

ARBEITSWISSENSCHAFTLICHE ERKENNTNISSE

Forschungsergebnisse für die Praxis

Persönliche Schutzausrüstung für Tätigkeiten mit handgeführten oder positionierten Laserbearbeitungsgeräten

Inhalt

- 1 Einleitung
- 2 Theoretische Betrachtung der Anforderungen an persönliche Schutzausrüstung (PSA) gegen Laserstrahlung
 - 2.1 Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (VMB) an Schutzsystemen
 - 2.2 Gegenüberstellung der VMB mit den Grenzwerten (MZB_{Haut})
 - 2.3 Beispiele für Schädigungen der Haut bei unbeabsichtigter Bestrahlung
 - 2.4 Am Markt verfügbare Schutzbekleidung / untersuchte Schutzsysteme
- 3 Charakterisierung der Schutzsysteme
 - 3.1 Kleinsignal-Untersuchungen
 - 3.2 Bestrahlungsuntersuchungen an Schutzsystemen (Realbestrahlung)
- 4 Kalorimetrische Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des Stoll/Chianta Kriteriums
 - 4.1 Reaktionszeit zum Entfernen der exponierten Körperteile aus dem Gefahrenbereich
 - 4.2 Schädigungsgrenzen, Stoll/Chianta Kriterium
 - 4.3 Bewertung der Schutzfunktion der Schutzsysteme
- 5 Zusammenfassung
- 6 Schrifttum
 - 6.1 Literatur
 - 6.2 Normen

Ergebnisse aus dem im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Sozialordnung, Bonn, und der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, durchgeführten Forschungsvorhaben, dargestellt in der Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin – Forschung – Fb 2117 von

Meier, O.; Püster, T.
Beier, H.; Wenzel, D.

Nachdruck und auszugsweise Wiedergabe nur mit ausdrücklicher vorheriger Zustimmung der Bundesanstalt

Arbeitswissenschaftliche Erkenntnisse Nr. 132

Persönliche Schutzausrüstung für Tätigkeiten mit handgeführten oder positionierten Laserbearbeitungsgeräten

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund, 2007
ISSN 0720-1699

1 Einleitung

Geräte zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung (HLG) stellen eine technisch innovative Ergänzung zu automatisierten Laseranlagen dar. Sie können immer dann vorteilhaft gegenüber automatisierten Laseranlagen eingesetzt werden, wenn:

- komplexe und/oder immobile Bauteile mit hoher Flexibilität lokal und präzise vor Ort bearbeitet werden sollen,
- auf aufwändige Handhabungstechnik und Programmierung verzichtet werden soll.

Mit der Verfügbarkeit von mobilen, leistungsfähigen und kompakten Festkörper-, Dioden- und Faserlasern in Kombination mit Strahlführungssystemen über optische Fasern [1-2] haben sich eine Reihe neuer Anwendungsfelder von HLG entwickelt (**Bild 1**). Eingesetzt werden HLG zum Schneiden, zum Schweißen, für die Oberflächenbearbeitung, wie Auftragschweißen, Löten und Härten, sowie zum Abtragen bzw. Reinigen [3-8]. Die Einsatzfelder der HLG sind u.a. der Automobilbau, der Maschinen- und Werkzeugbau wie auch die Denkmalpflege oder der Rückbau komplexer Anlagen. Anwendungen im Schiffbau sind derzeit in der Erprobung [9]; der Einsatz von HLG für den Fassadenbau (auf Baustellen) ist geplant.

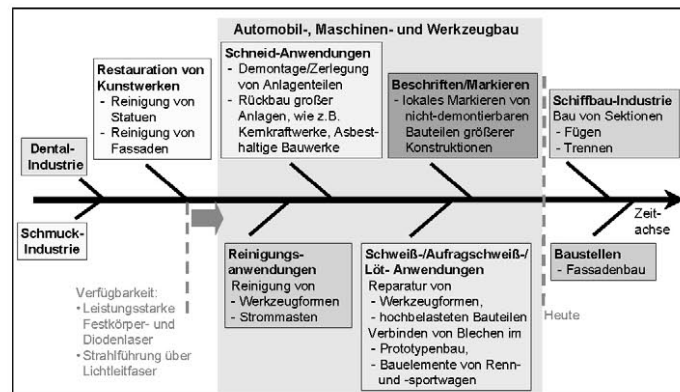


Bild 1: Anwendungen von HLG

Gefährdungen

Die Mehrzahl der HLG wird für 3D-Anwendungen eingesetzt; eine vollständige Kapselung der Prozesszone zur Abschirmung der Laserstrahlung ist daher oftmals nicht möglich. Verfahrensbedingt wird im bestimmungsgemäßen Betrieb bei den meisten HLG-Anwendungen gestreute Laserstrahlung zugänglich (in einigen Fällen gerichtet reflektierte Strahlung), in vorhersehbaren Fehlerfällen wie auch bei vorhersehbarem Missbrauch kann allerdings gerichtet reflektierte Laserstrahlung sowie direkte Laserstrahlung zugänglich werden. Anders als konventionelle Handwerkzeuge (z.B. Handbohrmaschine, Bolzentreiber) weisen HLG je nach Strahlformung und Freiheitsgraden der Strahlaustrittsebene sowie Reflexionsbedingungen einen weiten Wirk- und damit Gefährdungsbereich auf. Ausgehend von den mittleren Ausgangsleistungen und den Bearbeitungsbedingungen kann in diesen Fällen eine Überschreitung der maximal zulässigen Bestrahlungswerte für ungeschützte Augen (MZB_{Auge}) und für die nackte Haut (MZB_{Haut}) gemäß DIN EN 60825-1 nicht ausgeschlossen werden.

Persönliche Schutzausrüstung

Eine Reduzierung des Risikos von Schädigungen kann durch den Einsatz persönlicher Schutzausrüstung (PSA) erreicht werden. Während Anforderungen an persönliche Schutzbekleidung gegenüber Kontakt mit Flammen, Hitzestrahlung und Einwirkung von Störlichtbögen und deren Prüfung bereits normativ formuliert wurden und zum Schutz der Augen gegenüber Laserstrahlung am Markt qualifizierte und geprüfte Laserschutzbrillen (nach DIN EN 207) verfügbar sind, müssen im Vergleich hierzu für Schutzbekleidung gegen Laserstrahlung -wie Oberbekleidung, Handschuhe, Schürzen- die Anforderungen an die Schutzsysteme und die Prüfbedingungen erst noch definiert werden.

Für die Definition von Anforderungen an Schutzbekleidung gegen Laserstrahlung sind folgende Kriterien/Größen zu bewerten:

- 1) Die vorhersehbare maximale Bestrahlung (VMB gemäß DIN EN 60825-4), der die Schutzsysteme bzw. die Haut ausgesetzt werden können, muss bestimmt werden.
- 2) Durch fehlende Schutzbekleidung, Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung oder Lochbildung des Schutzsystems darf keine Schädigung der Haut auftreten. Hierzu wird die VMB den Grenzwerten für die maximale Laserbestrahlung der Haut (MZB_{Haut}) gegenübergestellt.
- 3) Durch Absorption der Laserstrahlung und nachfolgenden Wärmetransport von dem Schutzsystem an die darunter liegende Haut dürfen keine irreversiblen Schädigungen auftreten. Hierzu wird der Wärmeeintrag an die Haut mit den Grenzwerten nach Stoll/Chianta für Verbrennungen zweiten Grades der Haut verglichen.
- 4) Kriterien wie Entflammen, Nachbrennen, Schrumpfen der Schutzsysteme, sind zu prüfen. Aus dem Verhalten des Schutzsystems darf keine sekundäre Gefährdung der Haut resultieren.

Daneben muss die Schutzbekleidung zur Benutzung bei Tätigkeiten mit HLG weitere Anforderungen erfüllen, wie Ergonomie, Tragekomfort etc.

Für die Bestimmung der VMB ist neben der Abschätzung des Abstands und der räumlichen Lage der Schutzsysteme zur Strahlaustrittsöffnung die genaue Kenntnis der eingesetzten HLG in Verbindung mit der Laserstrahlquelle erforderlich. Bestimmende Parameter sind u.a. die emittierte maximale Laserleistung, die Betriebsart des Lasers, die eingesetzte Strahlformung (Aufweitung, Kollimation, Fokussierung) sowie die Divergenz des Laserstrahls.

Die Risikoanalyse muss für den bestimmungsgemäßen Betrieb, vorhersehbare Fehlerfälle und vorhersehbaren Missbrauch vorgenommen werden (DIN EN ISO 12100).

- Im bestimmungsgemäßen Betrieb tritt typischerweise eine Exposition gegenüber diffus gestreuter Laserstrahlung auf.
- In vorhersehbaren Fehlerfällen und Missbrauch kann eine Exposition
 - gegenüber dem direkten (geformten) Laserstrahl
 - oder gegenüber einem gerichtet reflektierten Laserstrahl, wie er z.B. von einer Werkstückoberfläche in den Raum reflektiert werden kann, möglich sein.

2 Theoretische Betrachtung der Anforderungen an PSA gegen Laserstrahlung

2.1 Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (VMB) an Schutzsystemen

In der folgenden Darstellung sind typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen des Bedieners eines HLG angegeben.

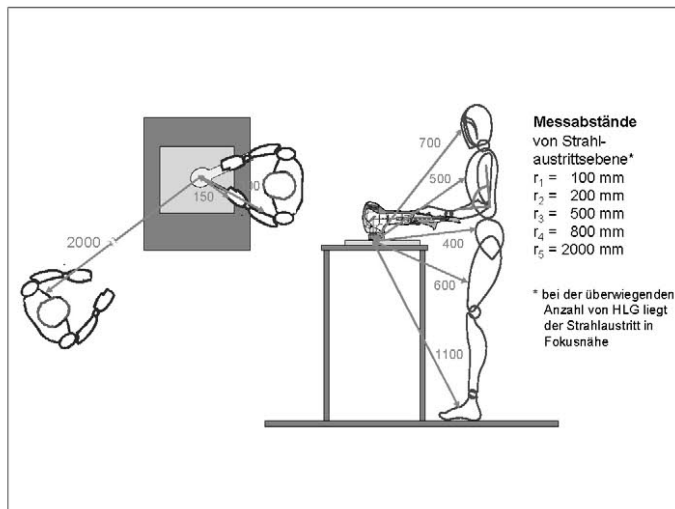


Bild 2: Typische Abstände von der Bearbeitungsposition (-zone) zu Körperteilen des Bedieners bei Tätigkeiten mit HLG

Mit Hilfe der technischen Daten von HLG und Laserstrahlquellen in Verbindung mit typischen Abständen zu Körperteilen sind exemplarisch vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärken (VMB) kalkuliert worden. Die berechneten Werte für die VMB liegen in Bereichen von

- $E_{\text{VMB}} = 5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ ($P_{\text{cw}} = 400 \text{ W}$, $d_k = 18 \text{ mm}$, $f_b = 30 \text{ mm}$, $r_{\text{abst}} = 500 \text{ mm}$) bis
- $E_{\text{VMB}} = 1 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ ($P_{\text{cw}} = 3 \text{ kW}$, $d_k = 20 \text{ mm}$, $f_b = 200 \text{ mm}$, $r_{\text{abst}} = 150 \text{ mm}$).

2.2 Gegenüberstellung der VMB mit den Grenzwerten (MZH_{Haut})

Die für die Berechnung der maximal zulässigen Bestrahlungen (MZH_{Haut}) angesetzten Zeitbasen beziehen sich auf die Reflexzeiten für die Wahrnehmung des Reizes und der Reaktionszeit bis zum Entfernen der Extremität aus dem Strahl (s.a. Kapitel 5).

Es wird eine menschliche Wahrnehmungszeit (Schmerzempfindung) zwischen 100 ms (0,1 s) und 1000 ms (1,0 s) sowie eine Reaktionszeit bis zum Entfernen der Extremität aus dem Strahl von 0,5 s bis 4 s angenommen [12-13]. In Ergänzung wird auch eine Zeitbasis von 10 s mit in die Betrachtungen einbezogen.

Unter Berücksichtigung dieser Zeitbasen wurden Werte für die maximal zulässige Bestrahlung der Haut (MZH_{Haut}) bei direkter Laserbestrahlung (cw-Betrieb) berechnet. Eine Gegenüberstellung der Abschätzungen der VMB an den Schutzsystemen durch

- direkte Laserstrahlung und
- diffus gestreute Laserstrahlung

für verschiedene Laserparameter und Abstände zum Strahlaustritt führt zu folgenden Ergebnissen bzw. Beurteilungen:

Direkte Laserstrahlung (nach Optik)

1) Nd:YAG-Laser (2-4 kW)

Bei Verwendung von kurzen Brennweiten (60 mm) ist bei Abständen

kleiner als 700 mm, (entspricht Abstand: Strahlaustrittsebene-Kopf) mit einer Grenzwertüberschreitung zu rechnen. Besonders gefährdet sind die oberen Extremitäten und der Oberkörper. Hier werden die Grenzwerte für Hand/Unterarm um den Faktor 100 (bei Brennweite 60 mm) bis 1000 (bei Brennweite 200 mm) überschritten.

2) Diodenlaser (400 W)

Grenzwertüberschreitungen ergeben sich bei Verwendung einer Brennweite von 40 mm für den Unterarm/die Hand um den Faktor 5-10.

Der Vergleich zeigt, dass insbesondere für die Extremitäten Hand/Arm und den Oberkörper die Grenzwerte (MZB_{Haut}) zum Teil um mehrere Größenordnungen überschritten werden können. Der Einsatz von PSA zum Schutz gegen Exposition durch Laserstrahlung in vorhersehbaren Fehlerfällen stellt aus Gründen des Arbeitsschutzes ein Gebot dar.

Diffus gestreute Laserstrahlung

Eine Gegenüberstellung der Abschätzungen der VMB an den Schutzsystemen durch für verschiedene Laserparameter und Abstände zum Strahlaustritt führt zu folgenden Ergebnissen bzw. Beurteilungen:

1) Nd:YAG-Laser (2-4 kW)

Bei kleinen Abständen (150 mm, Hand/Unterarm) und Leistungen über 3000 W ist bei einer Bestrahlungsdauer >10 s mit einer Grenzwertüberschreitung um den Faktor 1,4 zu rechnen.

2) Diodenlaser (400 W)

Bei Laserleistungen bis 400 W werden die Grenzwerte der MZB_{Haut} auch für kleine Abstände (Hand/Unterarm) nicht überschritten.

In der folgenden Fotoserie (**Bild 3**) sind Schädigungen der Haut bei unbeabsichtigter Bestrahlung und Entfernen der Finger innerhalb der Reflexzeit durch einen CO₂-Laser und einen Nd:YAG-Laser dargestellt. Entscheidend für das Ausmaß der Schädigung ist neben der Bestrahlungsstärke und -dauer das wellenlängenabhängige Absorptionsverhalten des menschlichen Gewebes. CO₂-Laserstrahlung ($\lambda = 10600$ nm) wird oberflächennah absorbiert, wohingegen Nd:YAG-Laserstrahlung ($\lambda = 1064$ nm) signifikant tiefer in das menschliche Gewebe eindringt und dort u.U. schwere Schädigungen verursacht, die von außen als solche von Laien nicht unbedingt erkannt werden.

2.3 Beispiele für Schädigungen der Haut bei unbeabsichtigter Bestrahlung

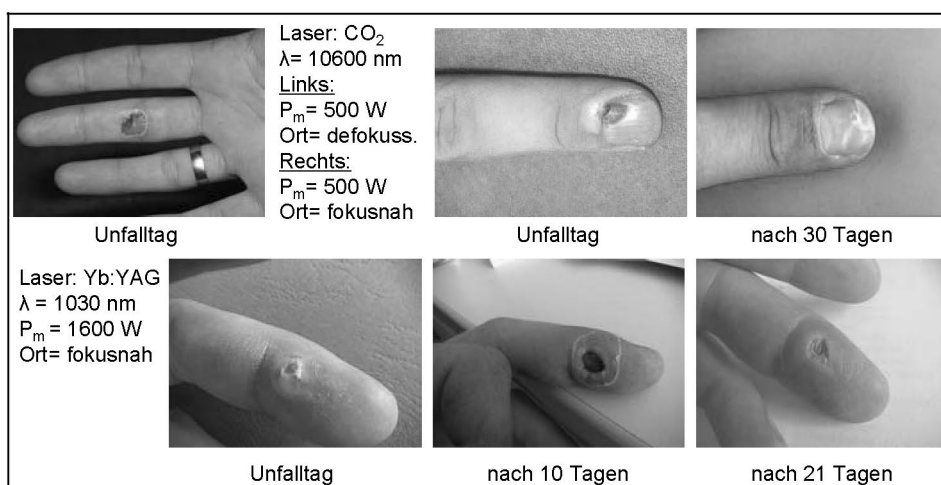


Bild 3: Unbeabsichtigte Laserbestrahlung von Fingern

2.4 Am Markt verfügbare Schutzbekleidung / untersuchte Schutzsysteme

Zur Beurteilung der Schutzwirkung werden ausgewählte Schutzsysteme (PSA) untersucht, um Erkenntnisse über das Verhalten der Werkstoffe/Schutzsysteme bei Exposition gegenüber Laserstrahlung zu erhalten. Die Proben repräsentieren herstellerunabhängig marktübliche Produkte aus unterschiedlichen Werkstoffen und unterschiedlichem Aufbau. Ausgangspunkt sind am Markt verfügbare Produkte, wie sie derzeit typischerweise von HLG-Anwendern eingesetzt werden.

Die untersuchten Schutzsysteme und ihre Spezifikation sind im Anhang in Tabelle i aufgelistet.

Die Produkte lassen sich folgenden Bereichen zuordnen:

- Schutzkleidung für Schweißen und verwandte Verfahren,
- Arbeitsbekleidung für hitzeexponierte Arbeiter,
- Schutzkleidung für den Feuerwehrbereich,
- Schutzkleidung für Elektriker,
- Schutzkleidung für Auto-Rennfahrer (Aramidgewebe: Kevlar[®], Nomex[®]),
- leichte Arbeitsbekleidung (Baumwolle).

Die Produkte können bezüglich der verwendeten Werkstoffe systematisch in folgende Gruppen unterteilt werden:

- textile Flächengebilde auf Naturfaserbasis,
- textile Flächengebilde auf Kunstfaserbasis,
- textile Flächengebilde auf Mischgewebekombi (Natur-/Kunstfaser),
- mit organischen oder anorganischen Werkstoffen kaschierte textile Flächengebilde,
- textile Flächengebilde auf Glasfaserbasis,
- Flächengebilde auf Naturstoffbasis (Leder).

3 Charakterisierung der Schutzsysteme

Zur Beurteilung des Verhaltens der Schutzsysteme sind verschiedene Untersuchungen zur Prüfung spezifischer Kriterien durchzuführen. Kleinsignal-Untersuchungen werden vorgenommen, um die optischen Eigenschaften der Schutzsysteme (Transmission/Absorption/Remission) zu bestimmen.

Daneben werden das Verhalten und die Schutzfunktion der Proben durch Exposition der Proben mit Laser-Bestrahlungsstärken, wie sie im Fehlerfall auftreten können, bewertet (Realbestrahlungen).

3.1 Kleinsignal-Untersuchungen

Zur Charakterisierung der optischen Eigenschaften (Transmission, Absorption, Remission) werden die Schutzsysteme durch Kleinsignal-Prüfverfahren mittels Spektrometern und speziellen Versuchsanordnungen untersucht. Um ein integrales Signal der über die Raumrichtungen transmittierten/remittierten Strahlungsanteile zu erhalten, müssen Integratoren (Ulbrichtkugel) eingesetzt werden. (Nd:YAG-/Diodenlaser: Beschichtung: BaSO₄, Durchmesser: 200 mm; CO₂-Laser: Beschichtung: Infragold, Durchmesser: 100 mm).

In **Bild 4** sind die Ergebnisse der Kleinsignaltransmission für die untersuchten Schutzsysteme dargestellt.

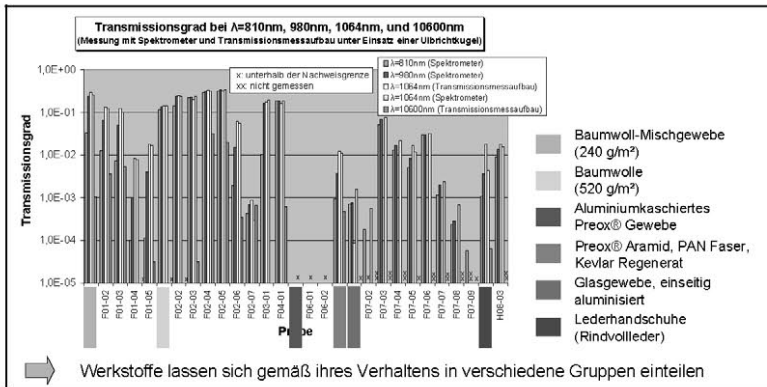


Bild 4: Spektraler Transmissionsgrad verschiedener Proben gemessen mit Spektrometer und speziellem Bestrahlungsmessaufbau (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser/CO₂-Laser)

Nd:YAG-Laser ($\lambda = 1064 \text{ nm}$)

Die untersuchten Proben lassen sich hinsichtlich ihrer Transmissionseigenschaften sinnvoll in drei Gruppen einteilen:

1. Gruppe mit $T < 1 \cdot 10^{-3}$
2. Gruppe mit $T < 1 \cdot 10^{-1}$
3. Gruppe mit $T \geq 1 \cdot 10^{-1}$

In die 1. Gruppe können Textilien mit funktionalen Schichten aus Metallfolie, kaschierte sowie unkaschierte engmaschig gewebte Textilien auf Basis von Aramid-Fasern oder Glasfasern eingeordnet werden. Schweißerschutzkleidung, Rindvollleder und textile Systeme auf Basis preoxidierter Aramidfasern lassen sich der 2. Gruppe zuordnen. Zur 3. Gruppe gehören Textilien, die überwiegend aus Baumwollgeweben konfektioniert sind und der Arbeitsbekleidung (Oberbekleidung, Schweißer-/Flammschutz) zuzuordnen sind.

CO₂-Laser ($\lambda = 10600 \text{ nm}$)

Die untersuchten Schutzsysteme weisen bei CO₂-Laserbestrahlung im Vergleich zu Diodenlaser- und Nd:YAG-Laserbestrahlung einen deutlich geringeren spektralen Transmissionsgrad auf. Ursächlich hierfür ist das wellenlängenabhängige optische Verhalten der Schutzsysteme (u.a. geringere optische Eindringtiefe). Die Schutzsysteme lassen sich hinsichtlich des spektralen Transmissionsgrades erneut in verschiedene Gruppen einteilen, wobei keine Korrelation der Gruppenzugehörigkeit von Diodenlaser und Nd:YAG-Laser zu CO₂-Lasern besteht.

1. Gruppe mit $T < 10^{-5}$
2. Gruppe mit $T < 10^{-3}$
3. Gruppe mit $T = 10^{-2}$

Aus den Ergebnissen ist abzuleiten, dass für typische oben genannte VMB bei Schutzsystemen mit einem hohen spektralen Transmissionsgrad ($T \geq 1 \cdot 10^{-1}$) die Grenzwerte (MZB_{Haut}) unmittelbar überschritten werden können.

3.2 Bestrahlungs- untersuchungen an Schutz- systemen

Für die Untersuchungen sind spezielle Versuchsanordnungen entwickelt worden. Sie können an verschiedene Laserstrahlquellen adaptiert werden.

Folgende Prüfverfahren werden eingesetzt:

- Spektrometrische Bewertung (Laserstrahlung / Wärmestrahlung)
- Thermometrische Bewertung (Temperaturverteilung / T_{\max} / Wärmestromdichte)
- Leistungsmessung mittels Thermopile-Detektor (Transmittierte Gesamtleistung, Messung des Wärmestrahlungsanteils)
- Visuelle Bewertung (u.a. Bewertung der Kriterien Rauchbildung, Entzündung, Aufbrechen, Verkohlen)
- Kalorimetrische Bewertung (Wärmestrom, Vergleich mit Stoll/Chianta Kriterium)

Spektrometrische Bewertung

Zur Detektion der von einem Schutzsystem transmittierten Laserstrahlung, wird in die Versuchsanordnung unterhalb der Probe eine Aufnahme für einen Faserkopf eines Spektrometers platziert. Die transmittierte Laserstrahlung sowie die emittierte Wärmestrahlung werden in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 1680 nm aufgezeichnet.

Bezüglich des Verhaltens bei Laserstrahlungsexposition können grundsätzlich zwei Schutzsystem-Typen unterschieden werden (**Bild 5**):

- Schutzsysteme mit ausgeprägter Transmission der Laserstrahlung
- Schutzsysteme mit ausgeprägter Absorption der Laserstrahlung und Energieübertragung in Form von Wärmestrahlung und Wärmeleitung an die Haut

Schutzsysteme mit ausgeprägter Transmission (im Vergleich: Kleinsignaltransmission $T = 0,14$), wie das Baumwollsystem F02-01, weisen bei Nd:YAG-Laserbestrahlung nach ungefähr 15 Sekunden eine beginnende irreversible Zerstörung mit Verkohlungen des Schutzsystems auf. Dieses hat zur Folge, dass der Anteil der transmittierten Laserleistung temporär abnimmt und der Anteil der Wärmestrahlung durch die erhöhte Absorption zunimmt. Die erhöhte Absorption führt schließlich zur vollständigen Zerstörung des Schutzsystems und somit zur Lochbildung, was anhand des deutlichen Anstiegs der transmittierten Laserstrahlung erkennbar ist.

Schutzsysteme mit geringer Transmission, wie das Schutzsystem F07-01, das auf einem einseitig aluminisierten Glasgewebe mit einseitiger Silikonbeschichtung basiert, verhalten sich signifikant unterschiedlich. Durch Absorption der Laserstrahlung kommt es zu einer lokalen Erwärmung und damit zur Emission von Wärmestrahlung, welches anhand der spektrometrischen Messdaten widerspiegelt wird. Durch das langsame Verkohlen des Werkstoffs steigt die Transmission der Laserstrahlung nach einem Zeitraum von ca. 40 Sekunden an.

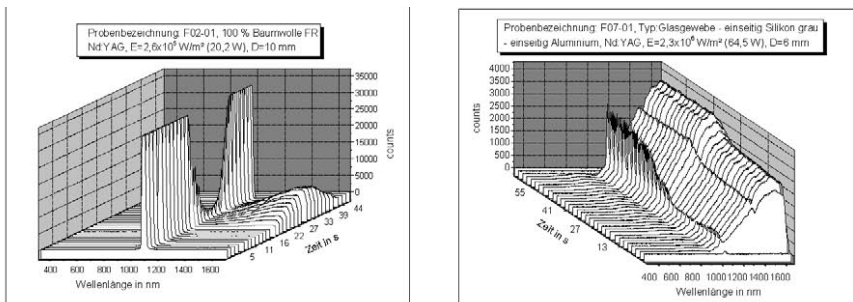


Bild 5: Spektrometrie im Bereich von $\lambda = 380 \text{ nm}-1680 \text{ nm}$ bei Nd:YAG-Laser-Bestrahlung

Ergebnisse der Leistungsmessung

Zur on-line Messung der hinter dem Schutzsystem an der Haut auftretenden Strahlung werden kommerzielle Thermo-Sensoren (Thermopile-Detektoren, sensitiv im Wellenlängenbereich von 250 nm-10600 nm) eingesetzt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass das zeitliche Verhalten von Schutzsystemen (hier repräsentiert durch den roten u. blauen Graph), die eine vernachlässigbare Transmission gegenüber Laserstrahlung aufweisen und auf Grund Absorption der Laserstrahlung oberhalb einer bestimmten Bestrahlungsstärke durch Lochbildung zerstört werden, in vier Bereiche unterteilt werden kann (**Bild 6**).

- Bereich 1: Mit Beginn der Laserstrahlungsexposition wird Laserstrahlung vom Schutzsystem absorbiert und es tritt eine lokale Erwärmung auf. Der Detektor empfängt die mit ansteigender Temperatur des Schutzsystems emittierte zunehmende Wärmestrahlung, welches in einem Anstieg der Amplitude erkennbar ist.
- Bereich 2: Bei dem betrachteten Schutzsystem stellt sich unter den gegebenen Parametereinstellungen ein quasi stationärer Zustand ein, d.h. die Wärmestrahlung ist über einen begrenzten Zeitabschnitt annähernd konstant.
- Bereich 3: Bei Bereich 3 handelt es sich um einen Übergangsbereich. Die Zerstörungsschwelle des Schutzsystems ist überschritten, es tritt beginnende Lochbildung auf. Die Amplitude der gemessenen Strahlungsanteile steigt an.
- Bereich 4: Das Schutzsystem hat partiell versagt und Laserstrahlung tritt durch das entstandene Loch im Schutzsystem hindurch. Die Amplitude des Messsignals entspricht der durchtretenden Laserstrahlleistung abzüglich diskreter Anteile, die im Randbereich des Loches in das Schutzsystem eingekoppelt werden.

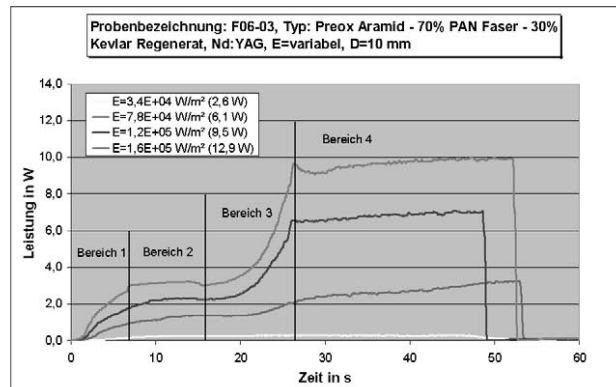


Bild 6: Zeitliches Gesamtsignal des Leistungsmessgerätes bei Nd:YAG-Laserbestrahlung des Schutzsystems F06-03

Eine Separierung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung kann bei Nd:YAG-Laserbestrahlung mittels eines HR-Spiegels für 1064 nm erreicht werden. Dieser befindet sich unmittelbar unterhalb der Probe und reflektiert nur die transmittierten Laserstrahlungsanteile auf den in 90° zur Probe angeordneten Detektor.

In **Bild 7** ist der zeitliche Verlauf des Signals von Gesamtstrahlung und separierter Laserstrahlung veranschaulicht. Man erkennt eine einsetzende Lochbildung bei einer Bestrahlungsstärke von $1,6 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ bei ungefähr 25 Sekunden. Am Signalverlauf der separierten Laserstrahlung äußert sich dieses in einem steilen Anstieg des Signals. Hieraus kann geschlussfolgert werden, dass die gemessenen Strahlungsanteile vor der Lochbildung Wärmestrahlung repräsentieren.

Diese Bereichseinteilung korreliert mit den Ergebnissen der Kalorimetrie.

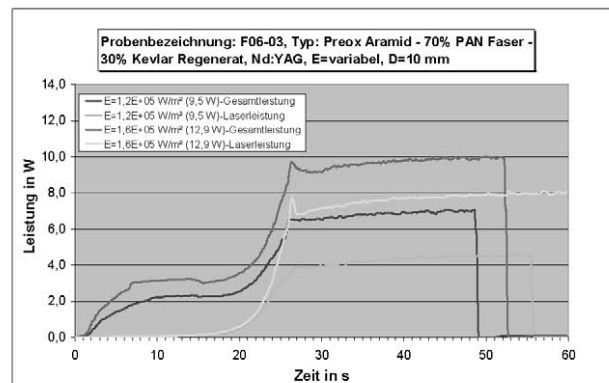


Bild 7: Trennung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung am Beispiel des Schutzsystems F06-03

Thermometrie und Visuelle Bewertung

Zur thermometrischen und visuellen Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung werden in den Messaufbau eine Thermokamera sowie eine CCD-Kamera integriert. Mittels einer vom Lasergerät getriggerten Zeitmessung und einer Aufzeichnung wird das zeitliche Verhalten der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung jeweils bis zu einer Zeitdauer von max. 100 Sekunden gespeichert und nachfol-

gend (off-line) bezüglich des Eintretens einer Reihe verschiedener Kriterien (s.a. Anhang: Tabelle ii) am PC bewertet.

In **Bild 8** sind ausgewählte Ergebnisse dargestellt. Das Schutzsystem F02-01 weist bei Nd:YAG-Laserbestrahlung bei Bestrahlungsstärken von $6 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ nach wenigen Sekunden eine Rauch- und Flammenbildung auf (*es entzündet sich der emittierte Rauch); nach 15 Sekunden ist Lochbildung, d.h. eine vollständige Zerstörung zu beobachten. Im Gegensatz dazu bietet das aluminisierte Schutzsystem F07-01 bei Bestrahlungsstärken bis 10^6 W/m^2 ausreichende Schutzwirkung gegen Lochbildung bzw. Strahldurchtritt. Ursächlich hierfür ist die im Vergleich zu Baumwoll- und Mischgeweben zu deutlich höheren Temperaturen verschobene Zerstörungsschwelle des anorganischen Glasfasergewebes.

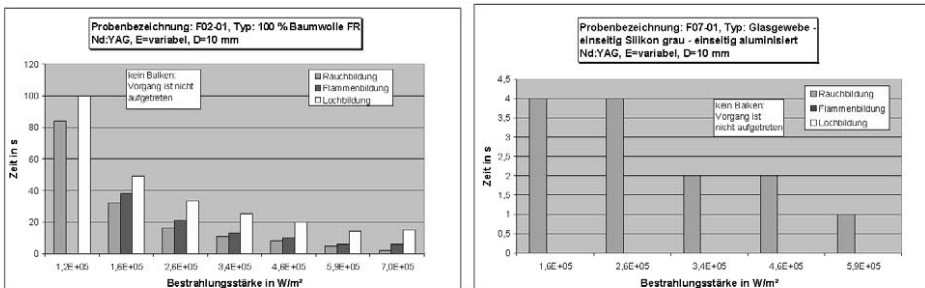


Bild 8: Visuelle Bewertung des Schutzsystems F02-01 und F07-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung

Kalorimetrische Bewertung

Zur Messung der von dem Schutzsystem an die Haut übertragenen Energie wird ein Kalorimeter unter dem Schutzsystem in Kontakt zu diesem platziert [10]. Der Aufbau des Kalorimeters lehnt sich an die in der DIN IEC 61482-1-1 geforderten Parameter an; jedoch sind Modifikationen bezüglich der Kupferplatte (Maße, Dicke, Gewicht) erforderlich, um die Gegebenheiten der Laserbestrahlung (Bestrahlungsfleckgröße, Bestrahlungsstärke) zu berücksichtigen, u.a. ist die Oberfläche des Kalorimeters mit einem schwarzen, matten Lack zu versehen. Die mit dem Kalorimeter aufgezeichneten Messwerte werden den Grenzkurven nach Stoll/Chianta vergleichend gegenübergestellt.

Für die kalorimetrische Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme, d.h. die Energieübertragung vom Schutzsystem an die Haut und die daraus resultierenden Hautschädigungen, werden Modelle von Stoll/Chianta [11,12] zu Grunde gelegt. Diese bereits um 1960 entwickelten mathematischen Modelle für das Auftreten einer Verbrennung 2. Grades bei einer 95%igen statistischen Wahrscheinlichkeit definieren eine sog. Toleranzzeit. Hierunter versteht man die Zeit von der Schmerzempfindung bis zum Auftreten einer Verbrennung 2. Grades. Eine Reduzierung der Energieübertragung vom Schutzsystem an die Haut hat längere Toleranzzeiten zur Folge. Diese Modelle können flexibel in Bezug auf die Art der Energie (Flamme, Wärmestrahlung, Wärmeleitung) als Funktion der absorbierten Wärmestromdichte bzw. Einwirkenergie angewendet werden. Für eine Kurzzeitbestrahlung, entsprechend einer unbeabsichtigten

4 Kalorimetrische Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des Stoll/Chianta Kriteriums

4.1 Schädigungsgrenzen Stoll/Chianta-Kriterium

Laserbestrahlung, ist das Kriterium „Zeit zur Flucht/Zeit zum Wegziehen“ bzw. die „Expositionsbegrenzung“ entscheidend. Einflussgrößen sind zum einen die Schädigungsgrenze der Haut wie auch die Energieübertragung vom Schutzsystem zur Haut.

4.2 Reaktionszeit zum Entfernen der exponierten Körperteile aus dem Gefahrenbereich

Schutzsysteme gegen Laserstrahlung müssen derart ausgelegt werden, dass die Zeit von der Schmerzempfindung bis zum Auftreten einer Verbrennung 2. Grades (Toleranzzeit) länger ist als die Reflexzeit zum Entfernen des Körperteils aus der Gefahrenzone, um Verbrennungen 2. Grades zu vermeiden.

Grundlagen für das Schmerzempfinden sowie das Reflexverhalten -und damit für die maximalen Einwirkdauern der thermischen Belastung- sind in der Neurophysiologie beschrieben [13]. Bei der Wahrnehmung einer unbeabsichtigten Laserbestrahlung von PSA-Systemen und der damit verbundenen thermischen Belastung der Haut mit nachfolgendem Rückziehreflex handelt es sich um einen polysynaptischen Reflex. Über diesbezügliche Reflexzeiten (bei thermischer Reizung der Nociceptoren durch Wärmestrahlung und -leitung) finden sich in der Literatur nur wenige Daten. Für die Abschätzung der Reflexzeiten werden daher Daten der technischen Norm DIN EN 563 herangezogen, die für kurze Berührungen von Bauteilen mit heißen Oberflächen (Wärmeleitung) ermittelt wurden [14]. Als maximale Zeit wird -für den Fall einer verlängerten Reaktionszeit bei Tätigkeiten mit HLG- eine Reflexzeit von 4 Sekunden angesetzt (siehe auch Anhang Tabelle iii).

4.3 Bewertung der Schutzfunktion der Schutzsysteme

Die mit dem Kalorimeter aufgezeichneten Messwerte werden den Grenzkurven nach Stoll/Chianta vergleichend gegenübergestellt. Bewertet wird die jeweilige Toleranzzeit im Vergleich zur Reflexzeit von 4 Sekunden (**Bilder 9-10**).

Bei CO₂-Laserbestrahlung der Baumwoll-Schutzbekleidung F02-01 mit einer Bestrahlungsstärke von $5,5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$ wird die Schmerzgrenze nach 5 Sekunden überschritten; die Toleranzzeit beträgt ca. 2,5 Sekunden, so dass ein Wegziehen der äußeren Extremitäten noch möglich ist. Oberhalb Bestrahlungsstärken von $2,5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ wird die Schmerzschwelle nach einer Sekunde überschritten; die Toleranzzeit liegt deutlich unter einer Sekunde (0,5 s bis 0,75 s) und damit innerhalb der Reflexzeit. Dieses bedeutet, dass eine hohe Gefährdung hinsichtlich einer irreversiblen Hautschädigung besteht.

Im Vergleich bietet das Schutzsystem F07-01 bei CO₂-Laserbestrahlung eine deutlich höhere Schutzwirkung. Erst im Bereich von Bestrahlungsstärken größer als 10^6 W/m^2 werden die Schmerzschwellen im Bereich von einer Sekunde überschritten und die Toleranzzeit ist kürzer als eine Sekunde.

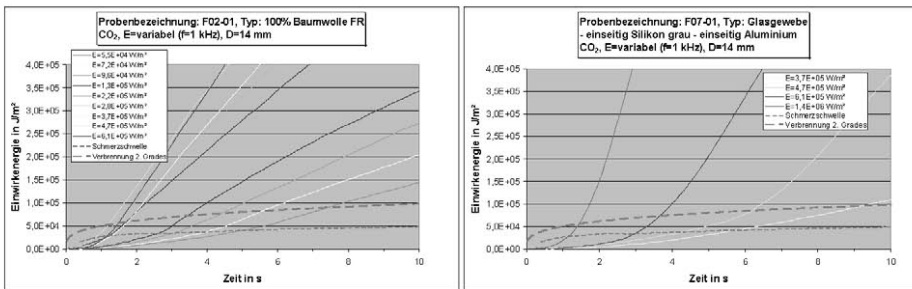


Bild 9: Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 bei CO₂-Laserbestrahlung

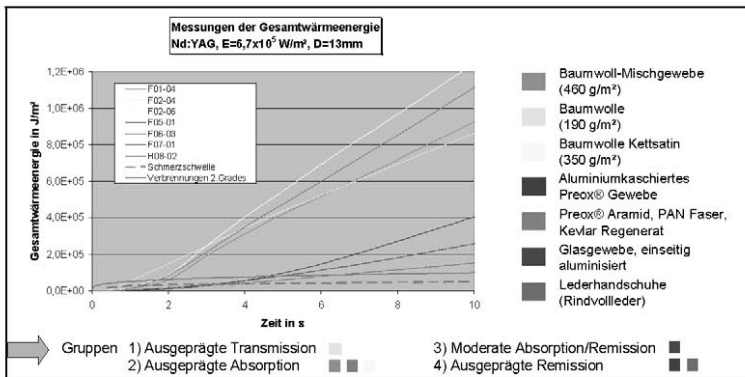


Bild 10: Kalorimetrische Messungen verschiedener Schutzsysteme bei Nd:YAG-Laserbestrahlung

Aus den Diagrammen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- die Schutzfunktion hängt entscheidend von der Wellenlänge der auftreffenden Laserstrahlung ab (940 nm, 1064 nm, 10600 nm)
- bei gleichem Schutzsystem haben höhere Bestrahlungsstärken kürzere Toleranzzeiten zur Folge
- Schutzsysteme, die einen signifikanten Anteil der Laserstrahlung transmittieren, weisen im Vergleich nur kurze Toleranzzeiten auf.
- Systeme, die auf Grund von funktionalen Schichten (Remission der Laserstrahlung) einen im Vergleich geringeren Anteil der Laserstrahlung absorbieren und/oder durch Isolation den Energietransport an die Haut reduzieren, weisen die längsten Toleranzzeiten auf und bieten damit den besten Schutz.

Für die Qualifizierung persönlicher Schutzkleidung gegen Laserstrahlung auf Basis technischer Textilien oder Naturstoffe (Leder) sind folgende Eigenschaften eines Schutzsystems zu prüfen:

- optische Eigenschaften bei Exposition gegenüber Laserstrahlung
 - Spektrometrie: Transmission/Remission/Absorption
- thermodynamische Eigenschaften
 - Kalorimetrie: Energietransport des Schutzsystems an die Haut
- thermomechanische Eigenschaften
 - Thermometrie/Videoanalyse: thermische Zerstörschwelle/Entflammbarkeit/Brandverhalten.

5 Zusammenfassung

Generell lässt sich das Verhalten der Schutzsysteme und der Belastungen für die Haut anhand von zwei idealisierten Verhaltenstypen beschreiben (**Bild 11**).

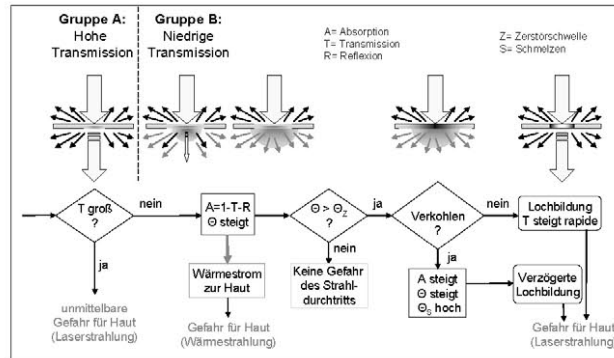


Bild 11: Schematische Darstellung des Verhaltens von Schutzsystemen

Gruppe A: Erhöhte Laserstrahlungstransmission

Bei entsprechend hoher Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung kommt es zur unmittelbaren Exposition der Haut gegenüber Laserstrahlung.

Zu bewerten ist, ob und nach welcher Zeit die MZB_{Haut} -Werte (gem. IEC DIN EN 60825-1) der unter dem Schutzsystem befindlichen Haut überschritten werden. Dieses kann bereits nach sehr kurzen Zeiträumen (<1 s) -innerhalb der Reflexzeiten, in denen das betroffene Körperteil aus dem Gefahrenbereich weggezogen wird- Schädigungen der Haut zur Folge haben.

Gruppe B: Wärmeübertragung

Bei ausgeprägt niedriger Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung wird ein entsprechender Anteil der Laserstrahlung von dem Schutzsystem absorbiert ($A=1-T-R$).

a) Zu bewerten ist die durch Absorption der Laserstrahlung in das Schutzsystem eingekoppelte Energie und die durch Wärmeübertragung von dem Schutzsystem an die Haut transportierte Energie. Als Grenzwert für das Auftreten von thermischen Schädigungen der Haut (Verbrennungen 2. Grades) wird die Grenzkurve nach Stoll/Chianta herangezogen.

b) Mit Beginn der Lochbildung des Schutzsystems steigt die Laserstrahlungsexposition der hinter dem Schutzsystem befindlichen Haut stark an. In den meisten Fällen werden die MZB -Werte kurzzeitig nach Einsetzen der Lochbildung überschritten.

Zu bewerten ist, ob die Lochbildung innerhalb (kritisch) oder außerhalb der Reflexzeit auftritt.

Die Anforderungen an die funktionalen Schichten eines Schutzsystems lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- 1) Die zu benutzenden Schutzsysteme (-werkstoffe) müssen einen ausreichenden Schutz hinsichtlich des Verhaltens gegenüber der vorhersehbaren maximalen Laserbestrahlung (VMB) bieten:
 - a) Ausreichend geringer Transmissionsgrad, so dass die maximal zulässige Bestrahlung der Haut (MZB_{Haut} gem. DIN EN 60825-1) nicht überschritten wird; Zeitbasis 10 s.

- vorteilhaft sind Schutzsysteme mit ausreichender Flächenmasse/Dicke, dichter Webart und/oder Kaschierung bei noch akzeptablem Tragekomfort
- b) Ausreichender Widerstand gegen Lochbildung (die Zeitdauer bis zum Versagen durch Laserstrahldurchtritt muss größer sein als die Reflexzeit zum Wegziehen der Extremität aus dem Gefahrenbereich), so dass keine Schädigungen der Haut durch Überschreitung der MZB_{Haut} auftreten.
→ vorteilhaft sind funktionale Schichten aus Werkstoffen, die eine hohe thermische Beständigkeit (Zerstörschwelle) bei noch akzeptablem Tragekomfort besitzen.
 - c) Ausreichend lange Toleranzzeit (Zeitdifferenz zwischen Schmerzempfindung und dem Eintritt von Verbrennungen 2. Grades), -Toleranzzeit > Reflexzeit-; d.h. begrenzter Wärmetransport des Schutzsystems an die Haut, so dass keine Schädigungen (Verbrennungen 2. Grades) der Haut auftreten.
→ Vorteilhaft sind Schutzsysteme mit funktionalen Schichten, die eine hohe Remission für Laserstrahlung aufweisen und/oder den Wärmetransport an die Haut durch Isolationsschichten reduzieren.
 - d) Innerhalb der Reflexzeit darf die Summe der Anteile (a+b+c) keine Schädigungen hervorrufen
- 2) Die zu benutzenden Schutzsysteme dürfen (entsprechend den Forderungen der Richtlinie für persönliche Schutzausrüstung) selbst keine Gefahr (z.B. durch Entflammen, Schmelzen/Einbrennen in Haut, Schrumpfen, etc.) mit sich bringen.
→ Erforderlich sind Schutzsysteme, die flammhemmend eingestellt sind. Schutzsysteme auf Leder dürfen kein oder nur vermindertes Schrumpfen aufweisen (schrumpfarme Spezialleder).
 - 3) Sie müssen –wenn erforderlich- gegen andere bei Tätigkeiten mit HLG auftretende Risiken schützen (z.B. Schmelzespritzer, heiße Oberflächen).
 - 4) Die Schutzsysteme müssen den ergonomischen Anforderungen und gesundheitlichen Erfordernissen der Versicherten genügen
 - 5) Sie müssen dem Träger/Benutzer angepasst werden können.

6 Schrifttum

6.1 Literatur

- [1] Schmid, C.: Handgeführte Lasersysteme für die cw- und pw-Materialbearbeitung. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2002
- [2] Neubert, J.: Einsatzpotenziale von Hochleistungsfaserlasern im Hinblick auf mobile Laserapplikationen. In: Tagungsband 4. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2004
- [3] Albert, S.: Reparaturschweißungen an Werkzeugen mittels Laserstrahltechnik. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg: SLV Halle, 1998
- [4] Haußmann, D.: Automatisierung von Handarbeitsplätzen. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2002
- [5] Haferkamp, H.; Schmid, C.; et al.: Handgeführtes Schneiden und Schweißen mit Nd:YAG-Hochleistungslasern. In: Tagungsband 2. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2000. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2000
- [6] Berend, O.; Haferkamp, H.; Ostendorf, A. et al.: Analyse der Voraussetzungen zum handgeführten Laserstrahlhärten von Umformwerkzeugen. In: Tagungsband 4. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2004
- [7] Brüninghoff, H.: Schicht für Schicht – Laserstrahlreinigen von Hochspannungsmasten, In: Tagungsband Aachener Kolloquium für Lasertechnik, 18.-20. September 2002, Augsburg, Hrsg: Grütter, 2002, sowie in: EuroLaser, No.4, 38pp., 2002
- [8] Forschungsbericht: Handgeführtes Werkzeugsystem zur lasergestützten Bearbeitung von Schneid- und Umformwerkzeugen, FKZ: AIF 13682 N1
- [9] Innovationsforum "Mobile und Variable Lasersysteme" - Neue Einsatzgebiete der Lasertechnologie in der Materialbearbeitung, 22.-23. Februar 2006, Rostock
- [10] N.N.: Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen durch einen Störlichtbogen, 2002, ISBN 3-9807576-2-5
- [11] Stoll, A.M.; Chianta, M.A.: Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection. Aerospace Medicine, Vol. 40, 1968, pp. 1232-1238
- [12] Henriques, F.C., Jr.: Studies of Thermal Injury: V. The Predictability and the Significance of thermally Induced Rate Processes leading to Irreversible Epidermal Injury. Arch. Path.43: 489-502, 1947
- [13] Schmidt, R.F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen, 23 Ausgabe, Springer Verlag, Berlin 1987
- [14] N.N.: BIA-Info 12/2000: Schutz vor Verbrennungen an heißen Oberflächen. BGIA, Sankt Augustin, 2000

6.2 Normen

- DIN EN ISO 12100-1:2004, Sicherheit von Maschinen - Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze; Teil 1: Grundsätzliche Terminologie, Methodologie
- DIN EN ISO 12100-2:2004, Sicherheit von Maschinen - Grundbegriffe, allgemeine Gestaltungsleitsätze - Teil 2: Technische Leitsätze
- DIN EN ISO 11553-1:2005, Sicherheit von Maschinen - Laserbearbeitungsmaschinen - Sicherheitsanforderungen

- DIN EN 60825-1 A2:2003, Sicherheit von Laser-Einrichtungen - Teil 1:
Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und
Benutzer-Richtlinien (IEC 60825-
1:1993+A1:1997+A2:2001); Deutsche Fassung EN
60825-1:1994+A1:2002+A2:2001
- DIN EN 60825-4:2004, Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 4:
Laserschutzwände (IEC 60825-
4:1997+A1:2002+A2:2003); Deutsche Fassung EN
60825-4:1997+A1:2002+A2:2003
- DIN EN 207:2002 Persönlicher Augenschutz - Filter und
Augenschutz gegen Laserstrahlung
(Laserschutzbrillen) (enthält Änderung A1:2002);
Deutsche Fassung EN 207:1998+A1:2002
- DIN EN 563:2000 Sicherheit von Maschinen - Temperaturen
berührbarer Oberflächen - Ergonomische Daten
zur Festlegung von Temperaturgrenzwerten für
heiße Oberflächen

Anhang

Tabelle i: Probenbezeichnung

Probe	Werkstoff
F01-01	Baumwoll-Mischgewebe (240 g/m ²)
F01-02	Baumwoll-Mischgewebe (240 g/m ²)
F01-03	Baumwoll-Mischgewebe (210 g/m ²)
F01-04	Baumwoll-Mischgewebe (460 g/m ²)
F01-05	Baumwoll-Mischgewebe (340 g/m ²)
F02-01	Baumwolle (520 g/m ²)
F02-02	Viskose/Polyamid/Trevira® (380 g/m ²)
F02-03	Baumwoll-Mischgewebe (330 g/m ²)
F02-04	Baumwolle (190 g/m ²)
F02-05	Baumwolle (190 g/m ²)
F02-06	Baumwolle Kettsatin (350 g/m ²)
F02-07	Aramid + Sympatexmembran
F03-01	Baumwolle
F04-01	Nomex® - Filament Chamatex® /Nomex® 3 Gestrück
F05-01	Aluminiumkaschiertes Preox® - Gewebe
F06-01	Aluminiumkaschiertes Nomex® - Gewebe
F06-02	Nomex®, einseitig Pu-kaschiert
F06-03	Preox® - Aramid, PAN-Faser, Kevlar® - Regenerat
F07-01	Glasgewebe, einseitig aluminisiert
F07-02	Baumwolle/Samt einseitig aluminisiert
F07-03	Baumwolle, einseitig aluminisiert
F07-04	Baumwolle, beidseitig aluminisiert
F07-05	Glasgewebe, beidseitig aluminisiert
F07-06	Kevlar®
F07-07	Kevlar® (60 g/m ² aluminisiert)
F07-08	Kevlar® (130 g/m ² aluminisiert)
F07-09	Kevlar® (165 g/m ² aluminisiert)
F08-01	Baumwolle (T-shirt)
H08-02	Lederhandschuhe (Rindvollleder)
H08-03	Lederhandschuhe (Nappaleder)

Tabelle ii: Kriterien zur visuellen Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung

Kriterium	Beschreibung
Aufbrechen/ Lochbildung	Ausbildung eines oder mehrerer Löcher
Schmelzen	Werkstoffabhängiges Erweichen und/oder Schmelzen des Schutzsystems (anorganisch/organisch)
Abtropfen	Flüssigwerden des Schutzsystem-Werkstoffes unter Bildung neuer Oberflächen (anorganisch/organisch)
Verkohlen	Ausbilden eines kohlenstoffhaltigen Rückstands als Ergebnis einer thermischen Zersetzung oder einer unvollständigen Verbrennung (organisch)
Versprödung	Ausbildung eines brüchigen Rückstands als Ergebnis einer thermischen Zersetzung oder einer unvollständigen Verbrennung (anorganisch/organisch)
Schrumpfen	Abnahme der Größe eines Schutzsystem-Werkstoffes (u.a. in Folge Wasserentzug/Fettentzug)
Entzündung	Einleitung einer thermischen Verbrennung eines Schutzsystem-Werkstoffes
Nachbrennen	Selbstständige thermische Verbrennung des Schutzsystem-Werkstoffes nach Abschalten der Energie (Nachbrennzeit)
Flammenbildung	Entstehung einer Flamme durch Entzündung von Gasen, die bei der Laserbestrahlung vom Schutzsystem-Werkstoff emittiert werden
Rauchbildung	Verdampfen des Werkstoffes unter Bildung von Rauch

Tabelle iii: Kontaktdauern / Reflexzeiten gemäß DIN EN 563

Kontakt- dauer bis zu	Beispiele für das Berühren einer heißen Oberfläche	
	unbeabsichtigt	beabsichtigt
0,5 s	Berühren einer heißen Oberfläche und schnellstmögliches Zurückziehen nach Schmerzepfindung ohne Einschränkung der Bewegungsfreiheit	-
1 s	Berühren einer heißen Oberfläche und schnelles Zurückziehen nach Schmerzepfindung	-
4 s	Berühren einer heißen Oberfläche und verlängerte Reaktionszeit	Umlegen eines Schalters, Drücken eines Knopfes
10 s	Fall gegen eine heiße Oberfläche mit Verlust der Bewegungsfähigkeit	Etwas länger andauerndes Umlegen eines Schalters, kurzes Drehen eines Handrads, eines Ventils usw.
ANMERKUNG: Eine Kontaktdauer von 0,5 s ist nur anwendbar für den Fall, dass gesunde Erwachsene unbeabsichtigt eine heiße Oberfläche berühren können		