Kindern im Gegensatz zu Erwachsenen teilweise deutlich dichter unter der Hautoberfläche liegen (SSK 2016). Aufgrund dieser Unterschiede ist anzunehmen, dass das kindliche Auge und die kindliche Haut gegenüber UVC-Strahlung empfindlicher und zur Vorbeugung besonders zu schützen sind;
- Personen mit angeborener, gebildeter (beispielsweise altersabhängig) oder vorübergehender Veränderung der Augenhornhaut oder dünnerem Stratum corneum;
- Personen mit Vorerkrankungen, die eine Veränderung der Augenhornhaut oder der Hauthornschicht bedingen;
- Personen mit Vorerkrankungen und/oder Verletzungen (auch aufgrund von Operationen) der Augen und der Haut; Personen, die schon einmal an Hautkrebs erkrankt sind, weisen ein erhöhtes Risiko auf, erneut daran zu erkranken;
- Personen mit fehlender Regenerationsfähigkeit UV-bedingter Hautschäden (z. B. Xeroderma-pigmentosum-Patienten);
- Personen, deren Haut allgemein überdurchschnittlich photosensibel ist;
- Personen, die Medikamente oder pflanzliche Präparate einnehmen, welche die Photosensibilität erhöhen;
- Personen, die mit photosensibilisierenden Substanzen in Berührung kommen, beispielsweise durch Berühren bestimmter Pflanzen (Hypericine im Johanniskraut, Furocumarine in Doldenblütlern).

Die von der EU und Deutschland festgelegten EGW gelten im Allgemeinen zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch eine achtstündige Exposition gegenüber UV-Strahlung. Sie sind aber nicht zum Schutz vulnerabler Personen vorgesehen und auch nicht anwendbar. Diese Personen können möglicherweise auch unterhalb der im Abschnitt 3.5.1 dargestellten EGW geschädigt werden. Deshalb besteht im Arbeitsschutz bezüglich dieser Gruppen grundsätzlich die Pflicht zur Information über eine arbeitsmedizinische Beratung und eine Unterweisungspflicht zur Angebots- und Pflichtvorsorge mit der Möglichkeit der Festlegung von individuellen Schutzmaßnahmen (TROS IOS 2013).

Während für vulnerable Personen am Arbeitsplatz individuell angepasste Schutzmaßnahmen vorgesehen sind, kann dies bei Personen im öffentlichen Raum nicht gewährleistet werden. Im Vergleich zu Beschäftigten, bei denen es sich im Allgemeinen um weitgehend gesunde Erwachsene innerhalb einer begrenzten Altersspanne handelt, umfasst die Allgemeinbevölkerung auch andere Altersgruppen, wie Kinder und ältere Menschen. Mindestens in der Gruppe älterer Menschen finden sich mit erhöhter Wahrscheinlichkeit auch andere vulnerable Gruppen, z. B. Personen mit Vorerkrankungen oder Verletzungen der Augen und der Haut (auch aufgrund von Operationen) sowie Personen, die photosensibilisierende Medikamente einnehmen. All diese Personen wären sich ohne entsprechende Information, z. B. in Form von Warnhinweisen, der UVC-Exposition im öffentlichen Raum nicht bewusst und würden keine Schutzmaßnahmen ergreifen.

4 Offene Fragen und Forschungsbedarf

Aus der in der Empfehlung (Kapitel 2) beschriebenen unzureichenden Datenlage ergibt sich folgender Forschungsbedarf:

- Die Mehrzahl der bisherigen Studien befasst sich mit den Effekten einer kurzzeitigen Exposition durch Fern-UVC-Strahlung. Um die Wirkung von Fern-UVC-Strahlung beim Einsatz in öffentlichen Räumen unter Anwesenheit von Menschen zu untersuchen, müssen Studien mit chronischer Bestrahlung durchgeführt werden.
- Solche weiterführenden Studien müssen auch Untersuchungen am menschlichen Auge sowie an verletzter oder geschädigter Haut einbeziehen. Darüber hinaus müssen bei diesen Untersuchungen auch möglicherweise vulnerable Gruppen wie z. B. Kinder, ältere Menschen, Menschen mit Vorerkrankungen der Haut oder der Augen berücksichtigt werden sowie die Wirkung von Fern-UVC-Bestrahlung bei Einnahme photosensibilisierender Medikamente.
- Die Abtötungswirkung auf (unerwünschte) Keime auf der Haut durch UVC_{222} wurde von Fukui et al. (2020) gezeigt. Es ist davon auszugehen, dass eine Bestrahlung mit Fern-UVC-Strahlung das Hautmikrobiom verändert. Da dessen Bedeutung für eine gesunde Haut und für den Schutz des Organismus vor äußeren Einflüssen immer deutlicher wird, sollte die Wirkung von Fern-UVC-Strahlung auf das Mikrobiom der Haut näher untersucht werden.
- Da die Absorption von UVC_{222} insbesondere durch Proteine hoch ist, wird ein Teil des Inaktivierungseffektes, insbesondere bei Viren, auf die Schädigung von Proteinen zurückgeführt (z. B. Beck et al. 2018). Nachgewiesen ist die Inhibition von Enzymaktivitäten durch UVC in Untersuchungen der Nahrungsmittelindustrie, die UVC-Bestrahlung einsetzt, um z. B. die Braunfärbung von frischen Säften zu verhindern (Yannam et al. 2020). Die Inhibition der Aktivität von Enzymen könnte bei der Absorption von Fern-UVC-Strahlung in der Tränenflüssigkeit eine Rolle spielen. Die Inhibition und der zugrunde liegende photochemische Mechanismus ist nicht hinreichend aufgeklärt und sollte weiter untersucht werden (Rathinasamy und Augenstein 1968, Setlow und Doyle 1957).

5 Weitergehende Fragen zum Einsatz von Fern-UVC-Strahlung

Im Fokus dieses Beratungsauftrags steht die Anwendung von Fern-UVC-Strahlung zur Desinfektion in Anwesenheit von Menschen und damit verbundene Risiken für menschliche

Haut und Augen. Der mögliche Einsatz von Fern-UVC-Strahlung durch nicht abgeschirmte, offene Strahlungsquellen im öffentlichen Raum wirft jedoch weitere Fragen auf, die ebenfalls berücksichtigt werden müssten, wie z. B. die mögliche Entstehung von UVC-resistenten Bakterienvarianten, die Wirkung auf Flora und Fauna, langfristige Wirkung auf die Materialien/Kunststoffe der Innenräume oder die mögliche Entstehung schädlicher chemischer Verbindungen in Innenräumen. Auf einige dieser Fragen wird im Folgenden kurz eingegangen.

Mögliche Entstehung von UVC-resistenten Bakterienvarianten

Choi et al. (Choi et al. 2022) untersuchten, ob multiresistente Bakterien durch wiederholte Expositionen resistent gegen UV-Strahlung werden können. Sie setzten Methicillin-resistenten *Staphylococcus aureus* (MRSA), Carbapenemase-bildenden *Klebsiella pneumoniae* und Metallo-β-Lactamase-bildenden *Klebsiella pneumoniae* der UV-Strahlung einer Quecksilberdampf-(UVC_{254})-Strahlung bzw. einer Xenonlampe aus. Nach 25 UV-Bestrahlungszyklen zeigten die Sequenzierungsanalysen des gesamten Genoms dieser drei Bakterienstämmen keine signifikanten genetischen Veränderungen. Allerdings wurden in dieser Studie sehr hohe UV-Dosen verwendet – im Fall der Quecksilberdampflampe die Dosis von 56 160 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 93,6 mW cm^{-2} für 10 min) und im Fall der Xenonlampe die Dosis von 11 430 mJ cm^{-2} (Bestrahlungsstärke 38,1 mW cm^{-2} für 5 min). Wenn die verwendeten UV-Dosen hoch genug sind, um die gesamte Bakterienpopulation abzutöten, kann die Entstehung von UV-resistenten Bakterienvarianten verhindert werden. In Studien von Alcantara-Diaz et al. (2004) und Shibai et al. (2017) wurden die *Escherichia coli* Bakterien wiederholt der UV-Strahlung einer Quecksilberdampflampe mit niedrigeren Dosen ausgesetzt (bis zu 15 mW cm^{-2} bzw. 10 mW cm^{-2}). Tatsächlich brachte die *Escherichia coli* Tochterstämme hervor, die resistenter gegen UV-Strahlung waren als die Elternstämme. Bei der Verwendung von Fern-UVC-Strahlung im öffentlichen Raum – insbesondere in größeren Abständen von der Strahlungsquelle – können ausreichende Dosen zur vollständigen Abtötung von Bakterienpopulationen nicht gewährleistet werden. Daher muss bezüglich wiederholter Einwirkung dieser Strahlung auch eine mögliche Entstehung von UVC-resistenten Bakterienvarianten in Betracht gezogen werden.

Wirkung auf andere Organismen

Otake et al. (2021) untersuchten den Einfluss der UVC_{222}- und UVC_{254}-Strahlung auf *Arabidopsis*-Pflanzen, indem sie sieben Tage alte Sämlinge bestrahlten. Bei Pflanzen, die UVC_{222}-Strahlung ausgesetzt wurden, konnte vier Tage nach der Bestrahlung Folgendes beobachtet werden: Nach einer Dosis von 100 mJ cm^{-2} kräuselten sich die Blätter, und bei 1000 mJ cm^{-2} waren sie deutlich gebleicht. Bei unbestrahlten Pflanzen sowie Pflanzen, die UVC_{254}-Strahlung ausgesetzt wurden, ließen sich diese Effekte nicht beobachten. Ferner konnten in den Blättern funktionstüchtige Schließzellen (die für den Gasaustausch der Pflanze mit der Umgebungsluft wichtig sind) nachgewiesen werden, sofern es sich um unbestrahlte Pflanzen handelte bzw. um Pflanzen, die bei UVC_{254}-Dosen von 100 mJ cm^{-2} bzw. 500 mJ cm^{-2} exponiert wurden. Im Gegensatz dazu waren nach der UVC_{222}-Strahlung mit gleichen Dosen die meisten Schließzellen deformiert. Die Untersuchungen deuteten auf die Inaktivierung bzw. Fragmentierung von Mitochondrien und die Schädigung von Chloroplasten hin. Die Autorschaft folgert, dass die UVC_{222}-Strahlung die Schließ- und Epidermiszellen stark schädigt und eine solche Schädigung eine Wachstumshemmung bewirken kann.

Yoshiyama et al. (2023) führten Experimente am transparenten Modellorganismus *Caenorhabditis elegans* (einem Fadenwurm) durch. Bereits bei einer Bestrahlung mit 20 mJ cm^{-2} und 40 mJ cm^{-2} UVC_{222} und UVC_{254} zeigte sich, dass nur UVC_{222} in den nur 1-2 µm unter der Oberfläche gelegenen sensorischen Neuronen schwerwiegende neurodegenerative Effekte und

neuronale Schäden verursachte. Die Autorschaft geht davon aus, dass hierfür in erster Linie UVC_{222} induzierte ROS verantwortlich sind. Eine vergleichbare Schädigung der Neuronen wurde für UVC_{254} bei diesen Dosen nicht beobachtet, allerdings zeigte sich hier eine Schädigung der 20 µm bis 60 µm unter der Oberfläche liegenden Oocyten.

Mögliche Entstehung schädlicher chemischer Verbindungen in Innenräumen

Peng et al. (2023) untersuchten die Auswirkungen von Fern-UVC-Strahlung auf die Luftqualität in Innenräumen. Sie führten eine Modellevaluation der durch UVC_{254} und UVC_{222} initiierten Sekundärchemie in einer typischen Innenraumumgebung für verschiedene Belüftungsniveaus durch. Die Evaluation zeigte, dass die UVC_{254}-Strahlung Ozonmoleküle (O_3) photolysieren kann und OH-Radikale erzeugt. Diese oxidieren flüchtige organische Verbindungen (VOCs) und führen zur Bildung von sauerstoffhaltigen VOCs (OVOCs) und sekundärem organischem Aerosol (SOA), die negative Auswirkungen auf die Gesundheit haben können (Collins und Farmer 2021). Die UVC_{222}-Strahlung mit der gleichen Virusinaktivierungsrate hat bei mittleren bis hohen Belüftungsniveaus geringere Auswirkungen auf die Raumluftqualität, hauptsächlich aufgrund der geringeren benötigten UV-Bestrahlungsstärke und auch aufgrund der weniger effizienten OH-erzeugenden Photolyse als im Fall von UVC_{254}-Strahlung. Allerdings hat die UVC_{222}-Strahlung bei schlechten Belüftungsniveaus (die z. B. oft in Schulen vorkommen) aufgrund einer geringen, aber signifikanten photochemischen Produktion von O_3 bei 222 nm eine größere Auswirkung auf die Raumluftqualität als UVC_{254}-Strahlung. Die Autoren betonen, dass in der Studie nur eine sehr begrenzte Anzahl chemischer Stoffe modelliert wurde und dass weitere Studien erforderlich sind, um die Toxizität von Gasphasenprodukten besser beurteilen zu können. Auch luftverschmutzte Innenräume müssen berücksichtigt werden, in denen die Konzentration der VOCs hoch sein kann.

6 Literatur

ACGIH 2022 American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). 2022 TLVs and BEIs Based on the Documentation of the Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents & Biological Exposure Indices. American Conference of Governmental Industrial Hygienists (Hrsg.), Cincinnati, OH, USA, 2022. ISBN: 978-1-607261-52-0. https://www.techstreet.com/standards/2022-threshold-limit-values-tlvs-and-biological-exposure-indices-beis?product_id=2242171#jumps, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Alcantara-Diaz et al. 2004 Alcantara-Diaz D, Brena-Valle M, Serment-Guerrero J. Divergent adaptation of Escherichia coli to cyclic ultraviolet light exposures. Mutagenesis. Sep;19(5):349-54, doi: 10.1093/mutage/geh039, Epub 2004/09/25

Azzimonti et al. 2023 Azzimonti B, Ballacchino C, Zanetta P, Cucci MA, Monge C, Grattarola M, Dianzani C, Barrera G, Pizzimenti S. Microbiota, Oxidative Stress, and Skin Cancer: An Unexpected Triangle. Antioxidants (Basel). Feb 21;12(3), doi: 10.3390/antiox12030546, Epub 2023/03/30

Beck et al. 2018 Beck SE, Hull NM, Poepping C, Linden KG. Wavelength-Dependent Damage to Adenoviral Proteins Across the Germicidal UV Spectrum. Environ Sci Technol. Jan 2;52(1):223-9, doi: 10.1021/acs.est.7b04602, Epub 2017/12/21

BfS 2022 Bundesamt für Strahlenschutz (BfS). Desinfektion mit UV-C-Strahlung. https://www.bfs.de/DE/themen/opt/anwendung-alltag-technik/uv/uv-c-strahlung/uv-c-desinfektion_node.html, zuletzt aufgerufen am 24.05.2022

Blanpain 2013 Blanpain C. Tracing the cellular origin of cancer. Nat Cell Biol. 2013 Feb;15(2):126-34, doi: 10.1038/ncb2657, Epub 2013/01/22

Blatchley et al. 2023 Blatchley EIII, Brenner DJ, Claus H, Cowan TE, Linden KG, Liu YJ, Mao T, Park SJ, Piper PJ, Simons RM, Sliney DH. Far UV-C radiation: An emerging tool for pandemic control. Critical Reviews in Environmental Science and Technology. Mar 19;53(6):733-53, doi: 10.1080/10643389.2022.2084315

Bogumil et al. 2003 Bogumil K, Orphal J, Homann T, Voigt S, Spietz P, Fleischmann OC, Vogel A, Hartmann M, Kromminga H, Bovensmann H, Frerick J, Burrows JP. Measurements of molecular absorption spectra with the SCIAMACHY pre-flight model: instrument characterization and reference data for atmospheric remote-sensing in the 230-2380 nm region. Journal of Photochemistry and Photobiology a-Chemistry. 2003 May 5;157(2-3):167-84, doi: 10.1016/S1010-6030(03)00062-5

Bonneß 2007 Bonneß O. Desinfektionsvorrichtung. Patentschrift DE 10 2006 029 946 B3, Deutsches Patent- und Markenamt, 11.10.2007. https://register.dpma.de/DPMAregister/pat/register?AKZ=1020060299469, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Bose et al. 2020 — Bose B, Kapoor S, Sen U, Nihad As M, Chaudhury D, Shenoy PS. Assessment of Oxidative Damage in the Primary Mouse Ocular Surface Cells/Stem Cells in Response to Ultraviolet-C (UV-C) Damage. J Vis Exp. Feb 15 (156), doi: 10.3791/59924, Epub 2020/03/03

Brubaker et al. 2000 — Brubaker RF, Bourne WM, Bachman LA, McLaren JW. Ascorbic acid content of human corneal epithelium. Invest Ophthalmol Vis Sci. Jun;41(7):1681-3, Epub 2000/06/14

Bruls et al. 1984 — Bruls WA, van Weelden H, van der Leun JC. Transmission of UV-radiation through human epidermal layers as a factor influencing the minimal erythema dose. Photochem Photobiol. 1984 Jan;39(1):63-7, doi: 10.1111/j.1751-1097.1984.tb03405.x, Epub 1984/01/01

Buonanno et al. 2016 — Buonanno M, Stanislauskas M, Ponnaiya B, Bigelow AW, Randers-Pehrson G, Xu Y, Shuryak I, Smilenov L, Owens DM, Brenner DJ. 207-nm UV light—a promising tool for safe low-cost reduction of surgical site infections. II: In-vivo safety studies. PloS one.11(6):e0138418

Buonanno et al. 2017 — Buonanno M, Ponnaiya B, Welch D, Stanislauskas M, Randers-Pehrson G, Smilenov L, Lowy FD, Owens DM, Brenner DJ. Germicidal Efficacy and Mammalian Skin Safety of 222-nm UV Light. Radiat Res. 2017 Apr;187(4):483-91, doi: 10.1667/RR0010 CC.1, Epub 2017/02/23

Buonanno et al. 2020 — Buonanno M, Welch D, Shuryak I, Brenner DJ. Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. Sci Rep. 2020 Jun 24;10(1):10285, doi: 10.1038/s41598-020-67211-2, Epub 2020/06/26

Buonanno et al. 2021a — Buonanno M, Welch D, Brenner DJ. Exposure of Human Skin Models to KrCl Excimer Lamps: The Impact of Optical Filtering(dagger). Photochem Photobiol. 2021 May;97(3):517-23, doi: 10.1111/php.13383, Epub 2021/01/20

Buonanno et al. 2021b — Buonanno M, Welch D, Shuryak I, Brenner DJ. Author Correction: Far-UVC light (222 nm) efficiently and safely inactivates airborne human coronaviruses. Sci Rep. 2021 Sep 27;11(1):19569, doi: 10.1038/s41598-021-97508-9, Epub 2021/09/29

Burns et al. 2019 — Burns EM, Ahmed H, Isedeh PN, Kohli I, Van Der Pol W, Shaheen A, Muzaffar AF, Al-Sadek C, Foy TM, Abdelgawwad MS, Huda S, Lim HW, Hamzavi I, Bae S, Morrow CD, Elmets CA, Yusuf N. Ultraviolet radiation, both UVA and UVB, influences the composition of the skin microbiome. Exp Dermatol. Feb;28(2):136-41, doi: 10.1111/exd.13854, Epub 2018/12/07

Cadet und Douki 2018 — Cadet J, Douki T. Formation of UV-induced DNA damage contributing to skin cancer development. Photochem Photobiol Sci. 2018 Dec 5;17(12):1816-41, doi: 10.1039/c7pp00395a, Epub 2018/02/07

Cheung et al. 1986 — Cheung ASC, Yoshino K, Parkinson WH, Guberman SL, Freeman DE. Absorption Cross-Section Measurements of Oxygen in the Wavelength Region 195-241 Nm of the Herzberg Continuum. Planetary and Space Science. 1986 Nov;34(11):1007-21, doi: Doi 10.1016/0032-0633(86)90011-5

Choi et al. 2022 — Choi H, Chatterjee P, Hwang M, Stock EM, Lukey JS, Zeber JE, Jinadatha C. Can multidrug-resistant organisms become resistant to ultraviolet (UV) light following serial exposures? Characterization of post-UV genomic changes using whole-genome sequencing. Infect Control Hosp Epidemiol. Jan;43(1):72-8, doi: 10.1017/ice.2021.51, Epub 2021/03/23

CIE 2020 — Commission Internationale de l'Eclairage (CIE). ILV: International Lighting Vocabulary, 2nd Edition. CIE S 017/E:2020. DOI: 10.25039/S017.2020. https://cie.co.at/publications/ilv-international-lighting-vocabulary-2nd-edition-0, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Collins und Farmer 2021 — Collins DB, Farmer DK. Unintended Consequences of Air Cleaning Chemistry. Environ Sci Technol. Sep 21;55(18):12172-9, doi: 10.1021/acs.est.1c02582, Epub 2021/09/01

de Feraudy et al. 2010 — de Feraudy S, Revet I, Bezrookove V, Feeney L, Cleaver JE. A minority of foci or pan-nuclear apoptotic staining of gammaH2AX in the S phase after UV damage contain DNA double-strand breaks. Proc Natl Acad Sci U S A. Apr 13;107(15):6870-5, doi: 10.1073/pnas.1002175107, Epub 2010/03/31

de Gruijl und Forbes 1995 — de Gruijl FR, Forbes PD. UV-induced skin cancer in a hairless mouse model. Bioessays. 1995 Jul;17(7):651-60, doi: 10.1002/bies.950170711, Epub 1995/07/01

de Jager et al. 2017 — de Jager TL, Cockrell AE, Du Plessis SS. Ultraviolet Light Induced Generation of Reactive Oxygen Species. Adv Exp Med Biol.996:15-23, doi: 10.1007/978-3-319-56017-5_2, Epub 2017/11/11

Destatis 2020 — Statistisches Bundesamt (Destatis). Ergebnisse der Todesursachenstatistik für Deutschland - Ausführliche vierstellige ICD10-Klassifikation - 2019. https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Gesundheit/Todesursachen/Publikationen/Downloads-Todesursachen/todesursachenstatistik-5232101197015.html, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

DGUV 2016 — Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV), Fachbereich Energie Textil Elektro Medienerzeugnisse (FB ETEM), SG Energie und Wasser (DGUV). Arbeiten an UV-Geräten zur Desinfektion in der Trinkwasserversorgung - Handlungshilfe zur Gefährdungsbeurteilung. Köln, Mai 2016. https://dguv.de/fb-etem/fb_aktuell/index.jsp, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

DIN 5031-10:2018-03 — (DIN 5031-10:2018-03). Strahlungsphysik im optischen Bereich und Lichttechnik - Teil 10: Photobiologisch wirksame Strahlung, Größen, Kurzzeichen und Wirkungsspektren. Ausgabedatum: 2018-03. Beuth Verlag, Berlin. https://www.beuth.de/de/norm/din-5031-10/276889937, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024.

DIN EN 62471:2009 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN EN 62471:2009. VDE 0837-471:2009-03: Photobiologische Sicherheit von Lampen und Lampensystemen (IEC 62471:2006, modifiziert); Deutsche Fassung EN 62471:2008. Ausgabedatum: 2009-03. Beuth Verlag, Berlin. https://www.beuth.de/de/norm/din-en-62471/115316882, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024.

DIN/TS 67506:2022-02 Deutsches Institut für Normung (DIN). DIN/TS 67506:2022-02. Technische Spezifikation DIN/TS 67506:2022-02: Entkeimung von Raumluft mit UV-Strahlung - UV-C-Sekundärluftgeräte. Ausgabedatum: 2022-02. Beuth Verlag, Berlin. https://www.beuth.de/de/vornorm/din-ts-67506/347831306, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024.

Eadie et al. 2021 Eadie E, Barnard IMR, Ibbotson SH, Wood K. Extreme Exposure to Filtered Far-UVC: A Case Study(dagger). Photochem Photobiol. 2021 May;97(3):527-31, doi: 10.1111/php.13385, Epub 2021/01/21

EG 2001 Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2001/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. Dezember 2001 über die allgemeine Produktsicherheit. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften, L 11/4, 15.01.2002. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0095&from=DE, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

EG 2006 Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2006/25/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 5. April 2006 über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung) (19. Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG). Amtsblatt der Europäischen Union, L 114/38, 27.4.2006. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32006L0025&from=FI, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

EU 2011 Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2011/65/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 8. Juni 2011 zur Beschränkung der Verwendung bestimmter gefährlicher Stoffe in Elektro- und Elektronikgeräten (Neufassung). Amtsblatt der Europäischen Union, L 174/88, 01.07.2011. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32011L0065&from=DE, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

EU 2014 Europäisches Parlament und Rat der Europäischen Union. Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt. Amtsblatt der Europäischen Union, L 96/357, 29.03.2014. https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0035&from=DE, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Fally et al. 2000 — Fally S, Vandaele AC, Carleer M, Hermans C, Jenouvrier A, Merienne M, Coquart B, Colin R. Fourier Transform Spectroscopy of the O(2) Herzberg Bands. III. Absorption Cross Sections of the Collision-Induced Bands and of the Herzberg Continuum. J Mol Spectrosc. 2000 Nov;204(1):10-20, doi: 10.1006/jmsp.2000.8204, Epub 2000/10/18

Fiethen 2019 — Fiethen, K. Verlaufsbeobachtung von kindlichen Narkoseuntersuchungen mit besonderer Berücksichtigung der zentralen Hornhautdicke und der Bulbuslänge. Dissertation, 2019, Augenklinik und Poliklinik der Universitätsmedizin der Johannes-Gutenberg-Universität Mainz. https://openscience.ub.uni-mainz.de/bitstream/20.500.12030/2379/1/100003173.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Finlayson et al. 2022 — Finlayson L, Barnard IRM, McMillan L, Ibbotson SH, Brown CTA, Eadie E, Wood K. Depth Penetration of Light into Skin as a Function of Wavelength from 200 to 1000 nm. Photochem Photobiol. Jul;98(4):974-81, doi: 10.1111/php.13550, Epub 2021/10/27

Forbes et al. 2021 — Forbes PD, Cole CA, deGruijl F. Origins and Evolution of Photocarcinogenesis Action Spectra, Including Germicidal UVC(dagger). Photochem Photobiol. 2021 May;97(3):477-84, doi: 10.1111/php.13371, Epub 2020/12/23

Fukui et al. 2020 — Fukui T, Niikura T, Oda T, Kumabe Y, Ohashi H, Sasaki M, Igarashi T, Kunisada M, Yamano N, Oe K, Matsumoto T, Matsushita T, Hayashi S, Nishigori C, Kuroda R. Exploratory clinical trial on the safety and bactericidal effect of 222-nm ultraviolet C irradiation in healthy humans. PLoS One. 2020;15(8):e0235948, doi: 10.1371/journal.pone.0235948, Epub 2020/08/14

Gaggioli und Sahai 2007 — Gaggioli C, Sahai E. Melanoma invasion - current knowledge and future directions. Pigment Cell Res. Jun;20(3):161-72, doi: 10.1111/j.1600-0749.2007.00378.x, Epub 2007/05/23

Garcia et al. 2011 — Garcia AM, McLaren CE, Meyskens FL, Jr. Melanoma: is hair the root of the problem? Pigment Cell Melanoma Res. Feb;24(1):110-8, doi: 10.1111/j.1755-148X.2010.00782.x, Epub 2010/10/01

Glickman 2011 — Glickman RD. Ultraviolet phototoxicity to the retina. Eye Contact Lens. 2011 Jul;37(4):196-205, doi: 10.1097/ICL.0b013e31821e45a9, Epub 2011/06/08

Gniesmer et al. 2023 — Gniesmer S, Sonntag SR, Schiemenz C, Ranjbar M, Heindl LM, Varde MA, Emmert S, Grisanti S, Kakkassery V. [Diagnosis and treatment of malignant eyelid tumors]. Ophthalmologie. Mar;120(3):262-70, doi: 10.1007/s00347-023-01820-w, Epub 2023/02/10

Gray et al. 1992 — Gray RH, Johnson GJ, Freedman A. Climatic droplet keratopathy. Surv Ophthalmol. Jan-Feb;36(4):241-53, doi: 10.1016/0039-6257(92)90093-9, Epub 1992/01/01

Green et al. 1987 — Green H, Boll J, Parrish JA, Kochevar IE, Oseroff AR. Cytotoxicity and mutagenicity of low intensity, 248 and 193 nm excimer laser radiation in mammalian cells. Cancer Res. Jan 15;47(2):410-3, Epub 1987/01/15

Hampel et al. 2022 — Hampel U, Elflein HM, Kakkassery V, Heindl LM, Schuster AK. [Alterations of the anterior segment of the eye caused by exposure to UV radiation]. Ophthalmologe. Mar;119(3):234-9, doi: 10.1007/s00347-021-01531-0, Epub 2021/12/04

Hessling et al. 2021 — 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, Epub 2021/03/02

Hessling et al. 2022 — Hessling M, Lau B, Vatter P. Review of Virus Inactivation by Visible Light. Photonics. 2022 Feb;9(2), doi: ARTN 11310.3390/ photonics9020113

Hickerson et al. 2021 — Hickerson RP, Conneely MJ, Hirata Tsutsumi SK, Wood K, Jackson DN, Ibbotson SH, Eadie E. Minimal, superficial DNA damage in human skin from filtered far-ultraviolet C. Br J Dermatol. Jun;184(6):1197-9, doi: 10.1111/bjd.19816, Epub 2021/01/17

ICNIRP 2004 — International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP). Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180 nm and 400 nm (incoherent optical radiation). Health Phys. 2004 Aug;87(2):171-86, doi: 10.1097/ 00004032-200408000-00006, Epub 2004/07/17

ICNIRP 2020 — International Commission on Non-Ionizing Radiation, Protection (ICNIRP). Principles for Non-Ionizing Radiation Protection. Health Physics. 2020 May;118(5):477-82, doi: 10.1097/HP.0000000000001252

IEC 62471:2006 — IEC 62471:2006. International Electrotechnical Commission (IEC): Photobiological safety of lamps and lamp systems. Ausgabedatum: 2006-07. VDE-Verlag, Berlin. https://www.vde-verlag.de/iec-normen/212931/iec-62471-2006.html, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024.

Jin et al. 2022 — Jin SG, Padron F, Pfeifer GP. UVA Radiation, DNA Damage, and Melanoma. ACS Omega. 2022 Sep 20;7(37):32936-48, doi: 10.1021/acsomega.2c04424, Epub 2022/09/27

Kaidzu et al. 2019 — Kaidzu S, Sugihara K, Sasaki M, Nishiaki A, Igarashi T, Tanito M. Evaluation of acute corneal damage induced by 222-nm and 254-nm ultraviolet light in Sprague-Dawley rats. Free Radic Res. 2019 Jun;53(6):611-7, doi: 10.1080/10715762.2019.1603378, Epub 2019/04/06

Kaidzu et al. 2021 — 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(dagger). Photochem Photobiol. 2021 May;97(3):505-16, doi: 10.1111/php.13419, Epub 2021/03/23

Kaidzu et al. 2023 Kaidzu S, Sugihara K, Sasaki M, Nishiaki A, Ohashi H, Igarashi T, Tanito M. Safety Evaluation of Far-UV-C Irradiation to Epithelial Basal Cells in the Corneal Limbus. Photochem Photobiol. Jul-Aug;99(4):1142-8, doi: 10.1111/php.13750, Epub 2022/11/29

Keller-Rudek et al. 2013 Keller-Rudek H, Moortgat GK, Sander R, Sörensen R. The MPI-Mainz UV/VIS Spectral Atlas of Gaseous Molecules of Atmospheric Interest. Earth System Science Data.5(2):365-73, doi: 10.5194/essd-5-365-2013

Kneissl et al. 2019 Kneissl M, Seong TY, Han J, Amano H. The emergence and prospects of deep-ultraviolet light-emitting diode technologies. Nature Photonics. 2019 Apr;13(4):233-44, doi: 10.1038/s41566-019-0359-9

Kolozsvari et al. 2002 Kolozsvari L, Nogradi A, Hopp B, Bor Z. UV absorbance of the human cornea in the 240- to 400-nm range. Invest Ophthalmol Vis Sci. 2002 Jul;43(7):2165-8, Epub 2002/07/02

Krutmann et al. 2014 Krutmann J, Behar-Cohen F, Baillet G, de Ayguavives T, Ortega Garcia P, Pena-Garcia P, Reme C, Wolffsohn J. Towards standardization of UV eye protection: what can be learned from photodermatology? Photodermatol Photoimmunol Photomed. 2014 Apr-Jun;30(2-3):128-36, doi: 10.1111/phpp.12089, Epub 2013/12/07

Landsberg et al. 2012 Landsberg J, Kohlmeyer J, Renn M, Bald T, Rogava M, Cron M, Fatho M, Lennerz V, Wolfel T, Holzel M, Tuting T. Melanomas resist T-cell therapy through inflammation-induced reversible dedifferentiation. Nature. Oct 18;490(7420):412-6, doi: 10.1038/nature11538, Epub 2012/10/12

Lavker et al. 2004 Lavker RM, Tseng SC, Sun TT. Corneal epithelial stem cells at the limbus: looking at some old problems from a new angle. Exp Eye Res. Mar;78(3):433-46, doi: 10.1016/j.exer.2003.09.008, Epub 2004/04/27

Lock-Andersen et al. 1997 Lock-Andersen J, Therkildsen P, de Fine Olivarius F, Gniadecka M, Dahlstrom K, Poulsen T, Wulf HC. Epidermal thickness, skin pigmentation and constitutive photosensitivity. Photodermatol Photoimmunol Photomed. 1997 Aug;13(4):153-8, doi: 10.1111/j.1600-0781.1997.tb00220.x, Epub 1997/08/01

Lu et al. 2010 Lu HC, Chen HK, Chen HF, Cheng BM, Ogilvie JF. Absorption cross section of molecular oxygen in the transition E3Σu-v= 0 – X3Σg-v= 0 at 38 K. Astronomy and Astrophysics. 2010;520:A19, doi: 10.1051/0004-6361/201013998

Lucas et al. 2019 Lucas RM, Yazar S, Young AR, Norval M, de Gruijl FR, Takizawa Y, Rhodes LE, Sinclair CA, Neale RE. Human health in relation to exposure to solar ultraviolet radiation under changing stratospheric ozone and climate. Photochem Photobiol Sci. 2019 Mar 1;18(3):641-80, doi: 10.1039/c8pp90060d, Epub 2019/02/28

Mainster und Turner 2010 Mainster MA, Turner PL. Ultraviolet-B phototoxicity and hypothetical photomelanomagenesis: intraocular and crystalline lens photoprotection. Am J Ophthalmol. 2010 Apr;149(4):543-9, doi: 10.1016/j.ajo.2009.11.028, Epub 2010/03/30

Masoudi 2022 Masoudi S. Biochemistry of human tear film: A review. Exp Eye Res. Jul;220:109101, doi: 10.1016/j.exer.2022.109101, Epub 2022/05/05

Michalos et al. 1994 Michalos P, Avila EN, Florakis GJ, Hersh PS. Do human tears absorb ultraviolet light? CLAO J. Jul;20(3):192-3, doi: 10.1097/00140068-199407000-00012, Epub 1994/07/01

Mitchell und Cenedella 1995 Mitchell J, Cenedella RJ. Quantitation of ultraviolet light-absorbing fractions of the cornea. Cornea. May;14(3):266-72, doi: 10.1097/00003226-199505000-00007, Epub 1995/05/01

Moan et al. 2015 Moan J, Grigalavicius M, Baturaite Z, Dahlback A, Juzeniene A. The relationship between UV exposure and incidence of skin cancer. Photodermatol Photoimmunol Photomed. Jan;31(1):26-35, doi: 10.1111/phpp.12139, Epub 2014/09/13

Narita et al. 2018a Narita K, Asano K, Morimoto Y, Igarashi T, Hamblin MR, Dai T, Nakane A. Disinfection and healing effects of 222-nm UVC light on methicillin-resistant Staphylococcus aureus infection in mouse wounds. J Photochem Photobiol B. 2018 Jan;178:10-8, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2017.10.030, Epub 2017/11/05

Narita et al. 2018b Narita K, Asano K, Morimoto Y, Igarashi T, Hamblin MR, Dai T, Nakane A. Corrigendum to "Disinfection and healing effects of 222-nm UVC light on methicillin-resistant Staphylococcus aureus infection in mouse wounds" [J. Photochem. Photobiol. B Biol. 178 (January 2018) 10-18]. J Photochem Photobiol B. 2018 May;182:146, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2018.03.019, Epub 2018/04/08

Narita et al. 2018c Narita K, Asano K, Morimoto Y, Igarashi T, Nakane A. Chronic irradiation with 222-nm UVC light induces neither DNA damage nor epidermal lesions in mouse skin, even at high doses. PLoS One. 2018;13(7):e0201259, doi: 10.1371/journal.pone.0201259, Epub 2018/07/26

Narita et al. 2020 Narita K, Asano K, Naito K, Ohashi H, Sasaki M, Morimoto Y, Igarashi T, Nakane A. 222-nm UVC inactivates a wide spectrum of microbial pathogens. J Hosp Infect. 2020 Mar 31;105(3):459-67, doi: 10.1016/j.jhin.2020.03.030, Epub 2020/04/04

Narita et al. 2022 Narita K, Asano K, Yamane K, Ohashi H, Igarashi T, Nakane A. Effect of ultraviolet C emitted from KrCl excimer lamp with or without bandpass filter to mouse epidermis. PLoS One. 2022;17(5):e0267957, doi: 10.1371/journal.pone.0267957, Epub 2022/05/04

Neagu et al. 2019 Neagu M, Constantin C, Caruntu C, Dumitru C, Surcel M, Zurac S. Inflammation: A key process in skin tumorigenesis. Oncol Lett. May;17(5):4068-84, doi: 10.3892/ol.2018.9735, Epub 2019/04/05

Nishigori et al. 2023 Nishigori C, Yamano N, Kunisada M, Nishiaki-Sawada A, Ohashi H, Igarashi T. Biological Impact of Shorter Wavelength Ultraviolet Radiation-C(dagger). Photochem Photobiol. Mar;99(2):335-43, doi: 10.1111/php.13742, Epub 2022/11/11

Ogawa 1971 Ogawa M. Absorption Cross Sections of O2 and CO2 Continua in the Schumann and Far-uv Regions. The Journal of Chemical Physics. 1971;54(6):2550-6, doi: 10.1063/1.1675211

Ong et al. 2022 Ong Q, Wee W, Dela Cruz J, Teo JWR, Han W. 222-Nanometer Far-UVC Exposure Results in DNA Damage and Transcriptional Changes to Mammalian Cells. Int J Mol Sci. Aug 14;23(16), doi: 10.3390/ijms23169112, Epub 2022/08/27

OStrV 2010 Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (OStrV). Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen vom 19. Juli 2010 (BGBl. I Nr. 38 vom 26.07.2010, S. 960). https://www.gesetze-im-internet.de/ostrv/OStrV.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Otake et al. 2021 Otake M, Okamoto Yoshiyama K, Yamaguchi H, Hidema J. 222 nm ultraviolet radiation C causes more severe damage to guard cells and epidermal cells of Arabidopsis plants than does 254 nm ultraviolet radiation. Photochem Photobiol Sci. 2021 Dec;20(12):1675-83, doi: 10.1007/s43630-021-00123-w, Epub 2021/11/05

Parrish et al. 1982 Parrish JA, Jaenicke KF, Anderson RR. Erythema and melanogenesis action spectra of normal human skin. Photochem Photobiol. Aug;36(2):187-91, doi: 10.1111/j.1751-1097.1982.tb04362.x, Epub 1982/08/01

Patra et al. 2019 Patra V, Wagner K, Arulampalam V, Wolf P. Skin Microbiome Modulates the Effect of Ultraviolet Radiation on Cellular Response and Immune Function. iScience. May 31;15:211-22, doi: 10.1016/j.isci.2019.04.026, Epub 2019/05/13

Peng et al. 2023 Peng Z, Miller SL, Jimenez JL. Model Evaluation of Secondary Chemistry due to Disinfection of Indoor Air with Germicidal Ultraviolet Lamps (vol 10, pg 6, 2023). Environmental Science & Technology Letters. Jul 5;10(8):718-, doi: 10.1021/acs.estlett.3c00382

Peris-Martinez et al. 2021 Peris-Martinez C, Garcia-Domene MC, Penades M, Luque MJ, Fernandez-Lopez E, Artigas JM. Spectral Transmission of the Human Corneal Layers. J Clin Med. Sep 29;10(19), doi: 10.3390/jcm10194490, Epub 2021/10/14

Peter et al. 2023 Peter VG, Morandi SC, Herzog EL, Zinkernagel MS, Zysset-Burri DC. Investigating the Ocular Surface Microbiome: What Can It Tell Us? Clin Ophthalmol.17:259-71, doi: 10.2147/OPTH.S359304, Epub 2023/01/27

Pitts und Tredici 1971 Pitts DG, Tredici TJ. The effects of ultraviolet on the eye. Am Ind Hyg Assoc J. Apr;32(4):235-46, doi: 10.1080/0002889718506444, Epub 1971/04/01

Pitts 1974 Pitts DG. The human ultraviolet action spectrum. Am J Optom Physiol Opt. 1974 Dec;51(12):946-60, doi: 10.1097/00006324-197412000-00003, Epub 1974/12/01

Ponnaiya et al. 2018 Ponnaiya B, Buonanno M, Welch D, Shuryak I, Randers-Pehrson G, Brenner DJ. Far-UVC light prevents MRSA infection of superficial wounds in vivo. PLoS One. 2018;13(2):e0192053, doi: 10.1371/journal.pone.0192053, Epub 2018/02/22

Preiss und Setlow 1956 Preiss JW, Setlow R. Spectra of Some Amino Acids, Peptides, Nucleic Acids, and Protein in the Vacuum Ultraviolet. Journal of Chemical Physics.25(1):138-41, doi: Doi 10.1063/1.1742806

ProdSG 2021 Produktsicherheitsgesetz vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146, 3147), das durch Artikel 2 des Gesetzes vom 27. Juli 2021 (BGBl. I S. 3146) geändert worden ist. http://www.gesetze-im-internet.de/prodsg_2021/, zuletzt aufgerufen am 25.05.2022

Quickenden und Irvin 1980 Quickenden TI, Irvin JA. The Ultraviolet-Absorption Spectrum of Liquid Water. Journal of Chemical Physics.72(8):4416-28, doi: Doi 10.1063/1.439733

Rathinasamy und Augenstein 1968 Rathinasamy TK, Augenstein LG. Photochemical yields in ribonuclease and oxidized glutathione irradiated at different wavelengths in the ultraviolet. Biophys J. Nov;8(11):1275-87, doi: 10.1016/S0006-3495(68)86555-5, Epub 1968/11/01

Richters et al. 2017 Richters RJ, Falcone D, Uzunbajakava NE, Varghese B, Caspers PJ, Puppels GJ, van Erp PE, van de Kerkhof PC. Sensitive Skin: Assessment of the Skin Barrier Using Confocal Raman Microspectroscopy. Skin Pharmacol Physiol. 2017;30(1):1-12, doi: 10.1159/000452152, Epub 2017/01/26

Ringvold 1997 Ringvold A. In vitro evidence for UV-protection of the eye by the corneal epithelium mediated by the cytoplasmic protein, RNA, and ascorbate. Acta Ophthalmol Scand. Oct;75(5):496-8, doi: 10.1111/j.1600-0420.1997.tb00135.x, Epub 1998/02/20

Ringvold 1998 Ringvold A. Corneal epithelium and UV-protection of the eye. Acta Ophthalmol Scand. Apr;76(2):149-53, doi: 10.1034/j.1600-0420.1998.760205.x, Epub 1998/05/20

RKI und GEKID 2019 Robert Koch-Institut und Zentrum für Krebsregisterdaten (RKI, GEKID). Zentrum für Krebsregisterdaten: Krebs in Deutschland 2015/2016. https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/kid_2019/krebs_in_deutschland_2019.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

RKI und GEKID 2021 Robert Koch-Institut und Zentrum für Krebsregisterdaten (RKI, GEKID). Zentrum für Krebsregisterdaten: Krebs in Deutschland 2017/2018. https://www.krebsdaten.de/Krebs/DE/Content/Publikationen/Krebs_in_Deutschland/kid_2021/krebs_in_deutschland_2021.pdf, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Robciuc et al. 2014 — Robciuc A, Rantamaki AH, Jauhiainen M, Holopainen JM. Lipid-modifying enzymes in human tear fluid and corneal epithelial stress response. Invest Ophthalmol Vis Sci. Jan 2;55(1):16-24, doi: 10.1167/iovs.13-12577, Epub 2013/12/05

Rudhart et al. 2022 — Rudhart SA, Gunther F, Dapper L, Stuck BA, Hoch S. UV-C Light-Based Surface Disinfection: Analysis of Its Virucidal Efficacy Using a Bacteriophage Model. Int J Environ Res Public Health. 2022 Mar 10;19(6), doi: 10.3390/ijerph19063246, Epub 2022/03/26

Segev et al. 2020 — Segev F, Geffen N, Galor A, Cohen Y, Gefen R, Belkin A, Arieli Y, Epshtein S, Oren A, Harris A. Dynamic assessment of the tear film muco-aqueous and lipid layers using a novel tear film imager (TFI). Br J Ophthalmol. 2020 Jan;104(1):136-41, doi: 10.1136/bjophthalmol-2018-313379, Epub 2019/04/20

Setlow und Doyle 1957 — Setlow R, Doyle B. The action of monochromatic ultraviolet light on proteins. Biochim Biophys Acta. 1957 Apr;24(1):27-41, doi: 10.1016/0006-3002(57)90142-7, Epub 1957/04/01

Shi et al. 2017 — Shi Y, Jia R, Fan X. Ocular basal cell carcinoma: a brief literature review of clinical diagnosis and treatment. Onco Targets Ther.10:2483-9, doi: 10.2147/OTT.S130371, Epub 2017/05/17

Shibai et al. 2017 — Shibai A, Takahashi Y, Ishizawa Y, Motooka D, Nakamura S, Ying BW, Tsuru S. Mutation accumulation under UV radiation in Escherichia coli. Sci Rep. Nov 6;7(1):14531, doi: 10.1038/s41598-017-15008-1, Epub 2017/11/08

Skakun et al. 2002 — Skakun VS, Lomaev MI, Tarasenko VF, Shitts DV. KrCl and XeCl exciplex glow discharge lamps with an output power of ~1.5 kW. Technical Physics Letters. 2002;28(11):899-901, doi: 10.1134/1.1526876

Sliney et al. 1991 — Sliney DH, Krueger RR, Trokel SL, Rappaport KD. Photokeratitis from 193 nm argon-fluoride laser radiation. Photochem Photobiol. 1991 Jun;53(6):739-44, doi: 10.1111/j.1751-1097.1991.tb09886.x, Epub 1991/06/01

Sliney und Stuck 2021 — Sliney DH, Stuck BE. A Need to Revise Human Exposure Limits for Ultraviolet UV-C Radiation(dagger). Photochem Photobiol. 2021 May;97(3):485-92, doi: 10.1111/php.13402, Epub 2021/02/17

SSK 2016 — Strahlenschutzkommission (SSK). Schutz des Menschen vor den Gefahren solarer UV-Strahlung und UV-Strahlung in Solarien. Empfehlung der Strahlenschutzkommission mit wissenschaftlicher Begründung, verabschiedet in der 280. Sitzung der Strahlenschutzkommission am 11./ 12.02.2016. urn:nbn:de:101:1-201811191105194644 7143. Bekanntmachung im BAnz AT 27.11.2018 B3

Stamatas et al. 2010 — Stamatas GN, Nikolovski J, Luedtke MA, Kollias N, Wiegand BC. Infant skin microstructure assessed in vivo differs from adult skin in organization and at the cellular level. Pediatr Dermatol. 2010 Mar-Apr;27(2):125-31, doi: 10.1111/j.1525-1470.2009.00973.x, Epub 2009/10/07

Starzonek et al. 2019 Starzonek et al. Starzonek C, Volkmer B, Greinert R, Bauer S, Ott G. Gepulste und kontinuierliche in vitro UV-Bestrahlung menschlicher Hautproben - Vergleich der biologischen Wirksamkeit. baua: Bericht, Projektnummer F 2377, 1. Auflage.1-74, doi: 10.21934/baua:bericht20190329. https://www.baua.de/DE/Angebote/Publikationen/Berichte/F2377-2.html, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Stope 2021 Stope M. Phosphorylation of histone H2A.X as a DNA-associated biomarker (Review). World Academy of Sciences Journal. 2021;3(3), doi: 10.3892/wasj.2021.102

Sugihara et al. 2023 Sugihara K, Kaidzu S, Sasaki M, Ichioka S, Takayanagi Y, Shimizu H, Sano I, Hara K, Tanito M. One-year Ocular Safety Observation of Workers and Estimations of Microorganism Inactivation Efficacy in the Room Irradiated with 222-nm Far Ultraviolet-C Lamps. Photochem Photobiol. May-Jun;99(3):967-74, doi: 10.1111/php.13710, Epub 2022/09/10

Tagami 2017 Tagami H. Stratum Corneum Cell Layers. In: Farage, M., Miller, K., Maibach, H. (Hrsg.) Textbook of Aging Skin. Springer, Berlin, Heidelberg (2017). doi: 10.1007/978-3-662-47398-6_37, Epub 2016/09/29. In:

Tavares et al. 2023 Tavares RSN, Adamoski D, Girasole A, Lima EN, da Silva Justo-Junior A, Domingues R, Silveira ACC, Marques RE, de Carvalho M, Ambrosio ALB, Leme AFP, Dias SMG. Different biological effects of exposure to far-UVC (222 nm) and near-UVC (254 nm) irradiation. J Photochem Photobiol B. Jun;243:112713, doi: 10.1016/j.jphotobiol.2023.112713, Epub 2023/04/23

Threlfall und English 1999 Threlfall TJ, English DR. Sun exposure and pterygium of the eye: a dose-response curve. Am J Ophthalmol. 1999 Sep;128(3):280-7, doi: 10.1016/s0002-9394(99)00161-0, Epub 1999/10/08

TROS IOS 2013 TROS IOS. Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – TROS Inkohärente Optische Strahlung (TROS IOS). GMBl. 2013 S. 1302 ff. [Nr. 65-67]. https://www.baua.de/DE/Angebote/Rechtstexte-und-Technische-Regeln/Regelwerk/TROS/TROS.html, zuletzt aufgerufen am 17.01.2024

Voet et al. 1963 Voet D, Gratzer WB, Cox RA, Doty P. Absorption Spectra of Nucleotides, Polynucleotides, and Nucleic Acids in the Far Ultraviolet. Biopolymers. 1963;1(3):193-208, doi: DOI 10.1002/bip.360010302

Volatier et al. 2022 Volatier T, Schumacher B, Cursiefen C, Notara M. UV Protection in the Cornea: Failure and Rescue. Biology (Basel). 2022 Feb 10;11(2), doi: 10.3390/biology11020278, Epub 2022/02/26

Wang et al. 2022 Wang Y, Ding Y, Jiang X, Yang J, Li X. Bacteria and Dry Eye: A Narrative Review. J Clin Med. Jul 12;11(14), doi: 10.3390/jcm11144019, Epub 2022/07/28

Welch und Brenner 2021 Welch D, Brenner DJ. Improved Ultraviolet Radiation Film Dosimetry Using OrthoChromic OC-1 Film(dagger). Photochem Photobiol. 2021 May;97(3):498-504, doi: 10.1111/php.13364, Epub 2020/12/10

Welch et al. 2023 Welch D, Kleiman NJ, Arden PC, Kuryla CL, Buonanno M, Ponnaiya B, Wu X, Brenner DJ. No Evidence of Induced Skin Cancer or Other Skin Abnormalities after Long-Term (66 week) Chronic Exposure to 222-nm Far-UVC Radiation. Photochem Photobiol. 2022 Jan;99(1):168-75, doi: 10.1111/php.13656, Epub 2022/05/27

Wischermann et al. 2008 Wischermann K, Popp S, Moshir S, Scharfetter-Kochanek K, Wlaschek M, de Gruijl F, Hartschuh W, Greinert R, Volkmer B, Faust A, Rapp A, Schmezer P, Boukamp P. UVA radiation causes DNA strand breaks, chromosomal aberrations and tumorigenic transformation in HaCaT skin keratinocytes. Oncogene. 2008 Jul 17;27(31):4269-80, doi: 10.1038/onc.2008.70, Epub 2008/04/01

Woods et al. 2015 Woods JA, Evans A, Forbes PD, Coates PJ, Gardner J, Valentine RM, Ibbotson SH, Ferguson J, Fricker C, Moseley H. The effect of 222-nm UVC phototesting on healthy volunteer skin: a pilot study. Photodermatol Photoimmunol Photomed. 2015 May;31(3):159-66, doi: 10.1111/phpp.12156, Epub 2014/12/17

Yamano et al. 2020 Yamano N, Kunisada M, Kaidzu S, Sugihara K, Nishiaki-Sawada A, Ohashi H, Yoshioka A, Igarashi T, Ohira A, Tanito M, Nishigori C. Long-term Effects of 222-nm ultraviolet radiation C Sterilizing Lamps on Mice Susceptible to Ultraviolet Radiation. Photochem Photobiol. 2020 Jul;96(4):853-62, doi: 10.1111/php.13269, Epub 2020/03/31

Yamano et al. 2021 Yamano N, Kunisada M, Nishiaki-Sawada A, Ohashi H, Igarashi T, Nishigori C. Evaluation of Acute Reactions on Mouse Skin Irradiated with 222 and 235 nm UV-C. Photochem Photobiol. Jul;97(4):770-7, doi: 10.1111/php.13384, Epub 2021/01/23

Yannam et al. 2020 Yannam SK, Patras A, Pendyala B, Vergne M, Ravi R, Gopisetty VVS, Sasges M. Effect of UV-C irradiation on the inactivation kinetics of oxidative enzymes, essential amino acids and sensory properties of coconut water. J Food Sci Technol. Oct;57(10):3564-72, doi: 10.1007/s13197-020-04388-4, Epub 2020/09/10

Yoshiyama et al. 2023 Yoshiyama KO, Okamoto NL, Hidema J, Higashitani A. 222 nm far-UVC efficiently introduces nerve damage in Caenorhabditis elegans. PLoS One.18(1):e0281162, doi: 10.1371/journal.pone.0281162, Epub 2023/02/01

Young et al. 1998 Young AR, Chadwick CA, Harrison GI, Nikaido O, Ramsden J, Potten CS. The similarity of action spectra for thymine dimers in human epidermis and erythema suggests that DNA is the chromophore for erythema. J Invest Dermatol. 1998 Dec;111(6):982-8, doi: 10.1046/j.1523-1747.1998.00436.x, Epub 1998/12/18

Zwicker et al. 2022 Zwicker P, Schleusener J, Lohan SB, Busch L, Sicher C, Einfeldt S, Kneissl M, Kuhl AA, Keck CM, Witzel C, Kramer A, Meinke MC. Application of 233 nm far-UVC LEDs for eradication of MRSA and MSSA and risk assessment on skin models. Sci Rep. 2022 Feb 16;12(1):2587, doi: 10.1038/s41598-022-06397-z, Epub 2022/02/18

7 Abkürzungsverzeichnis

ACGIH	American Conference of Governmental Industrial Hygienists (*Berufsverband von Industriehygienikern)*
BMU	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit
CCD	Charge-coupled device
CFU	Colony Forming Unit (*koloniebildende Einheit*)
CMOS	Complementary metal-oxide semiconductor (*komplementärer Metall-Oxid-Halbleiter*)
CPD	Cyclobutan-Pyrimidindimer
DNA	Desoxyribonucleic acid (*Desoxyribonukleinsäure* – DNS)
6-4PP-Photoprodukt	6-Pyrimidin-4-Pyrimidon-Photoprodukt
EGW	Expositionsgrenzwert(e)
ICNIRP	International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (*Internationale Kommission zum Schutz vor nichtionisierender Strahlung*)
KrCl	Kryptonchlorid
LED	Licht emittierende Diode
MMP	Matrix-Metalloproteinasen
MRSA	Methicillin-resistenter *Staphylococcus aureus*
OH-Radikal	Hydroxyl-Radikal
OStrV	Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV)
OVOC	Oxygenated Volatile Organic Compound (*sauerstoffhaltige flüchtige organische Verbindung*)
PFU	Plaque Forming Units (*Plaque-bildende Einheiten*)
ProdSG	Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt (Produktsicherheitsgesetz – ProdSG)
RLT Anlage	Raumlufttechnische Anlage
RNA	Ribonucleic acid (*Ribonukleinsäure* – RNS)
ROS	Reactive Oxygen Species (*Reaktive Sauerstoffspezies*)

RHS	Reconstructed Human Skin (*rekonstruierte menschliche Haut*)
SCT	Stratum Corneum Thickness (*Dicke des Stratum corneum*)
SOA	Secondary Organic Aerosol (*sekundäres organisches Aerosol*)
SSK	Strahlenschutzkommission
$TCID_{50}$	50 % Tissue Culture Infectious Dose (*50 % Infektionsdosis in Zellkulturen*)
TIMP-1	Tissue Inhibitor of Metalloproteinases 1 (*metallopeptidase inhibitor 1*)
TROS	Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung
TROS IOS	Technische Regel zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - TROS Inkohärente Optische Strahlung
UV-Strahlung	Ultraviolette Strahlung
UVC_{254}	UVC-Strahlung der Wellenlänge 254 nm (Beispiel)
VOC	Volatile Organic Compound (*flüchtige organische Verbindung*)