

7.8.21

Lizenzen für Herrn Stefan Bauer.
Die Inhalte sind urheberrechtlich geschützt.
In Kooperation mit:



72. Jahrgang
Juli/August 2021
ISSN 2199-7330
1424

sicher ist sicher

www.SISdigital.de

SAVE THE DATE!

Frühbucherpreis bis 8.11.2021

2. Dezember 2021, Online oder live in Berlin

Jahrestagung sicher ist sicher 2021

Flexibilisierung und Digitalisierung:
Organisation, Technik, Arbeit und Prävention



Sonderpreis für Abonnent/innen von sicher ist sicher



Gleich vormerken, informieren und anmelden –
auch das laufend aktualisierte Tagungsprogramm finden Sie unter:

 www.ESV-Akademie.de/sis2021

ESV AKADEMIE

Medienpartner:

sicher ist sicher

Gefährdungsbeurteilung
bei der Verwendung
von UV-C-Strahlern zur
Desinfektion 331

Die neuen TREMF 337
Atembeschwerden
und Allergien durch
Reinigungsmittel 353

ESV ERICH
SCHMIDT
VERLAG



STEFAN BAUER · MARTIN BROSE

Expositionsgrenzwerte für gepulste Laserstrahlung an Beispielen

Bei Verwendung von Laserstrahlung am Arbeitsplatz ist die fachkundige Durchführung der Gefährdungsbeurteilung, die in vielen Fällen auch die Berechnung von Expositionsgrenzwerten beinhaltet, gesetzlich vorgeschrieben. Dabei kann insbesondere für gepulste Laserstrahlung die Auswahl des korrekten Expositionsgrenzwertes aufgrund mehrerer zu berücksichtigender Kriterien kompliziert sein. Im Folgenden werden die dafür benötigten grundlegenden Vorgehensweisen anhand ausgewählter Beispiele erläutert.

Laserstrahlung ist aus dem modernen Berufsalltag nicht mehr wegzudenken: Laserpointer zu Vorführzwecken, Entfernung- und Nivellierlaser im Baugewerbe oder industrielle Hochleistungslaser etwa zur Materialbearbeitung sind nur einige Anwendungsbeispiele und auch in der Medizin gibt es diverse Einsatzmöglichkeiten. Dabei bietet gepulste, im Vergleich zu kontinuierlicher, Laserstrahlung oftmals Vorteile, z. B. in Form eines geringeren Wärmeeintrags in das zu bearbeitende Material, weshalb solche Laserprodukte häufig bevorzugt angeschafft werden.

Die gesetzlich vorgeschriebene Beurteilung der Gefährdungen am Arbeitsplatz kann jedoch

insbesondere für gepulste Laserstrahlung nicht trivial sein, da mehrere Kriterien zur Auswahl des restriktivsten Expositionsgrenzwertes (EGW) überprüft werden müssen. Hierbei sind charakteristische Größen zur Beschreibung gepulster Laserstrahlung ebenso zu betrachten wie Expositionsdauern und Korrekturfaktoren z. B. bei wiederholter Exposition. Ein wichtiges Dokument zur Unterstützung der Gefährdungsbeurteilung in der betrieblichen Praxis sind die Technischen Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (OStrV), TROS Laserstrahlung [1]. Bei fachkundiger Anwendung lösen die TROS Vermutungswirkung aus, d. h. Arbeitgeber

können davon ausgehen, die Anforderungen der OStrV [2] zu erfüllen.

Der vorliegende Artikel gibt anhand ausgewählter Beispiele mit unterschiedlichen Herangehensweisen eine Hilfestellung für die Berechnung und Bewertung gepulster Laserstrahlung und soll das Verständnis entsprechender Inhalte in den TROS Laserstrahlung, insbesondere in Teil 2 „Messungen und Berechnungen“, unterstützen.

Grundlegende Größen

Voraussetzung für die fachkundige EGW-Berechnung sind Kenntnisse der zur Charakterisierung gepulster Laserstrahlung benötigten physikalischen Größen. Der in Abb. 1 skizzierte theoretische Idealfall rechteckiger Impulse veranschaulicht die Bedeutung von Impulsdauer (zeitliche „Breite“, $\tau = 0,1$ s) und Periodendauer (zeitlicher Abstand zweier Impulse, $T = 0,5$ s) sowie von Impulsspitzenleistung (maximale Leistung, $P_p = 1,5$ W) und Impulsenergie (Zeitintegral, $Q_p = 0,15$ J). Mit einer exemplarischen Impulswiederholrfrequenz (Anzahl Impulse $N = 2$ pro Sekunde) von $f_p = 2$ Hz ergibt sich eine mittlere Leistung von $P_m = Q_p f_p = 0,3$ W, die bei gleicher Gesamtenergie $Q_G = 2Q_p = 0,3$ J der Leistung eines kontinuierlich emittierenden (engl. continuous wave, cw) Lasers entspräche. Der Tastgrad, also die Impulsdauer pro Periodendauer, beträgt $D = 0,1$ s / $0,5$ s = $0,2$ und verdeutlicht, dass keine symmetrische Impulsfolge vorliegt ($D = 0,5$ mit $T = 2\tau$). Der Kehrwert des Tastgrades, das Tastverhältnis sowie das Ein-Aus-Verhältnis werden im folgenden Artikel nicht verwendet. Tab. 1 fasst die grundlegenden Größen und ihre Einheiten zusammen.

Zur Nomenklatur sei angemerkt, dass ein Impuls im Sinne der TROS Laserstrahlung ein einzelnes „Ereignis“ darstellt, wohingegen ein Puls (oder eine Impulsfolge) ein sich periodisch wiederholender Vorgang ist. Eine Impulsgruppe ist eine bestimmte Anzahl von Impulsen eines Pulses.

Berechnung von Expositionsgrenzwerten

Entscheidend für die EGW-Bestimmung eines Lasers sind seine Wellenlänge und die Dauer der voraussichtlichen Einwirkung. Außerdem muss zwischen Auge und Haut als exponiertem Organ unterschieden werden, wobei die EGW in vielen Fällen identisch sind. Bei einem Blick auf die EGW-Tabellen in Teil 2 „Messungen und Berechnungen“ der TROS Laserstrahlung zeigt sich darüber hinaus, dass auf eine Reihe von Korrekturfaktoren bzw. Zeitparameter geachtet werden muss: $C_{A,B,C}$ und T_1 , welche die Wellenlänge des Lasers berücksichtigen, C_E und T_2 , die die Ausdehnung α der Quelle miteinbeziehen sowie C_p

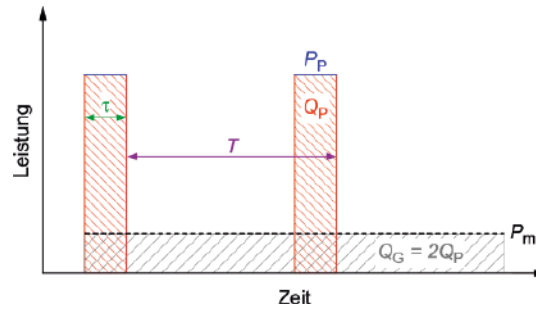


Abb. 1: Schematische Darstellung einiger charakteristischer Größen eines idealisierten Pulses.

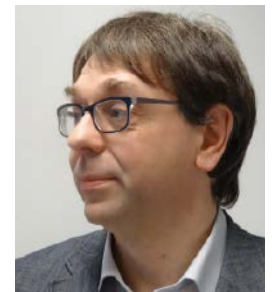
und T_{min} für wiederholt gepulste Exposition. Beginnend mit einer vergleichsweise einfachen Rechnung wird die Komplexität in den Beispielen 2 und 3 schrittweise gesteigert.

Beispiel 1. Für einen Nd:YAG-Laser ($\lambda = 1064$ nm) sollen die EGW berechnet werden. Da unklar ist, wie lange die Exposition tatsächlich stattfindet, kann von einer Expositionsdauer $t \geq 10$ s ausgegangen werden. In Tabelle A4.4 (TROS Laserstrahlung, Teil 2) findet man drei mögliche EGW, die von der Ausdehnung der Quelle abhängen. Sofern α unbekannt ist, sollte typischerweise der restriktivste Fall, der einer punktförmigen Quelle, also $\alpha \leq 1,5$ mrad, betrachtet werden. Damit folgt der EGW zu $E = 10 C_A C_C$ (in Wm^{-2}). Mit den Werten für die Korrekturfaktoren aus Tabelle A4.6, $C_A = 5$ und $C_C = 1$, ergibt sich eine maximal zulässige Bestrahlungsstärke von $50 Wm^{-2}$ für das Auge. Der EGW für die Haut kann Tabelle A4.5 entnommen werden und ist $E = 2000 C_A = 10 kWm^{-2}$.

Es ist wichtig anzumerken, dass bei der messtechnischen Erfassung der Bestrahlungsstärke



Stefan Bauer
Wissenschaftlicher Mitarbeiter auf dem Kompetenzfeld „Optische Strahlung“ der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA). www.baua.de/optische-strahlung



Dipl.-Phys. Martin Brose
Leiter des Sachgebietes Nichtionisierende Strahlung der DGUV; Stellvertretender Obmann des K841 im DKE „Optische Strahlung“ Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro Medien-erzeugnisse (BG ETEM) Köln. strahlung@bgetem.de

Größe	Definition	Einheit
Anzahl Impulse	$N = f_p t$	–
Impulswiederholrfrequenz	$f_p = N t^{-1} = T^{-1}$	Hertz, Hz
Periodendauer	$T = f_p^{-1}$	Sekunde, s
Impulsdauer	$\tau = Q_p P_p^{-1}$	
Tastgrad	$D = \tau T^{-1} = \tau f_p$	–
Impulsenergie	$Q_p = P_p \tau$	Joule, J
Impulsspitzenleistung	$P_p = Q_p \tau^{-1}$	Watt, W
Mittlere Leistung	$P_m = Q_p f_p$	
Bestrahlungsstärke	$E = P A^{-1}$	Watt pro Quadratmeter, Wm^{-2}
Bestrahlung	$H = E t$	Joule pro Quadratmeter, Jm^{-2}
Korrekturfaktoren	$C_{A,B,C,E}$	–
	$C_p = N^{-0,25}$	
Zeitparameter	$T_{1,2,min}$	Sekunde, s

Tab. 1: Größen zur Charakterisierung und Bewertung gepulster Laserstrahlung

Einzelimpulskriterium	Jeder Impuls einer Impulsfolge muss den EGW des Einzelimpulses einhalten.
Mittelwertkriterium	Jede (Unter-) Impulsgruppe einer Impulsfolge muss innerhalb einer beliebigen Zeitdauer t den cw-EGW für dieses t einhalten.
Impulsfolgekriterium	Zusatzbedingung zum Schutz gegen retinale thermische Schädigung. Es gilt der Einzelimpuls-EGW multipliziert mit $C_p = N^{-0,25}$, wobei alle Impulse innerhalb von T_{min} als Einzelimpuls der Dauer T_{min} zusammengefasst werden.

Tab. 2: Kriterien für wiederholt gepulste oder modulierte Laserstrahlung.

unterschiedliche Blendendurchmesser – 7 mm beim Auge und 3,5 mm für die Haut – zu Grunde gelegt werden müssen. Misst man z.B. für den Nd:YAG-Laser eine Leistung von $P_{7mm} = 20$ mW, so folgt für das Auge mit $A_{7mm} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ die Bestrahlungsstärke zu $E = 519 \text{ Wm}^{-2}$. Der entsprechende EGW ist demnach um mehr als das Zehnfache überschritten und Maßnahmen sind zu ergreifen.

Pulskriterien

Die EGW-Tabellen der TROS Laserstrahlung enthalten nur EGW für kontinuierliche Laserstrahlung bzw. für Einzelimpulse. Tritt die Exposition jedoch wiederholt gepulst oder moduliert auf, so sind gemäß TROS Laserstrahlung Teil 2, A4.1 (3) drei Pulskriterien zu überprüfen, siehe Tab. 2, und ist der daraus resultierende restriktivste Wert anzuwenden.

Beispiel 2. Der Nd:YAG-Laser aus Beispiel 1 wird nun mit einer Impulsdauer von $\tau = 1$ ms und einer Impulswiederholffrequenz von $f_p = 20$ Hz betrieben. Den Augen-EGW des Einzelimpulses findet man in Tabelle A4.3 zu $H = 90 \tau^{0,75} C_C C_E = 506 \text{ mJm}^{-2}$ (mit $C_C = C_E = 1$) bzw. ausgedrückt in Bestrahlungsstärke $E = 506 \text{ Wm}^{-2}$ (Einzelimpulskriterium). Aufgrund der gepulsten Emission liegt die tatsächliche Exposition während der 10 s (größte Impulsgruppe = komplette Impulsfolge) jedoch nur bei $\tau N = \tau f_p t = 1 \text{ ms} \cdot 20 \text{ Hz} \cdot 10 \text{ s} = Dt = 0,2 \text{ s}$, d.h. um den Faktor $D^{-1} = 50$ niedriger. Mit Hilfe des bereits bestimmten EGW für den cw-Laser aus Beispiel 1 von 50 Wm^{-2} folgt damit $E = 2,5 \text{ kWm}^{-2}$ (Mittelwertkriterium). In Tabelle A4.7 wird für den Nd:YAG-Laser ein $T_{min} = 50 \mu\text{s}$ aufgeführt. Innerhalb dieser Zeit können keine Impulse zusammengefasst werden, da $\tau = 1$ ms. Aus der Anzahl der zu betrachtenden Impulse, $N = f_p t = 200$, ergibt sich schließlich $E = N^{-0,25} \cdot 506 \text{ Wm}^{-2} = 135 \text{ Wm}^{-2}$ (Impulsfolgekriterium).

Bei einer Leistungsmessung wurde mit einer 7 mm Blende eine Spitzenimpulsleistung von $P_p = 10$ mW bestimmt. Hieraus ergibt sich mit $A_{7mm} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ eine (Spitzen-) Bestrahlungsstärke von $E = PA^{-1} = 260 \text{ Wm}^{-2}$. Das Einzelimpulskriterium wird damit eingehalten. Aus der mittleren Leistung $P_m = Q_p f_p = P_p \tau f_p =$

$10 \text{ mW} \cdot 1 \text{ ms} \cdot 20 \text{ Hz} = 0,2 \text{ mW}$ folgt, erneut bezogen auf die 7 mm Blende, eine mittlere Bestrahlungsstärke von $5,2 \text{ Wm}^{-2}$. Auch der EGW des Mittelwertkriteriums wird nicht überschritten. Bei einer Expositionsdauer von 10 s kann schließlich mit $H = Et = 52 \text{ Jm}^{-2}$ auch das Impulsfolgekriterium eingehalten werden. Die EGW-Berechnung zum Schutz der Haut erfolgt analog, wobei in diesem Beispiel die Augen-EGW deutlich restriktiver sind.

Beispiel 3. Ein Diodenlaser emittiert gepulste sichtbare Strahlung einer Wellenlänge von 595 nm. Die Impulswiederholffrequenz beträgt $f_p = 1,5$ Hz bei einer Impulsdauer von $\tau = 0,45$ ms und einer Impulsenergie von $Q_p = 0,1$ J. Der Laserstrahl wird von einer Wand mit rauer Oberfläche reflektiert, so dass der Strahldurchmesser 0,45 cm beträgt. Aufgrund der Zugänglichkeit, d.h. näher kann eine Person nicht an die Wand gelangen, soll der minimale Betrachtungsabstand bei 1 m liegen. Der Betrachtungswinkel folgt damit zu $\alpha = 0,45 \text{ cm} / 100 \text{ cm} = 4,5 \text{ mrad}$. Es soll eine maximale Expositionsdauer von 100 s beurteilt werden.

Aus Tabelle A4.3 entnimmt man den EGW des Einzelimpulses zu $H = 18 \tau^{0,75} C_E = 167 \text{ mJm}^{-2}$, wobei für den Korrekturfaktor $C_E = \alpha / \alpha_{min} = 4,5 \text{ mrad} / 1,5 \text{ mrad} = 3$ gilt (Einzelimpulskriterium). Zur Berechnung des Mittelwertkriteriums müssen gemäß Tabelle A4.4 zunächst sowohl photochemische als auch thermische Schädigungen betrachtet werden. Für ersteres folgt der EGW zu $E = C_B$ in Wm^{-2} (oder analog $H = 100$ in Jm^{-2} für 100 s). Der Korrekturfaktor hängt von der Wellenlänge ab und ist gegeben durch $C_B = 10^{0,02(595-450)} = 794$. Im Falle thermischer Schädigungen muss aufgrund des „ausgedehnten“ Laserstrahls der Zeitparameter $T_2 = 10 \cdot 10^{[(\alpha-1,5)/98,5]} = 10,7 \text{ s}$ (Achtung: Druckfehler in den TROS Laserstrahlung) berücksichtigt werden und man findet für $t > T_2$ den EGW $E = 18 C_E T_2^{-0,25} = 29,8 \text{ Wm}^{-2}$. Zum Vergleich mit der tatsächlichen Exposition muss der kleinere der beiden EGW herangezogen werden, also der für die thermische Gefährdung. Bei $N = f_p t = 1,5 \text{ Hz} \cdot 100 \text{ s} = 150$ Impulsen ergibt sich im Betrachtungszeitraum von 100 s der EGW für den Einzelimpuls zu $H = 29,8 \text{ Wm}^{-2} \cdot tN^{-1} = 29,8 \text{ Wm}^{-2} \cdot f_p^{-1} = 19,87 \text{ Jm}^{-2}$.

Zur Bestimmung der dritten Bedingung (Impulsfolgekriterium) ist der EGW des Einzelimpulses mit $C_p = N^{-0,25}$ zu multiplizieren. Es ist zu beachten, dass die Anzahl der Impulse nicht basierend auf der Expositionsdauer von 100 s zu berechnen ist, sondern hierfür gemäß TROS Laserstrahlung Teil 2, A4.1 (5), Hinweis 2, beim beispielhaften Diodenlaser mit $\lambda = 595 \text{ nm}$ das bereits bestimmte $T_2 = 10,7 \text{ s}$ die Grundlage bildet.

Damit folgt $N = f_p T_2 = 16$, $C_p = 0,5$ und schließlich $H_{\text{reduziert}} = 83 \text{ mJm}^{-2}$.

Die Impulsenergie $Q_p = 0,1 \text{ J}$ wird im Abstand von 1 m in Bezug auf eine Blende mit 7 mm Durchmesser vollständig erfasst. Mit Hilfe der bereits berechneten Kreisfläche von $A_{7\text{mm}} = 3,85 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$ ergibt sich eine Bestrahlung von $H = 2,6 \text{ kJm}^{-2}$. Durch diese Exposition werden alle EGW deutlich überschritten und Schutzmaßnahmen müssen ergriffen werden.

Ausblick

Während für den restriktivsten Fall mit $\alpha \leq \alpha_{\text{min}} = 1,5 \text{ mrad}$ die EGW-Bestimmung häufig schnell durchgeführt werden kann, steigert sich die Komplexität der Berechnung für Laserstrahlung mit größeren Strahldurchmessern und Korrekturfaktoren müssen berücksichtigt werden. Es ist wichtig anzumerken, dass die hier erläuterten Beispiele nur grundlegende Vorgehensweisen aufzeigen sollen, die sich vor allem beim Mittelwertkriterium unterscheiden können. Die Zeitparameter T_1 und T_{min} wurden in diesem Artikel nicht diskutiert, wobei sich insbesondere für T_{min} komplizierte Bedingungen ergeben können. Ebenso können für Fälle mit unterschiedlicher Impulsbreite anspruchsvolle Berechnungen erforderlich werden.

Tabelle A4.5 im Teil 2 der TROS Laserstrahlung enthält darüber hinaus eine wichtige Anmerkung, welche die bestrahlte Hautfläche betrifft und die in die EGW-Berechnung miteinbezogen werden muss. So sind für Hautareale $A_H = 0,01 \text{ m}^2$ ($10 \text{ cm} \cdot 10 \text{ cm}$) Bestrahlungsstärken von 1000 Wm^{-2} für Expositionsdauern größer 10 s gestattet. Diese Wärmebelastung kann die Haut jedoch merklich erhitzen und sollte bei der Gefährdungsbeurteilung berücksichtigt werden. Grundsätzlich (auch für andere Wellenlängenbereiche)

ist ohne Schutzmaßnahmen bei länger andauernder Exposition als 10 s eine Beschränkung der maximalen Bestrahlungsstärke auf 100 Wm^{-2} empfehlenswert, sofern die zuvor berechneten EGW nicht restriktiver sind.

Abschließend sei angemerkt, dass seit Jahren eine Diskrepanz zwischen Arbeitsplatz- und Produktsicherheit vorliegt. Die EGW der OStrV bzw. der TROS Laserstrahlung beruhen auf denen der EU-Richtlinie 2006/25/EG, welche die damals aktuellen Grenzwertempfehlungen der *International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection* (ICNIRP) beinhaltet. Bei der Überarbeitung der häufig als „Lasergrundnorm“ bezeichneten IEC 60825-1 aus dem Jahr 2014 (DIN EN 60825-1:2015-07) wurden jedoch die 2013 aktualisierten ICNIRP-Grenzwertempfehlungen mit teils angepassten EGW für Laserstrahlung zu Grunde gelegt. Bestrebungen, diese Unstimmigkeiten zwischen Arbeitsplatz- und Produktsicherheit zu regeln waren bislang wenig erfolgreich. Die Verantwortung für die europäische Arbeitsschutzrichtlinie zu künstlicher optischer Strahlung liegt schlussendlich bei der Europäischen Kommission, die entscheiden muss, inwiefern ein geändertes EGW-Konzept besser geeignet ist, Beschäftigte vor Gefährdungen durch Laserstrahlung zu schützen. ■

LITERATUR

- [1] Bundesministerium für Arbeit und Soziales (BMAS), *Technische Regeln zur Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung (TROS Laserstrahlung)*. Gemeinsames Ministerialblatt 69 (50-53), 961–1044, 2018.
- [2] *Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung – OStrV)*. Bundesgesetzblatt I 38, 960-967, 2010, zuletzt geändert durch Artikel 5 Abs. 6 der Verordnung vom 18. Oktober 2017 (Bundesgesetzblatt I 69, 3584-3995, 2017).