

QUALIFIZIERUNG PERSÖNLICHER SCHUTZAUSRÜSTUNG FÜR HANDGEFÜHRTE LASERGERÄTE ZUR MATERIALBEARBEITUNG

— ERGEBNISSE AUS DEM FORSCHUNGSPROJEKT F 2117 —

Thomas Puester¹, Dirk Herzog¹, Dirk Wenzel², Hendrik Beier², Günter Ott³

¹Laser Zentrum Hannover e.V., Hollerithallee 8, D-30419 Hannover

²Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V., Annaberger Straße 240, D-09125 Chemnitz

³Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, D-44149 Dortmund

Einleitung

Seit Mitte der 90er Jahre hat die Entwicklung von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung (HLG) signifikante Fortschritte erzielt.

Mit der Verfügbarkeit von leistungsfähigen und kompakten Festkörperlasern und Diodenlasern in Kombination mit Strahlführungssystemen über optische Fasern haben sich eine Reihe neuer Anwendungsfelder im industriellen Sektor ergeben. Durch die ständige Weiterentwicklung u.a. im Bereich der Hochleistungsfaserlaser ergeben sich weitere Potenziale im Hinblick auf mobile leistungsstarke Laserstrahlquellen hoher Strahlqualität in Verbindung mit HLG [1-2].

Manuelle Laser-Materialbearbeitung kann immer dann vorteilhaft eingesetzt werden, wenn die Aufgabe besteht, komplexe Bauteile mit hoher Flexibilität lokal und präzise zu bearbeiten und auf aufwändige Handhabungstechnik und Programmierung verzichtet werden soll.

Anwendungsbereiche

Ausgehend von Handarbeitsplätzen mit handbewegtem Werkstück in der Schmuck- und Dentalindustrie [3,4] wurden eine Reihe von handgeführten oder -positionierten Systemen zum Schneiden, zum Schweißen, für die Oberflächenbearbeitung, wie Auftragschweißen, Löten und Härten, sowie zum Abtragen bzw. Reinigen entwickelt [5-8]. Die Einsatzfelder der HLG sind u.a. der Automobilbau, der Maschinen- und Werkzeugbau wie auch die Denkmalpflege oder der Rückbau komplexer Anlagen. Erste Anwendungen im Schiffbau haben erfolgreich stattgefunden und werden derzeit ausgeweitet [9]; der

Einsatz von HLG für den Fassadenbau (auf Baustellen) ist geplant. In Abbildung 1 sind derzeitige und geplante Anwendungsbereiche von HLG dargestellt.

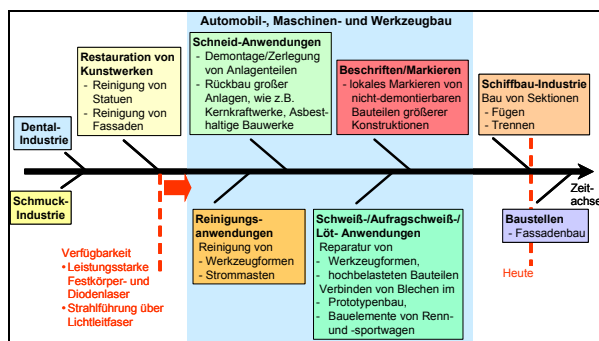


Abbildung 1: Anwendungsbereiche von HLG

Während in den ersten Jahren insbesondere von Forschungsinstituten Prototypen entwickelt wurden, bieten mittlerweile mehrere Firmen (überwiegend kleine und mittlere Unternehmen, KMU) Geräte zur handgeführten und/oder handpositionierten Laser-Materialbearbeitung auf dem Weltmarkt an. Auch wird die Anwendung der HLG als Dienstleistung angeboten, wobei die ausführenden Firmen in der Regel mit mobilen Laseranlagen vor Ort gehen und die Bearbeitung im Haus des Auftraggebers durchführen.

Derzeitiger Stand bezüglich Gefährdungen und Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit HLG

Bezüglich des Schutzes der Augen gegenüber Laserstrahlung ist am Markt eine Vielzahl von qualifizierten persönlichen Schutzsystemen verfügbar. Die Anforderungen an Laserschutzbrillen und die entsprechenden Prüfverfahren sind in Normenwerken formuliert.

Im Vergleich hierzu besteht im Bereich Schutzbekleidung gegen Laserstrahlung derzeit noch ein deutliches Wissensdefizit sowohl bezüglich Anforderungen an Schutzsysteme wie auch an die Schutzwirkung am Markt verfügbarer Systeme (überwiegend aus anderen Einsatzbereichen). Die Empfehlung der HLG-Hersteller für PSA sowie die Bereitstellung von PSA durch die Betreiber von HLG geschieht derzeit überwiegend auf intuitiver Basis und nicht erkenntnisbasiert. Typische Werkstoffe für Handschuhe, die beim Umgang mit HLG eingesetzt werden, sind derzeit Leder und/oder Baumwolle; für Oberbekleidung wird überwiegend Baumwolle eingesetzt.

Es gibt nur äußerst vereinzelt veröffentlichte Daten über das Verhalten von Schutzbekleidung bei Bestrahlung durch Laserstrahlung. Alunovic und Kreutz [10] untersuchten stichprobenartig Baumwoll-Arbeitsbekleidung. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Oberbekleidung eine nur äußerst geringe Schutzfunktion gegenüber Laserstrahlung aufweist.

Eine Patentrecherche auf dem Gebiet der persönlichen Schutzausrüstung im Bereich Schutzhandschuhe führte zu dem Ergebnis, dass ein amerikanisches Patent für Laser-Schutzhandschuhe vorliegt [11]. Anhand der Ausführungsbeschreibung kann darauf geschlossen werden, dass es sich auf Grund der verwendeten Werkstoffe und Schichtsysteme (Polymermatrix mit Zwischenschicht, die Metallpartikel enthält) um Applikationen handelt, bei denen eher geringere Bestrahlungsstärken auf der PSA auftreten; z.B. im Bereich medizinischer Anwendungen oder Laboranwendungen. Ein Händler bzw. Vertriebswege für die Schutzhandschuhe konnten nicht eruiert werden, was faktisch bedeutet, dass die Handschuhe am Markt nicht verfügbar sind.

Zu unterscheiden sind hinsichtlich der Gefährdung durch Laserstrahlung der bestimmungsgemäße Betrieb, vorhersehbare Fehlerfälle und vorhersehbarer Missbrauch (s.a. CEN guide 414).

Während im bestimmungsgemäßen Betrieb bei den meisten HLG-Anwendungen gestreute Laserstrahlung zugänglich wird (in einigen Fällen gerichtet reflektierte Strahlung), kann in vorhersehbaren Fehlerfällen wie auch bei vorhersehbarem Missbrauch gerichtet reflektierte Strahlung sowie direkte Strahlung zugänglich werden. Ausgehend von den mittleren Ausgangsleistungen und den Bearbeitungsbedingungen kann in diesen Fällen eine Überschreitung der maximal zulässigen Bestrahlungswerte für die Haut (MZB_{Haut}) nicht ausgeschlossen werden.

Anders als konventionelle Handwerkzeuge (z.B. Handbohrmaschine, Bolzenschussgerät) können die

HLG je nach Strahlformung und Freiheitsgraden der Strahlaustrittsebene sowie Reflexionsbedingungen einen weiten Wirkungsbereich (Gefährdungsbereich) aufweisen. Die bisher erstellten HLG verfügen nur zum Teil über technische Sicherheitseinrichtungen zum Laserschutz (u.a. Auflagekontrolle, Abstandskontrolle); auch erreichen die sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen nur niedrige Kategorien gemäß DIN EN 954-1, so dass eine fehlersichere Isolierung der Laserstrahlung oftmals nicht gewährleistet werden kann.

Dieses bedeutet, dass z.B. bei HLG zum Reinigen, Härten oder Auftragschweißen, bei denen die Bedienung über Fußschalter oder Einhandbedienung realisiert ist (derzeit am Markt verfügbare HLG), insbesondere Hand und Unterarme wie auch der Oberkörper durch Laserstrahlung gefährdet sind.

Der derzeitige Status-Quo im Bereich Gefährdungen und persönliche Schutzausrüstung beim Betrieb von HLG lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Eine Reihe von Herstellern und Betreibern von HLG haben sich am Markt platziert. Derzeit werden die HLG eingesetzt, ohne dass Daten bezüglich Anforderungen und Prüfbedingungen für persönliche Schutzkleidung, die ein Mindestschutz gegen die beim Betrieb von HLG zugänglich werdende Laserstrahlung bietet, existieren. Demzufolge sind auch entsprechende technische Regelwerke nicht erstellt und nicht verfügbar. Die fehlende Qualifikation von persönlicher Schutzausrüstung stellt aus arbeitsschutztechnischer und wirtschaftlicher Sicht ein Defizit dar, das die Verbreitung von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung in den Markt erschwert.

Status-Quo im Bereich Mess- und Prüfverfahren

Für die Prüfung der Schutzfunktion gegenüber Kontakt mit Flammen und Hitzestrahlung existiert eine Vielzahl von Methoden. Für die Prüfung und Beurteilung der thermischen Schutzwirkung technischer textiler Flächen und Kleidung bei Einwirkung eines Störlichtbogens wurden Verfahren entwickelt und in europäischen/internationalen Normengremien eingebracht. Weiterführende Arbeiten für Handschutz bei Störlichtbogenunfällen sind in Diskussion.

Anleihen hinsichtlich der Prüfung der Schutzfunktion von technischen Textilien und Leder gegen Laserstrahlung können aus den Prüfverfahren für Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen und bedingt von Laserschutzwänden (nur hinsichtlich der Begrifflichkeiten; VMB u. SGB) genommen werden:

- DIN EN 12254, Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen
- DIN EN 60825-4, Sicherheit von Lasereinrichtungen, -Teil 4: Laserschutzwände

Gemäß der DIN EN 12254 werden die Proben hinsichtlich der Kriterien „spektraler Transmissionsgrad“ sowie „Beständigkeit gegen Laserstrahlung“ geprüft. Dieses bedeutet, dass die Abschirmungen ihre Schutzeigenschaften (bezüglich Transmission oder Durchtritt von Laserstrahlung) unter der Bestrahlung nicht verlieren dürfen. Dabei sind bestimmte Durchmesser der Bestrahlungsflecke einzuhalten.

Leistungsanforderungen an passive Schutzsysteme sind in der DIN EN 60825-4 formuliert. Hiernach darf bei Bestrahlung der Vorderseite der Laserschutzwand mit der vorhersehbaren Maximalbestrahlung (VMB) auf der Rückseite innerhalb des Wartungszeitraums zu keiner Zeit der Grenzwert (GZS) zugänglicher Strahlung der Klasse 1 überschritten werden. Die spektrale Transmission bzw. der Durchtritt von Strahlung werden mit geeigneten Leistungs-/Energiesmessgeräten oder schnellen Detektoren (z.B. Dioden) gemessen.

Weltweit existiert jedoch **noch kein genormtes Prüfverfahren**, das Aussagen zur Schutzwirkung von PSA aus technischen Textilien und/oder Leder gegen die Auswirkungen von Laserstrahlen liefert.

Analogien zur Konzeption von Schutzsystemen, die einen Mindestschutz gegenüber Laserstrahlung aufweisen, finden sich in der Lasermedizin. Parallel erfolgte die Entwicklung von technischen Normen zur Definition von Anforderungen an die Schutzsysteme und an Prüfverfahren.

Im Bereich der Endo-Trachealtuben wurden Anforderungen an Schutzsysteme und an die Prüfverfahren in der internationalen Norm DIN EN ISO 11990 festgelegt. Geprüft wird das Produkt auf laserinduzierte Beschädigungen bei definierten Bestrahlungsparametern.

Im Bereich der Operationstücher sind Anforderungen an Produkte und Prüfverfahren in der internationalen Norm DIN EN ISO 11810-1,2 formuliert. Die Produkte werden hinsichtlich laserinduzierter Entflammbarkeit und der Laserdurchstrahlung bei definierten Bestrahlungsparametern geprüft.

Untersuchte Werkstoffe/Schutzsysteme

Gesamtziel des Projektes ist die Erarbeitung und Bereitstellung systematischer Daten bezüglich persönlicher Schutzkleidung gegen Laserstrahlung, um einen sicheren Umgang mit Geräten zur handgeführten

und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung zu ermöglichen.

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

Weitere Kriterien zur Charakterisierung der textilen Flächengebilde sind die Gewebe-Bindungsart (u.a. Leinwand- Köper-, Atlasbindung), die Flächenmasse, Dicke des Flächengebildes, sowie die chemische Behandlung (Additivierung, Imprägnierung).

Bei den für die Untersuchungen ausgewählten textilen Flächengebilden handelt es sich um schwerentflammbare Materialien unterschiedlicher Flächenmasse, wie sie für Hitzeschutzkleidung nach EN 531 und EN 470-1 verwendet werden. Bis auf Gestricke sind alle Materialien als Außenlage vorgesehen. Sie erfüllen die Anforderungen an die begrenzte Flammenausbreitung CODE A (geprüft nach 10s Beflammung entsprechend ISO 15025, Verfahren A, Flächenbeflammung) sowie mindestens CODE B1 für konvektive Hitze (geprüft nach EN 367 mit 80 kW/m² Wärmestromdichte) und CODE C1 (geprüft nach EN 366/EN ISO 6942 bei 20 kW/m² Wärmestromdichte) für Strahlungswärme.

Das Aramid (Nomex®)-Filament-Gewebe stammt aus dem Bereich der Rennfahrer-Schutzkleidung. Es wird als Außenlage eingesetzt. Eine (oder zwei) zusätzliche Lage des Nomex®-Gestrickes erhöht die Wärmeisolation bei einwirkender konvektiver Wärme oder Strahlungswärme. Die weiteren mit verschiedenen Stoffen (Aluminium, Polyurethan) kaschierten Aramid-Gewebe entstammen dem Hitzeschutzbereich bzw. Feuerwehrbereich (Handschuhe).

Die Glasfasergewebe entsprechen Flächengebilden, wie sie zum Hitzeschutz eingesetzt werden. Untersucht werden Glasgewebe, die einseitig oder beidseitig mit Aluminium beschichtet sind.

Bei den untersuchten Flächengebilden aus Naturstoffen handelt es sich um Rindvollleder (Narbenleder) und Spaltleder. Die untersuchten Leder werden für Handschuhe zum Schweißerschutz nach DIN EN 12477 verwendet.

Für die Bestrahlungsversuche wurden zunächst vorrangig flächenförmige Proben verwendet.

Abschätzung der vorhersehbaren Maximalbestrahlung an Schutzsystemen

Bei der Beurteilung der Schutzsysteme (PSA) hinsichtlich ihres Schutzes gegenüber Laserstrahlung muss sowohl vom bestimmungsgemäßen Betrieb als auch vom Auftreten vorhersehbarer Fehlerfälle ausgegangen werden.

Im bestimmungsgemäßen Betrieb tritt typischerweise eine Exposition gegenüber beim Anwendungsprozess diffus gestreuter Laserstrahlung auf.

Vorhersehbare Fehlerfälle sind:

- Exposition gegenüber dem direkten (geformten) Laserstrahl
- Exposition gegenüber einem gerichtet reflektierten Laserstrahl, wie er z.B. von einer Werkstückoberfläche in den Raum reflektiert werden kann.

Für die Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung in einem bestimmten Abstand zur Strahlaustrittsöffnung ist die genaue Kenntnis der eingesetzten HLG in Verbindung mit der Laserstrahlquelle erforderlich. Bestimmende Parameter sind die verwendete Laserleistung, die eingesetzte Strahlformung (Aufweitung, Kollimation, Fokussierung) sowie die Divergenz des Laserstrahls.

In der folgenden Darstellung sind typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG angegeben.

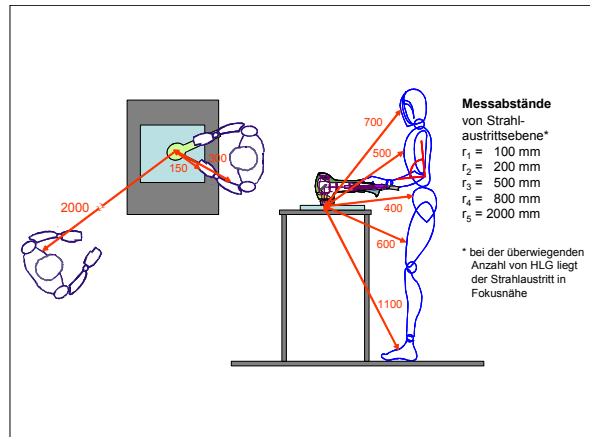


Abbildung 2: Typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG

Mit Hilfe der technischen Daten der HLG und Laserstrahlquellen in Verbindung mit typischen Abständen zu Körperteilen sind exemplarisch vorhersehbare maximale Bestrahlungen (VMB) kalkuliert worden.

Die berechneten Werte für die VMB liegen in Bereichen von $5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ ($p_{cw}=400 \text{ W}$, $d_k=18 \text{ mm}$, $f_b=30 \text{ mm}$, $r_{abst}=500 \text{ mm}$) bis $1 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ ($p_{cw}=3 \text{ kW}$, $d_k=20 \text{ mm}$, $f_b=200 \text{ mm}$, $r_{abst}=150 \text{ mm}$).

Gegenüberstellung der VMB mit Grenzwerten (MZB)

Die für die Berechnung der maximal zulässigen Bestrahlungen (MZB) angesetztten Zeitbasen basieren auf den Reflexzeiten für die Wahrnehmung des Reizes und der Reaktionszeit bis zum Entfernen der Extremität aus dem Strahl (s.a. Stoll/Chianta).

Es wird eine menschliche Wahrnehmungszeit (Schmerzempfindung) zwischen 100 ms (0,1 s) und 1000 ms (1,0 s) sowie eine Reaktionszeit R bis zum Entfernen der Extremität aus dem Strahl von 0,5 s bis 4 Sekunden 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 (MZB_{Haut}) bei direkter Laserbestrahlung 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.

Ergebnisse der Untersuchungen an persönlicher Schutzausrüstung

1) Charakterisierung der Schutzsysteme hinsichtlich Ihrer optischen Eigenschaften (Kleinsignal-Prüfverfahren)

Um grundlegende Aussagen über die optischen Eigenschaften der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung mit verschiedenen Wellenlängen treffen zu können, werden die Schutzsysteme in einem ersten Schritt mit Hilfe von Kleinsignal-Prüfverfahren untersucht.

Eingesetzt werden zum einen marktübliche Spektrometer mit Integriereinheit (Ulbrichtkugel). Daneben werden spezielle Versuchsaufbauten erstellt,

um bei verschiedenen Wellenlängen die Kleinsignal-Transmission und Remission bestimmen zu können. Für die speziellen Versuchsaufbauten wurden ebenfalls Ulbrichtkugeln eingesetzt (Nd:YAG-Laser: Beschichtung: $BaSO_4$, Durchmesser: 200 mm; CO_2 -Laser: Beschichtung: Infragold, Durchmesser: 100 mm), um ein integrales Signal der über die Raumrichtungen transmittierten/remittierten Strahlungsanteile zu erhalten. Die Versuche werden mit einem Nd:YAG- sowie einem CO_2 -Laser im quasi cw-Betrieb durchgeführt.

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Kleinsignaltransmission für die untersuchten Schutzsysteme dargestellt.

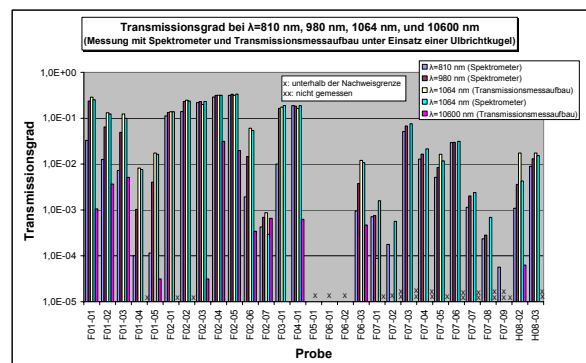


Abbildung 3: Spektraler Transmissionsgrad verschiedener Proben gemessen mit Spektrometer und speziellem Bestrahlungsmessaufbau (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser/ CO_2 -Laser)

Nd:YAG-Laser ($\lambda = 1064$ 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, Schweiß-/Flammschutz) zuzuordnen sind.

Wie anhand der Abbildung 1 zu erkennen ist, korrelieren die mit dem speziellen Kleinsignal-Transmissionsmessaufbau ermittelten Ergebnisse sehr gut mit den Ergebnissen der Transmissionsmessung unter Einsatz des Spektrometers.

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 $T = 10^{-2}$

2) **Bestrahlungsuntersuchungen an Schutzsystemen (Realbestrahlung)**

Die Untersuchungen erfolgen an speziellen Versuchsaufbauten, die an verschiedene Laserstrahlquellen adaptiert werden können.

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

Bezüglich des Verhaltens bei Laserstrahlungsexposition können grundsätzlich zwei Typen von Schutzsystemen unterschieden werden:

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

Um die von den Schutzsystemen transmittierte Laserstrahlung zu detektieren, wird in den Messaufbau unterhalb der Probe eine Aufnahme für einen Faserkopf eines Spektrometers platziert. Die transmittierte Laserstrahlung sowie emittierte Wärmestrahlung wird in einem Wellenlängenbereich von 380 nm bis 1680 nm aufgezeichnet.

Wie anhand der Diagramme in Abbildung 4 erkennbar ist, tritt bei Nd:YAG Laserbestrahlung beim Schutzsystem F02-01 eine ausgeprägte Transmission auf. (im Vergleich: Kleinsignaltransmission $T=0,14$). Nach ungefähr 15 Sekunden beginnt die irreversible Zerstörung mit Verkohlungen des Schutzsystems, was zur Folge hat, 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. Dies ist anhand des deutlichen Anstiegs der transmittierten Laserstrahlung erkennbar. Da die Amplitude der transmittierten Laserstrahlung signifikant höher als die Messbereichsgrenze ist, wird nicht deutlich, dass die transmittierte Laserleistung nach der Lochbildung höher ist, als vor der vollständigen Zerstörung.

Im Vergleich dazu verhalten sich Systeme mit geringer Transmission, wie das Schutzsystem F07-01, das auf einem einseitig aluminisierten Glasgewebe mit einseitiger Silikonbeschichtung basiert, signifikant unterschiedlich. Durch Absorption der Laserstrahlung kommt es zu einer lokalen Erwärmung und damit zur Emission von Wärmestrahlung, welches anhand der spektrometrischen Messdaten in Abbildung 5 veranschaulicht wird. Durch das langsame Verkohlen des Werkstoffs steigt die Transmission der Laserstrahlung nach einem Zeitraum von ca. 40 Sekunden an.

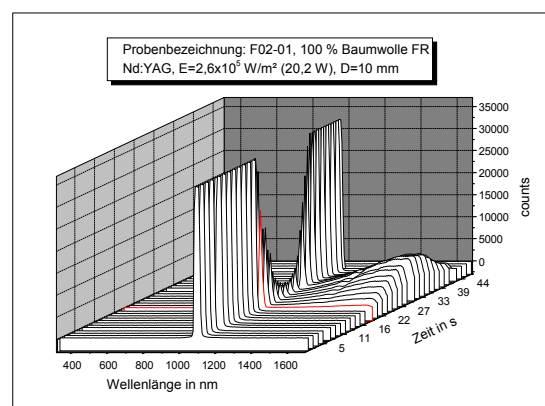


Abbildung 4: Spektrometrie mit Nd:YAG-Laser im Bereich von $\lambda=380 \text{ nm} - 1680 \text{ nm}$

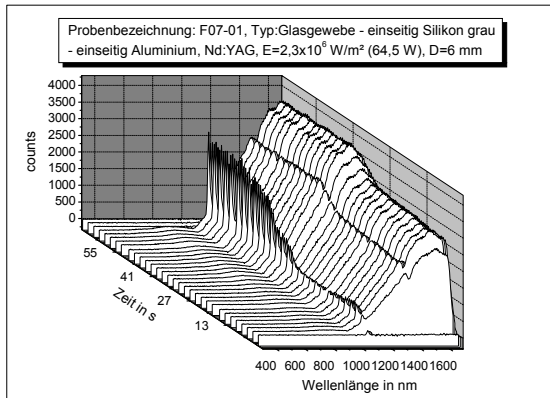


Abbildung 5: Spektrometrie mit Nd:YAG-Laser im Bereich von $\lambda=380$ nm -1680 nm

Ergebnisse der Leistungsmessung

Zur Messung der transmittierten Gesamtleistung der Schutzsysteme wird ein Powermeter der Firma Coherent, Typ Labmaster Ultima bzw. Fieldmaster GS, verwendet. Das Powermeter erlaubt den Anschluss von Thermopile-Detektoren (LM-10 HTD, LM-45 HTD, LM-100 HTD) für verschiedene Leistungsbereiche.

Hinsichtlich einer Bewertung der Schädigungen für die Haut ist die Frage zu beantworten, welche Strahlungsanteile auf direkt vom Schutzsystem transmittierter Laserstrahlung zurückzuführen sind und welche Strahlungsanteile durch Wärmestrahlung resultieren. Im NIR-Wellenlängenbereich kann diese Frage durch Einsatz von Spektrometern oder Separierung der Strahlungsanteile mittels HR-Spiegel (für entsprechende Laserstrahlung) beantwortet werden. Um im IR-Bereich (10600 nm) die Wärmestrahlungsanteile von der transmittierten Laserstrahlung zu trennen, wird vor den Detektor ein Saphir-Kristall positioniert, das ein Filter für Wellenlängen oberhalb von 6 μ m darstellt. Bei Einsatz des Saphir-Kristall wird nur der Wärmestrahlungsanteil vom nachgeschalteten Detektor gemessen. Mittels einer Vergleichsmessung ohne Saphir-Kristall, bei der die Gesamtstrahlungsanteile (transmittierte Laserstrahlung + Wärmestrahlung) detektiert werden, kann die Differenz der beiden Signale berechnet werden; sie entspricht den transmittierten Laserstrahlungsanteilen.**

**Bei niedrigen Temperaturen des Schutzsystems (mittels Thermokamera gemessen) werden die gemessenen Wärmestrahlungsanteile bezüglich der oberhalb von 6 μ m auftretenden – durch den Filter ausgeblendeteten – Wärmestrahlungsanteile gemäß der Stefan Boltzman Kurve korrigiert.

In Abbildung 6 ist das zeitliche Gesamtsignal des Leistungsmessgerätes wiedergegeben. Zu erkennen sind bei den Proben (hier repräsentiert durch den roten u. blauen Graph), die oberhalb einer bestimmten Bestrahlungsstärke durch Lochbildung zerstört werden, vier Bereiche.

- 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.

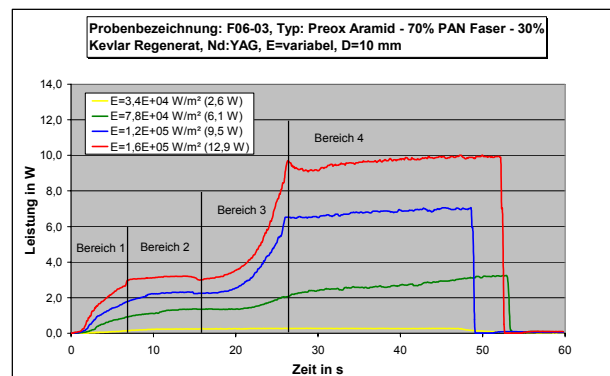


Abbildung 6: Zeitliches Gesamtsignal des Leistungsmessgerätes bei Nd:YAG-Laserbestrahlung des Schutzsystems F06-03

Diese Bereichseinteilung korreliert mit den Ergebnissen der Kalorimetrie. Berücksichtigt werden muss hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Daten, dass ein konstanter Verlauf der Kurve ($E = const$) bei Angabe leistungsbezogenen Daten (Abbildung 4) bei der Angabe energiebezogener Daten mit einer linearen Steigung ($\Delta H/\Delta t = const.$) korreliert.

Um eine Trennung zwischen Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung zu erreichen, wird bei Nd:YAG-Laserbestrahlung ein HR-Spiegel für 1064 nm verwendet. Dieser befindet sich unmittelbar unterhalb der Probe und reflektiert nur die transmittierten Laserstrahlungsanteile auf den in 90° zur Probe angeordneten Detektor. Die Wärmestrahlungsanteile werden von dem HR-Spiegel nicht reflektiert und somit nicht vom Detektor erfasst.

Abbildung 7 veranschaulicht den zeitlichen Verlauf des Signal von Gesamtstrahlung und separierter Laserstrahlung. 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.

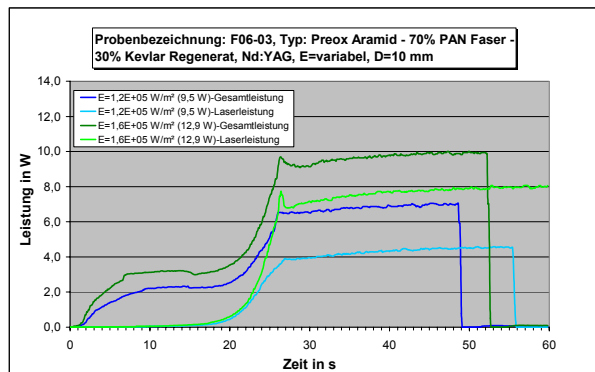


Abbildung 7: Trennung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung des Schutzsystems F06-03 mit Nd:YAG-Laserstrahlung

Visuelle Bewertung

Um die Schutzsysteme hinsichtlich ihres Verhaltens bei Laserbestrahlung visuell zu bewerten, wird in den Messaufbau eine CCD-Kamera integriert. Aus Gründen des zugänglichen Raumes (unter der Probe befinden sich Glasfaserkopf und Thermopiledetektor) wird die Kamera wie auch die Thermokamera oberhalb der Probe positioniert. Mittels einer vom Lasergerät getriggerten Zeitmessung und einer Videoaufzeichnung wird das zeitliche Verhalten der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung jeweils bis zu einer Zeitdauer von max. 100 Sekunden gespeichert. Im Anschluss (off-

line) erfolgt eine Analyse bezüglich des Zeitpunktes des Eintretens der unten genannten Kriterien am PC.

Ausgangspunkt für die Auswahl und Definition der Kriterien für die Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung ist die Kriterienliste wie sie zur Bewertung von Kleidungsmaterialien in der „Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen durch einen Störlichtbogen“ formuliert wurde [14]. Die Liste wird ergänzt um die Kriterien „Flammenbildung“ und „Rauchbildung“.

Tabelle 1: 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

Wie in Abbildung 8 dargestellt, wird das Schutzsystem F02-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung schon bei Bestrahlungsstärken von $6 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ innerhalb von 15 Sekunden zerstört. Im Gegensatz dazu bietet das aluminisierte Schutzsystem F07-01 bei Bestrahlungsstärken bis 10^6 W/m^2 ausreichende Schutzwirkung gegen Lochbildung bzw. Strahldurchtritt, wie anhand Abbildung 9 deutlich wird. Ursächlich hierfür ist die im Vergleich zu Baumwoll- und Mischgeweben zu deutlich höheren Temperaturen verschobene Zerstörschwelle des anorganischen Glasfasergewebes.

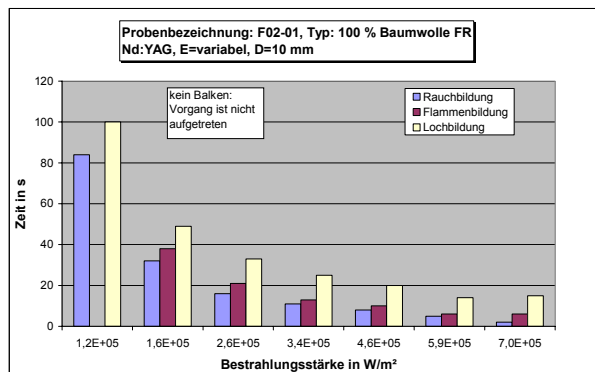


Abbildung 8: Visuelle Bewertung des Schutzsystems F02-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung

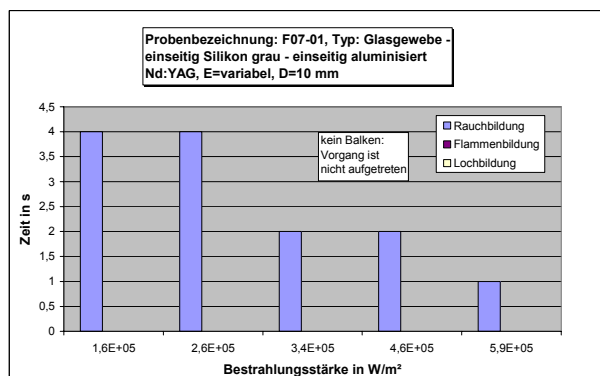


Abbildung 9: Visuelle Bewertung des Schutzsystems F07-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung

3) Kalorimetrische Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des Stoll-Chianta Kriteriums

Für die Bewertung des Verhaltens des jeweiligen Schutzsystems werden Schädigungskriterien der Haut und Toleranzzeiten des Schutzsystems von der

Wahrnehmung einer Bestrahlung bis zum Auftreten einer Schädigung herangezogen.

Für Kurzzeitbestrahlung ist das Kriterium „Zeit zur Flucht/Zeit zum Wegziehen“ bzw. die „Expositionsbegrenzung“ entscheidend. Einflussgrößen sind zum einen die Schädigungsgrenze der Haut wie auch die Wärmeübertragungs-Prozesse vom Schutzsystem zur Haut.

Die thermische Schädigung der Haut bis zur vollständigen Epidermisnekrose war schon in den 1940er Jahren Gegenstand von Untersuchungen verschiedener vorwiegend amerikanischer Forschergruppen. Ergebnis der Untersuchungen von Henriques und Moritz war die empirische Beschreibung der Schädigung mit Hilfe einer Temperatur-Zeit-Funktion [15].

Stoll und Chianta [13] haben diese Modelle in den 60er Jahren vor dem Hintergrund der Bewertung von Persönlicher Schutzausrüstung gegenüber thermischen Belastungen weiterentwickelt. Für die Schädigungsrate des menschlichen Gewebes ist die maximale Temperatur des menschlichen Gewebes entscheidend:

- Temperaturerhöhungen im Bereich $<44^\circ\text{C}$ verursachen auch bei Einwirkdauern von mehreren 100 s keine Schädigung
- Temperaturerhöhungen über 44°C führen zu irreversiblen Schädigungen der Haut, unabhängig von der Expositionsdauer.
- Das Verhältnis, mit dem die Schädigung auftritt (Schädigungsrate $d\Omega/dt$), steigt logarithmisch mit linearem Anstieg der Hauttemperatur, $45^\circ\text{C} = 1$; $50^\circ\text{C} = 100$.

Stoll und Chianta haben mathematische Modelle für das Auftreten einer Verbrennung 2. Grades bei Zugrundelegung einer 95%igen statistischen Wahrscheinlichkeit entwickelt. Diese Modelle können flexibel in Bezug auf die Art der Energie (Flamme, Wärmestrahlung, Wärmeleitung) als Funktion der absorbierten Wärmestromdichte bzw. Einwirkenergie angewendet werden. Darstellen lassen sich in Abhängigkeit der Expositionszeit (Einwirkdauer) und der Wärmestromdichte bzw. der Einwirkenergie die Grenzen für den Schmerzreiz und für das Auftreten einer Verbrennung 2. Grades (Brandblase) [13].

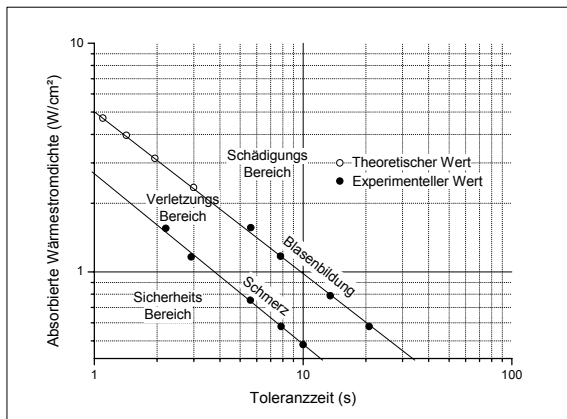


Abbildung 10: Toleranzzeit der ungeschützten menschlichen Haut für das Auftreten von Schmerz und Verbrennungen 2. Grades (Blasenbildung) gemäß Stoll/Chiara [13]

Wie aus dem Diagramm in Abbildung 10 geschlossen werden kann, steigt bei einer geringeren Wärmestromdichte die Toleranzzeit von der Schmerzempfindung bis zur Verbrennung 2. Grades an.

Die mit dem Kalorimeter aufgezeichneten Messwerte werden den Grenzkurven nach Stoll/Chiara vergleichend gegenübergestellt. Überschreitungen der jeweiligen Grenze indizieren Schmerz bzw. Verbrennungen 2. Grades.

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

Grundlagen für das Schmerzempfinden und das Reflexverhalten -und damit für die maximalen Einwirkdauern der thermischen Belastung- sind in der Neurophysiologie beschrieben [16]. Hinsichtlich der Reflexe werden sogenannte monosynaptische Reflexbögen und polysynaptische Reflexbögen unterschieden, bei denen Rezeptor und Effektor nicht im gleichen Organ liegen. Der Fremdreflex dauert daher deutlich länger als der Eigenreflex (~1s). Bei der Wahrnehmung einer unbeabsichtigten Laserbestrahlung von PSA-Systemen für Laserstrahlung und der thermischen Belastung der Haut mit nachfolgendem Rückziehreflex handelt es sich um einen polysynaptischen Reflex.

Die Reaktionszeiten für das Überschreiten einer Reizschwelle und die reflexartige Bewegung des Körperteils aus dem Gefahrenbereich bestimmen die

maximalen Einwirkdauern der Belastung auf die menschliche Haut. In der Literatur finden sich nur wenige Daten über Reflexzeiten bei thermischer Reizung der Nociceptoren (insbesondere durch Wärmestrahlung und -leitung).

Im Folgenden werden Daten der technischen Norm DIN 563 herangezogen, die für kurze Berührungen von Bauteilen (Wärmeleitung) mit heißen Oberflächen ermittelt wurden.

Tabelle 2: 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 Schmerzempfindung ohne Einschränkung der Bewegungsfreiheit	-
1 s	Berühren einer heißen Oberfläche und schnelles Zurückziehen nach Schmerzempfindung	-
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		

Als Basisgröße für die Reflexzeiten beim Entfernen von Körperteilen aus dem Gefahrenbereich wird im Rahmen dieser Untersuchungen von PSA für

Handlaser von Zeiträumen zwischen 1 s bis 4 s ausgegangen.

Auf Basis dieser Annahme wird eine Bewertung der Beispiel-Schutzsysteme F02-01 und F07-01 hinsichtlich des Schutzniveaus bei Laserbestrahlung im Folgenden vorgenommen.

Bei CO₂-Laserbestrahlung des Schutzsystems F02-01 mit einer Bestrahlungsstärke von $5,5 \times 10^4$ W/m² wird die Schmerzgrenze nach 5 Sekunden überschritten (Abbildung 11). Die Zeitspanne von der Schmerzempfindung bis zum Eintritt von Verbrennungen 2. Grades beträgt ca. 2,5 Sekunden. In diesem Fallbeispiel ist ein Wegziehen der äußeren Extremitäten durchaus noch möglich.

Im Vergleich wird bei einer Bestrahlungsstärke von $1,3 \times 10^5$ W/m² die Schmerzgrenze nach 2,5 Sekunden überschritten. Die Zeitdauer von der Schmerzgrenze bis zum Überschreiten der Verbrennung 2. Grades, d.h. die Toleranzzeit beträgt ca. 1 Sekunde. Bezüglich der Reflexzeiten ist eine Toleranzzeit von einer Sekunde des Schutzsystems als grenzwertig zu betrachten. Oberhalb von Bestrahlungsstärken von $2,5 \times 10^5$ W/m² wird die Schmerzschwelle nach einer Sekunde überschritten und die Toleranzzeit bis zum Eintritt von Verbrennungen 2. Grades liegt deutlich unter einer Sekunde (0,5 s bis 0,75 s). Dieses bedeutet, dass unter Berücksichtigung der Reflexzeiten von ca. einer Sekunde eine hohe Gefährdung hinsichtlich einer irreversiblen Hautschädigung besteht.

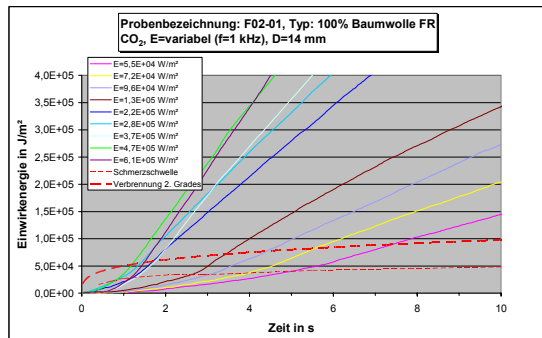


Abbildung 11: Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-01 bei CO₂-Laserbestrahlung

Im Vergleich zu dem Schutzsystem F02-01 bietet das Schutzsystem F07-01 bei CO₂-Laserbestrahlung eine deutlich höhere Schutzwirkung (Abbildung 12).

Bei Bestrahlungsstärken im Bereich von $3,7 \times 10^5$ W/m² wird die Schmerzgrenze nach 6 Sekunden überschritten. Die Toleranzzeit des Schutzsystems bis zum Überschreiten der Schädigungsgrenze

(Verbrennungen 2. Grades) beträgt 3 Sekunden. Erst im Bereich von Bestrahlungsstärken größer als 10^6 W/m² werden die Schmerzschwellen im Bereich von einer Sekunde überschritten und die Toleranzzeit ist kürzer als eine Sekunde.

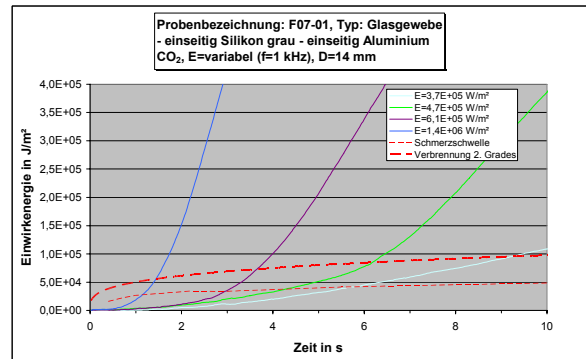


Abbildung 12: Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F07-01 bei CO₂-Laserbestrahlung

Zusammenfassung Auslegungskriterien für Schutzsysteme

Für die Eignung eines Schutzsystems auf Basis technischer Textilien oder Naturstoffen (Leder) gegen Laserstrahlung sind neben den optischen Eigenschaften (Transmission/Remission/Absorption) die thermomechanischen Eigenschaften (thermische Zerstörschwelle, Entflammbarkeit, Brandverhalten, etc.) wesentlich.

Generell lässt sich das Verhalten der Schutzsysteme und der physikalischen Wechselwirkungen mit der Haut wie folgt anhand von zwei idealisierten Verhaltenstypen beschreiben (Abbildung 13):

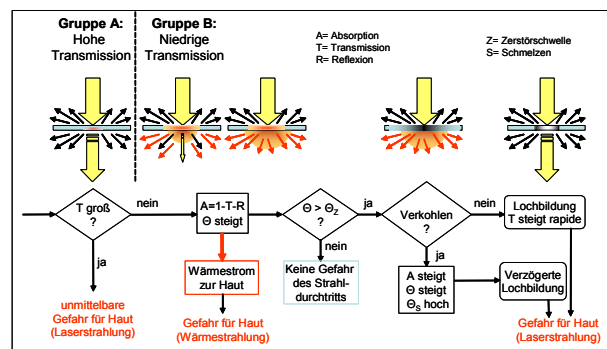


Abbildung 13: Schematische Darstellung des Verhaltens von Schutzsystemen

a) Gruppe A: Erhöhte Laserstrahlungstransmission

Bei entsprechend hoher Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung kommt es zur unmittelbaren Exposition der Haut gegenüber Laserstrahlung. Die MZB-Werte gemäß der technischen Norm IEC DIN EN 60825-1 der unter dem Schutzsystem befindlichen Haut können innerhalb sehr kurzer Zeiträume (<1 s) überschritten werden. Dieses kann bereits innerhalb der Reflexzeiten, in denen das betroffene Körperteil aus dem Gefahrenbereich weggezogen wird, zu Schädigungen der Haut führen.

Zu bewerten ist die vorhersehbare maximale Bestrahlung (VMB) der Laserstrahlung auf der Außenseite des Schutzsystems. In Abhängigkeit der spektralen Transmission des Schutzsystems ist dann zu beurteilen, nach welcher Zeit die MZB_{Haut} überschritten werden, bzw. ob innerhalb der Reflexzeiten überhaupt eine Schädigung zu vermeiden ist.

b) Gruppe B: Wärmeübertragung

Bei ausgeprägt niedriger Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung wird ein hoher Anteil der Laserstrahlung von dem Schutzsystem (PSA) absorbiert (abzüglich der Remission $A=1-T-R$). Dieses führt zu einem Wärmeeintrag mit Temperaturerhöhung im Schutzsystem. Bei diesen Schutzsystemen, die eine sehr geringe Transmission aufweisen, so dass die MZB_{Haut} innerhalb der Reflexzeit nicht überschritten werden, ist vorrangig die durch Absorption in das Schutzsystem eingekoppelte Laserstrahlung und durch Wärmeübertragung von dem Schutzsystem an die Haut transportierte Energie zu bewerten. Als Grenzwert für das Auftreten von thermischen Schädigungen der Haut (Verbrennungen 2. Grades) wird die Grenzkurve nach Stoll/Chianta herangezogen. Mit Beginn der Lochbildung 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 resultieren aus dem thermomechanischen Verhalten des Schutzsystems (u.a. Zerstörschwelle) sowie dem Vergleich der Zeitdifferenz zwischen Schmerzempfindung und dem Eintritt von Schädigungen (Verbrennungen 2. Grades), d.h. der sog. Toleranzzeit, mit den Reflexzeiten:

Die durch das Schutzsystem erreichbare Toleranzzeit (Zeit zwischen Schmerzempfindung und Eintritt von Verbrennungen 2. Grades) muss länger sein als die Reflexzeit.

Dieses bedeutet,

- dass innerhalb der Reflexzeit durch Versagen des Schutzsystems, d.h. durch eine signifikant kritische Erhöhung der Transmission für Laserstrahlung (z.B. auf Grund von Lochbildung) keine Schädigungen ($E > MZB_{Haut}$) auftreten dürfen.
- dass innerhalb der Reflexzeit die durch Wärmeübertragung vom Schutzsystem an die Haut transportierte Energie keine Schädigungen (Verbrennungen 2. Grades) hervorrufen darf.
- dass innerhalb der Reflexzeit die Summe beider Anteile (a+b) keine Schädigungen hervorrufen darf.

Probenbezeichnung

Tabelle 3: 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 Gestrick
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)

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der BAuA für die Bereitstellung der Mittel für die Untersuchungen

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 Alunovic, M.; Kreutz, E.W.: Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1996, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, ISBN 3-89429-790-5
 - 11 Saffer, Jeffrey D.; Profenno, Louis A.: Patentschrift Laser-Schutzhandschuhe: Laser Beam Protective Gloves. Patentschrift: US Patent 4,947,487 (14.08.1990)
 - 12 N.N.: BIA-Info 12/2000: Schutz vor Verbrennungen an heißen Oberflächen. BGIA, Sankt Augustin, 2000
 - 13 Stoll, A.M.; Chianta, M.A.: Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection. Aerospace Medicine, Vol. 40, 1968, pp. 1232-1238
 - 14 N.N.: Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen durch einen Störlichtbogen, 2002, ISBN 3-9807576-2-5
 - 15 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
 - 16 Schmidt, R.F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen, 23. Ausgabe, Springer Verlag, Berlin 1987
- CEN guide 414 Safety of machinery-Rules for the drafting and presentation of safety standards (CEN 2004-12-15)
- Zitierte Normen-/Regelwerke: siehe Verzeichnisse der nationalen, europäischen und internationalen Normungsinstitutionen