

Bewertungsdefizite bei gepulster inkohärenter optischer Strahlung

Günter Ott, Stefan Bauer, Dortmund

Die OStrV-Expositionsgrenzwerte für den ultravioletten Spektralbereich beruhen auf der biologischen Wirkung kontinuierlicher Strahlung. Zur Bewertung gepulster inkohärenter optischer Strahlung (IOS) werden derzeit die Regelungen aus dem Bereich Laserstrahlung genutzt, allerdings ohne wissenschaftliche Überprüfung ihrer Anwendbarkeit. Die dafür notwendige Datenbasis ist bisher auch noch unzureichend. Deshalb wurde diese Thematik in einem BAuA-Forschungsprojekt aufgegriffen und die biologische Wirksamkeit gepulster inkohärenter UV-Strahlung an menschlicher Haut untersucht. Die vorgestellten Ergebnisse dienen dazu, die biologischen Wirkungsmechanismen besser zu verstehen und sind Anlass für eine Diskussion zur Überarbeitung des vorhandenen Expositionsgrenzwertkonzeptes bei der Arbeit mit gepulster IOS. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse von Vorversuchen vorgestellt und die Festlegungen aus den Technischen Regeln zur künstlichen optischen Strahlung erläutert.

In der europäischen Richtlinie 2006/25/EG „über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen (künstliche optische Strahlung)“ [1] sind Expositionsgrenzwerte (EGW) zur Bewertung der Risiken durch optische Strahlungsquellen enthalten. National umgesetzt durch die „Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV“ [2], besteht seit 2010 ein verbindliches und für die Gefährdungsbeurteilung zwingend notwendiges gesetzliches Regelwerk, welches durch die „Technischen Regeln zur OStrV“ (TROS) [3, 4], sowohl für inkohärente als auch für Laserstrahlung, konkretisiert wird.

Zur Gestaltung sicherer Produkte gilt für Hersteller u. a. die Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU [5] und insbesondere die damit verbundene harmonisierte Norm DIN EN 60825-1 über die „Sicherheit von Lasereinrichtungen Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen“ [6].

Eine Vielzahl potenzieller Risiken und Gefährdungen wird durch dieses bestehende Regelwerk (siehe Bild 1) erfasst, welches in regelmäßigen Abständen durch neue wissenschaftliche Erkenntnisse [7, 8, 9] aktualisiert wird. Bei genauerem Blick in das hochkom-

plexe EGW-System findet man drei Kriterien zur Bewertung gepulster (kohärenter) Laserstrahlung, wohingegen für gepulste IOS z. B. von dimmbaren LEDs, UVC-Entkeimungslampen oder aber auch von stark flackernden Schweißlichtbögen (intermittierende Strahlung) keine EGW vorhanden sind. In den „Technischen Regeln zu inkohärenter optischer Strahlung“ (TROS IOS) [4] findet man lediglich den Hinweis, dass unter bestimmten Umständen eine Expositionsbewertung gemäß TROS Laserstrahlung durchgeführt werden muss. Die wissenschaftliche Überprüfung dieser Anwendbarkeit bleibt allerdings noch zu zeigen.

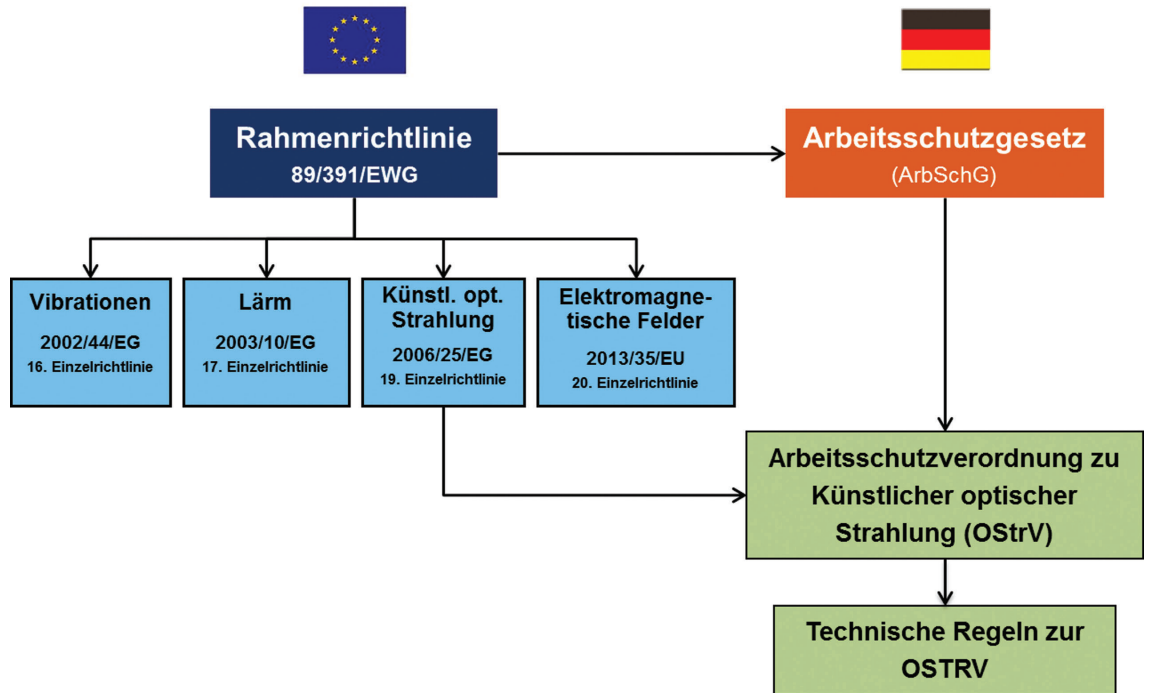
So belegen neue Forschungsergebnisse (wenn auch nur für Modellsysteme) eine um ca. 30 % höhere biologische Wirksamkeit von gepulster im Vergleich zu kontinuierlicher (cw, engl. continuous wave) optischer Strahlung [10]. Außerdem sind die Schädigungsmechanismen bei kürzerer Einwirkungsdauer (thermische Wirkung) andere als bei kontinuierlicher Bestrahlung (photochemische Wirkung). Mit Untersuchungen zum Lidschlussreflex (BAuA-Forschungsprojekt F 1775 [11]) konnte darüber hinaus nachgewiesen werden, dass Sicherheitskonzepte zum Schutz vor Gefährdungen durch eine bestimmte Strahlungsquelle bei anderen versagen können. Ange-

sichts einer zunehmenden Anzahl an Strahlungsquellen, die nicht mehr im cw-Modus sondern gepulst betrieben werden, stellt sich die Frage nach deren photobiologischer Sicherheit. Die EGW spielen bei der Beantwortung dieser Frage eine entscheidende Rolle.

Die BAuA hat dieses Wissensdefizit mit dem Forschungsvorhaben F 2377 „Biologische Wirksamkeit gepulster inkohärenter optischer Strahlung“, das der zweite Teil eines Projektbündels mit dem Titel „UV-Strahlungsbelastung beim Schweißen“ ist, aufgegriffen. Dessen übergeordnetes Ziel besteht darin, den Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch optische Strahlung beim Schweißen (und generell vor künstlichen optischen Strahlungsquellen) zu verbessern, und insbesondere für den zweiten Teil die bislang fehlenden wissenschaftlichen Grundlagen zur biologischen Wirkung von gepulster IOS zu erarbeiten.

Die neuen Erkenntnisse sollen dazu beitragen, die biologischen Wirkungsmechanismen besser zu verstehen und feststellen, ob das vorhandene EGW-Konzept überarbeitet werden muss. Bei signifikanten Unterschieden in der Bewertung von gepulster IOS im Vergleich zu kontinuierlicher-Strahlung ist eine Anpassung des Schutzkonzeptes zu entwickeln.

Bild 1 Gesetzliche Regelungen zu optischer Strahlung.



Begriffsbestimmungen

Für einen Vergleich von gepulster mit kontinuierlicher optischer Strahlung müssen zunächst die relevanten physikalischen Größen sowie einige Begriffe definiert werden, die sowohl für Laserstrahlung wie auch für IOS bei zeitlich veränderlichen Expositionen Anwendung finden. Eine Hilfestellung dazu sind u. a. die Definitionen aus der DIN EN 60825-1 [6], zum Teil visualisiert in Bild 2.

Dauerstrich cw / gepulste Strahlung

Als Dauerstrich oder cw-Laser bezeichnet man einen Laser mit kontinu-

ierlicher Ausgangsleistung P , der Strahlung über einen Zeitraum von mindestens 0,25 s emittiert. Folglich wird Strahlung, die über einen Zeitraum von weniger als 0,25 s emittiert wird, als gepulste Strahlung definiert.

Impulsdauer τ

die Impulsdauer τ ist die Zeitdauer zwischen den Halbwerten der Impulsspitzenleistung P_p der ansteigenden und dem entsprechenden Wert auf der abfallenden Flanke.

Emissionsdauer t_e

Die Emissionsdauer ist die Zeit des Dauerbetriebs oder eines Impulses (ein-

malige Emission, dann gilt $t_e = \tau$) bzw. einer Impulsfolge (periodische Emission), in der Zugang zu Laserstrahlung möglich ist.

Impulsenergie Q

Gepulste Strahlung wird durch die Impulsenergie Q beschrieben, welche ein Produkt aus der Impulsspitzenleistung P_p und der Impulsdauer τ ist.

$$Q = P_p \cdot \tau \text{ in Joule}$$

Impulsspitzenleistung P_p

Die Impulsspitzenleistung P_p ist die maximale Leistung von gepulster Strahlung, die aus dem Quotient der Impulsenergie Q und der Impulsdauer τ berechnet wird.

$$P_p = \frac{Q}{\tau} \text{ in Watt}$$

Impulsfolgefrequenz f

Die Impulsfolgefrequenz f ist die Anzahl N der Impulse pro Zeiteinheit t . Analog kann als Kehrwert der Periodendauer T definiert werden.

$$f = \frac{N}{t} = \frac{1}{T} \text{ in } \frac{1}{s} = \text{Hertz}$$

Mittlere Leistung P_m

Die mittlere Leistung P_m wird aus dem Produkt der Impulsenergie Q und der Impulsfolgefrequenz f berechnet.

$$P_m = Q \cdot f \text{ in Watt}$$

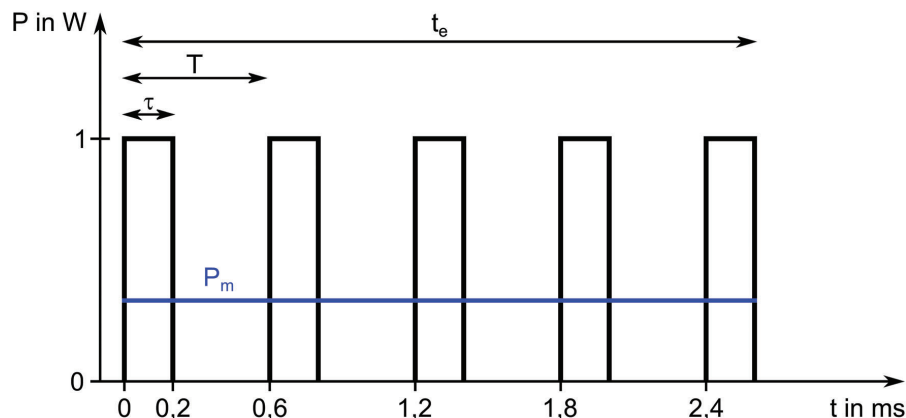


Bild 2 Hypothetische Impulsfolge zur Veranschaulichung von Emissionsdauer $t_e = 2,6$ ms, Impulsdauer $\tau = 0,2$ ms, Periodendauer (Impulsfolgedauer) $T = 0,6$ ms bzw. Impulsfolgefrequenz $f = T^{-1} = 1,7$ kHz, Impulsspitzenleistung $P_p = 1$ Wm⁻², Impulsenergie $Q = P_p \cdot \tau = 0,2$ mJ sowie der mittleren Leistung $P_m = 0,3$ Wm⁻².

Expositionsgrenzwert

EGW ist der maximal zulässige Wert, der bei Einhaltung eine Schädigung der Augen oder der Haut verhindert.

Wissenschaftliches Gutachten

Für das BAuA-Forschungsprojekt F 2377 wurde zunächst durch ein Gutachten geklärt, welche Gründe für eine unterschiedliche Betrachtung der biologischen Wirkung von Laser- und inkohärenter optischer Strahlung sprechen und welche Parameter (Impulsdauer, Impulsfolgefrequenz, Impulsenergie, etc.) bei den Untersuchungen zu berücksichtigen sind. Neben diesen Überlegungen wurden auch die Forschungsfragen konkretisiert. Auf dieser Grundlage erfolgten Vorschläge für biologisches Gewebe und Strukturen, an denen die entsprechenden Untersuchungen durchgeführt werden können. In dem Gutachten wird dabei an mehreren Stellen aufgezeigt, dass der Wissensstand zur gepulsten IOS noch sehr lückenhaft ist. Experimentelle Untersuchungen hierzu sind notwendig, um für die Gefährdungsbeurteilung ein fundiertes Schutzkonzept anwenden zu können.

Voruntersuchungen

Das Gutachten zeigte aber auch deutlich die Komplexität und den Umfang der notwendigen Untersuchungen auf. Zur Konkretisierung der entsprechenden experimentellen Parameter mussten zunächst noch Voruntersuchungen stattfinden. Ein geeignetes Probensystem, welches auf biologischem Material basiert, der menschlichen Haut ähnlich ist und von ultravioletter Strahlung geschädigt wird, fand sich im VioSpor Biosensor der Firma BioSense. Bestandteil des Sensors sind in Agarosegel eingebettete Sporen, die bei (gepulster oder cw-) Exposition in Abhängigkeit von der Höhe der Bestrahlung geschädigt bzw. abgetötet werden. Die Auswertung der Sensoren erfolgt durch Inkubation mit einer Nährlösung, wobei Proteine entstehen, die je nach Höhe der Bestrahlung mehr oder weniger intensiv gefärbt werden können (vereinfachte Darstellung). Anschließende densitometrische Messungen geben Aufschluss über die Desinfektionsrate δ .

Für die Voruntersuchungen wurde ein experimenteller Aufbau mit einer Bestrahlungseinheit, die gepulste IOS emittiert und durch geeignete Strahlführung auf die UV-sensitiven Biosensoren umlenkt, entwickelt. Die Modulierung der

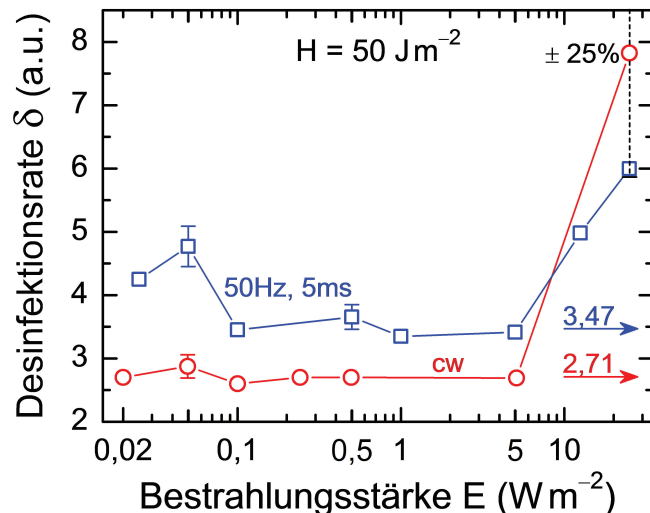


Bild 3 Desinfektionsrate als Funktion der Bestrahlungsstärke bei einer konstanten Bestrahlung $H = 50 \text{ J m}^{-2}$ sowohl für kontinuierliche (rote Kreise) als auch für gepulste (blaue Rechtecke) Exposition der VioSpor Biosensoren mit UV-Strahlung. Mehrfachmessungen spiegeln sich in den gezeigten Fehlerbalken (sofern diese die Symbolgröße übersteigen) wider. Für $E = 25 \text{ W m}^{-2}$ (cw) resultiert die -Unsicherheit aus einem -Fehler von 0,5 s. Für die annähernd konstanten Bestrahlungsstärkeregime sind außerdem zwei mittlere Desinfektionsraten angegeben. Nach [10].

optischen Strahlung erfolgte mittels eines optischen Choppers. Die rotierenden Sektorblenden mit variierender Anzahl an Öffnungen gestatten dabei die Kontrolle von Impulsdauer τ und Impulsfolgefrequenz f .

Ein zentraler Punkt der Voruntersuchungen war der Vergleich der Desinfektionsraten δ bei kontinuierlicher und gepulster Bestrahlung unter sonst gleichen Bedingungen. Dazu wurde zunächst das Bunsen-Roscoe-Gesetz überprüft, welches besagt, dass zur Verursachung eines identischen photochemischen Effektes lediglich die Bestrahlung H , bei variabler Bestrahlungsstärke E und entsprechender Expositionsdauer t , konstant sein muss.

In Bild 3 ist zu erkennen, dass das Bunsen-Roscoe-Gesetz nur in einem eingeschränkten Bestrahlungsstärkeregime gilt. Für kontinuierliche IOS mit Bestrahlungsstärken unterhalb von 5 W m^{-2} ist ein nahezu konstanter Wert zu erkennen. Im Verlauf der gepulsten Bestrahlung besteht für $E \leq 0,05 \text{ W m}^{-2}$ eine Abweichung vom konstanten Verhalten. Weiterhin ist bei kurzen Expositionsdauern und entsprechend höheren Bestrahlungsstärken eine sprunghafte Zunahme der cw-Desinfektionsrate δ festzustellen. Von besonderer Bedeutung ist der signifikante Unterschied der Desinfektionsrate von 2,71 bei kontinuierlicher zu 3,47 bei gepulster Bestrahlung. Im Folgenden soll versucht werden, mit

den bestehenden Schutzkonzepten diese Erhöhung von ca. 30 % nachzubilden.

Festlegungen der Technischen Regeln

In diesem Abschnitt werden die Kriterien an die Expositionsgrenzwerte bei zeitlich veränderlichen Bestrahlungen der Augen oder der Haut durch inkohärente optische Strahlung bzw. Laserstrahlung der TROS IOS [4] sowie der TROS Laserstrahlung [3], jeweils aus Teil 2: „Messungen und Berechnungen von Expositionen gegenüber inkohärenter bzw. Laserstrahlung“, vorgestellt.

Angaben der TROS IOS

In Teil 2, Abschnitt 6 der TROS IOS wird die „Vorgehensweise bei nicht durch die EGW erfassten Expositionssituationen“ beschrieben, wozu die Anwendung der EGW bei zeitlich veränderlicher Bestrahlung (Abschnitt 6.4) zählt.

Nach dem einleitenden Hinweis, dass in der OStrV Vorschriften fehlen, wie die bestehenden EGW für unterbrochene und zeitlich veränderliche Strahlungsexpositionen anzuwenden sind, wird die kumulative Dosis-Wirkungs-Beziehung von UV- und sichtbarer Strahlung angesprochen. Gemeint ist damit, dass sich die über einen 8h-Arbeitstag verteilten Expositionsdauern addieren und somit die Gesamtbestrahlung bei der EGW-Berechnung betrachtet werden muss. Bei den experimentellen Daten in Bild 3 ist dies bereits durch eine vierfach längere

Bestrahlungszeit der Biosensoren berücksichtigt (50 Impulse pro Sekunde mit einer Impulsdauer von jeweils 5 ms ergeben 250 ms Expositionsdauer pro Sekunde). Dadurch ist sowohl für cw-als auch gepulste Bestrahlung der Wert $H = 50 \text{ Jm}^{-2}$ konstant.

Anschließend werden in der TROS IOS je nach Wirkungsart der Strahlung insbesondere für Infrarotstrahlung Fälle beschrieben, bei denen die Strahlungsexposition während einer Arbeitsschicht variiert oder unterbrochen ist. In einem abschließenden Hinweis wird schließlich dargelegt, dass „die Bewertung von gepulster Strahlung mit Pulslängen kleiner als $18 \mu\text{s}$ und Pulsen mit unterschiedlicher Stärke in dieser TROS IOS nicht behandelt“ [4] wird. Sofern keine anderen staatlichen oder berufsgenossenschaftlichen Informationen vorliegen, ist für eine sichere Expositionsbeurteilung die TROS Laserstrahlung anzuwenden.

Fazit:

Die in der TROS IOS enthaltene Beschreibung zur Vorgehensweise bei der Bewertung nicht-kontinuierlicher Strahlung kann die experimentell gemessene Schädigungserhöhung von ca. 30 % für gepulste IOS nicht erklären.

Angaben der TROS Laserstrahlung

Die Kriterien hinsichtlich gepulster Strahlung aus der TROS Laserstrahlung sind vergleichbar mit dem Grenzwertkonzept der DIN EN 60825-1, wenn auch in der Norm zusätzliche Bedingungen für gepulste kohärente Bestrahlung beschrieben sind. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich deswegen nur auf die TROS Laserstrahlung.

Für wiederholt gepulste oder modulierte Laserstrahlung sind im Wellenlängenbereich von 400 bis 1400 nm drei Bedingungen zu beachten, wobei die daraus resultierende restriktivste Anforderung in Bezug auf die ermittelten Strahlungsdaten anzuwenden ist.

Bedingung 1

Die Exposition (Bestrahlung H oder Bestrahlungsstärke E) durch jeden einzelnen Impuls der Impulsdauer τ einer Impulsfolge darf den Expositionsgrenzwert für den Einzelimpuls nicht überschreiten (Einzelimpulskriterium).

Bedingung 2

Die mittlere Leistung P_m für eine Impulsfolge der Emissionsdauer t_e darf die zulässige Leistung entsprechend dem jeweiligen Expositionsgrenzwert für einen einzelnen Impuls der Emissionsdauer t_e nicht überschreiten (Kriterium der mittleren Leistung).

Bedingung 3

Bei einer Impulsfolge darf die Exposition durch jeden Einzelimpuls den Expositionsgrenzwert für den Einzelimpuls multipliziert mit einem Korrekturfaktor C_p (C_5 nach DIN EN 60825-1) nicht überschreiten (reduziertes Einzelimpulskriterium bzw. Impulsfolgekriterium). Für die Bestimmung von C_p bzw. von C_5 gelten unterschiedliche Festlegungen. Bedingung 3 ist ausschließlich anzuwenden, wenn sich der Expositionsgrenzwert auf einen möglichen thermischen Schaden bezieht [3].

Anhand der experimentellen Daten in Bild 3 kann man leicht zeigen, dass für jeden einzelnen Impuls Bedingung 1 erfüllt ist: mit einer maximalen Bestrahlungsstärke von $E = 25 \text{ Wm}^{-2}$ und einer Impulsdauer von $\tau = 5 \text{ ms}$ ergibt sich eine maximale Einzelimpulsbestrahlung von $H = 0,125 \text{ Jm}^{-2}$. Dieser Wert liegt deutlich unter dem experimentell festgelegten Wert von 50 Jm^{-2} . Es ist zu beachten, dass die EU-Richtlinie bzw. die OStrV den Expositionsgrenzwert auf 30 Jm^{-2} (restriktivster UV-Expositionsgrenzwert, Wellenlängenbereich 100 - 302 nm) beschränkt, für die in Bild 3 gezeigten Messungen wurde allerdings bewusst ein Expositionsszenario mit Grenzwertüberschreitung gewählt.

Die Berechnung der mittleren Leistung erfolgt über das Produkt aus Impulsenergie Q und Impulsfolgefrequenz f . Da die nahezu konstante 30 %ige Schädigungserhöhung nur im Gültigkeitsbereich des Bunsen-Roscoe-Gesetzes, $0,1 \text{ Wm}^{-2} \leq E \leq 5 \text{ Wm}^{-2}$, nachgewiesen werden konnte, ist die Überprüfung des Mittelwertkriteriums nur für die entsprechende obere bzw. untere Bestrahlungsstärkegrenze sinnvoll. Zur Berechnung der Impulsenergie $Q = P_p \times \tau = E \times A \times \tau$ wird die bestrahlte kreisrunde Fläche der Biosensoren mit einem Durchmesser von 1 cm zu Grunde gelegt. Die mittlere Leistung beträgt dann $P_m = 100 \mu\text{W}$ für $E = 5 \text{ Wm}^{-2}$ bzw. $2 \mu\text{W}$ bei einer Bestrahlungsstärke von

$0,1 \text{ Wm}^{-2}$ (Faktor 50). Im Vergleich mit dem Expositionsgrenzwert, $P_{EGW} = H \times A \times t_e^{-1} = 60 \mu\text{W}$ bzw. $1,2 \mu\text{W}$, basierend auf einer Bestrahlung $H = 30 \text{ Jm}^{-2}$ und einer Emissionsdauer $t_e = 40 \text{ s}$ bzw. 2000 s, kommt es durch Bedingung 2 demnach zu einer etwa 67 %-igen Grenzwertüberschreitung.

Bedingung 3 bezieht sich ausschließlich auf thermische Schädigungen. Die Biosensoren wurden allerdings wohldefinierter UV-Strahlung ausgesetzt, so dass eine photochemische Schädigung zu erwarten ist.

Fazit

Auch die Festlegungen der TROS Laserstrahlung bieten keinen Erklärungsansatz für die beobachtete Schädigungserhöhung von ca. 30 % bei gepulster Bestrahlung mit IOS.

Zusammenfassung, Ausblick

Das Gutachten, in dem ein Bedarf an experimentellen Untersuchungen hinsichtlich der biologischen Wirkung gepulster IOS beschrieben wird, sowie die Ergebnisse der Voruntersuchungen begründen das zur Zeit noch laufende BAuA-Forschungsprojekt F 2377, das zunächst auf gepulster IOS-Bestrahlung von menschlicher Haut beschränkt ist. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse werden zeigen, ob bzw. inwiefern die Notwendigkeit besteht, ein neues Grenzwertkonzept für gepulste inkohärente optische Strahlung zu entwickeln.

TS647

Autoren



Dipl.-Ing. **Günter Ott**,
Dr. **Stefan Bauer**,
Bundesanstalt für Arbeitsschutz und
Arbeitsmedizin (BAuA)
Dortmund

Literatur

- [1] 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, S. 38-59 (2006).
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32006L0025>
- [2] Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV). Bundesgesetzblatt I S. 960 (2010). Zuletzt geändert am 18.10.2017.
<http://www.bmas.de/DE/Service/Gesetze/arbeitsschutzverordnung-optische-strahlung.html>
- [3] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Laserstrahlung). Gemeinsames Ministerialblatt 12-15, S. 211-305 (2015).
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TROS/TROS-Laser.html>
- [4] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Inkohärente optische Strahlung). Gemeinsames Ministerialblatt S. 65-67, S. 1302-1379 (2013).
<http://www.baua.de/de/Themen-von-A-Z/Anlagen-und-Betriebssicherheit/TROS/TROS-IOS.html>
- [5] 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, S. 357-347 (2014).
<http://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32014L0035&rid=1>
- [6] DIN EN 60825-1:2015-07 „Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen“
- [7] 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 Physics 87, S. 171-186 (2004).
- [8] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Incoherent Visible and Infrared Radiation. Health Physics 105, S. 74-96 (2013).
- [9] International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection (ICNIRP), ICNIRP Guidelines on Limits of Exposure to Laser Radiation of Wavelengths between 180 nm and 1,000 µm. Health Physics 105, S. 271-295 (2013).
- [10] Bauer, S.; Holtschmidt, H.; Ott, G.: Ultraviolet germicidal efficacy as a function of pulsed radiation parameters studied by spore film dosimetry. Journal of Photochemistry and Photobiology, B: Biology 178, S. 69-75 (2018).
- [11] Reidenbach, H.-D.; Dollinger, K.; Hofmann, J.: F 1775 Überprüfung der Laserklassifizierung unter Berücksichtigung des Lidschlussreflexes. BAuA-Forschungsbericht (Fb 985).