

Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

O. Meier, Th. Püster, H. Beier, D. Wenzel

**Forschung
Projekt F 2117**

**Forschung
Projekt F 2117**

O. Meier
Th. Püster
H. Beier
D. Wenzel

**Qualifizierung von persönlicher
Schutzausrüstung für handgeführte
Laser zur Materialbearbeitung**

Dortmund/Berlin/Dresden 2008

Diese Veröffentlichung ist der Abschlussbericht zum Projekt „Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung“ – Projekt F 2117 – im Auftrag der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Autoren: Dr.-Ing. Oliver Meier
Dipl.-Ing. Thomas Püster
Laser Zentrum Hannover e. V.
Hollerithallee 8, 30419 Hannover

Dipl.-Inform. Hendrik Beier
Dipl.-Ing. Dirk Wenzel
Sächsisches Textilforschungsinstitut e. V.
Annaberger Str. 240, 09125 Chemnitz

Herausgeber: Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin
Friedrich-Henkel-Weg 1-25, 44149 Dortmund
Telefon: 0231 9071-0
Telefax: 0231 9071-2454
E-Mail: poststelle@buaa.bund.de
Internet: www.buaa.de

Berlin:
Nöldnerstr. 40-42, 10317 Berlin
Telefon: 030 51548-0
Telefax: 030 51548-4170

Dresden:
Proschhübelstr. 8, 01099 Dresden
Telefon: 0351 5639-50
Telefax: 0351 5639-5210

Alle Rechte einschließlich der fotomechanischen Wiedergabe und des auszugsweisen Nachdrucks vorbehalten.
Aus Gründen des Umweltschutzes wurde diese Schrift auf Recyclingpapier gedruckt.

ISBN 978-3-88261-085-7

Inhaltsverzeichnis

Kurzreferat.....	5
Abstract	6
Résumé	7
1 Einleitung.....	9
2 Derzeitiger Erkenntnisstand im Bereich persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte und -positionierte Lasergeräte zur Materialbearbeitung	13
2.1 Derzeitiger Erkenntnisstand im Bereich Laser-Schutzbekleidung	13
2.2 Stand der Normung im Bereich Schutzbekleidung gegen thermische Risiken und im Bereich Ausrüstungen zum Schutz gegen Laserstrahlung (Anforderungen und Prüfungen).....	14
2.3 Derzeitige Schutzkonzepte für PSA und Anforderungen an PSA seitens der Hersteller und Betreiber von HLG	17
3 Theoretische Betrachtung der Anforderungen an PSA- Schutzsysteme	19
3.1 Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (VMB) an persönlichen Schutzsystemen	20
3.2 Gegenüberstellung der VMB mit Grenzwerten (MZB)	24
4 Experimentelle Untersuchungen der Schutzsysteme	28
4.1 Probenauswahl und Beschreibung	28
4.2 Untersuchungsmethoden.....	30
4.2.1 Kleinsignal-Prüfverfahren zur Charakterisierung der Schutzsysteme hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften.....	30
4.2.1.1 Leistungslose Spektrometrie mittels Spektrometern.....	31
4.2.1.2 Spezielle Einrichtungen für Kleinsignal-Transmissions- /Remissionsmessungen.....	31
4.2.2 Untersuchungstechnik für Bestrahlungsuntersuchungen an Schutzsystemen (Realbestrahlung).....	33
4.2.2.1 Spektrometrische Bewertung.....	33
4.2.2.2 Thermometrische Bewertung.....	34
4.2.2.3 Leistungsmessung.....	34
4.2.2.4 Visuelle Bewertung	35
4.2.2.5 Kalorimetrie	36
4.2.2.6 Hautsimulationsfolie.....	37
4.3 Eingesetzte Lasereinrichtungen	38
5 Ergebnisse der Untersuchungen	40
5.1 Ergebnisse der Kleinsignal-Prüfverfahren	40
5.2 Ergebnisse der Bestrahlungsversuche (Realbestrahlung).....	45
5.2.1 Ergebnisse der spektrometrischen Bewertung	46
5.2.2 Ergebnisse der thermometrischen Bewertung.....	47
5.2.3 Ergebnisse der visuellen Bewertung.....	49

5.2.4	Ergebnisse der Leistungsmessung.....	56
5.2.5	Ergebnisse der kalorimetrischen Bewertung	59
6	Bewertung der Ergebnisse	63
6.1	Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung	63
6.1.1	Transmission von Laserstrahlung	63
6.1.2	Versagensmechanismen der Schutzsysteme	63
6.2	Kalorimetrische Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des Stoll/Chianta-Kriteriums	69
6.2.1	Schädigungsgrenzen nach dem Stoll/Chianta-Kriterium.....	69
6.2.2	Reaktionszeit zum Entfernen der exponierten Körperteile aus dem Gefahrenbereich/maximale Einwirkdauern	73
6.2.3	Zusammenfassende Bewertung der Schutzsysteme unter Berücksichtigung der physikalischen Wechselwirkungen mit der Haut und des Stoll/Chianta-Kriteriums	77
7	Auslegungskriterien für Schutzsysteme.....	84
7.1	Empfehlungen zur Benutzung von Schutzsystemen.....	84
7.2	Empfehlungen zur Konzeption von optimierten Systemen zum Schutz gegen Laserstrahlung	88
7.3	Musterbetriebsanweisung nach PSA Benutzungsverordnung	88
8	Zusammenfassung	89
9	Ausblick	91
10	Literaturverzeichnis.....	93
11	Abbildungsverzeichnis	96
12	Tabellenverzeichnis	99
13	Abkürzungen und Formelzeichen	100
14	Danksagung	102
Anhang 0	Hersteller von HLG und Dienstleister.....	103
Anhang 1	Erläuterung der Prüfverfahren zur Bestimmung der Probendicke sowie Ermittlung der Bindungsart	104
Anhang 2	Spezifikation der für die Untersuchungen ausgewählten Werkstoffe	107
Anhang 3	Spezifikation der für die Untersuchungen eingesetzten Lasengeräte (Strahlquellen)	109
Anhang 4	Tabellarische Übersicht der Ergebnisse	113
Anhang 5	Musterbetriebsanweisung für Laser-PSA	132

Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung

Kurzreferat

Die Anwendungen von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung (HLG) nehmen kontinuierlich zu. Ausgehend von Geräten zum Feinschweißen werden HLG heute unter anderem zum Schweißen, Schneiden, Auftragschweißen, Härten und Reinigen eingesetzt. Die Einsatzfelder der HLG sind unter anderem der Automobilbau, der Maschinen- und Werkzeugbau. Anwendungen im Schiffbau sind derzeit in der Erprobung. Darüber hinaus werden HLG auch in der Kunstrestauration und Denkmalpflege genutzt.

Die Sicherheit von HLG ist eine grundlegende Anforderung. Jedoch bestehen hinsichtlich der sicherheitsgerechten Konstruktion wie auch des sicheren Betriebs eine Reihe offener Fragestellungen. In 2005 wurde dieses Forschungsprojekt initiiert, um persönliche Schutzausrüstung für handgeführte und -positionierte Geräte zur Laser-Materialbearbeitung zu prüfen und zu qualifizieren und um Mindestanforderungen an den Laserschutz zu definieren.

In einem ersten Schritt werden verschiedene am Markt verfügbare technische Textilien und Leder, die als Hitze- und Flammenschutz-Bekleidung (z. B. für Schweißer, hitzeexponierte Arbeiter oder Rennfahrer) Verwendung finden, untersucht. Zum Vergleich wird typische Arbeits- und Freizeitbekleidung (aus Baumwolle) herangezogen. Die Untersuchungen beinhalten verschiedene Prüfverfahren und -kriterien, um das Verhalten der Schutzsysteme zu bewerten; unter anderem Transmission der Laserstrahlung, Entflammbarkeit des Schutzsystems, Lochbildung und nachfolgender Durchtritt von Laserstrahlung sowie Wärmetransport zur Haut. Zur Beurteilung der Gefährdung/Risiken für die Haut werden die Ergebnisse mit den Grenzwerten für die maximal zulässige Bestrahlung für die Haut durch Laserstrahlung (MZB_{Haut} gem. DIN EN 60825-1) und dem Stoll/Chianta-Kriterium für das Auftreten Verbrennungen 2. Grades (Blasenbildung) durch Wärmetransport vom Schutzsystem an die Haut vergleichend gegenübergestellt.

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass der Schutz von gewöhnlicher Baumwollkleidung gegen Laserstrahlung gering ist. Vorteilhaft sind Schutzsysteme aus Aramid-Geweben und/oder Geweben, die mit metallischen Schichten kaschiert oder beschichtet sind. Beachtet werden müssen bei der Auswahl und Konfektionierung der Schutzsysteme ein akzeptabler Tragekomfort der Schutzbekleidung und eine ausreichende Taktilität von Handschuhen.

Schlagwörter:

Persönliche Schutzausrüstung, Schutzkleidung, Schutzhandschuhe, handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung

Qualification of personal protective equipment for the use of hand-held laser processing devices

Abstract

The number of applications for hand-held laser processing devices (HLDs) is increasing steadily. Starting with precision welding, today, hand-held laser processing devices are available amongst others for welding, cutting, cladding, hardening and cleaning. The devices are used in the automotive, engineering and tool making industry, and are currently tested in the shipbuilding industry. Also, hand-held laser systems are applied for art restoration and conservation.

The safety of hand-held laser processing devices is a fundamental requirement. However, a number of questions regarding both the safe design and the safe use of the devices are still open. In 2005, this research project was started to test and qualify personal protective clothing for the use with hand-held laser processing devices, and to define minimum safety requirements for laser protection.

In a first step, a number of different commercially available technical textiles and leather that are used as heat and flame protection textiles (for e.g. welders, workers exposed to heat/flames and racing car drivers) are tested. Also, typical work clothing and leisure wear (made from cotton) are examined for comparison. The investigations cover various test methods and criteria to evaluate the behavior of the protective system, such as the transmittance of laser radiation, flammability, hole formation and subsequent beam penetration and heat transfer to the skin. For the assessment of skin hazards the results are compared with the maximum permissible exposure for laser radiation (MPE_{skin} acc. EN 60825-1) and the Stoll/Chianta-criterion for a second degree burn (blister) by heat transfer from the protective system to the skin.

Results reveal that the laser protection level of commercial cotton work wear is low. Advantageous are protective systems, which are made from aramid and are metal laminated or coated. However, selecting and tailoring the protective clothing a convenient wearing comfort of clothing and a sufficient tactility of gloves must be faced.

Key words:

Personal protective equipment, protective clothing, protective gloves, hand-held laser processing devices, laser material processing

Qualification de l'équipement de protection personnelle relatif à l'usage manuel de laser pour le traitement des matériaux

Résumé

Les applications des appareils laser à usage manuel pour le traitement des matériaux (ALM) croissent continuellement. Initialement utilisés pour la soudure de précision, les ALM interviennent de nos jours dans divers domaines tels que la soudure, la coupure, le revêtement, le nettoyage et l'endurcissement des matériaux. Les ALM trouvent des applications entre autres dans la construction automobile, mécanique et navale. Ses applications dans la construction navale sont encore dans une phase d'essai. Au-delà des utilisations précédemment mentionnées, Il est à noter que les ALM sont également utilisés dans la restauration des arts et la conservation des monuments.

La sécurité des ALM constitue une priorité fondamentale. Cependant, il existe beaucoup d'interrogations concernant leur fabrication dans le respect des règles de sécurité et de leur utilisation sécurisée. En 2005 a été initié ce projet de recherche dans le but d'examiner et de qualifier un équipement de protection personnelle pour les appareils laser à usage manuel pour traitement de matériaux. Un autre objectif de ce projet de recherche est de définir un minimum de mesures de sécurité pour la protection contre les rayons lasers.

Dans un premier temps, il sera question d'examiner divers textiles et cuir techniques disponibles sur le marché, qui sont utilisés comme vêtements de protection contre la chaleur et les flammes (par ex. pour les soudeurs, les travailleurs exposés à de fortes chaleurs, ou bien les conducteurs de véhicules de course). En comparaison seront pris des vêtements typiques de travail et les tenues vestimentaires de loisir (en coton). Ces études appliquent divers procédés et critères de tests pour l'évaluation du comportement des systèmes de protection comme: la transmission des rayons laser, l'inflammabilité du système de protection, la perforation et par conséquent la pénétration des rayons laser, tout comme le transport de chaleur à travers la peau. Pour trancher sur les dangers et risques pour la peau, les résultats seront comparés d'une part avec les limites définies (d'après EN 60825-1) pour le rayonnement maximum de rayons laser autorisé pour la peau par et d'autre part avec le critère Stoll/Chianta quant à l'apparition des brûlures de second degré (boursoufflure) par le transport de la chaleur du système de protection dans la peau.

Les résultats montrent clairement que la protection contre le rayonnement laser par les vêtements en coton habituels est relativement insuffisante. Les systèmes de protection en aramide et/ou bien en matières recouvertes ou contenant des couches métalliques présentent un avantage particulier. Cependant, lors du choix et de la confection des systèmes de protection, la tenue de protection doit être confortable et les gangs doivent être suffisamment maniables.

Mots clés:

Équipement de protection personnelle, vêtement de protection, gangs de protection, appareil laser à usage manuel pour le traitement des matériaux

1 Einleitung

Seit Mitte der 90er Jahre hat die Entwicklung von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung (HLG) kontinuierlich technische Fortschritte erzielt und neue Anwendungsfelder erschlossen (KEITEL, 1998; NEUBERT, 2004; SCHMID, 2006). HLG stellen eine technisch innovative Ergänzung zu automatisierten Laseranlagen dar, die immer dann vorteilhaft gegenüber automatisierten Anlagen eingesetzt werden können, 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.

Einsatzgebiete von HLG

Den Ausgangspunkt von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung stellen Lasereinrichtungen zum Feinschweißen dar, wie sie in der Schmuckindustrie und im Dentalbereich seit mehr als 10 Jahren eingesetzt werden. Bei diesen Laser-Handarbeitsplätzen handelt es sich je nach Gerätedesign um einen geschlossenen oder offenen Bearbeitungsbereich, in den der Bediener eingreift und das Werkstück relativ zum ortsfesten Laserstrahl manuell positioniert und bewegt (ALBERT, 1998).

Mit der Verfügbarkeit von mobilen, leistungsfähigen und kompakten Festkörper-, Dioden- und Faserlasern in Kombination mit Strahlführungssystemen über optische Fasern (SCHMID, 2002; NEUBERT, 2004) haben sich eine Reihe neuer Anwendungsfelder von HLG insbesondere im industriellen Sektor entwickelt. Bei diesen mobilen Geräten wird der Laserstrahl bzw. das HLG relativ zum ortsfesten Werkstück handgeführt oder –positioniert. Eingesetzt werden HLG zum Schneiden, zum Schweißen (HAFERKAMP et al., 2004), für die Oberflächenbearbeitung, wie Auftragschweißen, Löten und Härten (BEREND et al., 2004) sowie zum Abtragen bzw. Reinigen (BRÜNINGHOFF, 2002; PANZNER, 2006). Die Einsatzfelder der HLG sind unter anderem der Automobilbau, der Maschinen- und Werkzeugbau, der Rückbau komplexer immobiler Anlagen sowie die Denkmalpflege. Anwendungen im Schiffbau sind derzeit in der Erprobung (JASNAU, 2006); der Einsatz von HLG für den Fassadenbau (auf Baustellen) ist geplant. Im Bereich der Kunstrestauration und Denkmalpflege führte die Entwicklung zu sehr kompakten, – z. T. energieautarken – tragbaren Lasereinrichtungen in Verbindung mit HLG (BARKHAUSEN, 2006). In Abb. 1.1 sind derzeitige und geplante Anwendungsbereiche von HLG dargestellt.

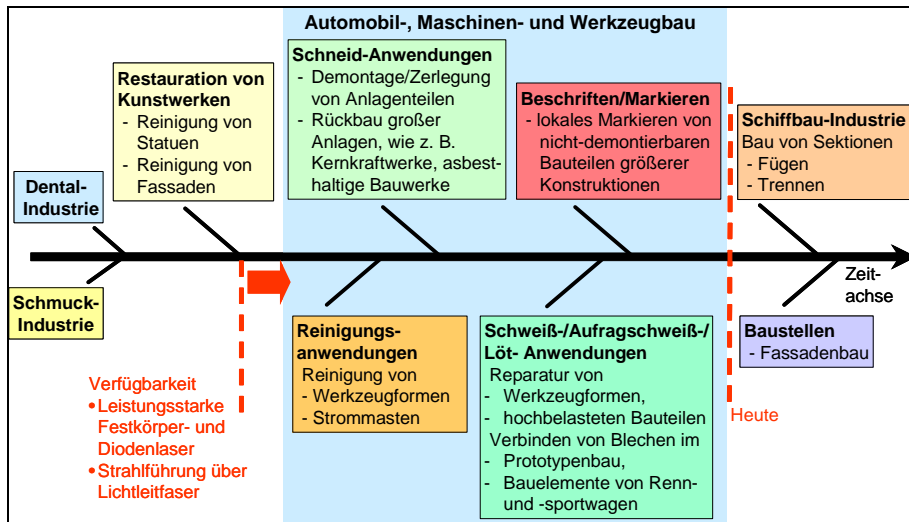


Abb. 1.1 Anwendungsbereiche von HLG

Während in den ersten Jahren insbesondere von Forschungsinstituten Prototypen entwickelt wurden, bieten mittlerweile eine Reihe von Firmen (überwiegend kleine und mittlere Unternehmen, KMU) Geräte zur handgeführten und/oder handpositionierten Laser-Materialbearbeitung 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. Geräte zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung sind von ihrer Stellung auf dem Lasermarkt derzeit noch den Nischenprodukten zuzuordnen. Lasergeräte (Strahlquellen) für HLG, die ebenfalls einer ständigen Weiterentwicklung unterliegen, zählen zu den typischen Laserprodukten am Markt. Marktstudien verdeutlichen, dass sich der weltweite Markt für Lasertechnologie in einem stetigen Wachstum befindet. Während im Jahr 2003 die Gesamteinnahmen von Lasersystemen ein Wachstum von ca. 5 % erreichten, wuchsen die Märkte für Nischenprodukte (Anteil von 20 % des Gesamtmarktes) überproportional (BELFORTE, 2003). Das Marktvolumen für Lasersysteme zur Materialbearbeitung stieg von 3,7 Mrd. Euro im Jahr 2003 auf 6,1 Mrd. Euro im Jahr 2006 (MAYER, 2007). Dieses unterstreicht das Wachstumspotenzial der HLG bzw. der Gesamtsysteme.

Gefährdungen/Status Quo

Die Mehrzahl der HLG wird für 3-D-Anwendungen eingesetzt; eine vollständige Kapselung der Prozesszone zur lokalen Abschirmung der Laserstrahlung ist daher oftmals nicht möglich und in Hinblick auf die beabsichtigte Funktion kontraproduktiv (SCHMID, 2001). Nur wenige Geräte verfügen über technische Sicherheits-einrichtungen (u. a. Aufsatz-, Abstandskontrolle) zur Reduzierung des Risikos (HAFERKAMP et al., 2002; BARKHAUSEN, 2006). Verfahrensbedingt wird im bestimmungsgemäßen Betrieb bei den meisten HLG-Anwendungen gestreute Laserstrahlung zugänglich (in einigen Fällen gerichtet reflektierte Strahlung) (RASMUSSEN et al., 2006). In vorhersehbaren Fehlerfällen wie auch bei vorhersehbarem Missbrauch kann jedoch gerichtet reflektierte Laserstrahlung sowie direkte Laserstrahlung zugänglich werden. Anders als konventionelle Handwerkzeuge (z. B. Handbohrmaschine, Bolzentreibgerät) weisen HLG je nach Strahlformung und Freiheitsgraden der Strahlaustrittsebene sowie Reflexionsbedingungen der zu bearbeitenden Werkstücke einen weiten Wirk- und damit Gefährdungsbereich auf.

Das Maß der Gefährdung wird dabei wesentlich durch die leistungsführenden Parameter eines HLG bestimmt. Je nach Anwendung variieren die mittleren Ausgangsleistungen von einigen Watt bis zu mehreren Kilowatt. In Abhängigkeit der Ausgangsleistungen, den strahlformenden Optiken und den Bearbeitungsbedingungen kann eine Überschreitung der maximal zulässigen Bestrahlungswerte für ungeschützte Augen (MZB_{Auge}) und für die nackte Haut (MZB_{Haut}) gemäß DIN EN 60825-1 nicht sicher ausgeschlossen werden.

Derzeitige Nutzung von persönlicher Schutzausrüstung beim Betrieb von HLG

Da die Mehrzahl der eingesetzten mobilen HLG verfahrensbedingt einen offenen Bearbeitungsbereich aufweist, handelt es sich bei den Geräten typischerweise um Laser der Klasse 4 (gemäß DIN EN 60825-1). Dieses bedeutet, dass ein Laserbereich generiert wird; es bedeutet aber auch, dass der HLG-Bediener oder weitere Personen im Laserbereich Gefährdungen durch Laserstrahlung ausgesetzt sind.

Gemäß der technischen Normen DIN EN 60825-1, DIN EN 11553-1 und DIN EN 11553-2 sind vorrangig technische Maßnahmen zur Abschirmung der Laserstrahlung vorzunehmen. Ist der Zugang zum Gefahrenbereich notwendig, um die beabsichtigte Funktion der Einrichtung auszuführen, muss durch Abstand (NOHD) oder persönliche Schutzausrüstung sichergestellt sein, dass die MZB nicht überschritten werden.

Konsequenterweise müssen demzufolge bei den meisten Tätigkeiten mit HLG zum Schutz der Augen im Laserbereich Laserschutzbrillen getragen werden. Die Auswahl der richtigen Laserschutzbrille erfolgt anhand der Norm DIN EN 207, in der Anforderungen an Laserschutzbrillen und die entsprechenden Prüfverfahren definiert sind. Am Markt ist eine Vielzahl qualifizierter persönlicher Laserschutzbrillen verfügbar.

Anders stellt sich die Situation im Bereich persönlicher Schutzbekleidung dar. Hier erfolgt derzeit die Bereitstellung von persönlicher Schutzbekleidung zum Schutz der Haut vor Laserstrahlung überwiegend auf intuitiver Basis und nicht erkenntnisbasiert, da bisher keine diesbezüglichen normativen Anforderungen und Prüfverfahren erarbeitet und formuliert wurden. Typische Werkstoffe für Handschuhe, die beim Umgang mit HLG eingesetzt werden, sind Leder und/oder Baumwolle; für Oberbekleidung wird überwiegend Baumwolle, Baumwoll-Mischgewebe oder auch Kunstfasergewebe eingesetzt.

Aufgabenstellung

Um grundlegende Anforderungen an die Konstruktion von HLG für Hersteller bereitzustellen, wurde im Jahr 2000 von der deutschen Arbeitsgruppe (O18 AK3) im DIN ein Normenvorschlag initiiert (PÜSTER et al., 2002; PÜSTER et al., 2005), der im Juli 2007 als „DIN EN ISO 11553-2: Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte“ veröffentlicht wurde. Wie bei vergleichbaren Normentwürfen im Bereich der Lasersicherheit eröffneten sich bei der Erarbeitung der Norm weitere Fragestellungen unter anderem zur Reduzierung des Risikos von Unfällen beim Betrieb von HLG durch technische und/oder persönliche Schutzmaßnahmen.

Dieses Projekt greift den Bereich der persönlichen Schutzmaßnahmen auf. Ziel ist die Beantwortung folgender Fragen bezüglich persönlicher Schutzausrüstung bei Tätigkeiten mit HLG:

- Welches sind die Mindestanforderungen an persönliche Schutzausrüstung zum Schutz der Haut vor Laserstrahlung?

- Welche Kriterien müssen durch Einsatz welcher Prüfmethoden/-technik charakterisiert werden?
- Welchen Schutz bieten am Markt verfügbare Schutzbekleidung und Schutzhandschuhe aus anderen Bereichen?
- Welche konstruktiven Merkmale müssen bezüglich Lasersicherheit optimierte Schutzsysteme aufweisen?

Um Erkenntnisse über das Verhalten der Werkstoffe/Schutzsysteme bei Exposition gegenüber Laserstrahlung zu erhalten, und zur Beurteilung der Schutzwirkung werden ausgewählte Schutzsysteme (PSA) untersucht. Die Proben repräsentieren herstellerunabhängig marktübliche Produkte aus unterschiedlichen Werkstoffen und unterschiedlichem Aufbau. Ausgangspunkt sind am Markt verfügbare Produkte aus anderen Anwendungsbereichen (u. a. Schweißerschutz, hitzeexponierte Arbeiter, Motorsport), wie sie derzeit typischerweise von HLG-Anwendern eingesetzt werden. Die Ergebnisse der Untersuchungen bieten eine Hilfestellung bezüglich der Auswahl von PSA, die einen Mindestschutz gegen Laserstrahlung bei Tätigkeiten mit HLG gewährt. Auch geben sie Aufschluss über geeignete Prüfmethoden zur Qualifizierung von PSA mit Hinblick auf eine spätere normative Umsetzung in entsprechenden technischen Regelwerken.

2 Derzeitiger Erkenntnisstand im Bereich persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte und -positionierte Lasergeräte zur Materialbearbeitung

2.1 Derzeitiger Erkenntnisstand im Bereich Laser-Schutzbekleidung

Während bezüglich des Augenschutzes gegen Laserstrahlung am Markt eine Reihe qualifizierter persönlicher Schutzsysteme verfügbar ist, besteht hinsichtlich Schutzbekleidung zum Schutz der Haut gegen Laserstrahlung derzeit ein Wissensdefizit; dieses bezieht sich sowohl auf Anforderungen an Schutzsysteme wie auch an die Schutzwirkung am Markt verfügbarer Systeme (überwiegend aus anderen Einsatzbereichen). Die Empfehlung der Hersteller für PSA sowie die Bereitstellung von PSA durch die Betreiber für 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, Baumwollmischgewebe oder auch Kunstfasergewebe eingesetzt.

Die Gefährdungen für die Haut entstehen zum einen direkt durch die Exposition der Haut gegenüber Laserstrahlung, zum anderen auf Grund der Absorption der Laserstrahlung vom Schutzsystem und dem sich einstellenden Wärmetransport vom Schutzsystem an die Haut.

Es gibt nur äußerst vereinzelt veröffentlichte Daten über das Verhalten von Schutz- bzw. Arbeitsbekleidung bei Exposition durch Laserstrahlung. Alunovic und Kreutz (ALUNOVIC et al., 1996) prüften im Rahmen von Untersuchungen zu Abschirmungen für Laserstrahlung stichprobenartig Baumwoll-Arbeitsbekleidung. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass Arbeitskleidung (Gewebedicke: 0,5 mm) eine nur äußerst geringe Schutzfunktion gegenüber Laserstrahlung (cw, $\lambda = 10,6 \mu\text{m}$) bei Bestrahlungsstärken von $5,7 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ und höher aufweist. Durchbrände, d. h. ein vollständiges Versagen mit Strahldurchtritt, traten nach 0,5 Sekunden und kürzer auf. Bei Laserstrahlung von Diodenlasern ($\lambda = 810 \text{ nm}$) werden Zeiträume für Durchbrände von 19 Sekunden ($E = 1,2 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$) bis 4 s ($E = 9,6 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$) genannt, wobei eine deutlich früher einsetzende Rauchbildung beobachtet wurde. Schädigungen der Haut durch durchtretende Laserstrahlung oder auf Grund des Wärmetransports vom Schutzsystem an die Haut waren nicht Gegenstand der Untersuchungen.

Eine Patentrecherche auf dem Gebiet der persönlichen Schutzausrüstung im Bereich Schutzhandschuhe führt zu dem Ergebnis, dass ein (1) amerikanisches Patent für Laser-Schutzhandschuhe vorliegt (SAFFER et al., 1990). 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. Die Handschuhe sind am Markt nicht verfügbar gemäß der Aussage des Patentanmelders Jackson Laboratory.

Patentschrift Laser-Schutzhandschuhe:

- SAFFER, JEFFREY D.; PROFENNO, LOUIS A.: *Laser Beam Protective Gloves*. Patentschrift: US Patent 4,947,487 (14.08.1990)

2.2 Stand der Normung im Bereich Schutzbekleidung gegen thermische Risiken und im Bereich Ausrüstungen zum Schutz gegen Laserstrahlung (Anforderungen und Prüfungen)

Anforderungen an die Beschaffenheit von Schutzausrüstungen resultieren aus der europäischen Richtlinie 89/686/EWG (96/58/EG) zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für persönliche Schutzausrüstungen. Ziel dieser unter dem Artikel 95 (Vertrag von Amsterdam) erlassenen Einzelrichtlinie ist die Definition von grundlegenden Sicherheitsanforderungen (Mindeststandards) an persönliche Schutzausrüstungen. National ist die Richtlinie in Deutschland durch die achte Verordnung zum Geräte- und Produktsicherheitsgesetz, 8. GPSGV (Verordnung über das Inverkehrbringen von persönlichen Schutzausrüstungen), umgesetzt worden.

Anforderungen an die Benutzung von Schutzausrüstung sind in der europäischen Richtlinie 89/656/EWG „Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Benutzung persönlicher Schutzausrüstungen durch Arbeitnehmer bei der Arbeit“ definiert. Sie ist die dritte Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16, Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG unter dem Artikel 137. In Deutschland wurde diese Richtlinie durch die Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Benutzung persönlicher Schutzausrüstungen bei der Arbeit (PSA-Benutzungsverordnung - PSA-BV) umgesetzt.

Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Beschaffenheit von Schutzausrüstungen - wie auch die Prüfverfahren - sind in einer Reihe von technischen Richtlinien von normengebenden Gremien u. a. dem Technischen Komitee CEN/TC 162 „Schutzkleidung einschließlich Hand- und Armschutz und Rettungswesten“ in Verbindung mit dem ISO/TC 94/SC 13 „Protective clothing and equipment“ detailliert ausgearbeitet und festgelegt worden.

Im speziellen Bereich der Sicherheit von Lasereinrichtungen und Laserbearbeitungsmaschinen wurden sicherheitstechnische Festlegungen vom CEN/TC 123 „Laser und Laseranlagen“ in Verbindung mit dem IEC/TC 76 „Optical radiation safety and laser equipment“ und dem ISO/TC 172/SC9 „Electro-optical systems“ erarbeitet. Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen sind gemeinsam mit Laserschutzbrillen vom CEN/TC 85 „Augenschutzgeräte“ behandelt und in diesbezüglichen Normen formuliert worden. In allen Komitees sind die entsprechenden deutschen Normenausschüsse mit Fachbezug vertreten.

Die Anforderungen an Schutzbekleidung gegen Laserstrahlung sind komplex. Dieses bedeutet, dass eine Reihe verschiedener sicherheitsrelevanter Kriterien zu prüfen sind, um ein Schutzsystem gegen Laserstrahlung zu qualifizieren.

Zu untersuchen ist, ob einzelne Anforderungen und Prüfverfahren von bestehenden technischen Regelwerken in Analogie angewendet und/oder entsprechend angepasst/modifiziert werden können (u. a. Flammenausbildung, kalorimetrische Messungen).

Für den Bereich „Schutzbekleidung gegen thermische Risiken“ existiert eine Vielzahl technischer Regelwerke, die grundlegende Anforderungen an die PSA und die Prüfung der Schutzfunktion von persönlicher Schutzbekleidung gegen thermische Risiken definieren. Sie stellen einen Ausgangspunkt für die Prüfung von persönlicher Schutzbekleidung gegen Laserstrahlung und somit für die im Rahmen des Projektes durchzuführenden Arbeiten dar.

Im Folgenden sind beispielhaft Normen sowie Normentwürfe aus dem Bereich der Schutzbekleidung gegen Kontakt mit Flammen und Hitzestrahlung sowie geschmolzene heiße Materialien aufgeführt:

DIN EN 348: 1992:	Schutzkleidung; Prüfverfahren; Verhaltensbestimmung von Materialien bei Einwirkung von kleinen Spritzern geschmolzenen Metalls
DIN EN 367: 1992:	Schutzkleidung; Schutz gegen Wärme und Flammen; Prüfverfahren: Bestimmung des Wärmedurchgangs bei Flammeneinwirkung
DIN EN 373: 1993:	Schutzkleidung; Beurteilung des Materialwiderstandes gegen flüssige Metallspritzer
DIN EN 469: 2007:	Schutzkleidung für die Feuerwehr - Leistungsanforderungen für Schutzkleidung für die Brandbekämpfung
DIN EN 470-1: 1998:	Schutzkleidung für Schweißen und verwandte Verfahren - Teil 1: Allgemeine Anforderungen
DIN EN 531: 1998:	Schutzkleidung für hitzeexponierte Arbeiter
DIN EN 533: 1997:	Schutzkleidung - Schutz gegen Hitze und Flammen - Materialien und Materialkombinationen mit begrenzter Flammenausbreitung
DIN EN 702: 1995:	Schutzkleidung - Schutz gegen Hitze und Flammen - Prüfverfahren: Bestimmung des Kontaktwärmedurchgangs durch Schutzkleidungen oder deren Materialien
DIN EN ISO 6942: 2002:	Schutzkleidung - Schutz gegen Hitze und Feuer - Prüfverfahren: Beurteilung von Materialien und Materialkombinationen, die einer Hitze-Strahlungsquelle ausgesetzt sind
DIN EN ISO 14460: 2002:	Schutzkleidung für Auto-Rennfahrer - Schutz gegen Hitze und Feuer - Leistungsanforderungen und Prüfverfahren
DIN EN ISO 15025: 2003:	Schutzkleidung - Schutz gegen Hitze und Flammen - Prüfverfahren für die begrenzte Flammenausbildung
DIN EN 407: 2004:	Schutzhandschuhe gegen thermische Risiken (Hitze und/oder Feuer)
DIN EN 659: 2003:	Feuerwehrschtzhandschuhe
DIN EN 12477: 2005:	Schutzhandschuhe für Schweißer

Den technischen Regelwerken können Beschreibungen von Prüfungen u. a. zum Brennverhalten, zur Flammenausbreitung, zu Einwirkungen durch Wärme/Hitze (Kontaktwärme -EN 702-, konvektive Wärme -EN 367- und Strahlungswärme -EN 6942- sowie durch Spritzer geschmolzenen Metalls -EN 348-) entnommen werden. Verwendet werden als Detektoren u. a. Temperatursensoren, Kalorimeter und PVC-Folie (DIN EN 373) sowie zur Beurteilung vom zeitlichen Verhalten der Schutzsysteme (u. a. Nachbrennzeit, Schmelzen) Aufzeichnungsgeräte.

Für die Prüfung und Beurteilung der thermischen Schutzwirkung technischer textiler Flächen und Kleidung bei Einwirkung eines Störlichtbogens wurden verschiedene Verfahren entwickelt und in europäische/internationale Normengremien eingebracht.

DIN IEC 61482-1-1: 2006: Arbeiten unter Spannung - Schutzkleidung gegen die thermischen Gefahren eines Lichtbogens - Teil 1: Prüfverfahren - Norm-Entwurf

Zur Beurteilung der auf die Haut einwirkenden Energie bei Einwirkung eines Störlichtbogens und der damit verbundenen Schädigungen werden mehrere Kalorimeter unter der Probe positioniert. Anhand der durch die Probe an die Haut geleiteten Wärmeenergie wird unter Zugrundelegung des Stoll/Chianta-Kriteriums (STOLL et al., 1969) für beginnende Verbrennungen 2. Grades die Schutzfunktion beurteilt. Die Ergebnisse der Tätigkeit der internationalen Arbeitsgruppe zur Thematik „Störlichtbogen“ der internationalen Vereinigung für soziale Sicherheit (IVSS) mündeten in einer Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen durch einen Störlichtbogen (INTERNATIONALE VEREINIGUNG FÜR SOZIALE SICHERHEIT, 2002). Weiterführende Arbeiten für Handschutz bei Störlichtbogenunfällen sind in Diskussion.

Insbesondere auf Grund der Berücksichtigung des Stoll/Chianta-Kriteriums und der entsprechenden Prüfverfahren (kalorimetrische Verfahren) stellt dieser Normentwurf eine technische Ausgangsbasis für Untersuchungen von persönlicher Schutzkleidung gegen Laserstrahlung dar.

Einen weiteren Ansatzpunkt stellen technische Regelwerke aus dem Bereich der Lasersicherheit dar. 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; Vorhersehbare Maximalbestrahlung -VMB- und Schutzgrenzbestrahlung -SGB-) genommen werden:

DIN EN 12254:2002 Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen - Sicherheits-technische Anforderungen und Prüfung

DIN EN 60825-4: 2007 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 aktive und 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 wird mit geeigneten Leistungs-/Energiesmessgeräten gemessen.

Weitere Analogien zur Konzeption von Schutzsystemen, die einen Mindestschutz gegenüber Laserstrahlung aufweisen und bezüglich technischer Prüfverfahren, finden sich in der Lasermedizin.

Für 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. Mittlerweile gibt es am Markt eine Reihe von Endo-Trachealtuben, die hinsichtlich Lasersicherheit optimiert wurden. Die Mehrzahl der Produkte ist gekennzeichnet durch einen Aufbau aus mehreren funktionalen Lagen.

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

Derzeit existiert jedoch **kein genormtes Prüfverfahren**, das Aussagen zur Schutzwirkung von persönlicher Schutzbekleidung aus technischen Textilien und/oder Naturprodukten (u. a. Leder) gegen Laserstrahlung liefert.

2.3 Derzeitige Schutzkonzepte für PSA und Anforderungen an PSA seitens der Hersteller und Betreiber von HLG

Um Erkenntnisse über derzeitige von Herstellern und Betreibern von offenen HLG (mit nicht abgeschirmter Bearbeitungszone) verfolgte Schutzkonzepte im Bereich persönlicher Schutzbekleidung zusammenzutragen, wurden verschiedene Quellen benutzt:

- Herstellerunterlagen
- Fotodokumentationen von Herstellern und Betreibern
- Veröffentlichungen (u. a. in Fachzeitschriften, auf Messen, Seminaren, Workshops)
- Gespräche mit Herstellern und Anwendern

Die Auswertung der Informationen und Angaben zu Gefährdungen durch Laserstrahlung und bezüglich eingesetzter Schutzbekleidung lässt sich wie folgt zusammenfassen:

Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung

- In einigen Fällen wurden Messungen der Laserstrahlung im bestimmungsgemäßen Betrieb des HLG im Laserbereich vorgenommen. Die Anzahl der diesbezüglichen Veröffentlichungen ist allerdings äußerst gering (s. a. RASMUSSEN et al. (2006)).
- Einige Hersteller definieren Gefahrenbereiche (NOHD*), außerhalb derer die MZB_{Haut} unterschritten werden. In Bereichen, wo die MZB_{Haut} überschritten werden kann, wird das Tragen von Schutzbekleidung/-handschuhen (ohne nähere Spezifikation) empfohlen. Dieses erfolgt in den meisten Fällen für den bestimmungsgemäßen Betrieb; unklar bleibt, inwieweit Hersteller und Betreiber vorhersehbare Fehlerfälle und Missbrauch berücksichtigen.

Anforderungen an Schutzbekleidung und Prüfungen

- Anforderungslisten an den Schutzgrad von Schutzbekleidung für Tätigkeiten mit HLG liegen offensichtlich nicht vor.
- Inwieweit Prüfungen zur Laserresistenz von Schutzbekleidung durch HLG-Hersteller oder Betreiber vorgenommen wurden, ist nicht nachvollziehbar. Derzeit liegen keine publizierten Daten vor.

- Angaben bezüglich der Leistungsanforderungen an die empfohlene persönliche Schutzausrüstung für Tätigkeiten mit HLG wurden von Herstellern und Betreibern nicht veröffentlicht bzw. gemacht.

*NOHD = nominal ocular hazard distance

Zusammenfassend ist festzustellen, dass derzeit HLG vielfach eingesetzt werden, ohne dass Daten bezüglich Anforderungen und Prüfbedingungen für persönliche Schutzkleidung, die ein Mindestschutz gegen die beim Betrieb von HLG zugänglich werdende Laserstrahlung bietet (insbesondere unter Einbeziehung vorhersehbarer Fehlerfälle und Missbrauch), existieren.

Die Auswahl der PSA erfolgt nicht anhand technisch/wissenschaftlicher Daten, sondern basiert überwiegend auf Analogiebetrachtungen des Verhaltens von Schutzkleidung aus anderen technischen Anwendungsbereichen (Schweißerschutz, hitzeexponierte Arbeiter).

Gemäß den derzeitigen Applikationen von HLG und geplanten Anwendungen lassen sich die Anforderungen aus Sicht der Hersteller und Betreiber von HLG an persönliche Schutzkleidung wie folgt zusammenfassen:

- Die Handschuhe sollen einen Mindestschutz gegenüber Laserstrahlung bieten.
- Sie dürfen keine Sekundärgefährdung (z. B. durch Einbrennen in die Haut) hervorrufen.
- Die Schutz-Zeitbasis sollte so lang sein, dass nach Wärmeempfindung und unmittelbarer Entfernung der Hand aus dem Laserstrahlbereich keine oder nur leichte Schädigungen des menschlichen Gewebes auftreten.
- Aus ergonomischen Gründen sollten die Handschuhe als 5-Finger-Handschuhe ausgeführt sein, sie dürfen nicht zu steif sein, da Taster und Stellräder am Handlaser bedient werden müssen.
- Die Fingerfertigkeit und das Tastgefühl (Taktilität) sollten weitgehend erhalten bleiben.
- Für einige Anwendungsfälle (Blechbearbeitung) wäre ein rutschhemmender Belag (z. B. Leder/Gummierung) vorteilhaft.
- Die Kosten für ein Paar Handschuhe sollten nicht mehr als 50-100 € betragen.

Hinsichtlich Oberbekleidung bestehen folgende Anforderungen:

- Eignung für Maschinenwäsche.
- Kleidung darf keine Sekundärgefährdung (z. B. durch Einbrennen in die Haut oder Transmission von Laserstrahlung an darunterliegende entflammbare Textilien) hervorrufen.
- Die Schutz-Zeitbasis sollte so lang sein, dass nach Wärmeempfindung und unmittelbarer Entfernung des Körpers aus dem Laserstrahlbereich keine oder nur leichte Schädigungen des menschlichen Gewebes auftreten.

Die Anforderungen an die PSA werden bei der Auswahl der Proben für die im Rahmen dieses Projektes durchzuführenden Untersuchungen berücksichtigt.

3 Theoretische Betrachtung der Anforderungen an PSA-Schutzsysteme

Handgeführte oder -positionierte Geräte zur Lasermaterialbearbeitung verfügen in den meisten Fällen über eine offene Bearbeitungszone, um eine flexible 3-D-Bearbeitung durchführen zu können. Hierdurch bedingt (durch die nicht vorhandene Abschirmung/Isolierung der Laserstrahlung) kann Laserstrahlung in den Arbeitsbereich emittiert werden und eine Gefahr darstellen.

Zur Bewertung, ob das Tragen von persönlicher Schutzausrüstung gegen Laserstrahlung für Tätigkeiten mit handgeführten oder -positionierten Geräten zur Lasermaterialbearbeitung notwendig ist und, wenn ja, welche Anforderungen an die PSA zu stellen sind, ist eine Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung für den HLG-Arbeitsplatz vorzunehmen.

Zur Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung muss die vorhersehbare maximale Bestrahlung (VMB gemäß DIN EN 60825-4), der die nackte Haut bzw. die Schutzsysteme ausgesetzt werden können, bestimmt werden.

In Fällen einer Exposition der nackten Haut, werden die VMB den maximal zulässigen Bestrahlungswerten der Haut (MZB_{Haut} gemäß DIN EN 60825-1) vergleichend gegenübergestellt (s. a. Abschnitt 3.2). Um Schädigungen der Haut zu vermeiden, darf die VMB die MZB_{Haut} nicht überschreiten. Die Exposition gegenüber höheren Bestrahlungsstärken muss durch Abschirmung der Laserstrahlung (hier: durch persönliche Schutzausrüstung) vermieden werden.

Für die Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (VMB) ist die genaue Kenntnis der eingesetzten HLG in Verbindung mit der Laserstrahlquelle und der räumlichen Lage der exponierten Körperteile/Schutzsysteme von der Strahlaustrittsöffnung erforderlich. Die Größe „maximale Bestrahlung“ [J/m^2] sowie die zeitlich abgeleitete Größe „Bestrahlungsstärke“ [W/m^2] sind radiometrische Größen, d. h. sie beziehen sich auf den Empfänger bzw. die exponierte Oberfläche.

Die Arbeitsabstände bei Tätigkeiten mit HLG sind im Vergleich zu automatisierten Laseranlagen eher geringer; hierdurch bedingt werden in der Regel fokussierende optische Elemente mit kürzeren Brennweiten eingesetzt. Aus sicherheitstechnischer Sicht kann dieses zum Vorteil gereichen, da der Strahl nach dem Fokus schneller aufweitet. Auf Grund des manuellen Vorschubs sind die maximal zu realisierenden Bearbeitungsgeschwindigkeiten bei vielen HLG limitiert. Hieraus resultiert eine geringere Anforderung an die erforderliche maximale Laserleistung im Vergleich zu automatisierten Laseranlagen.

Auf Grund der großen Verschiedenartigkeit der HLG (u. a. hinsichtlich leistungsführender Größen, Anwendungsabstände) und ihrer Anwendungen (u. a. Markieren, Schneiden, Reinigen), können die VMB trotzdem mehrere Größenordnungen überdecken. Im Folgenden sind für einige typische HLG und Anwendungsfälle die VMB kalkuliert worden.

3.1 Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (VMB) an persönlichen Schutzsystemen

Bei der Beurteilung der Gefährdungen durch Laserstrahlung bei Tätigkeiten mit HLG bzw. den daraus resultierenden Anforderungen an den Schutz der PSA müssen gemäß DIN EN 12100-1 für das HLG folgende Betriebszustände berücksichtigt werden:

- bestimmungsgemäßer Betrieb,
- Auftreten vorhersehbarer Fehlerfälle
- und von vorhersehbarem Missbrauch.

Im bestimmungsgemäßen Betrieb von HLG tritt typischerweise eine Exposition gegenüber beim Anwendungsprozess diffus gestreuter Laserstrahlung auf (RASMUSSEN et al., 2006). Jedoch kann das Auftreten gerichtet reflektierter Strahlungsanteile, z. B. an spiegelnden Werkzeugoberflächen/-kanten, nicht immer sicher ausgeschlossen werden.

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.

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 (cw, gepulst),
- das Strahlprofil (gaußförmig, Flat-Top),
- die Divergenz des Laserstrahls
- sowie die eingesetzte Strahlformung (Aufweitung, Kollimation, Fokussierung).

a) diffus gestreute Laserstrahlung

Zur Berechnung der Bestrahlungsstärke an einem angenommenen Schutzsystem in einem Abstand D zum Bauteil durch diffus gestreute Laserstrahlung wird das in Abb. 3.1 dargestellte Fallbeispiel zu Grunde gelegt. Die Laserstrahlung wird mit Hilfe eines optischen Elements fokussiert, wobei sich die Oberfläche des Bauteils im Fokus (fokussnah) befindet. Von der Oberfläche wird die Strahlung diffus reflektiert. Die Bestrahlungsstärke E an einem angenommenen Schutzsystem im Abstand D wird nach Formel 3.1 berechnet.

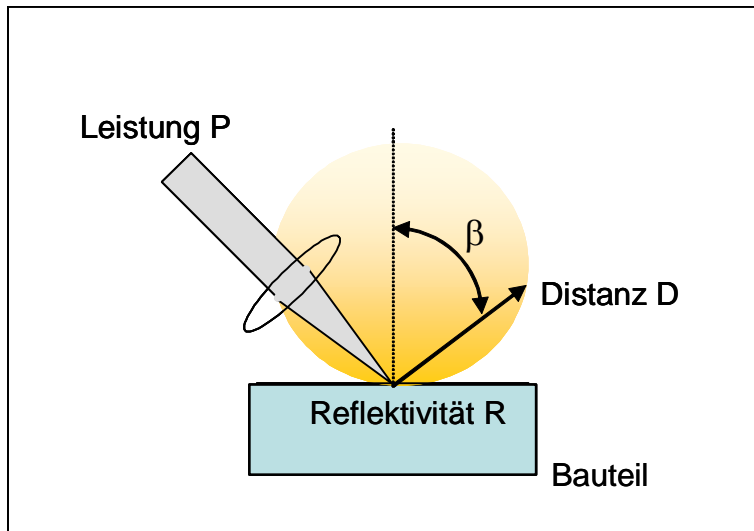


Abb. 3.1 Diffus reflektierte Laserstrahlung (HENDERSON et al., 2004)

Formel 1:
$$E = \frac{R \cdot P \cdot \cos \beta}{D^2 \cdot \pi} \quad (3.1)$$

mit:

E : Bestrahlungsstärke

R : Reflektivität der Bauteiloberfläche

P : Mittlere Leistung

D : Distanz zwischen Bauteil und Schutzsystem/Körperteil

β : Reflexionswinkel

b) direkte Laserstrahlung/gerichtet reflektierte Laserstrahlung

Zur Berechnung der Bestrahlungsstärke an einem angenommenen Schutzsystem in einem Abstand D zum Bauteil durch direkte Laserstrahlung wird das in Abb. 3.2 dargestellte Fallbeispiel zu Grunde gelegt.

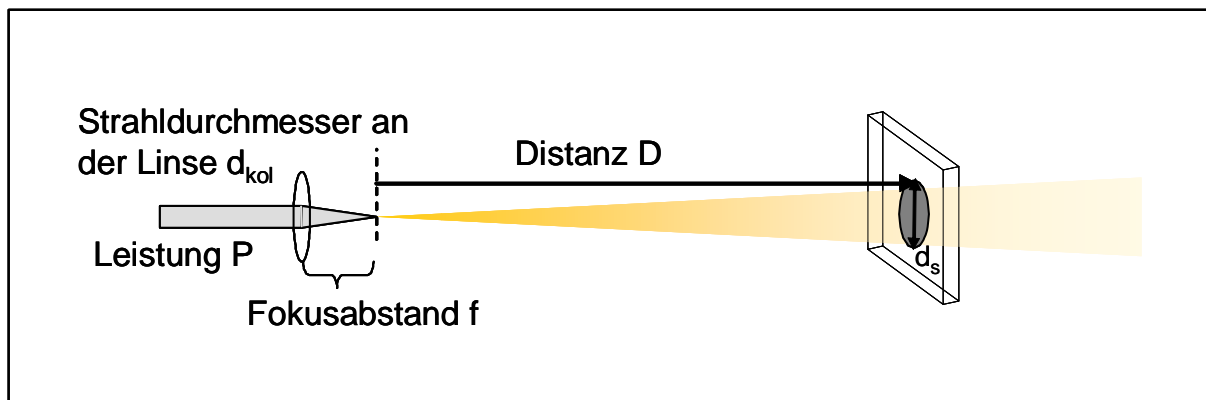


Abb. 3.2 Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik (HENDERSON et al., 2004)

Die Bestrahlungsstärke E an einem angenommenen Schutzsystem in einem Abstand D (Fernfeld) von der Fokussierebene kann bei gegebenen Parametern mit Hilfe folgender Gleichungen näherungsweise berechnet werden.

Formel 2:
$$E = \frac{P \cdot 4 \cdot f^2}{\pi \cdot d_{kol}^2 \cdot D^2} \quad (3.2)$$

wobei

Formel 3:
$$d_s = d_f \left(\frac{D}{f} \right) + (\delta \cdot a) \quad (3.3)$$

mit:

δ : Divergenz

E : Bestrahlungsstärke

P : mittlere Leistung

D : Distanz

d_{kol} : Durchmesser kollimierter Strahl

d_s : Durchmesser des Bestrahlungsflecks am Schutzsystem

f : Fokusabstand

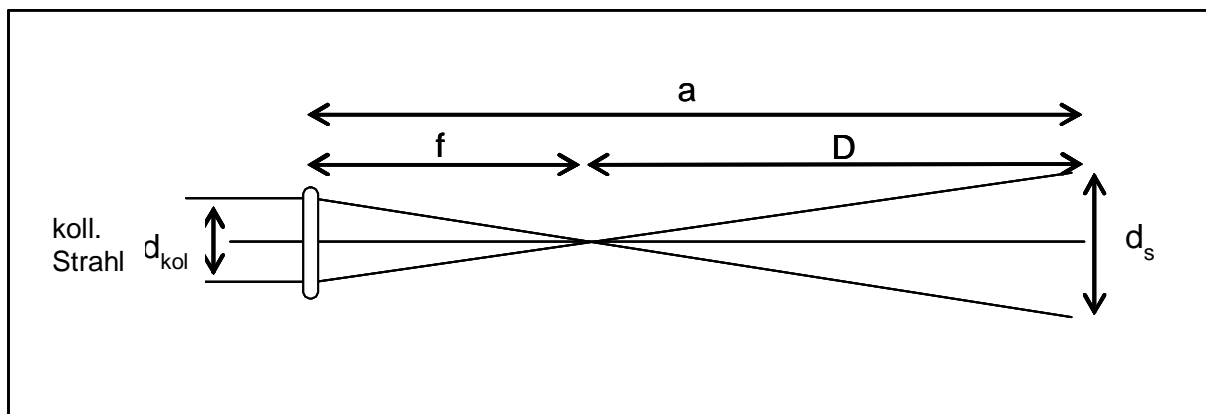


Abb. 3.3 Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik (schematisch)
(SUTTER, 2002)

In erster Näherung kann im Fernfeld der Divergenz-Term vernachlässigt werden, da sich hierdurch größere Bestrahlungsfleckdurchmesser bzw. kleinere vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärken ergeben. Hinsichtlich der Beurteilung der Sicherheit bewegt man sich somit „auf der sicheren Seite“.

Im Folgenden ist exemplarisch eine tabellarische Übersicht über HLG und deren technische Daten angegeben, wie sie am Markt zurzeit eingesetzt werden.

Tab. 3.1 Technische Daten verwendeter HLG und Strahlquellen*

Strahlquelle	Yb:YAG, Scheibenlaser
Wellenlänge λ	1.030 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 3.000 W
Brennweite f (HLG)	60, 100, 150, 200 mm
Kollimierter Rohstrahl d_{kol} (HLG)	20 mm

Strahlquelle	Nd:YAG, lampengepumpt
Wellenlänge λ	1.064 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 4.000 W
Brennweite f (HLG)	60, 100, 150, 200 mm
Kollimierter Rohstrahl d_{kol} (HLG)	20 mm

Strahlquelle	Diodenlaser
Wellenlänge λ	980 nm
Mittlere Leistung P_m	200 W
Brennweite f (HLG)	30 - 40 mm
Kollimierter Rohstrahl d_{kol} (HLG)	18 mm

Strahlquelle	Nd:YAG
Wellenlänge λ	1.064 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 150 W

Strahlquelle	Nd:YAG
Wellenlänge λ	1.064 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 20 - 500 W
Brennweite f (HLG)	bis 500 mm

Strahlquelle	Faserlaser
Wellenlänge λ	1.070 - 1.080 nm
Mittlere Leistung P_m	max. 3.000 W
Brennweite f (HLG)	bis 250 mm

*Tabelle erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

In der folgenden Darstellung (Abb. 3.4) sind typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG angegeben.

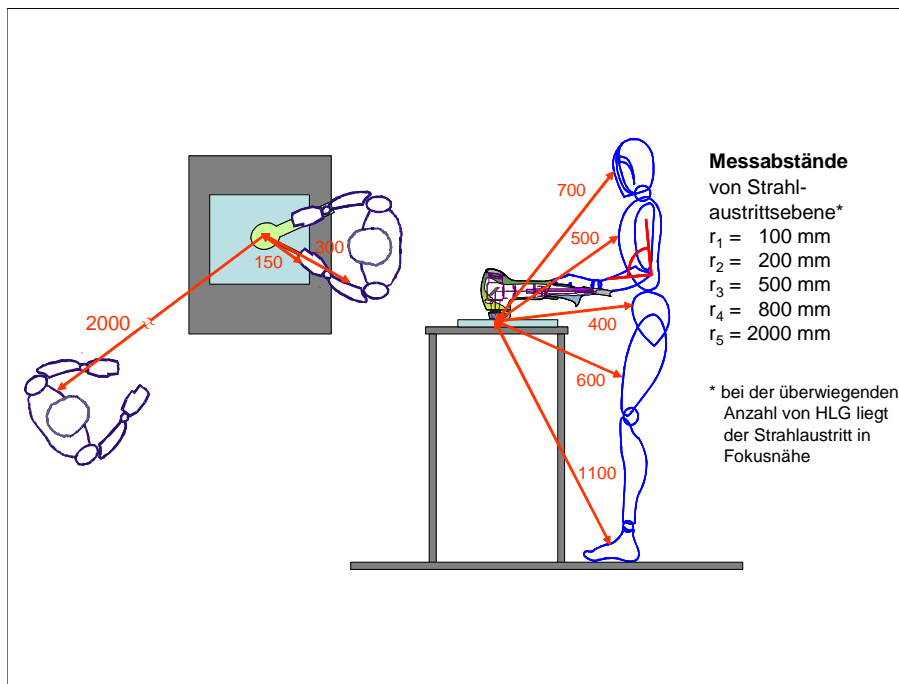


Abb. 3.4 Typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG

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

Die berechneten Werte für die VMB liegen in Bereichen von

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

3.2 Gegenüberstellung der VMB mit Grenzwerten (MZB)

Zur Klärung der Frage, ob das Tragen persönlicher Schutzausrüstung erforderlich ist, werden die VMB mit den maximal zulässigen Bestrahlungswerten für die nackte Haut (MZB_{Haut}) verglichen.

Die für die Berechnung der MZB_{Haut} -Werte 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 1.000 ms (1,0 s) sowie eine Reaktionszeit bis zum Entfernen der Extremität aus dem Strahl von 0,5 s bis 4 s angenommen (SIEKMANN, 2000). In Ergänzung wird auch eine Zeitbasis von 10 s mit in die Betrachtungen einbezogen.

Unter Berücksichtigung dieser Zeitbasen wurden exemplarisch Werte für die maximal zulässige Bestrahlung der Haut (MZB_{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:

Kriterium: „Transmission/Durchstrahlung des Schutzsystems“

Angenommen wird eine menschliche Wahrnehmungszeit (Schmerzempfindung) zwischen 100 ms (0,1 s) und 1.000 ms (1,0 s) sowie eine Reaktionszeit R bis zum Entfernen der Extremität aus dem Strahl von 0,5 s bis einigen Sekunden (DIN EN 5638). In Ergänzung wird auch eine Zeitbasis von 10 s mit in die Betrachtungen einbezogen.

Unter Berücksichtigung dieser Zeitbasen berechnen sich Werte für die maximal zulässige Bestrahlung der Haut bei direkter Bestrahlung durch Laserstrahlung (MZB_{Haut}) gemäß DIN EN 60825-1:2001 für typische a) frequenzverdoppelte Nd:YAG-Laser, b) Diodenlaser; Nd:YAG-Laser; c) CO₂-Laser wie folgt:

- | | | | |
|----|---------------------|------------------------------------|--|
| a) | Einwirkdauer < 10 s | 400 nm < λ < 700 nm: | $MZB_{\text{Haut}} = 1,1 \cdot 10^4 \cdot t^{0,25} \cdot \text{J/m}^2$ |
| | Einwirkdauer ≥ 10 s | 400 nm < λ < 700 nm: | $MZB_{\text{Haut}} = 2.000 \text{ W/m}^2$ |
| b) | Einwirkdauer < 10 s | 700 nm < λ < 1.400 nm: | $MZB_{\text{Haut}} = 1,1 \cdot 10^4 \cdot C_4 \cdot t^{0,25} \cdot \text{J/m}^2$ |
| | Einwirkdauer ≥ 10 s | 700 nm < λ < 1.400 nm: | $MZB_{\text{Haut}} = 2.000 C_4 \cdot \text{W/m}^2$ |
| c) | Einwirkdauer < 10 s | 2.600 nm < λ < 10 ⁶ nm: | $MZB_{\text{Haut}} = 5.600 \cdot t^{0,25} \cdot \text{J/m}^2$ |
| | Einwirkdauer ≥ 10 s | 2.600 nm < λ < 10 ⁶ nm: | $MZB_{\text{Haut}} = 1.000 \text{ W/m}^2$ |

Damit ergeben sich folgende Werte für MZB_{Haut} :

ad a)

0,1 s:	6.186 J/m ²	61.860 W/m ² 6,1·10 ⁴ W/m ²
1,0 s:	11.000 J/m ²	11.000 W/m ² 1,1·10 ⁴ W/m ²
4,0 s:	15.556 J/m ²	3.889 W/m ² 3,9·10 ³ W/m ²
10 s:		2.000 W/m ² 2,0·10 ³ W/m ²

ad b)

*(hierfür λ = 800 nm; C₄ = 10^{0,002(λ-700)}, C₄ = 1,59)

0,1 s:	9.836 J/m ²	98.360 W/m ² 9,8·10 ⁴ W/m ²
1,0 s:	17.490 J/m ²	17.490 W/m ² 1,7·10 ⁴ W/m ²
4,0 s:	24.735 J/m ²	6.183 W/m ² 6,2·10 ³ W/m ²
10 s:		3.180 W/m ² 3,1·10 ³ W/m ²

*(hierfür 1050 nm < λ < 1400 nm; C₄ = 5)

0,1 s:	30.929 J/m ²	309.290 W/m ² 3,1·10 ⁵ W/m ²
1,0 s:	55.000 J/m ²	55.000 W/m ² 5,5·10 ⁴ W/m ²
4,0 s:	77.781 J/m ²	19.445 W/m ² 1,9·10 ⁴ W/m ²
10 s:		10.000 W/m ² 1,0·10 ⁴ W/m ²

ad c)

0,1 s:	3.149 J/m ²	31.490 W/m ² 3,1·10 ⁴ W/m ²
1,0 s:	5.600 J/m ²	5.600 W/m ² 5,6·10 ³ W/m ²
4,0 s:	7.919 J/m ²	1.979 W/m ² 1,9·10 ³ W/m ²
10 s:		1.000 W/m ² 1,0·10 ³ W/m ²

Wie in obiger Auflistung zu entnehmen ist, liegen für eine Expositionszeit von 10 s die niedrigsten Grenzwerte im Bereich $MZB_{Haut} \geq 1,0 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ (CO₂-Laser). Bei Expositionszeiten von 1 s ergeben sich Grenzwerte von $MZB_{Haut} \geq 5,6 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ (CO₂-Laser); für Bestrahlungsdauern von 0,1 s liegen die Grenzwerte $MZB_{Haut} \geq 3,1 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ (CO₂-Laser). Unterhalb dieser Bestrahlungsstärken ist keine Schädigung zu erwarten, das Tragen von PSA ist nicht erforderlich.

Direkte Laserstrahlung (nach Optik)

Eine Gegenüberstellung der Abschätzungen der VMB an den Schutzsystemen durch direkte Laserstrahlung für verschiedene Laserparameter und Abstände zum Strahlaustritt gemäß Abb. 3.2 bis Abb. 3.4 und Tab. 3.1 führt zu folgenden Ergebnissen bzw. Beurteilungen:

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

Bei Verwendung der kürzesten Brennweite von 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 1.000 (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 diffus gestreute Laserstrahlung für verschiedene Laserparameter und Abstände zum Strahlaustritt gemäß Abb. 3.1, Abb. 3.4 und Tab. 3.1 führt zu folgenden Ergebnissen bzw. Beurteilungen:

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

Bei kleinen Abständen (150 mm, Hand/Unterarm) und Leistungen über 3.000 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.

Beispiele für Schädigungen der Haut bei unbeabsichtigter Bestrahlung

In der folgenden Fotoserie (Abb. 3.5) 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 ($\lambda = 10.600 \text{ nm}$) wird oberflächennah absorbiert, wohingegen Nd:YAG-Laserstrahlung ($\lambda = 1.064 \text{ nm}$) signifikant tiefer in das menschliche Gewebe eindringt und dort u. U. schwere Schädigungen verursacht, die von außen als solche von medizinischen Laien nicht unbedingt erkannt werden.

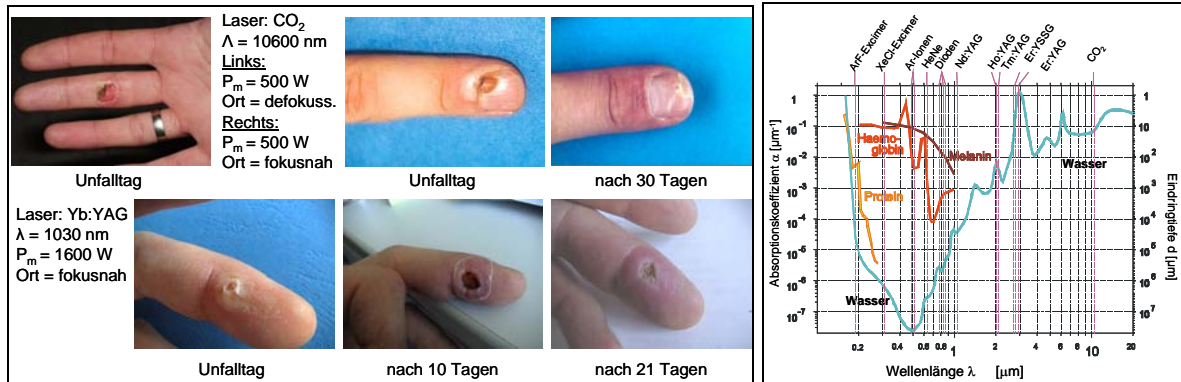


Abb. 3.5 Unbeabsichtigte Laserbestrahlung von Fingern und Absorptionsverhalten verschiedener Stoffe im menschlichen Organismus

4 Experimentelle Untersuchungen der Schutzsysteme

4.1 Probenauswahl und Beschreibung

Ausgehend von dem derzeitigen Verwendungsverhalten persönlicher Schutzbekleidung für Tätigkeiten mit HLG werden zunächst am Markt verfügbare Produkte aus anderen Anwendungsbereichen untersucht. Ergänzt wird diese Produktauswahl durch ausgewählte spezielle Flächengebilde aus dem Bereich Hitze-/Flammschutz, die ein günstiges Verhalten gegenüber Laserstrahlung vermuten lassen.

Um Erkenntnisse über das Verhalten der Werkstoffe/Schutzsysteme bei Exposition gegenüber Laserstrahlung und damit über ihre Schutzwirkung zu erhalten, werden repräsentative ebene Proben der entsprechenden Schutzbekleidung bzw. textiler Flächengebilde oder Flächengebilde auf Naturstoffbasis (Leder) exponiert.

Die Proben repräsentieren herstellerunabhängig marktübliche Produkte aus unterschiedlichen Werkstoffen und unterschiedlichem Aufbau. Ausgangspunkt sind am Markt verfügbare Produkte, wie sie derzeit typischerweise von Anwendern von handgeführten Lasergeräten zur Materialbearbeitung (HLG) 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 (Aramid-Gewebe),
- leichte Arbeitsbekleidung (Baumwolle).

Die Produkte können bezüglich der verwendeten Werkstoffe systematisch in folgenden 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).

Weitere Kriterien zur Charakterisierung der textilen Flächengebilde sind (s. a. Anhang 1)

- die Gewebe-Bindungsart (u. a. Leinwand-, Köper-, Atlasbindung),
- die Flächenmasse, Dicke des Flächengebildes sowie
- die chemische Behandlung (Additivierung, Imprägnierung).

Zu berücksichtigen sind ferner Eigenschaftsveränderungen durch mehrmaliges Waschen und Tragen der Produkte (s. a. detaillierte Probenbeschreibung im Anhang 2).

Bei den für die Untersuchungen ausgewählten textilen Flächengebilden handelt es sich um schwerentflammbare Materialien unterschiedlicher Flächenmasse, wie sie für Hitzeschutzkleidung nach DIN EN 531 und Schweißerschutzkleidung nach DIN EN 470-1 verwendet werden. Bis auf Gestricke sind alle Materialien als Außenlage vorgesehen. Sie erfüllen die Anforderungen an die begrenzte Flammen-

ausbreitung CODE A (geprüft nach 10 s Beflammung entsprechend DIN EN ISO 15025, Verfahren A, Flächenbeflammung) sowie mindestens CODE B1 für konvektive Hitze (geprüft nach DIN EN 367 mit 80 kW/m² Wärmestromdichte) und CODE C1 (geprüft nach DIN EN ISO 6942 bei 20 kW/m² Wärmestromdichte) für Strahlungshitze. Eine höhere Schutzfunktion kann aber durch einen Mehrlagenaufbau (2 Lagen) ermöglicht werden.

Handelsübliche Berufsbekleidung auf Basis von Mischgeweben mit hohem Kunstfaseranteil (> 50 %) und auf Basis reiner Kunstfasergewebe (u. a. Polyester, Polyamid, Polypropylen) wurde auf Grund der geringen Schutzwirkung bzw. hohen Gefährdung der Haut bei thermischer Belastung (u. a. durch Schmelzen des Gewebes resultierende Hautschädigungen) nicht in die Untersuchungen mit einbezogen.

Baumwoll-/Baumwollmischgewebe

Die Baumwoll- bzw. Baumwollmischgewebe entstammen Produkten aus den Bereichen Schutzbekleidung für hitzeexponierte Arbeiter und Schweißerschutzbekleidung. Die untersuchten Gewebe unterscheiden sich hinsichtlich der Werkstoffzusammensetzung (Kunstfaserart und -anteil), der Flächenmasse, der Bindungsart, der Imprägnierung/Additivierung sowie der Konditionierung (Waschzyklen). Ergänzend wurde zum Vergleich leichte Baumwolle (T-Shirt), wie sie bei der Arbeit oder in der Freizeit getragen wird, stichprobenartig untersucht.

Reine Baumwolle ist eine Naturfaser, sie ist schlecht entflammbar und brennt sehr langsam. Mischgewebe aus Baumwolle und Kunstfasern können zum Teil sehr leicht entflammen und brennen weiter. Schweißerschutzbekleidung und Flammenschutzbekleidung wird durch Additiva flammhemmend eingestellt, typische Produkte für die Gewebeausrüstung sind PROBAN® und SECAN®. Die flammhemmenden Eigenschaften sind nur unter Beachtung der Herstellerangaben für die Konditionierung des Gewebes, d. h. der max. Waschzyklen garantiert. Baumwoll- und Baumwollmischgewebe bieten einen guten Tragekomfort.

Kunstfasergewebe

Aramid-Gewebe bestehen aus aromatischen Polyamidfasern. Man unterscheidet meta-Aramide (Handelsname u. a. Nomex®) und para-Aramide (Handelsname u. a. Kevlar®). Aramidfasern sind hitzebeständig und beginnen ohne zu schmelzen ab ca. 400 °C zu verkohlen. Sie weisen eine hohe Festig- und Steifigkeit auf.

Das untersuchte Aramid(Nomex®)-Filament-Gewebe stammt aus dem Bereich der Schutzkleidung für Auto-Rennfahrer. Es wird als Außenlage eingesetzt. Eine (oder zwei) zusätzliche Lage(n) des Nomex®-Gestrickes erhöhten die Hitzeisolation bei einwirkender konvektiver Hitze oder Strahlungshitze. Die weiteren mit verschiedenen Stoffen (Aluminium, Polyurethan) kaschierten Aramid-Gewebe (Nomex®, Kevlar®) entstammen dem Hitzeschutz- bzw. Feuerwehrbereich (Handschuhe).

PREOX® oder PAN-Gewebe basieren auf Polyacrylnitril-Fasern. PREOX®-Fasern sind oxidierte, thermisch stabilisierte PAN-Fasern. Sie sind Vorprodukte von Kohlenstofffasern und weisen eine hohe thermische Beständigkeit bei moderater mechanischer Festigkeit auf. Sie sind unbrennbar, schmelzen und erweichen nicht und halten kurzzeitig Temperaturen bis 900 °C stand. PREOX®- und PAN-Gewebe werden beide im Hitzeschutzbereich eingesetzt. Oftmals werden sie mit anderen Fasern zu textilen Flächengebilden kombiniert. Die untersuchten Gewebe bzw. Mischgewebe mit PREOX®-Faseranteilen entstammen dem Hitze- und Flammenschutzbereich. Sie werden zur Isolation für Abschirmungen oder auch Schürzen etc. verwendet.

Glasfasergewebe

Die ausgewählten Glasfasergewebe entsprechen textilen Flächengebilden, wie Sie zum Hitzeschutz und Schutz vor heißen Metallspritzern eingesetzt werden.

Glasfasern sind nicht brennbar; ihre Erweichungstemperaturen liegen bei ca. 600 °C, der Schmelzpunkt bewegt sich zwischen 900 °C und 1.300 °C. Zum Schutz der Gewebeerfläche und zur Erhöhung der Hautfreundlichkeit werden die Gewebeerflächen häufig versiegelt. Untersucht werden Glasgewebe, die einseitig mit Aluminium und einseitig mit PTFE oder Silikon oder beidseitig mit Aluminium beschichtet sind. Oftmals werden Glasfasern mit anderen Fasern (Preox, Aramid) kombiniert, um die jeweiligen günstigen Eigenschaften der Fasern zu nutzen.

Naturstoffe/Leder

Bei den untersuchten Flächengebilden aus Naturstoffen handelt es sich um Rindvollleder (Narbenleder) und Spaltleder (Narbenspaltleder). Als Narbenleder bezeichnet man die Haarseite des Leders, die Leder sind je nach Dicke (1 mm bis über 3 mm) feinfühlig oder besonders abrieb- und reißfest. Nappaleder ist eine besondere Bezeichnung für ein Narbenspaltleder. Als Nappaleder bezeichnet man die glatte, obere Seite des Spaltleders; Nappaleder sind sehr feinfühlig bei guter Abrieb- und Reißfestigkeit.

Leder als Naturprodukt ist gekennzeichnet durch die Aufnahme von Feuchtigkeit, Ölen und Fetten. Bei thermischer Belastung kann der Entzug von Feuchtigkeit und Fetten zum Schrumpfen des Leders führen. Durch Ausrüstung (u. a. Hydrophobierung) können diese Eigenschaften verbessert werden. Leder ist bis ca. 150 °C hitzebeständig, bei höheren Temperaturen verkohlt es. Speziell ausgerüstete Leder (Sebatanleder) sind bis zu Temperaturen von 300 °C beständig.

Die untersuchten Leder werden für Handschuhe zum Schweißerschutz nach DIN EN 12477 verwendet.

Für die Bestrahlungsversuche werden flächenförmige Proben verwendet. Die Proben werden von namhaften Herstellern textiler Bekleidung und Schutzsystemen bzw. deren Gewebe-Zulieferern zur Verfügung gestellt. Eine Übersicht der untersuchten Proben sowie ihrer physikalischen Eigenschaften ist im Anhang 2 gegeben.

4.2 Untersuchungsmethoden

Die Untersuchungsmethoden gliedern sich in Kleinsignal-Prüfverfahren zur Bestimmung des spektralen Transmissionsgrads der Schutzbekleidungssysteme sowie in Prüfverfahren, bei denen die Schutzsysteme Bestrahlungsstärken ausgesetzt werden, wie sie bei Tätigkeiten mit HLG auftreten können.

4.2.1 Kleinsignal-Prüfverfahren zur Charakterisierung der Schutzsysteme hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften

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. Daneben werden spezielle Versuchsaufbauten erstellt, um bei 10.600 nm ergänzende Messungen und bei 1.064 nm vergleichende Messungen der Kleinsignal-Transmission und Reflexion/Remission durchführen zu können.

Auf Grund der Struktur der Textilien wird die Strahlung in einem weiten Winkelbereich remittiert und transmittiert. Um systematische Fehler auszuschließen, müssen die Spektrometer zur Messung des spektralen Remissions- und Transmissionsgrades mit einem Integrator (Ulbrichtkugel) ausgestattet sein.

Gemäß dem Energieerhaltungssatz muss der auf einen Körper auftreffende Strahlenfluss gleich der Summe des transmittierten, reflektierten und absorbierten Strahlungsflusses sein.

$$\text{Formel 1:} \quad \phi_0 = \phi_t + \phi_r + \phi_a \quad (4.1)$$

mit:

Φ : Strahlungsfluss

$$\text{Formel 2:} \quad 1 = T + R + A \quad (4.2)$$

mit:

T : Transmissionsgrad

R : Reflexionsgrad

A : Absorptionsgrad

Der spektrale Absorptionsgrad des jeweiligen Schutzsystems wurde nach Gleichung 4.2 aus der gemessenen spektralen Transmission und Reflexion berechnet. Die Ergebnisse der spektrometrischen Messungen sind in tabellarischer Form im Anhang 4 dargestellt.

4.2.1.1 Leistungslose Spektrometrie mittels Spektrometern

Alle Schutzsysteme werden auf ihren spektralen Transmissions- und Reflexionsgrad im leistungslosen Fall mit Hilfe von Spektrometern untersucht (VIS/NIR-Spektrometer). Verwendet wird ein Spektrometer der Firma Perkin Elmer, Typ Lambda 900. Der Messbereich des Spektrometers umfasst einen Wellenlängenbereich von 280 nm bis 2500 nm (UV/VIS/NIR). Durchgeführt werden drei Wiederholmessungen.

4.2.1.2 Spezielle Einrichtungen für Kleinsignal-Transmissions-/Remissionsmessungen

Für die Untersuchungen werden spezielle Messaufbauten erstellt, mit denen Bestrahlungsversuche an Schutzsystemen unter Verwendung verschiedener Laserstrahlquellen und unterschiedlicher Detektoren vorgenommen werden können. Die Versuche werden mit einem Nd:YAG- sowie einem CO₂-Laser im quasi cw-Betrieb durchgeführt.

Bei den Transmissionsmessungen wird hinter dem zu prüfenden Schutzsystem eine Ulbrichtkugel (Nd:YAG-Laser: Beschichtung: BaSO₄, Durchmesser: 200 mm; CO₂-Laser: Beschichtung: Infragold, Durchmesser: 100 mm) positioniert, um ein integrales Signal der über die Raumrichtungen transmittierten Strahlungsanteile zu erhalten. Am Ausgangsport der Ulbrichtkugel wird mittels einer Halbleiter-Fotodiode (Silizium) bei Verwendung des Nd:YAG-Lasers bzw. mittels pyroelektrischem Detektor bei Einsatz des CO₂-Lasers die integrale transmittierte Leistung detektiert (Abb. 4.1).

Bei Reflexions-/Remissionsmessungen wird das Schutzsystem am rückwärtigen Port der Ulbrichtkugel positioniert, um die reflektierten Strahlungsanteile mittels eines geeigneten Detektors integral zu erfassen (Abb. 4.2).

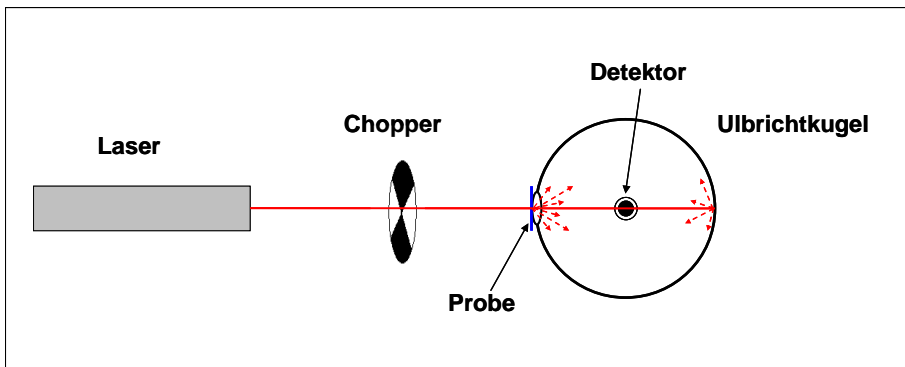


Abb. 4.1 Versuchsaufbau zur Kleinsignal-Transmissionsmessung

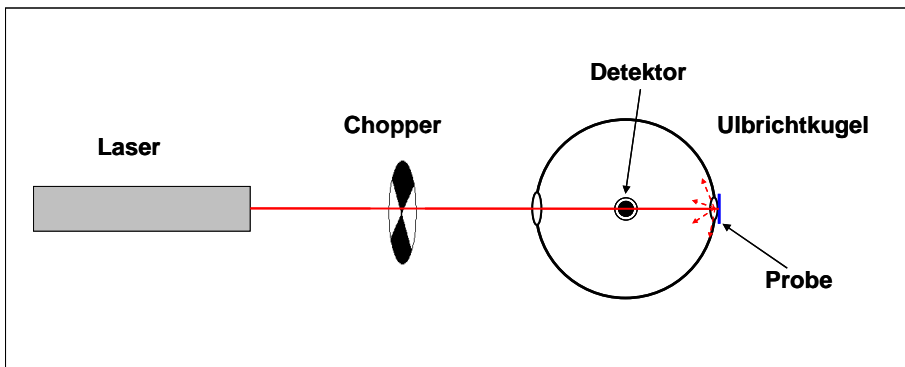


Abb. 4.2 Versuchsaufbau zur Kleinsignal-Remissionsmessung

Der Transmissions- bzw. Remissionsgrad ergibt sich aus dem Verhältnis der gemessenen Werte ohne bzw. mit Schutzsystem. Um das Signal-Rausch-Verhältnis signifikant zu verbessern, wird in den Messaufbau ein Chopper integriert, der mit einem Lock-In-Verstärker gekoppelt ist. Hierdurch wird eine Nachweisgrenze für den Transmissionsgrad von 10^{-5} (10600 nm) erreicht. Angegeben wird der Mittelwert aus drei Wiederholmessungen.

Für die leistungslosen Transmissionsmessungen (Wellenlänge: 1064 nm) wird eine Nd:YAG-Laserstrahlquelle mit einer max. Leistung (P_M) von 16 W eingesetzt, die für die Versuche auf ca. 0,1 mW abgeschwächt ist (technische Spezifikation: s. Anh. 3, Tab. 1).

Die Messung des Transmissionsgrades bei einer Wellenlänge von 10.600 nm erfolgt mit einer CO₂-Laserstrahlquelle mit einer maximalen Leistung (P_M) von 25 W. Um die Nachweisgrenze des Detektors sicher zu überschreiten, werden die Versuche bei Schutzsystemen mit niedriger spektraler Transmission mit einer mittleren Leistung von bis zu 2 W durchgeführt (technische Spezifikation: Anh. 3, Tab. 2).

4.2.2 Untersuchungstechnik für Bestrahlungsuntersuchungen an Schutzsystemen (Realbestrahlung)

Die Untersuchungen erfolgen an speziellen Versuchsaufbauten, die an verschiedene Laserstrahlquellen adaptiert werden können. In Abb. 4.3 ist der Versuchsaufbau schematisch dargestellt.

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)
- Hautsimulationsfolie (Wärmestrom/Temperatur)*

* nur als Vorversuche zur kalorimetrischen Bewertung

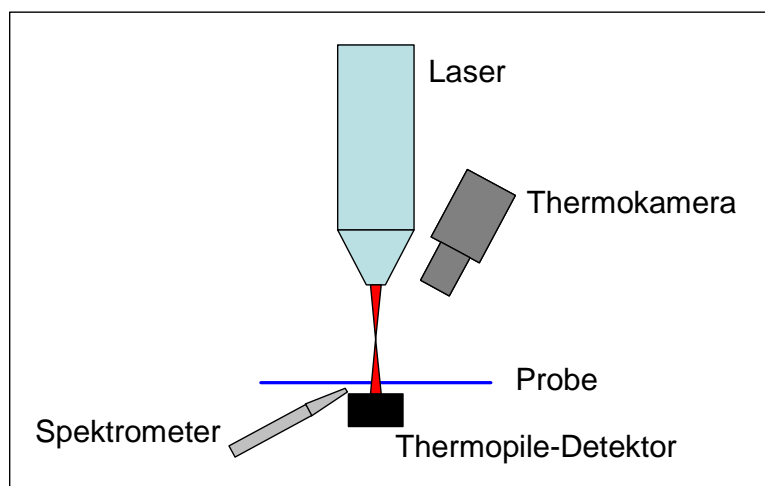


Abb. 4.3 Messaufbau (schematisch) für die Bestrahlungsversuche

4.2.2.1 Spektrometrische Bewertung

Zur spektrometrischen Messung der von den Schutzsystemen transmittierten Laserstrahlung und generierten Wärmestrahlungsanteile wird ein on-line Spektrometersystem von Zeiss verwendet, das aus zwei optisch miteinander gekoppelten Einzel-FTIR-Spektrometern besteht. Durch die Kombination von zwei Systemen kann ein Wellenlängenbereich von 380 nm bis 1.680 nm messtechnisch erfasst werden. Bei den Einzel-Systemen handelt es sich um den Typ MCS 521 VIS CLH (Wellenlängenbereich 380 nm bis 1.050 nm) und um den Typ MCS 511 NIR 1.7 CLH (Wellenlängenbereich 950 nm bis 1.680 nm). Beide Spektrometer sind über Fasern gekoppelt und über die Software gegeneinander kalibriert. Das System erlaubt die halbquantitative Beurteilung der spektralen Signalpegel.

Um die von den Schutzsystemen transmittierte Laserstrahlung sowie generierte Wärmestrahlungsanteile zu detektieren, wird in den Messaufbau unterhalb der Probe eine Aufnahme für den Faserkopf/die Glasfaser integriert. Über die Glasfaser wird die einfallende Strahlung zum Spektrometersystem weitergeleitet und mittels entsprechender Softwareprogramme ausgewertet.

4.2.2.2 Thermometrische Bewertung

Zur Aufzeichnung der Oberflächentemperatur der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung wird eine Thermokamera der Firma FLIR Systems, Typ ThermaCam SC 1000, verwendet. Als Detektor dient ein kühlbarer 256 x 256 Pixel Platin Silizium „focal plane array“ (FPA). Die Thermokamera erlaubt die Bestimmung von Temperaturen zwischen -10 °C und 1.500 °C, wobei der Gesamtmessbereich in einzelne Teilmessbereiche unterteilt ist. Für die Untersuchungen an den Schutzsystemen wird ein Temperaturmessbereich von 230 °C bis 1500 °C (503 K bis 1773 K) verwendet. Die Auswertung der Messdaten erfolgt softwaretechnisch mittels entsprechender Programme (ThermaCam Researcher 2000) nachgeschaltet (offline).

Die Kamera wird aus Gründen des zugänglichen Raumes (unter der Probe befinden sich Glasfaserkopf und Thermopiledetektor) oberhalb der Probe positioniert. Hierbei wird davon ausgegangen, dass auf Grund der geringen Dicke der Probe nach sehr kurzer Zeit die Temperatur an der Probenunterseite derjenigen an der -oberseite entspricht. Die Aufnahmedauer beträgt maximal 100 Sekunden.

4.2.2.3 Leistungsmessung

Zur Messung des Summensignals aus transmittierter Laserstrahlung bzw. generierter Wärmestrahlungsanteile wird ein Powermeter der Firma Coherent, Typ Labmaster Ultima bzw. Fieldmaster GS, verwendet. Das Powermeter erlaubt den Anschluss von Thermopile-Detektoren (LM-10, LM-45, LM-100) für verschiedene Leistungsbereiche. Alle eingesetzten Detektoren weisen einen spektralen Messbereich von 250 nm-10.600 nm auf; die Empfindlichkeit ist annähernd konstant über den gesamten Messbereich (Responsefaktor: 0,95-1,1).

Die Erfassung der Messdaten erfolgt hardware- bzw. softwaretechnisch über eine serielle Schnittstelle mittels entsprechender Programme (LMU Connection Kit bzw. FMGS Connection CS).

Der entsprechende Detektor wird mittels eines Halters unter dem Schutzsystem in einem geringen Abstand von 15 mm positioniert, um zu verhindern, dass ein für die Messergebnisse relevanter Anteil der diffus gestreuten Laser- und Wärmestrahlung nicht erfasst wird. Somit können systematische Fehler bezüglich der gemessenen Strahlungsanteile minimiert werden.

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 (980 nm, 1064 nm) kann diese Frage durch Einsatz von Spektrometern oder Separierung der Strahlungsanteile mittels HR-Spiegel (für entsprechende Laserstrahlung) beantwortet werden. Um im IR-Bereich (10.600 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 µm darstellt (Abb. 4.4). IR-Spektrometer oder HR-Spiegel für 10.600 nm mit ausreichender Transmission für Wärmestrahlung sind am Markt nicht standardmäßig verfügbar. Bei Einsatz des Saphir-Kristalls 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 $6\ \mu\text{m}$ auftretenden - durch den Filter ausgeblendeten - Wärmestrahlungsanteile gemäß der Stefan-Boltzmann-Kurve korrigiert.

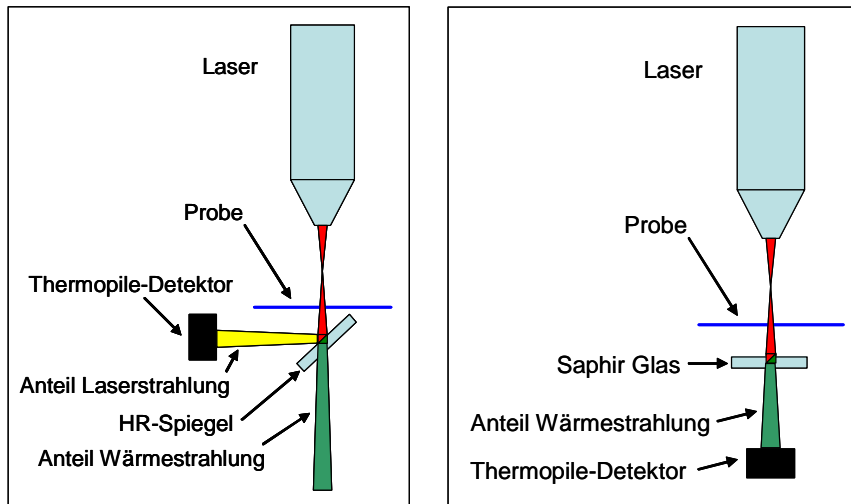


Abb. 4.4 Versuchsaufbauten zur Separierung von Laserstrahlungs- und Wärmestrahlungsanteilen (links: 1.064 nm; rechts: 10.600 nm)

4.2.2.4 Visuelle Bewertung

Um die Schutzsysteme hinsichtlich ihres Verhaltens bei Laserbestrahlung visuell zu bewerten, wird in den Messaufbau eine Videokamera der Firma Mikrotron, Typ MC 1300, integriert. Die Kamera wird aus Gründen des zugänglichen Raumes (unter der Probe befinden sich Glasfaserkopf und Thermopiledetektor) 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 100 Sekunden lang festgehalten. Im Anschluss (off-line) erfolgt eine Analyse bezüglich des Zeitpunktes des Eintretens der in Tab. 4.1 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 ist (SIEKMANN, 2000). Die Liste wird ergänzt um die Kriterien „Flammenbildung“ und „Rauchbildung“. In der folgenden Tabelle sind die Kriterien inkl. ihrer Beschreibung aufgelistet:

Tab. 4.1 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

4.2.2.5 Kalorimetrie

Der Messaufbau für die kalorimetrische Bewertung der Schutzsysteme besteht aus Kalorimeter, Messwertverstärker, externem Datenerfassungsmodul sowie einem PC mit eigens entwickeltem Datenerfassungs- und Auswerteprogramm.

Der Aufbau des Kalorimeters lehnt sich an die in der DIN IEC 61482-1-1 geforderten Parameter an; jedoch wurden Modifikationen bezüglich der Kupferplatte (Maße, Dicke, Gewicht) vorgenommen, um auf die Gegebenheiten der Laserbestrahlung (Bestrahlungsfleckgröße, Bestrahlungsstärke) einzugehen (Abb. 4.5). Die Oberfläche des Kalorimeters ist mit einem schwarzen, matten Lack versehen. Die durch das Thermoelement, Typ T, am Kupferelement ausgegebenen Messwerte werden in einem externen Messwertverstärker und Linearisierer (Firma Analog Device, Typ 7B47-T-05-2) verstärkt und als Spannungssignal (0 V-10 V) ausgegeben. Die Spannungssignale werden mittels USB Messbox ME-RedLAB PMD-1008 (Firma MEILHAUS ELECTRONIC), mit 12 bit Auflösung, an das Datenerfassungs- sowie Auswerteprogramm weitergeleitet. Dieses Programm basiert auf der Programmiersprache LabVIEW 7.1. Es beinhaltet die von außen triggerbare Messdatenerfassung sowie die Darstellung der Messwerte (Einwirkenergie) gegenüber der Stoll/Chianta-Kurve, die in der DIN IEC 61482-1-1:2006 mit einer Näherungsformel angegeben ist.

Die aus den ermittelten Werten berechneten Gesamt-Wärmestromdichten* bzw. Gesamt-Einwirkenergien* werden zur Bewertung der Schutzsysteme der Stoll/Chianta-Kurve (Grenzwertkurve) hinsichtlich des Zeitpunktes der Grenzwertüberschreitung

gegenübergestellt. Gemessen wurden pro Schutzsystem 9 verschiedene Bestrahlungsstärken (Ausnahme: Leder auf Grund des Schrumpfens).

*Gemessen wird das ungewichtete Summensignal aus Laserstrahlung, Wärmestrahlung und Wärmeleitung.

Die Fläche des verwendeten Kupferkalorimeters beträgt 15 mm·15 mm. Die Bestrahlungsfleckgrößen wurden entsprechend angepasst; die Versuche erfolgten mit einem Bestrahlungsfleckdurchmesser von $d_{86} = 13 \text{ mm}$ (14 mm).

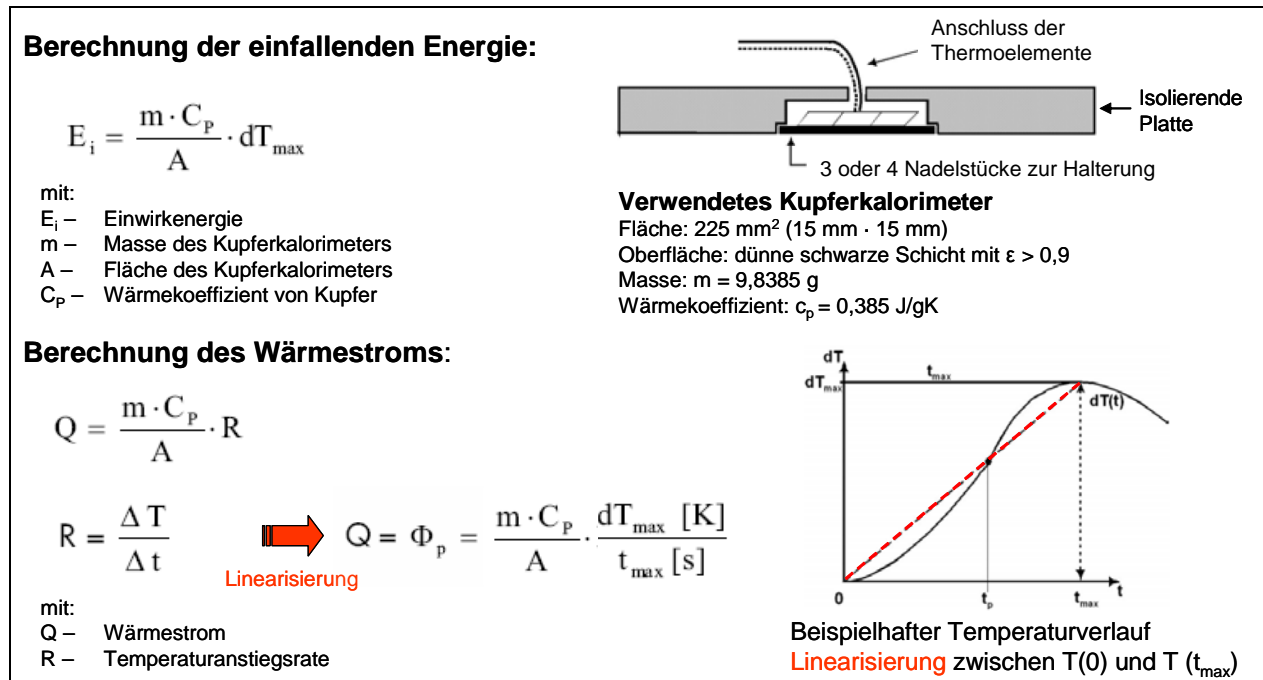


Abb. 4.5 Verwendetes Kupferkalorimeter und Berechnungsprinzipien

4.2.2.6 Hautsimulationsfolie

Zur Abschätzung des Verhaltens der Schutzsysteme bei den kalorimetrischen Untersuchungen wurde für Voruntersuchungen stichprobenartig eine so genannte „Hautsimulationsfolie“ aus PVC nach DIN EN 373 eingesetzt (Abb. 4.6).

Die Hautsimulationsfolie wird für die Untersuchungen in direktem Kontakt hinter dem Schutzsystem platziert. Anhand von Veränderungen der Folienprägung der Hautsimulationsfolie bei einem Wärmeeintrag kann auf das Verhalten (thermische Schädigungen) der Haut geschlossen werden.

Basis für die Anwendung der Hautsimulationsfolie stellt die DIN EN 373 „Schutzkleidung; Beurteilung des Materialwiderstandes gegen flüssige Metallspritzer“, im Anhang B der Norm, dar. Inhalt sind die Beschreibung des Prüfverfahrens sowie die Beschreibung der rechnerischen Ermittlung des Wärmeeintrags bei bekannten physikalischen Parametern (der Folie). Kalibriert wird die Folie, indem ein Aluminiumblock auf eine festgelegte Temperatur erhitzt und auf die PVC-Folie gelegt wird. Der Block wird nach einer festgelegten Zeit abgenommen und es erfolgt eine Inspektion der Prägung der PVC-Folie hinsichtlich einer Glättung (oder Beschädigung). Bei einem 5-sekündigen Kontakt und der Temperatur des Aluminiumklotzes von $166 \pm 2 \text{ °C}$ darf keine Prägungsveränderung zu beobachten sein. Bei einer Temperatur von $183 \pm 2 \text{ °C}$ sollte eine Glättung beobachtet werden.

Da die diesbezüglichen Temperaturen nicht mit den Werten für die Verbrennungsschwelle nach DIN EN 563: „Sicherheit von Maschinen - Temperaturen berührbarer Oberflächen - Ergonomische Daten zur Festlegung von Temperaturgrenzwerten für heiße Oberfläche“ korrelieren (hier wird bei Kontakt mit heißen glatten Oberflächen aus blankem Metall ein mittlerer Wert von 61 °C bei 5-sekündigem Kontakt angegeben), werden die Versuche ausschließlich zur Abschätzung der maximalen Versuchszeit für die kalorimetrischen Untersuchungen verwendet.

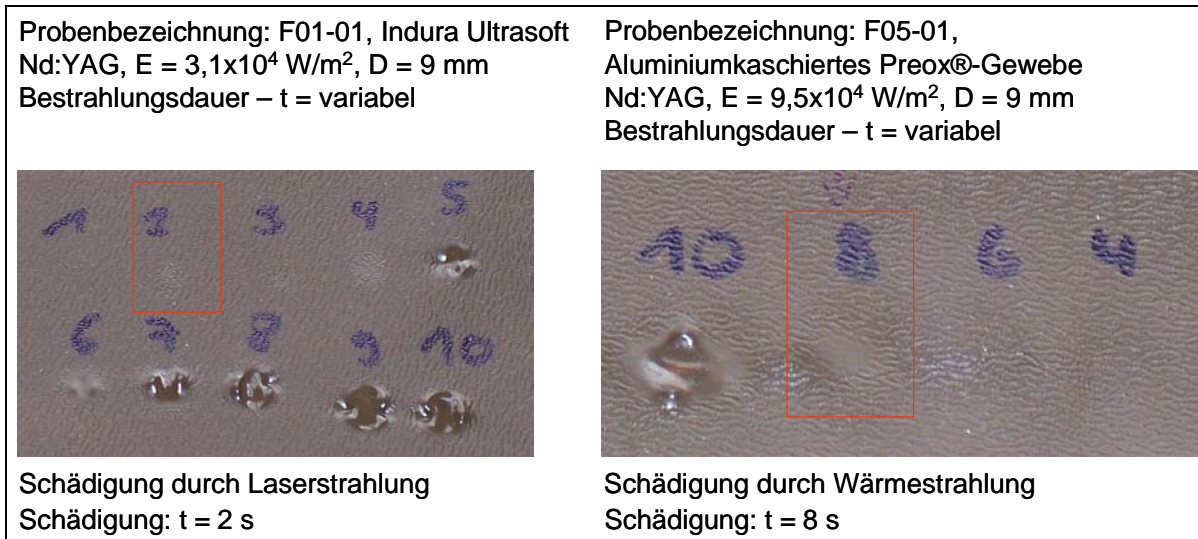


Abb. 4.6 Einsatz der Hautsimulationsfolie im Rahmen von Voruntersuchungen für kalorimetrische Messungen (rote Markierung: Schädigungsbeginn)

4.3 Eingesetzte Lasereinrichtungen

Entsprechend den für handgeführte und -positionierte Lasergeräten zur Materialbearbeitung derzeit am Markt eingesetzten Laserstrahlquellen wurden für die Untersuchungen der textilen Flächengebilde und Naturstoffe folgende Lasergeräte eingesetzt:

- Diodenlaser ($\lambda = 940 \text{ nm}$)
- Nd:YAG-Laser ($\lambda = 1.064 \text{ nm}$)
- CO_2 -Laser ($\lambda = 10.600 \text{ nm}$)

Hinsichtlich der maximalen Ausgangsleistung wurden Lasergeräte ausgewählt, mit denen sich bei den für die Prüfverfahren benötigten Bestrahlungsfleckdurchmessern Bestrahlungsstärken im Bereich $1 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ bis mindestens $1 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$ realisieren lassen (dieser Bereich wurde anhand der Vorversuche mit der Hautsimulationsfolie und der kalorimetrischen Messungen als kritisch, d. h. relevant bestimmt).

Die Laserstrahlung wurde bei allen Versuchsständen über optische, strahlformende Elemente, d. h. mittels Kollimier- und Fokussiereinheit auf die Probe gelenkt. Um eine Verschmutzung der Optiken durch partikel- und gasförmige Schadstoffe zu vermeiden, ist in alle Bearbeitungsköpfe eine Querstromspülung (cross-jet) integriert. Alle Stationen verfügen über ein Handhabungssystem mit 1 bis 3 beweglichen Linearachsen. Da auf Grund der thermischen Belastung der Proben bei Laserbestrahlung

partikel- und gasförmige Gefahrstoffe emittiert werden können, ist jeder Versuchstand mit einem entsprechenden Erfassungssystem, das an ein Abluftreinigungssystem angeschlossen ist, ausgestattet. Ferner wurden Vorkehrungen für das Ablöschen von Entstehungsbränden getroffen.

Die Probe wird senkrecht zum einfallenden Laserstrahl ausgerichtet ($\pm 3^\circ$).

Vor Aufnahme der Versuche an einer Laseranlage erfolgte die Charakterisierung des Strahlprofils mit Hilfe einer Strahldiagnoseeinrichtung der Fa. Primes, Typ FokusMonitor, mit entsprechend der Strahlung angepasster Detektornadel und Detektor. Ergänzend wurden während der Versuche stichprobenartige Überprüfungen der Bestrahlungsfleckdurchmesser zur Bestimmung der radiometrischen Größe „Bestrahlungsstärke“ mit kalibrierten Detektorkarten (Fluoreszenzkarten: Dioden- und Nd:YAG-Laser) und Plexiglasbränden (CO₂-Laser) durchgeführt.

Angesetzt wird der Durchmesser $d_{86,5}$ (2. Moment gemäß DIN EN ISO 11146) in dem 86 % der applizierten Leistung liegen. Die gemessenen Strahlprofile (in Werkstückebene) der eingesetzten Lasergeräte können als gaußartig bezeichnet werden und weisen keine hohen zentralen Strahlungsspitzen auf.

Die Überprüfung der emittierten, an der Probe anliegenden Leistung wurde mit Leistungsmessgeräten der Fa. Coherent, u. a. Coherent Labmaster/Fieldmaster in Kombination mit verschiedenen Detektoren (Typ LM--) vor jeder Parameteränderung vorgenommen.

Die technischen Daten der eingesetzten Lasergeräte sind im Anhang 3 aufgeführt.

5 Ergebnisse der Untersuchungen

5.1 Ergebnisse der Kleinsignal-Prüfverfahren

Die Ergebnisse der leistungslosen Transmissions- und Remissionsmessungen sind in den folgenden Diagrammen für die Wellenlängen $\lambda = 810 \text{ nm}$, $\lambda = 980 \text{ nm}$, $\lambda = 1.064 \text{ nm}$, $\lambda = 10.600 \text{ nm}^*$ graphisch dargestellt.

Für ausgewählte Stoffe ist aus dem Transmissions- und Remissionsgrad der Absorptionsgrad gemäß Gleichung 4.1 berechnet worden. Die diesbezüglichen Ergebnisse sind in Abb. 5.2 und Abb. 5.3 graphisch dargestellt. In tabellarischer Form sind die Ergebnisse als Zahlenwerte in Anhang 4 aufgelistet.

* bei $\lambda = 10.600 \text{ nm}$ wurden nur Transmissionsmessungen durchgeführt

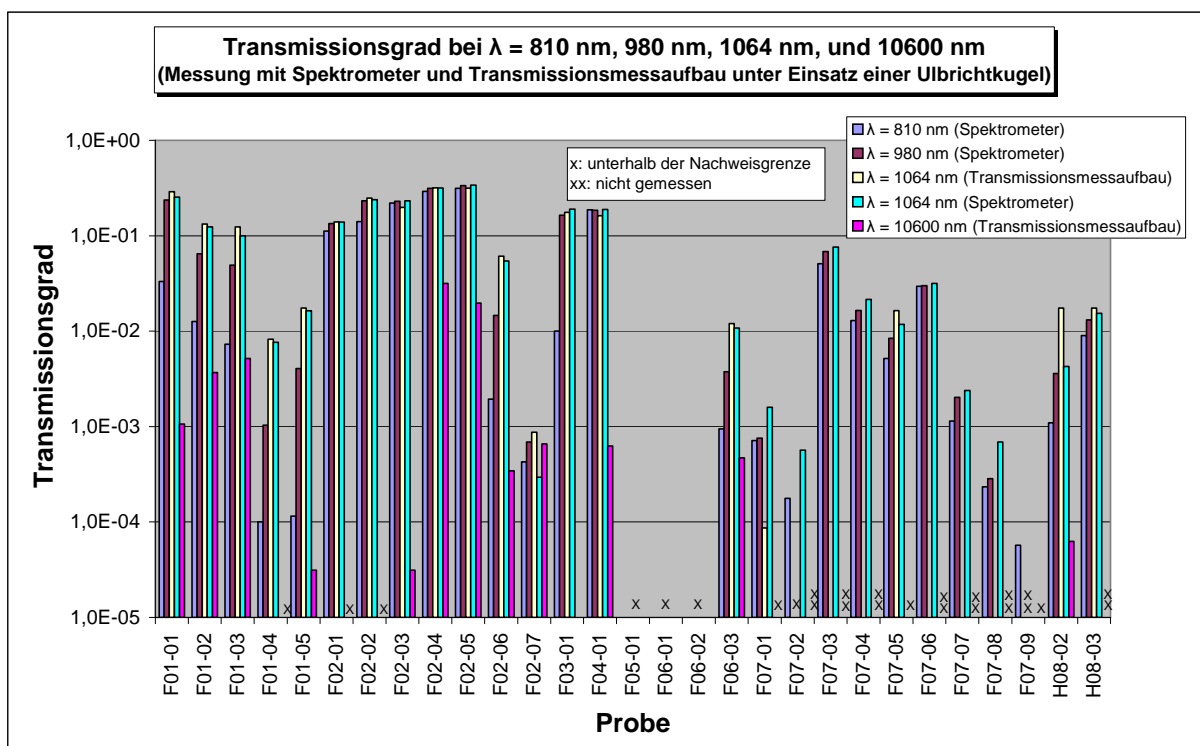


Abb. 5.1 Spektraler Transmissionsgrad verschiedener Proben, gemessen mit Spektrometer und speziellem Bestrahlungsmessaufbau (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser/CO₂-Laser)

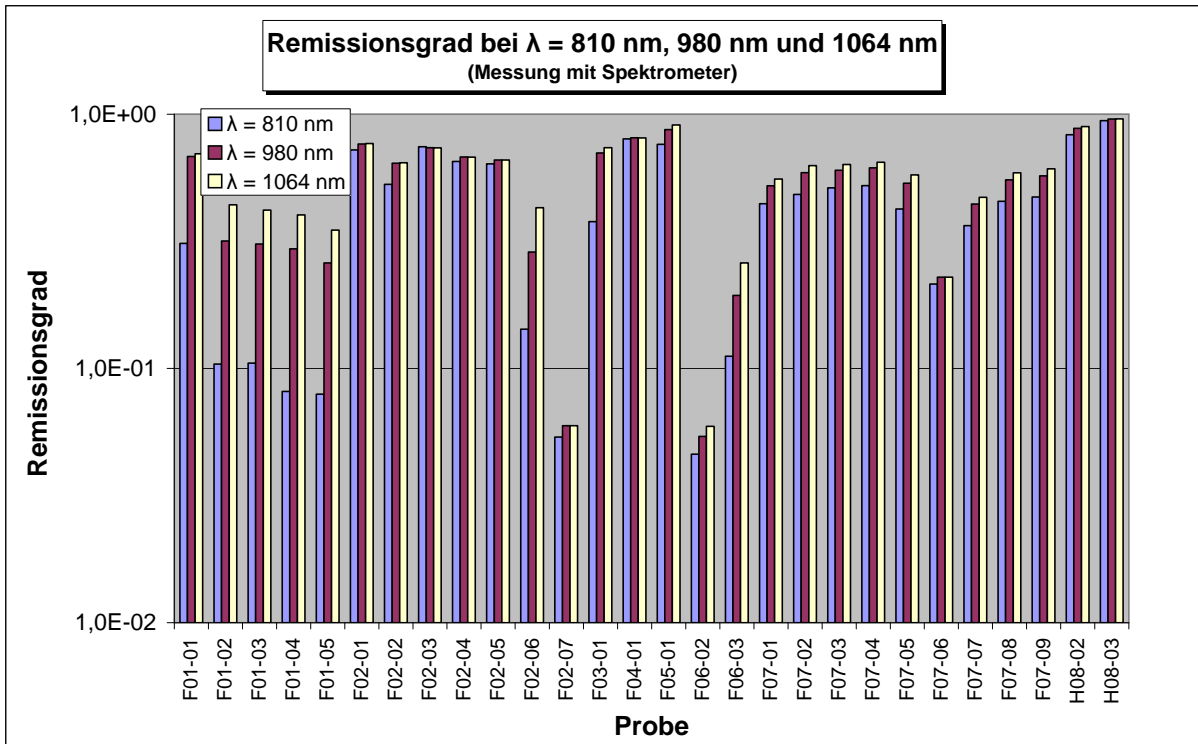


Abb. 5.2 Spektraler Remissionsgrad verschiedener Proben, gemessen mit Spektrometer (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser)

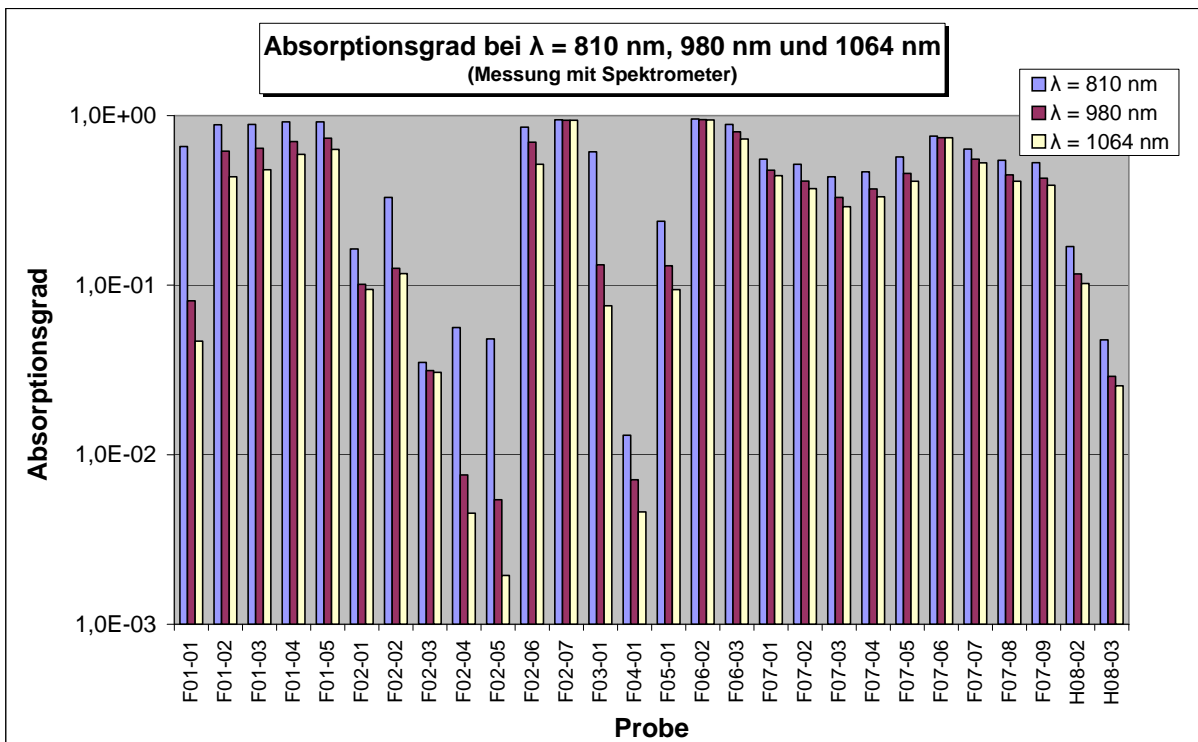


Abb. 5.3 Spektraler Absorptionsgrad verschiedener Proben, berechnet aus Transmissions- und Remissionsgrad (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser)

Diodenlaser ($\lambda = 810$ und 980 nm)

Die Ergebnisse der leistungslosen Transmissionsmessungen für eine Wellenlänge von $\lambda = 980$ nm entsprechen weitestgehend den Ergebnissen, die bei $\lambda = 1.064$ nm ermittelt wurden. Die Gruppeneinteilung kann analog übernommen werden.

Für $\lambda = 810$ nm weisen die untersuchten Schutzsysteme überwiegend einen deutlich geringeren Transmissionsgrad auf als bei $\lambda = 980$ nm.

Die Proben lassen sich anhand ihres Transmissionsgrades in drei Gruppen einteilen:

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

Zur ersten Gruppe gehören Baumwoll- und Baumwollmischgewebe mit Kettkörperbindung (F01-xx) und Flächenmassen über 300 g/m^2 . Ebenso sind aluminium- oder PU-kaschierte Gewebe und aluminisierte Aramidgewebe mit höherer Flächenmasse ($> 150 \text{ g/m}^2$) zu dieser Gruppe zu zählen.

In die zweite Gruppe lassen sich Baumwoll- und Baumwollmischgewebe mit Kettkörperbindung (F01-xx) und Flächenmassen unter 300 g/m^2 eingliedern. Auch aluminisierte Baumwollgewebe, Glasgewebe und Aramidgewebe mit niedriger Flächenmasse (60 g/m^2) wie auch Voll- und Spaltleder sind in dieser Gruppe.

Zur dritten Gruppe gehören Baumwoll- und Baumwoll-Mischgewebe mit moderaten Flächenmassen bzw. bei höherer Flächenmasse (520 g/m^2) mit einer weniger dichten Bindungsart (Schussatlas).

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

Anhand der logarithmischen Darstellung lässt sich erkennen, dass die untersuchten Proben hinsichtlich ihrer Transmissionseigenschaften sinnvoll in drei Gruppen eingeteilt werden können:

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 erste 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 Preox- und Aramid-Fasern lassen sich der 2. Gruppe zuordnen. Zur 3. Gruppe gehören Textilien, die überwiegend aus Baumwollgeweben konfektioniert sind und der Arbeitsbekleidung bzw. Schutzbekleidung (Oberbekleidung, Schweißer-/Flammschutz) zuzuordnen sind.

Die Ergebnisse der Transmissionsmessung, die mit dem speziellen Kleinsignal-Transmissionsmessaufbau ermittelt wurden, korrelieren mit den Ergebnissen der Transmissionsmessung unter Einsatz des Spektrometers für die betrachtete Wellenlänge von $\lambda = 1064$ nm ($< 5\%$ Abweichung).

Einfluss der Flächenmasse/Konditionierungen während des Gebrauchs der Textilien

Am Beispiel der Proben F01-01 bis F01-05 und F02-01 bis F02-06 kann der Einfluss der Flächenmasse verdeutlicht werden. Mit steigender Flächenmasse ist eine Abnahme des spektralen Transmissionsgrads ($\lambda = 1064$ nm) zu beobachten. Ursächlich hierfür sind die Merkmale einer dichteren Webart wie auch eine größere Dicke der textilen Flächengebilde.

Wiederholtes Reinigen der Textilien durch Maschinenwäschen führt tendenziell zu einer Veränderung des Transmissionsgrads. Das Verhalten lässt sich zum einen auf das „oberflächliche Auffasern“ der Fasern und zum anderen auf ein Verengen der

Faserzwischenräume durch Aufquellung der Faser begründen. Demgegenüber steht allerdings bei weiterem Gebrauch eine Abnutzung des Gewebes, die hier nicht berücksichtigt werden konnte (Abb. 5.4).

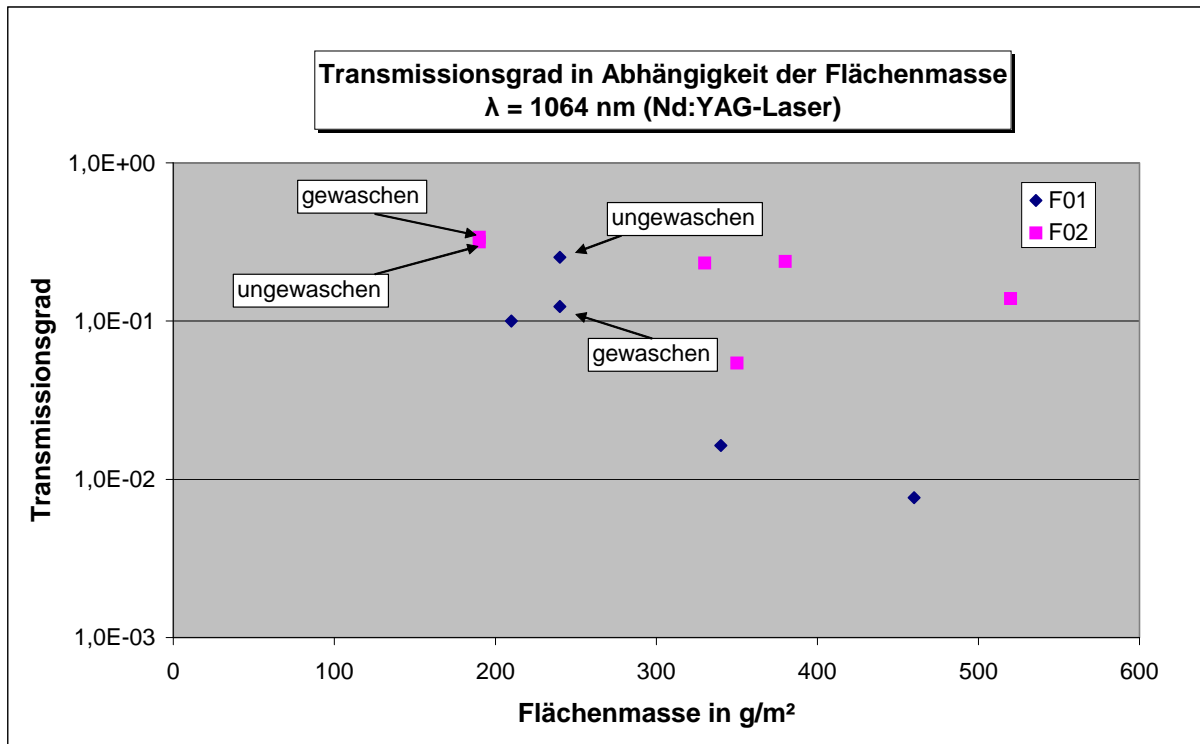


Abb. 5.4 Spektraler Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Flächenmasse für Nd:YAG-Laser

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 $T = 10^{-2}$

Die Abhängigkeit des Transmissionsgrades von der Flächenmasse ist im Vergleich zu den Festkörperlaser deutlich ausgeprägter wie in Abb. 5.5 dargestellt.

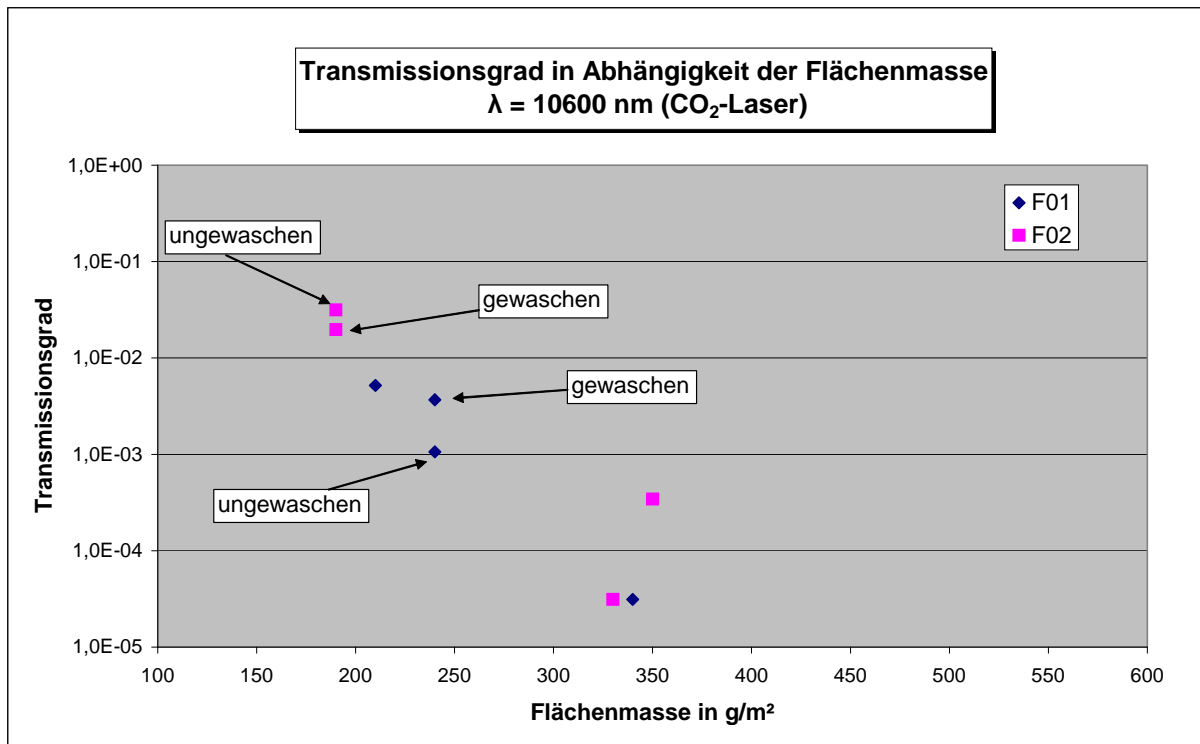


Abb. 5.5 Spektraler Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Flächenmasse für CO₂-Laser

Ursache hierfür ist die bei hoher Flächenmasse bzw. dichter Webart höhere oberflächennahe Absorption im Vergleich zu Festkörper- und Diodenlaser.

Winkelabhängigkeit der transmittierten Strahlung/Notwendigkeit des Einsatzes einer Integratoroptik

Um Informationen über die Winkelabhängigkeit der transmittierten Strahlung zu erhalten bzw. Aussagen über die Notwendigkeit des Einsatzes einer Integratoroptik, wurden stichprobenartig Voruntersuchungen durchgeführt. Hierzu wurden die ermittelten Ergebnisse von Versuchen mit und ohne Einsatz einer Ulbrichtkugel vergleichend gegenübergestellt.

Bei den Versuchen ohne Einsatz einer Ulbrichtkugel werden vom Detektor nur Strahlungsanteile detektiert, die in einen Winkelbereich von $\pm 0,5^\circ$ transmittiert bzw. gestreut werden, wobei 0° die Einfallsrichtung der Laserstrahlung auf das Schutzsystem darstellt.

Wie anhand der Abb. 5.6 verdeutlicht wird, liegen die ohne Integratoroptik ermittelten spektralen Transmissionsgrade 1 bis 2 Größenordnungen unter den Werten, wie sie mit Einsatz einer Integratoroptik ermittelt werden. Insbesondere textile Gewebe mit einer hohen Flächenmasse und/oder mit einer dichten Webart weisen geringe gerichtete transmittierte Strahlungsanteile auf.

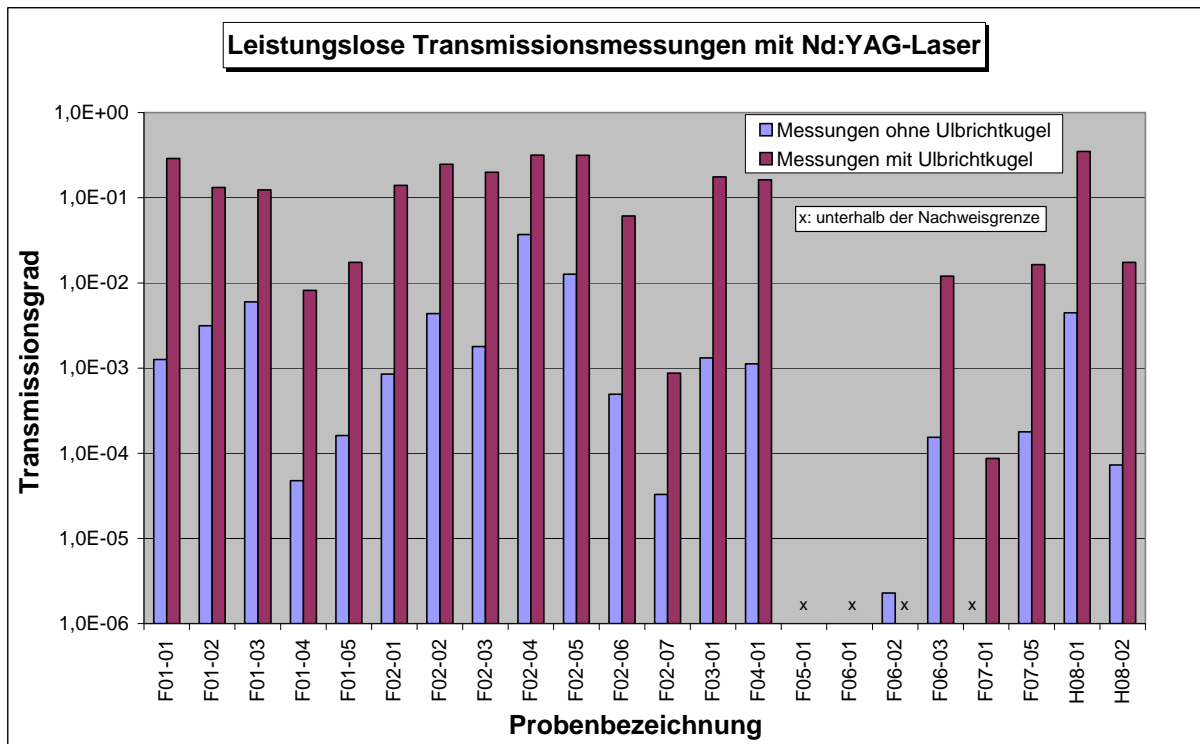


Abb. 5.6 Vergleich der Transmissionsgrade bei und ohne Einsatz einer Ulbrichtkugel

Ursächlich für dieses Verhalten sind die optischen Eigenschaften des Schutzsystems bzw. des Fasergebindes. Dichtere Fasergebinde bewirken vermehrte Beugungseffekte und Streuung der Strahlung an den Einzelfasern.

5.2 Ergebnisse der Bestrahlungsversuche (Realbestrahlung)

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur

- spektrometrischen Bewertung
- thermometrischen Bewertung
- Leistungsmessung
- visuellen Bewertung
- Kalorimetrie

werden im Folgenden anhand einiger ausgewählter Schutzsysteme bzw. ihres charakteristischen Verhaltens exemplarisch erläutert. Die entsprechenden Zahlenwerte befinden sich – geordnet nach Schutzsystem – in tabellarischer Form im Anhang 4.

5.2.1 Ergebnisse der spektrometrischen Bewertung

Die Ergebnisse der spektrometrischen Bewertung erlauben halbquantitative Aussagen zur transmittierten Laserstrahlung und zur Wärmestrahlung, die vom Schutzsystem emittiert wird.

Wie anhand der Daten in Abb. 5.7 veranschaulicht wird, ist bei Nd:YAG Laserbestrahlung beim Schutzsystem F02-01 eine ausgeprägte Transmission mit Einsetzen der Laserstrahlungsexposition zu erkennen (dieses korreliert mit den Ergebnissen der Kleinsignaltransmissionsmessung: $T = 0,14$). Nach ungefähr 15 Sekunden beginnt die irreversible Zerstörung mit Verkohlung des Schutzsystems. Dieses hat zur Folge, dass der Anteil der transmittierten Laserleistung temporär abnimmt und der Anteil der Wärmestrahlung durch die erhöhte Absorption der Laserstrahlung zunimmt. Die erhöhte Absorption und Energieeinbringung 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 von Laserstrahlung bei 1064 nm, wie das Schutzsystem F07-01, das auf einem einseitig aluminisierten Glasgewebe mit einseitiger Silikonbeschichtung basiert, signifikant unterschiedlich. Durch instantane Absorption der Laserstrahlung kommt es zur lokalen Erwärmung und damit zur Emission von Wärmestrahlung, welches anhand der spektrometrischen Messung in Abb. 5.7 verifiziert werden kann. Durch das langsame Verkohlen des Materials und nachfolgendes partielles Versagen steigt die Transmission der Laserstrahlung nach einem Zeitraum von ca. 40 Sekunden an.

Das Verhalten dieser Schutzsysteme bei Diodenlaserstrahlung ($\lambda = 940$ nm) ist vergleichbar zu Bestrahlungen bei $\lambda = 1064$ nm.

Bei Bestrahlung mit CO₂-Laserstrahlung ($\lambda = 10.600$ nm) weist das Schutzsystem F02-01 im Vergleich zur Nd:YAG-Laserbestrahlung eine ausgeprägte Absorption auf (die Messwerte der Kleinsignaltransmission befinden sich unterhalb der Nachweisgrenze; vgl. auch kalorimetrische Messungen), wie anhand Abb. 5.8 erkennbar ist. Die erhöhte Absorption führt nach einem Zeitraum von 15 Sekunden zu einer vollständigen Zerstörung des Schutzsystems durch Lochbildung, die sich in einer raschen Abnahme der Wärmestrahlungsanteile äußert.

Im Vergleich wird in das aluminisierte Schutzsystem F07-01 auf Grund der erhöhten Reflektivität weniger Leistung eingekoppelt. Dieses korreliert mit den Kleinsignal-Remissionsmessungen in 5.2 (F07-06 bis F07-09). Infolge der eingekoppelten Laserstrahlung steigt die Temperatur im Schutzsystem an, welches durch eine Zunahme der Wärmestrahlungsanteile messtechnisch festgehalten werden kann.

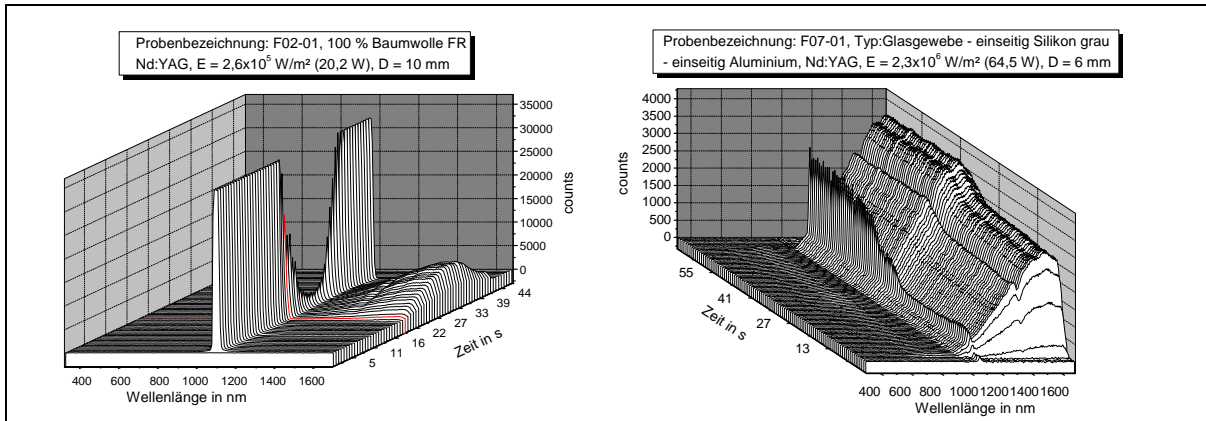


Abb. 5.7 Spektrometrie mit Nd:YAG-Laser im Bereich von $\lambda = 380$ nm - 1.680 nm

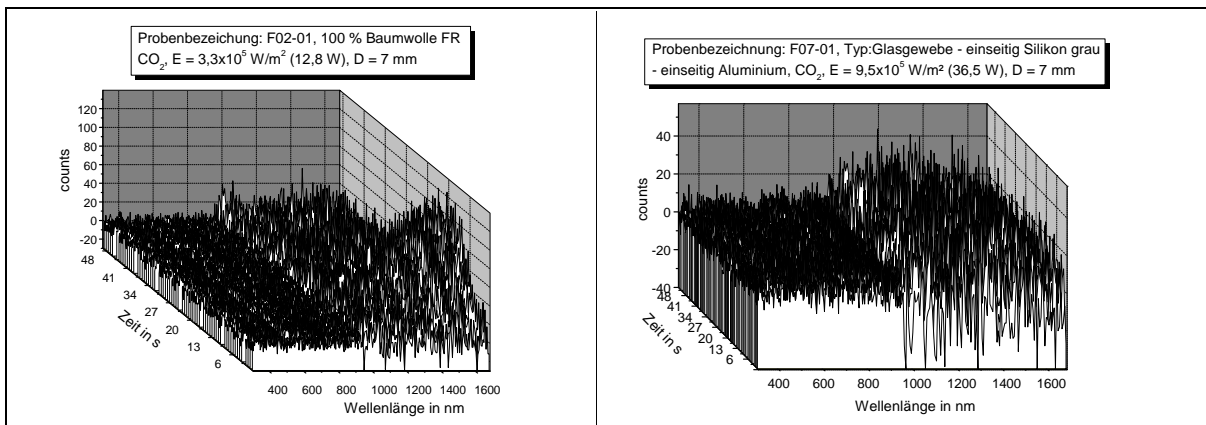


Abb. 5.8 Spektrometrie mit CO₂-Laser im Bereich von $\lambda = 380$ nm - 1.680 nm

Die spektrometrischen Ergebnisse korrelieren mit den Ergebnissen der thermometrischen und leistungsbezogenen Untersuchungen, wie anhand von Abb. 5.9 und Abb. 5.11 veranschaulicht ist.

5.2.2 Ergebnisse der thermometrischen Bewertung

Aus Abb. 5.9 ist ersichtlich, dass das Schutzsystem F02-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung eine geringe Absorption (Energieeinkopplung) aufweist, da die Temperatur in den ersten 15 Sekunden unterhalb des minimal messbaren Wertes ($T_0 = 503$ K) bleibt. Dieses korreliert mit den Kleinsignal-Transmissionsmessungen in Abb. 5.1, da F02-01 einen Transmissionsgrad von $T = 0,14$ aufweist. Nach 15 Sekunden setzt die Verkohlung des Schutzsystems ein, die zu einer Erhöhung der Absorption und dadurch auch zu einer Erhöhung der Temperatur des Schutzsystems führt. Nach ungefähr 30 Sekunden beginnt die Temperatur zu sinken. Dieses ist auf die beginnende vollständige Zerstörung des Schutzsystems (Lochbildung) zurückzuführen. Da der Laser nach 45 Sekunden abgeschaltet wurde, sinkt die Temperatur des Schutzsystems anschließend exponentiell.

Im Vergleich hierzu zeigt die gemessene maximale Temperatur bei CO₂-Laserbestrahlung, dass das Schutzsystem F02-01 eine hohe Absorption aufweist, da die Temperatur des Schutzsystems sehr schnell ansteigt (Abb. 5.10). Dies führt innerhalb eines Zeitraums von 10 Sekunden zu einer vollständigen Zerstörung des Schutzsystems mit partieller Lochbildung, wodurch die maximale Temperatur abnimmt (in den Lochrandbereichen wird die Laserstrahlung noch partiell absorbiert). Der exponentielle Abfall der Temperatur nach 48 Sekunden ist auf das Abschalten des Lasers zurückzuführen.

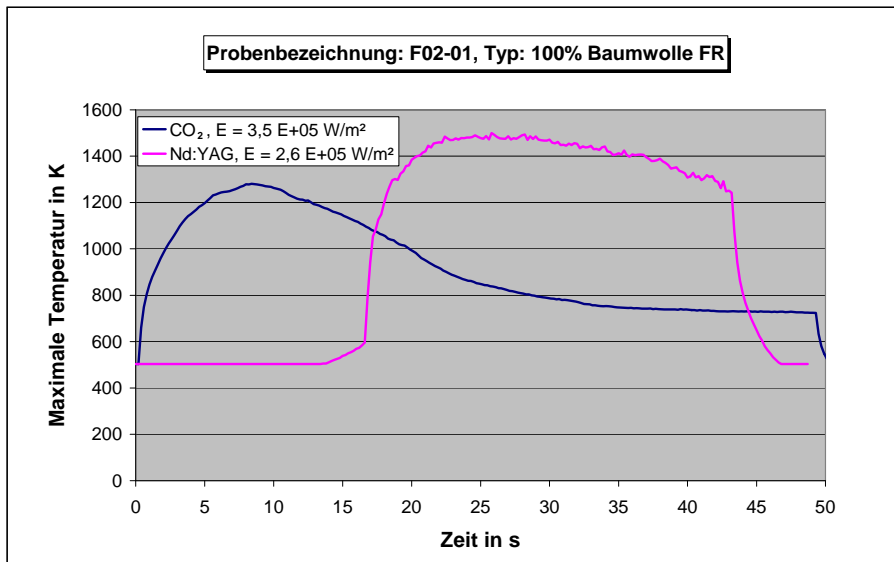


Abb. 5.9 Vergleich der maximalen Temperatur des Schutzsystems F02-01 bei Bestrahlung mit CO₂- und Nd:YAG-Laser, gemessen mit Thermokamera

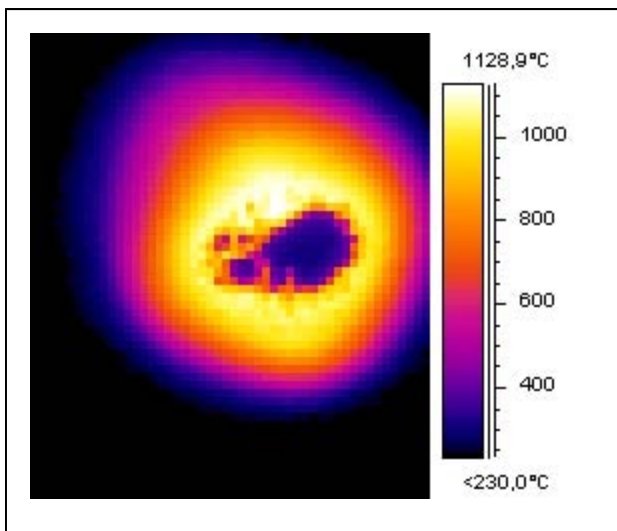


Abb. 5.10 Messung mit Temperaturverteilung des Schutzsystems F02-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung und Eintritt von Lochbildung

Wie anhand Abb. 5.11 ersichtlich ist, weist das Schutzsystem F07-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung eine starke Absorption auf, da die Temperatur unmittelbar nach Laserstrahlungsexposition stark ansteigt und schon nach 10 Sekunden das thermodynamische Gleichgewicht mit der Umgebung erreicht hat. Dieses Verhalten korreliert mit den Kleinsignal-Transmissionsmessungen (Abb. 5.1) bei einer geringen Transmission, gleichbedeutend mit einer hohen Absorption, beziehungsweise Energie, die in das Schutzsystem eingekoppelt wird. In diesem Versuch wurde nach 60 Sekunden der Laser abgeschaltet.

Im Gegensatz dazu weist das aluminisierte Schutzsystem F07-01 bei CO₂-Laserbestrahlung eine hohe Reflexion auf (dieses korreliert mit Vergleichsdaten bezüglich der Absorption von Aluminium gegenüber CO₂-Laserstrahlung und Nd:YAG-Laserstrahlung (HÜGEL, 1992)); demzufolge steigt die Temperatur des Schutzsystems nur sehr langsam. Bei dieser Messung wurde der Laser nach ca. 36 Sekunden abgeschaltet.

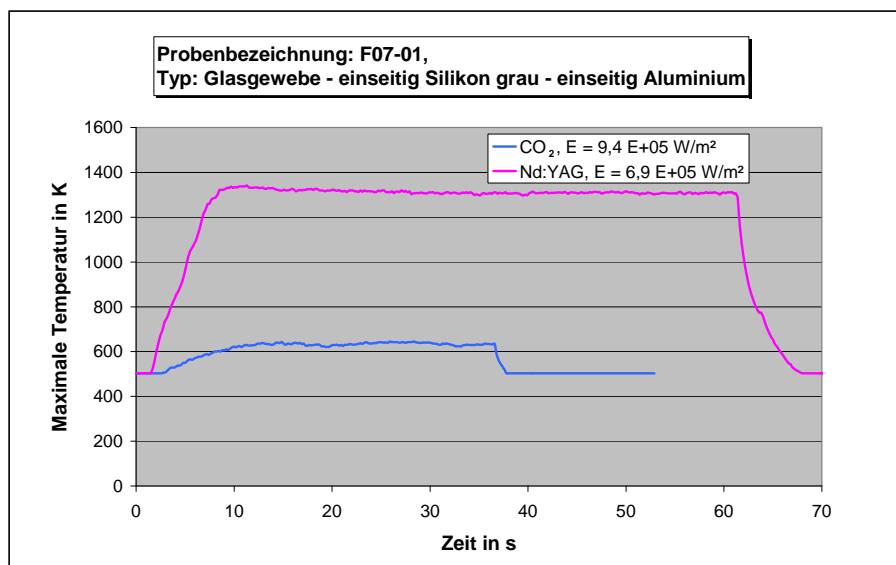


Abb. 5.11 Vergleich der maximalen Temperatur des Schutzsystems F07-01 bei Bestrahlung mit CO₂- und Nd:YAG-Laser, gemessen mit Thermokamera

5.2.3 Ergebnisse der visuellen Bewertung

Im Folgenden wird das Laserstrahl/Werkstoff-Verhalten am Beispiel ausgewählter Schutzsysteme erläutert. Die entsprechenden Einzeldaten sind im Anhang 4 tabellarisch geordnet nach Schutzsystemen und Wellenlängen aufgeführt.

Als Grenz-Zeitpunkte werden auf Basis der Reflexzeiten 1 Sekunde und 4 Sekunden herangezogen. In Analogie zu den Normen DIN EN 12254 und DIN EN 60825-1 wird für das Versagen ein Zeitraum von 10 s zum Vergleich angesetzt. Im Hinblick auf die kalorimetrische Bewertung (Abschnitt 5.2) wird der Bestrahlungsbereich von 10⁴ W/m² bis 10⁵ W/m² eingehender untersucht.

Einfluss der Bestrahlungsstärke

Allgemein kann festgehalten werden, dass mit Erhöhung der Bestrahlungsstärke der Zeitpunkt für das Auftreten der Kriterien „Rauch-, Flammen- und Lochbildung“ zu kürzeren Zeiten verschoben wird. Dabei gilt, dass – wenn die Kriterien überhaupt auftreten – die Rauchbildung vor der Flammenbildung und vor der Lochbildung einsetzt.

Einfluss der Flächenmasse/Bindungsart

In Abb. 5.12 sind die Ergebnisse der visuellen Bewertung für Nd:YAG Bestrahlung von Baumwoll- und Baumwollmischgeweben mit unterschiedlicher Flächenmasse und Bindungsart dargestellt. Es ist festzustellen, dass artgleiche Gewebe mit höherer Flächenmasse längere Zeiträume bis zum Eintreten der Kriterien „Rauch-, Flammen- und Lochbildung“ aufweisen. Das Gewebe F02-01 mit höherer Flächenmasse zeigt im Vergleich zum Gewebe F02-06 (beides Atlasbindungen) längere Zeiträume bis zum Eintritt oben genannter Kriterien. Bei einer Bestrahlungsstärke von $E = 7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ tritt keine Lochbildung innerhalb von 10 Sekunden auf. Das Schutzsystem F02-06 mit niedrigerer Flächenmasse zeigt bei $4,6 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ bereits nach 8 Sekunden eine Lochbildung.

Vergleicht man das Gewebe F02-06 mit dem Baumwollmischgewebe F01-01 mit einer Flächenmasse von 240 g/m^2 , so weist letzteres mit einer dichten Kettbindung trotz niedrigerer Flächenmasse längere Zeitdauern bis zum Eintreten der Kriterien auf. Unter Einbeziehung der Ergebnisse der Kleinsignalmessungen zeigt sich allerdings, dass das Gewebe F02-06 den deutlich höheren Absorptionsgrad aufweist, d. h. es wird im Vergleich die meiste Energie eingekoppelt;

→ Dieses bedeutet, dass definitive Aussagen über den Zeitpunkt des Versagens eines Gewebes erst anhand des optischen Verhaltens in Verbindung mit den thermomechanischen Eigenschaften des Gewebes (u. a. Zerstörschwelle) gemacht werden können.

Einfluss der Gewebeausrüstung/Imprägnierung/Additivierung

Festzustellen ist, dass Baumwollgewebe vor der Lochbildung eine Rauchbildung und ab $1,6$ bzw. $2,6 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ eine Flammenbildung zeigt. Während der Rauchentwicklung noch eine gewisse positive Warnwirkung zugeschrieben werden kann, stellt die Flammenbildung eine signifikante sekundäre Gefährdung dar. Kritisch ist festzustellen, dass sich auch Textilien mit einer flammhemmenden Ausrüstung nach DIN EN 531 und DIN EN 533 oberflächlich entzünden und die aus dem Schutzsystem abströmenden Gase mit einer bis zu 10 cm hohen Flamme abbrennen. Flammhemmend ausgerüstete Textilien brennen nach Ende der Laserexposition nicht bzw. nur begrenzt weiter; auch breitet sich das Nachglimmen nicht in den unbeschädigten Teil der Probe aus (Index 1 bis 3 gemäß DIN EN 533). Gewebe, die nicht als „nicht brennbar“ eingestuft sind oder nicht „flammhemmend“ ausgerüstete Gewebe, wie z. B. T-Shirt-Baumwollstoff normaler Freizeitbekleidung oder leichter Handschuhe entzünden sich, brennen nach und müssen abgelöscht werden (Abb. 5.14).

Einfluss der Konditionierung

Untersucht wurden Gewebe, die mit mehreren Waschzyklen behandelt wurden. Die Ergebnisse lassen auf Grund der Streuung aber keine Zuordnung zu unterschiedlichen Konditionierungen zu. Zur Verifizierung möglicher Einflüsse sind weitergehende Untersuchungen erforderlich.

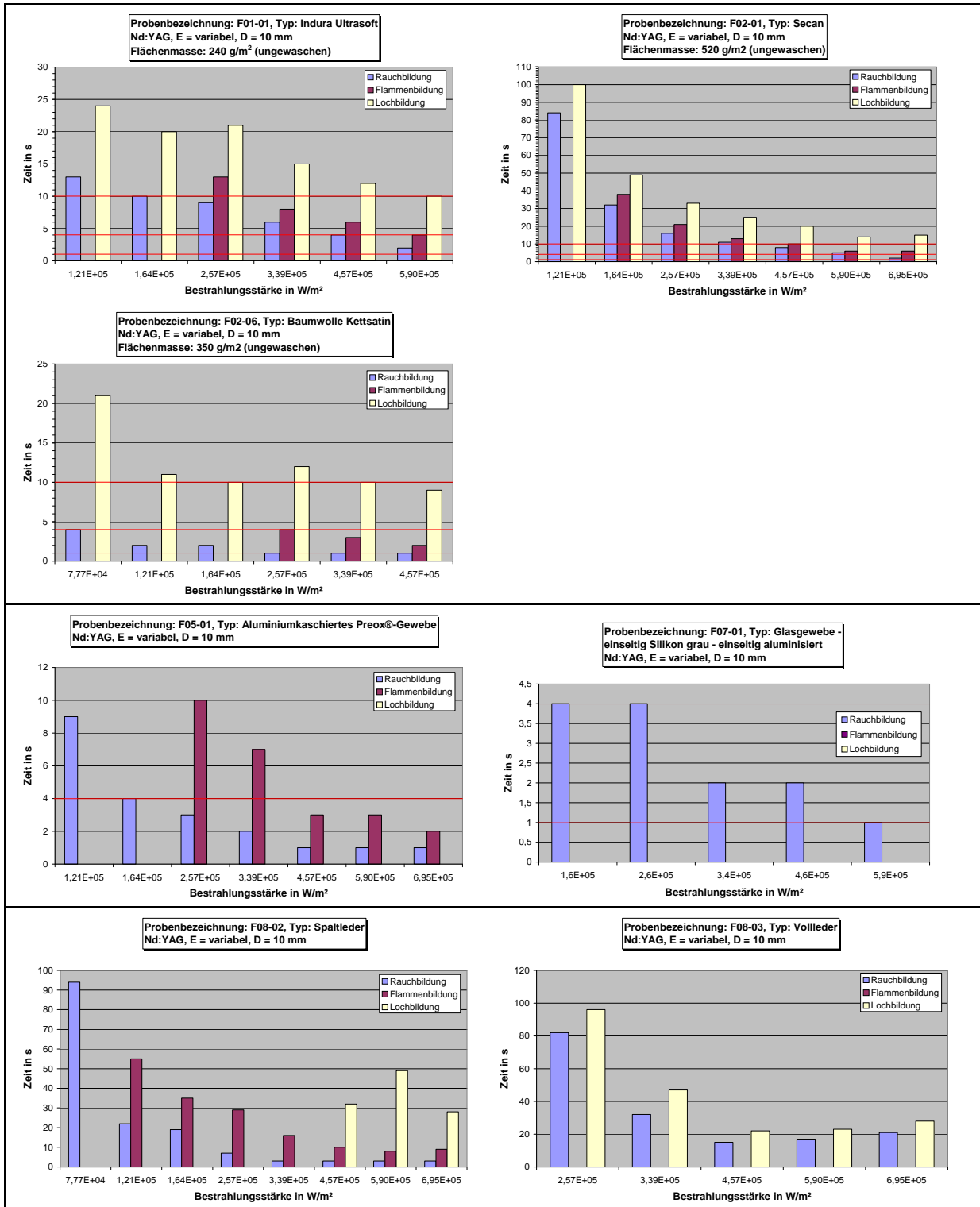


Abb. 5.12 Visuelle Bewertung der Schutzsysteme F01-01, F02-01, F02-06, F05-01, F07-01, H8-02 und H8-03 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung

Einfluss des Schutzsystem-Werkstoffes

Höher oder hochtemperaturbeständige textile Flächengebilde, u. a. aus Preox PAN-Fasern oder aus Glasfasern, zeigen in dem Beobachtungszeitraum von 10 Sekunden bei Nd:YAG-Laserbestrahlung keine Lochbildung (Abb. 5.13). Ursächlich hierfür ist die im Vergleich zu Baumwoll- und Mischgeweben zu deutlich höheren Temperaturen verschobene Zerstörschwelle des anorganischen Glasfasergewebes. Innerhalb der Reflexzeiträume tritt eine Rauchbildung auf, der eine gewisse positive Warnwirkung zugeschrieben werden kann. Günstig - im Vergleich zu den anderen Schutzsystemen - ist das Fehlen der Flammenbildung beim Glasgewebe F07-01.

Die untersuchten Schutzhandschuhe zeigen ein unterschiedliches Verhalten. Beide Lederarten, Rindvollleder und Nappaleder (Spaltleder), weisen bei Nd:YAG-Laserbestrahlung bis $7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ Zeitpunkte für die Lochbildung von mehr als 20 Sekunden auf. Vorteilhaft zu bewerten ist, dass beim untersuchten Nappaleder keine Flammenbildung auftritt. Problematisch bei beiden Ledern ist das mit Beginn der Laserexposition auftretende Schrumpfen. Insbesondere bei CO_2 -Laserbestrahlung ist ein starkes Schrumpfen zu beobachten*. Hierbei handelt es sich um eine sekundäre Gefährdung, da der Handschuh nicht mehr ohne weiteres ausgezogen werden kann und durch die verzögerte Wärmeabgabe an die Haut die Gefahr von schweren Verbrennungen besteht. In Abb. 5.14 ist ein Schweißerschutzhandschuh nach CO_2 -Laserbestrahlung abgebildet.

*das Schrumpfen stellt ebenfalls hohe Anforderungen an das Einspannen des Schutzsystems in der Prüfanordnung. Kann die Probe nicht allseits eingespannt werden, wie für die kalorimetrischen Messungen, ist eine Prüfung auf Grund des Schrumpfens und des damit verbundenen Abhebens von dem Detektor oder dem Bewegen im Strahlungsfeld nicht möglich.

Einfluss der Wellenlänge der auftreffenden Laserstrahlung

In der folgenden Abbildung sind zwei der oben aufgeführten Schutzsysteme zum Vergleich bei CO_2 -Laserbestrahlung ($\lambda = 10.600 \text{ nm}$) dargestellt.

Auf Grund der in Abschnitt 5.1 beschriebenen wellenlängenabhängigen optischen Eigenschaften der textilen Flächengebilde und damit der Energieeinkopplung ergibt sich ein unterschiedliches - insbesondere zeitbezogenes - Verhalten der Schutzsysteme.

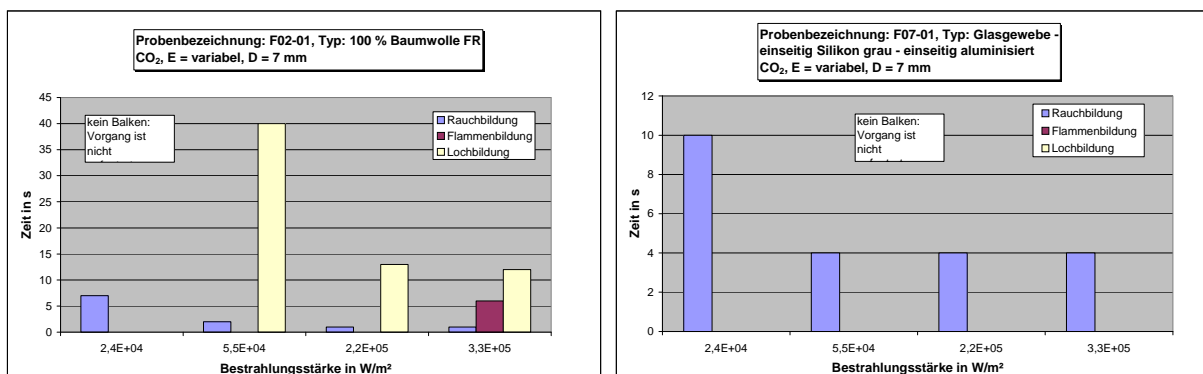


Abb. 5.13 Visuelle Bewertung der Schutzsysteme F02-01 und F07-01 bei CO_2 -Laserbestrahlung

Wie in Abb. 5.13 dargestellt, weist das Schutzsystem F02-01 bei CO₂-Laserbestrahlung schon bei vergleichsweise geringen Bestrahlungsstärken im Bereich von 10⁴ W/m² eine Lochbildung auf. Im Vergleich ist die Schutzwirkung des Schutzsystems F07-01 bei Bestrahlungsstärken bis 10⁶ W/m² deutlich höher, da ausschließlich Rauchbildung (ohne Lochbildung und Durchtritt von Laserstrahlung) zu beobachten ist.



Abb. 5.14 Aufnahmen von Handschuhen, die mit einem CO₂-Laser bestrahlt wurden

leichter Baumwollhandschuh	Schweißerschutzhandschuh
$E = 2,7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$	$E = 3,7 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$
Flammenbildung: 1,5 s	Schrumpfen: sofort
Lochbildung: 2 s	Lochbildung: 5,5 s

Einfluss der Bestrahlungsfleckgröße

Der Einfluss der Bestrahlungsfleckgröße bei konstanter Bestrahlungsstärke wurde anhand von Stichversuchen mit typischen Vertretern aus den jeweiligen Werkstoff-/Verhaltensgruppen der Schutzsysteme für Dioden-, Nd:YAG- und CO₂-Laserstrahlung untersucht. Die visuellen Bewertungen werden gestützt durch Messungen der durch das Schutzsystem tretenden Laserstrahlung mit Hilfe eines Leistungsmessgeräts (Thermopile-Detektor). Die folgenden Abbildungsserien (Abb. 5.15 und Abb. 5.16) veranschaulichen den mit Hilfe des Leistungsmessgeräts aufgezeichneten Signalverlauf der auf Grund einer einsetzenden Lochbildung durch das Schutzsystem durchtretenden Laserstrahlungsanteile.

Wie exemplarisch anhand der Diagramme für Nd:YAG- und CO₂-Laser für den Zeitpunkt des Auftretens der Lochbildung festgestellt werden kann, sind die Ergebnisse inhomogen. Ursächlich hierfür dürfte das Auftreten unterschiedlicher Effekte sein.

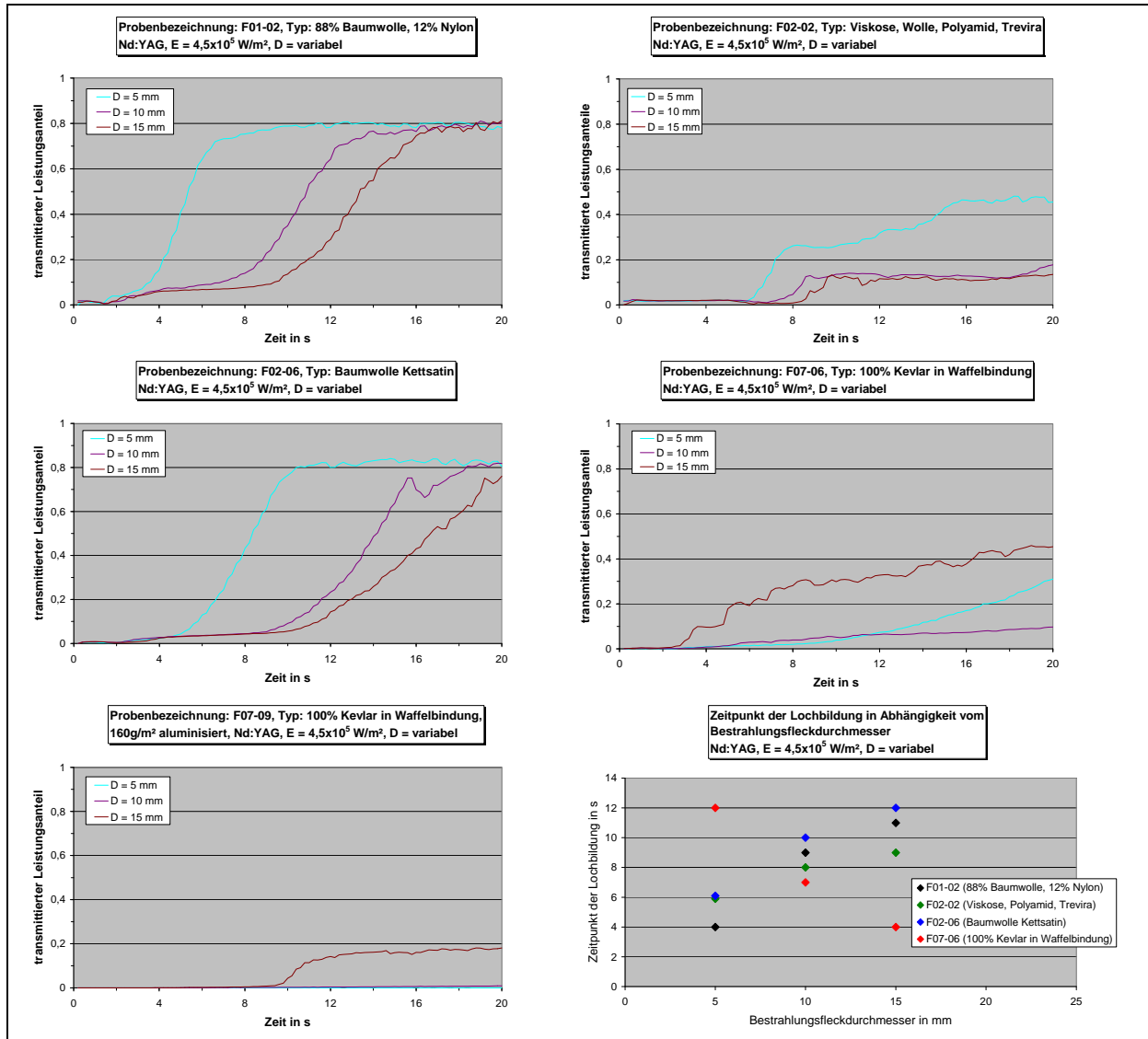


Abb. 5.15 Zeitpunkte für das Eintreten von Lochbildung für verschiedene Schutzsysteme bei Nd:YAG-Laserbestrahlung

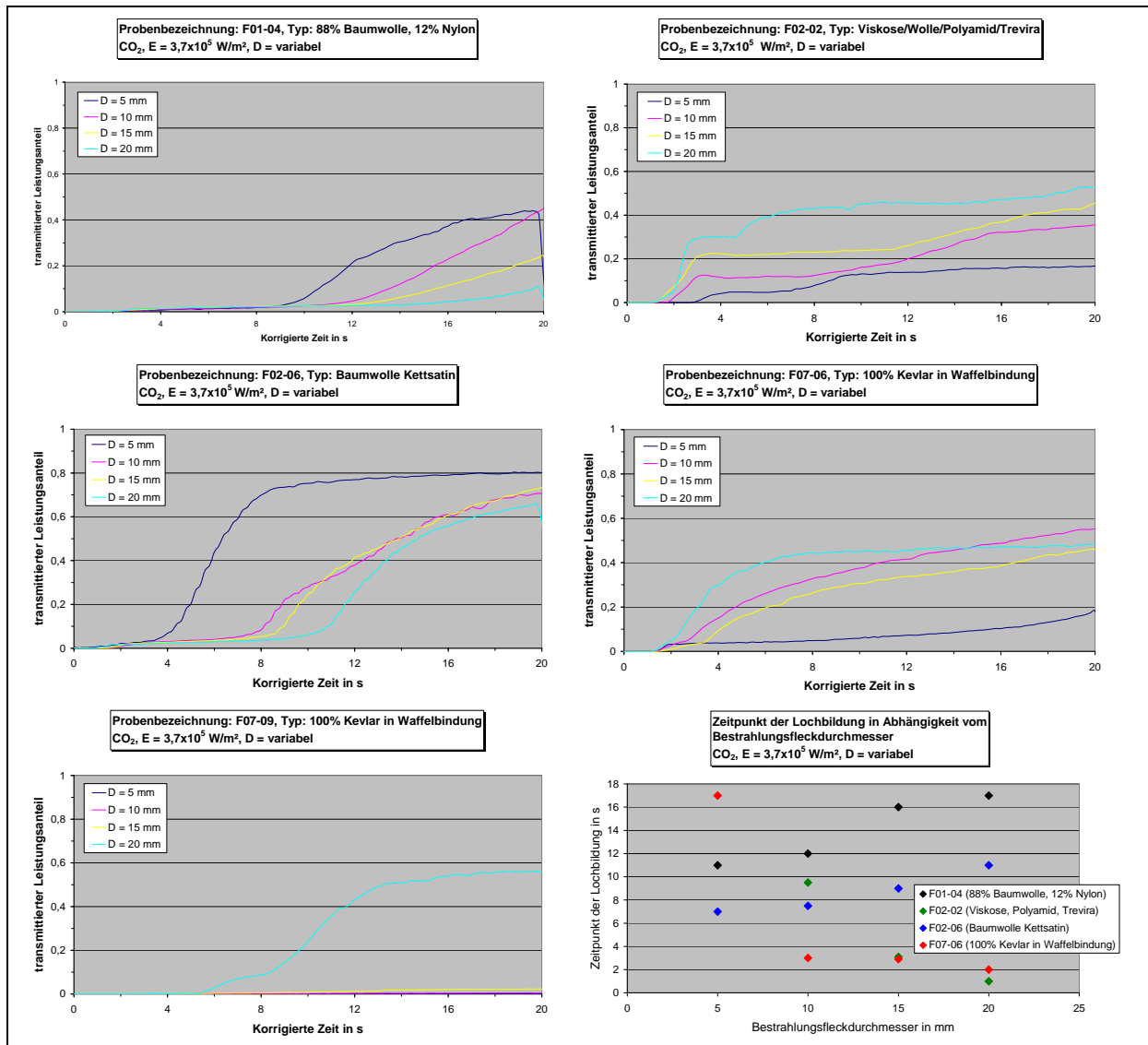


Abb. 5.16 Zeitpunkte für das Eintreten von Lochbildung für verschiedene Schutzsysteme bei CO₂-Laserbestrahlung

Gemäß thermodynamischer Grundsätze kommt es bei dünnen Werkstoffen bei ansteigender Bestrahlungsfleckgröße ($E = \text{const.}$) zu einer Behinderung der Wärmeableitung aus der Mitte des Bestrahlungsflecks zu den Seiten; hierdurch ist die Temperaturbelastung des Werkstoffs höher und die Zerstörschwelle kann eher überschritten werden. Dieses erwartete Verhalten kann bei dem hochtemperaturbeständigen Aramid-Gewebe (Kevlar® in Waffelbindung) für alle applizierten Wellenlängen beobachtet werden. Ausgeprägt ist dieses Verhalten auch bei dem aluminisierten Kevlar®-Gewebe (F07-09), jedoch wird dieses durch die minimale Lochbildung bei kleineren Bestrahlungsfleckdurchmessern im Diagramm nicht sehr deutlich; eine signifikante Lochbildung setzt bei einem Bestrahlungsfleckdurchmesser von 15 mm (Nd:YAG) bzw. 20 mm (CO₂) ein, der entsprechende im Durchmesser 5 mm kleinere Bestrahlungsfleck zeigt nur punktuelle Lochbildung (geringes Leistungssignal). Dem Übersichts-Diagramm ist zu entnehmen, dass für diese Schutzsysteme der Zeitpunkt des Eintritts für Lochbildung bei größeren Bestrahlungsfleckdurchmessern zu kürzeren Zeiten verschoben ist.

Konträr verhalten sich die Baumwoll- und Baumwollmischgewebe. Der Zeitpunkt für den Eintritt der Lochbildung verschiebt sich zu späteren Zeiten mit größeren Bestrahlungsfleckdurchmessern. Ursächlich für dieses Verhalten dürfte zum einen die Karbonisierung der Gewebe und eine damit verbundene verzögerte Lochbildung sein; zum anderen kann auch der Einfluss eines shielding-Effekts nicht ausgeschlossen werden, da bis auf das Kevlar®-Gewebe alle organischen Gewebe eine der Lochbildung zeitlich vorgelagerte deutlich frühere Flammenbildung aufweisen. Beim Kevlar®-Gewebe treten Flammen- und Lochbildung mit nur geringem zeitlichen Abstand auf.

Das untersuchte Mischgewebe auf Basis von Viskose zeigt in Abhängigkeit der eingestrahnten Wellenlänge ein unterschiedliches Verhalten. Bei CO₂-Laserbestrahlung tritt bei ansteigenden Bestrahlungsfleckdurchmessern eine frühere Lochbildung ein; wohingegen bei Nd:YAG Laserbestrahlung das früheste Versagen bei dem kleinsten Bestrahlungsfleckdurchmesser auftritt.

Die für diese Effekte verantwortlichen komplexen Vorgänge müssen unter Analyse und Einbeziehung der thermodynamischen und mechanischen Werkstoffeigenschaften im Rahmen weiterer Versuche näher untersucht werden.

5.2.4 Ergebnisse der Leistungsmessung

In Abb. 5.17 sind vergleichend ein Schutzsystem mit ausgeprägtem spektralen Transmissionsgrad und ein System mit niedrigem Transmissionsgrad gegenübergestellt. Man erkennt beim Schutzsystem F01-01 mit ausgeprägter Transmission einen sofortigen Anstieg des Signals. Kommt es in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke zur Lochbildung, sinkt das Signal auf Grund der Karbonisierung (abnehmendem Transmissionsgrad) und steigt nachfolgend auf Grund einsetzender Lochbildung stark an. Bei Schutzsystemen mit sehr geringem spektralen Transmissionsgrad steigt das Signal mit Erhöhung der Temperatur und Zunahme der Wärmestrahlung verzögert an (in erster Näherung: Wurzelfunktion; $T_{\text{Oberfl.}}(0,t) \sim \sqrt{t}$). Auch hier ist bei Einsetzen der Lochbildung ein starker Anstieg des Signals zu beobachten.

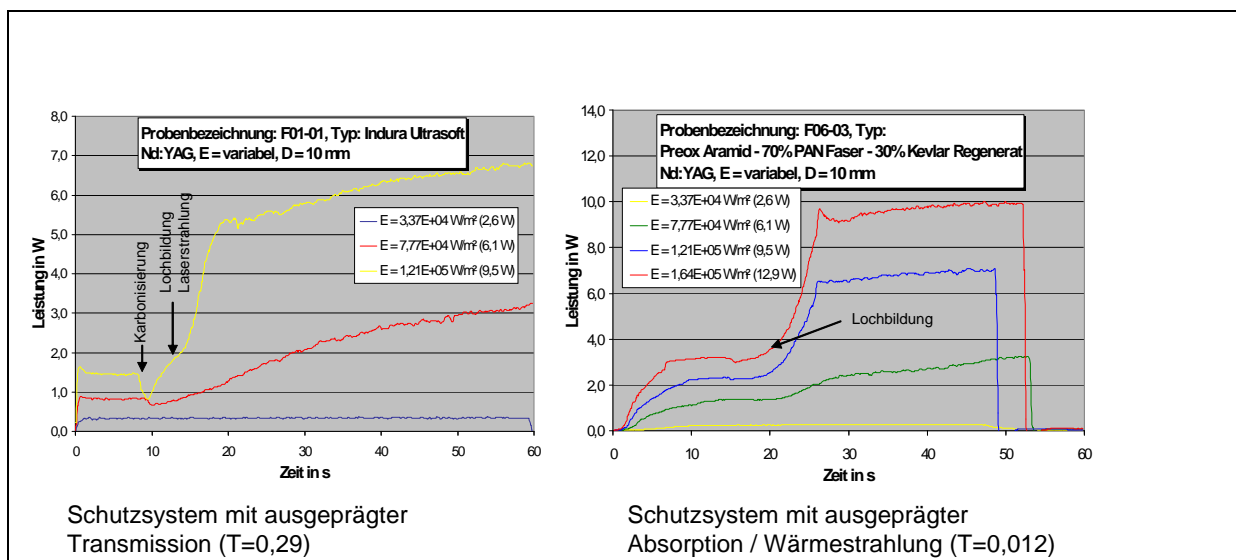


Abb. 5.17 Vergleich der Signalverläufe bei Leistungsmessungen eines Schutzsystems mit ausgeprägtem spektralem Transmissionsgrad und geringem Transmissionsgrad

Wie anhand Abb. 5.18 exemplarisch für das Schutzsystem F02-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung erkennbar ist, hängt der Zeitpunkt für das Überschreiten der Zerstörungsschwelle und der Beginn der Verkohlung und Lochbildung von der Bestrahlungsstärke ab. So setzt die Karbonisierung bei einer Bestrahlungsstärke von $2,6 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ (orange Kurve) bei 16 Sekunden ein. Dieses hat eine kurzzeitige Abnahme des spektralen Transmissionsgrades zur Folge. Nachfolgend setzt die partielle Lochbildung des Schutzsystems ein, was an der starken Zunahme der transmittierten Laserstrahlung erkennbar ist. Da der Detektor nur für eine maximale Leistung von 10 W ausgelegt ist, wurde der Laser nach ca. 35 Sekunden zum Schutz vor Überlastung (d. h. der Signalanstieg wurde begrenzt) abgeschaltet, um den Detektor nicht zu gefährden. Die gemessenen Transmissionswerte der ersten 10 bis 15 Sekunden korrelieren mit dem spektralen Transmissionsgrad (Kleinsignal-Messung) des Schutzsystems von $T = 0,14$ unter Berücksichtigung des begrenztem Empfangswinkels des Detektors (der Detektor wird unter dem Schutzsystem platziert ohne Einsatz einer Integratoroptik). Auch korrelieren die Zeitpunkte der Lochbildung mit der visuellen Bewertung des Schutzsystems in Abb. 5.12.

Im Vergleich zum Schutzsystem F02-01 transmittiert das aus hochtemperaturbeständigem Glasgewebe bestehende Schutzsystem F07-01 Nd:YAG-Laserstrahlung nur gering ($T < 10^{-3}$). Die Signale steigen verzögert bis auf einen von der Bestrahlungsstärke abhängigen Grenzwert (Gleichgewichtszustand) asymptotisch an. Die gemessenen Signale (hier ohne Lochbildung im betrachteten Zeitraum) repräsentieren den vom Detektor empfangenen Wärmestrahlungsanteil. Dieses korreliert mit der visuellen Bewertung in Abb. 5.12.

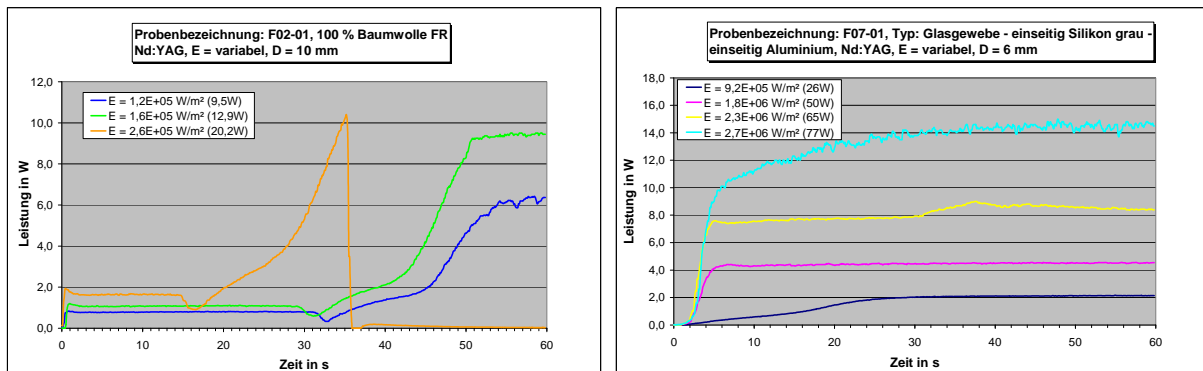


Abb. 5.18 Leistungsmessungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 mit Nd:YAG-Laserstrahlung

Wie anhand Abb. 5.18 erkennbar ist, steigt bei Bestrahlung des Schutzsystems F02-01 mit CO_2 -Laserstrahlung die transmittierte Leistung nach ca. 10 Sekunden steil an. Dieses bedeutet, dass die Zerstörung des Schutzsystems mit beginnender Lochbildung einsetzt. Nach dem steilen Anstieg bleibt die transmittierte Leistung nahezu konstant. Abzüglich von absorbierten Laserstrahlungsanteilen im Randbereich des Loches entspricht diese Leistung der gesamten eingestrahlt Laserleistung. Um den Detektor nicht zu gefährden, wurde der Laser nach ungefähr 50 Sekunden abgeschaltet. Mittels eines Vergleichs dieser Messung mit Abb. 5.13 (Visuelle Bewertung des Schutzsystems F02-01) ist eine Korrelation des Zeitpunktes der Lochbildung erkennbar.

Im Vergleich ist bei Bestrahlung des Schutzsystems F07-01 mit CO₂-Laserstrahlung aus dem Signalverlauf abzuleiten, dass es sich bei den gemessenen Strahlungsanteilen um Wärmestrahlung handelt. Dieses korreliert mit der Kleinsignaltransmission (Transmissionsgrad unterhalb der Nachweisgrenze; $T < 10^{-5}$) und der visuellen Bewertung in Abb. 5.13.

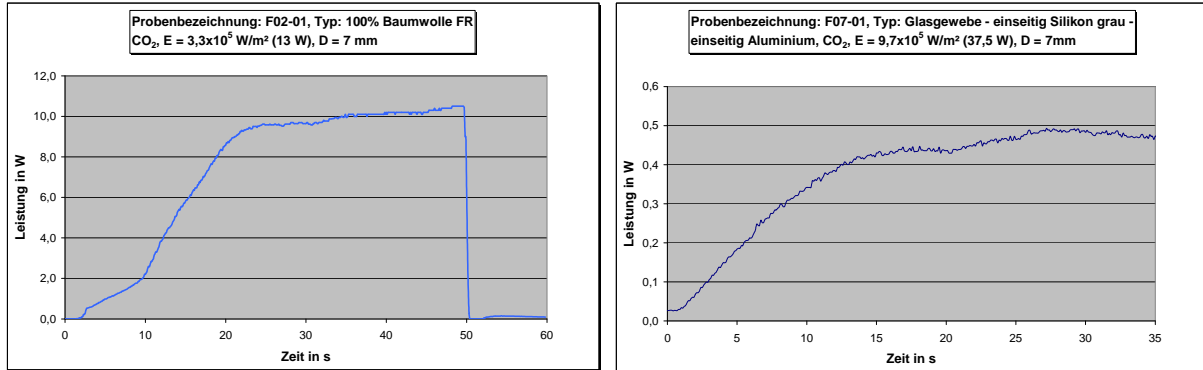


Abb. 5.19 Leistungsmessungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 mit CO₂-Laserstrahlung

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.

Wie anhand von Abb. 5.20 zu erkennen ist, setzt eine Lochbildung bei einer Bestrahlungsstärke von $1,6 \cdot 10^5$ W/m² bei ca. 25 Sekunden ein. Dieses korreliert mit der visuellen Bewertung des Schutzsystems.

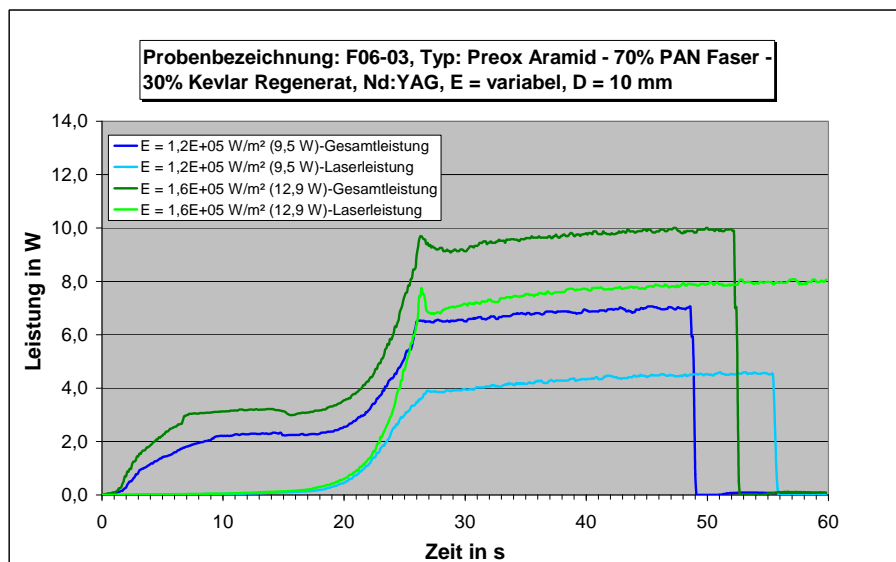


Abb. 5.20 Trennung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung des Schutzsystems F06-03 mit Nd:YAG-Laserstrahlung

Um dieselbe Trennung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung bei CO₂-Laserstrahlung zu erreichen, wird ein Saphir-Kristall vor dem Detektor platziert, um den Anteil der transmittierten Laserstrahlung zu absorbieren, sodass er nicht vom Detektor erfasst wird.

Abb. 5.21 veranschaulicht, dass bei Bestrahlung des Schutzsystems F02-01 die Wärmestrahlung bis zum Einsetzen der Lochbildung nach ca. 12 Sekunden den größten Anteil der transmittierten Leistung darstellt. Dieses korreliert mit dem Kriterium der Lochbildung im Rahmen der visuellen Bewertung in Abb. 5.13. Nach der Zerstörung des Schutzsystems nimmt die Wärmestrahlung stark ab, während der Anteil der transmittierten Laserleistung auf Grund von Lochbildung größer wird. Nach ungefähr 30 Sekunden ist der Anteil der Wärmestrahlung vernachlässigbar. Somit ist nur noch die transmittierte Laserstrahlung relevant.

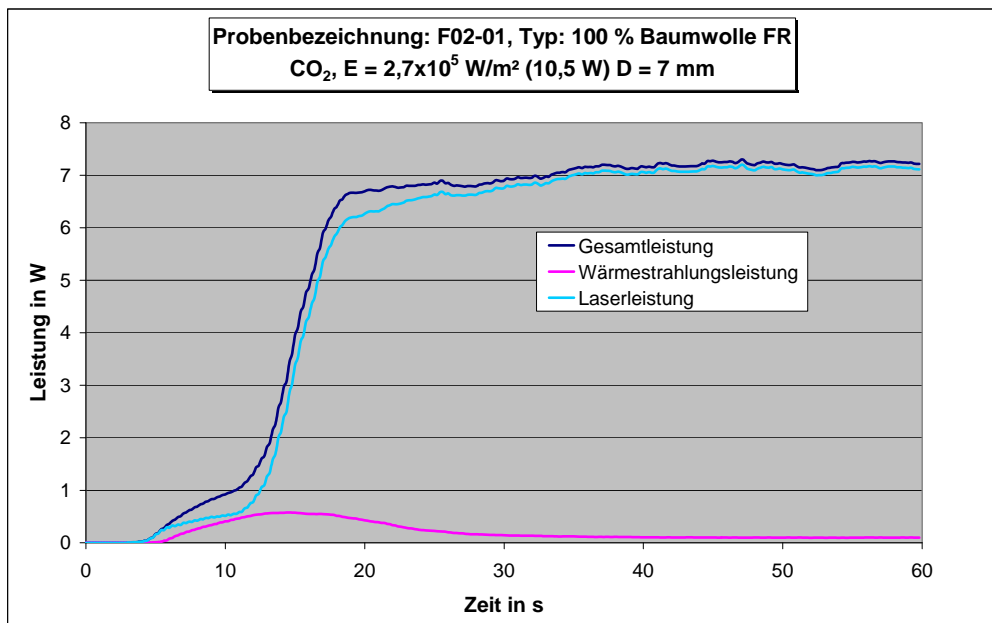


Abb. 5.21 Trennung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung des Schutzsystems F02-01 mit CO₂-Laserstrahlung

5.2.5 Ergebnisse der kalorimetrischen Bewertung

Vorangestelltes Ziel der kalorimetrischen Untersuchungen ist die Adaption des Kalorimeters für Messungen der Einwirkenergie bei Bestrahlungen von Schutzsystemen mit Lasern und die Qualifizierung der Prüfmethdik.

Im Folgenden sind die Ergebnisse dieser Versuche dargestellt.

Zu differenzieren sind bei der Bewertung des Messsignals vom Kalorimeter zwei Bedingungen:

- Schutzsysteme mit relevanter Transmission für die eingestrahlte Wellenlänge der Laserstrahlung (d. h. transmittierte Laserstrahlungsanteile treffen auf das Kalorimeter),
- Schutzsysteme mit sehr geringer Transmission ($T \approx 10^{-4}$).

Für die Berücksichtigung der ersten Messbedingung wurde das Kalorimeter bezüglich auftreffender Laserstrahlung kalibriert (Abb. 5.22).

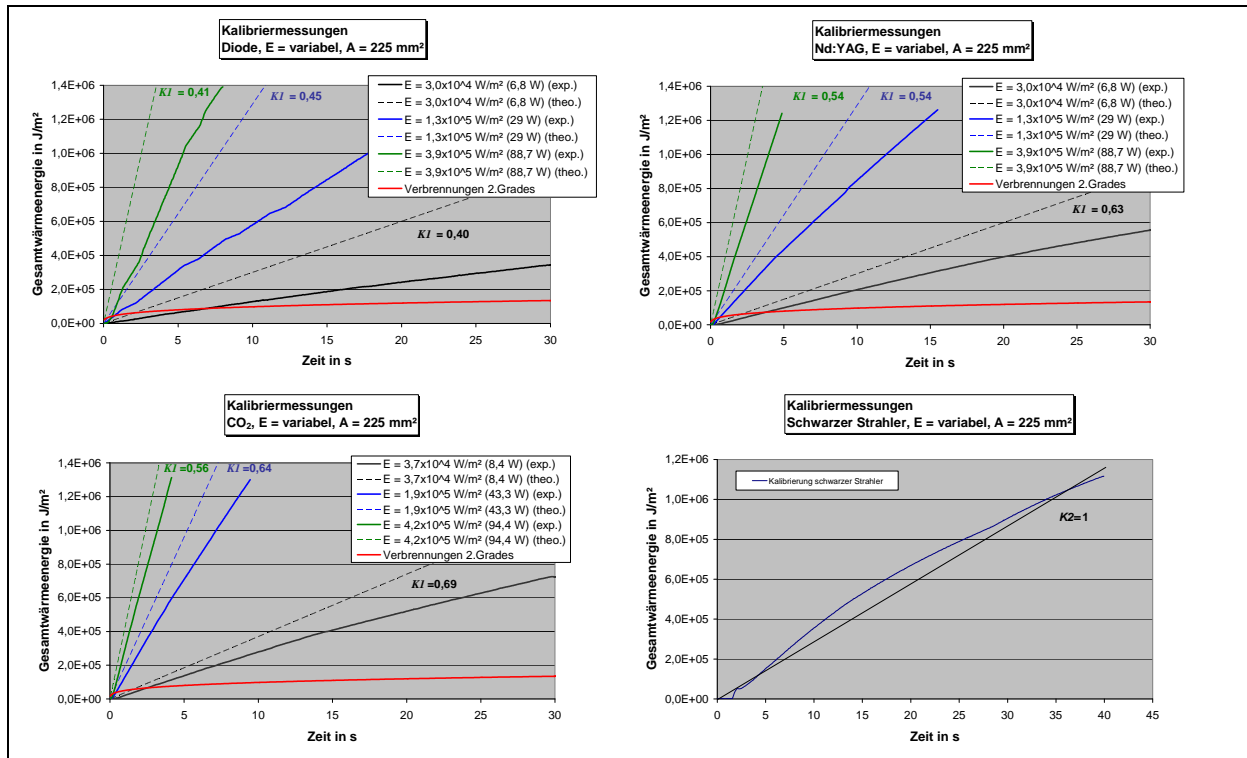


Abb. 5.22 Kalibration des Kalorimeters (hier dargestellt bis $E \approx 4 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$)

Hieraus ergibt sich ein anzusetzender Korrekturfaktor, der von der eingestrahelten Wellenlänge und von der Bestrahlungsstärke abhängig ist (Abb. 5.23).

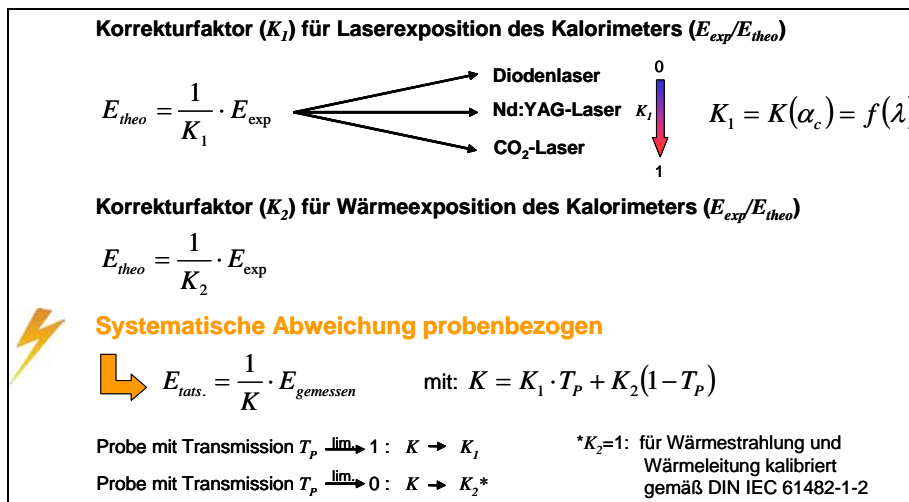


Abb. 5.23 Korrekturfaktor für Laserexposition des Kalorimeters

Dieses bedeutet, dass in Abhängigkeit des spektralen Transmissionsgrades des Schutzsystems für die eingestrahelte Wellenlänge der Laserstrahlung das Messsignal des Kalorimeters (Einwirkenergie) korrigiert werden muss.

Unter Berücksichtigung der im Abschnitt 5.1 dargestellten Ergebnisse zum spektralen Transmissionsgrad ist dieses insbesondere für Dioden- und Nd:YAG-Laserstrahlung (im Vergl. zu CO₂-Laserstrahlung) für Schutzsysteme mit hohem spektralen Transmissionsgrad ($T \geq 0,1$) relevant.

Im Folgenden sind zur Veranschaulichung des Korrekturbereiches Beispiele für verschiedene Schutzsysteme bei Nd:YAG-Laserstrahlung gegeben (Abb. 5.24).

Beispielrechnungen

Systematische Abweichung probenbezogen

↳ $E_{tats.} = \frac{1}{K} \cdot E_{gemessen}$ mit: $K = K_1 \cdot T_p + K_2(1 - T_p)$

Probe mit Transmission $T_p \xrightarrow{\text{lim}} 1$: $K \rightarrow K_1$ * $K_2=1$: für Wärmestrahlung und Wärmeleitung kalibriert gemäß DIN IEC 61482-1-2

Probe mit Transmission $T_p \xrightarrow{\text{lim}} 0$: $K \rightarrow K_2^*$

Beispiel 1: F02-05; Nd:YAG: $\rightarrow T_p = 0,35$ $K = 0,55 \cdot 0,35 + 1(1 - 0,35)$
 $K = 0,1925 + 0,65$
 $K = 0,8425$
 $\rightarrow E_{tats.} = 1,187 E_{gemessen}$

Beispiel 2: F02-07; Nd:YAG: $\rightarrow T_p = 5 \cdot 10^{-4}$ $K = 0,55 \cdot 0,0005 + 1(1 - 0,0005)$
 $K = 0,000275 + 0,9995$
 $K = 0,999775$
 $\rightarrow E_{tats.} = 1,000225 E_{gemessen}$

Abb. 5.24 Beispiele für den Korrekturbereich

Der maximale Fehler beträgt bei dem Schutzsystem F02-05, das für Nd:YAG-Laserstrahlung den höchsten spektralen Transmissionsgrad aufweist, um 19 %.

Um das Messverhalten zu bewerten, werden anhand von Abb. 5.25 und Abb. 5.26 die Graphen für die Einwirkenergie erläutert.

In Abb. 5.25 sind zum Vergleich der Graph der Einwirkenergie bei Bestrahlung des Schutzsystems F02-01 mit CO₂- bzw. Nd:YAG-Laserstrahlung sowie die Kalibrierkurven für die betreffende Bestrahlungsstärke, die ohne Schutzsystem gemessen wurden, dargestellt. Das Schutzsystem weist in dem betrachteten Zeitbereich keine Lochbildung auf. Der Bereich von $t = 0$ s bis $t = 1,5$ s ist durch einen steileren Anstieg des Signals bei Nd:YAG-Laserbestrahlung gekennzeichnet. Ursächlich hierfür ist die mit Bestrahlungsbeginn im Vergleich zu CO₂-Laserbestrahlung höhere Transmission des Schutzsystems. Die bei CO₂-Laserbestrahlung vom Schutzsystem absorbierte Energie wird nur verzögert durch Wärmestrahlung und Wärmeleitung an das Kalorimeter weitergegeben. Hieraus resultiert ein verzögerter Anstieg des Signals.*

* Zu beachten ist bei nicht zu vernachlässigender Kleinsignaltransmission die Einkopplung der Laserstrahlung (Absorptionsgrad $A < 1$) in das Kalorimeter und die demzufolge berechneten Wärmestromdichten und Einwirkenergien (Absorptionsgrad des Kalorimeters für Laserstrahlung ist bei $\lambda = 1.064$ nm -Nd:YAG-Laser- kleiner als bei $\lambda = 10.600$ nm -CO₂-Laser-).

Die geringeren Steigungen der Graphen bei realer Bestrahlung der Schutzsysteme gegenüber den Kalibrierkurven des Kalorimeters verdeutlichen, dass durch Absorption der Laserstrahlung und Anstieg der Temperatur im Schutzsystem nur ein Teil der Energie (Wärmeleitungs- bzw. Wärmestrahlungsanteile) an das Kalorimeter geleitet wird. Da das Schutzsystem Wärmestrahlung in alle Raumrichtungen abstrahlt, werden diskrete Anteile vom Kalorimeter nicht erfasst.

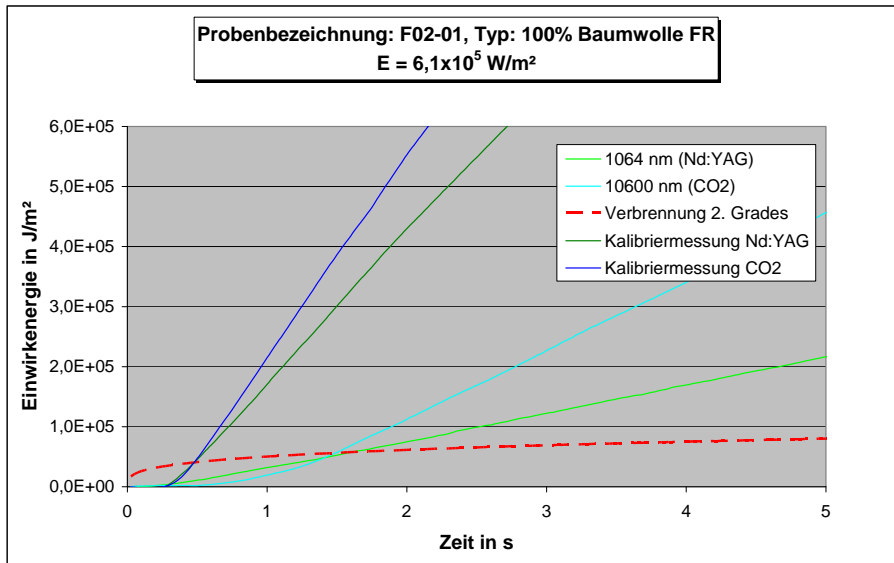


Abb. 5.25 Vergleich der Kalibriermessungen des Kalorimeters mit den Ergebnissen der Realbestrahlung des Schutzsystems F02-01 bei CO₂- und Nd:YAG-Laserbestrahlung

Wie am Beispiel des Schutzsystems F02-04 veranschaulicht, ist eine Lochbildung durch ein im Rahmen der Messgenauigkeit asymptotisches Verhalten des Graphs bei Bestrahlung des Schutzsystems gegenüber der Kalibriermessung bei der jeweiligen Bestrahlungsstärke zu erkennen (Abb. 5.26) (blaue Kurve: Kalibriermessung bei $E = 1,3 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$; grüne Kurve: Realbestrahlung des Schutzsystems bei $E = 1,3 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$). Die Lochbildung tritt nach ca. 4,5 Sekunden ein.

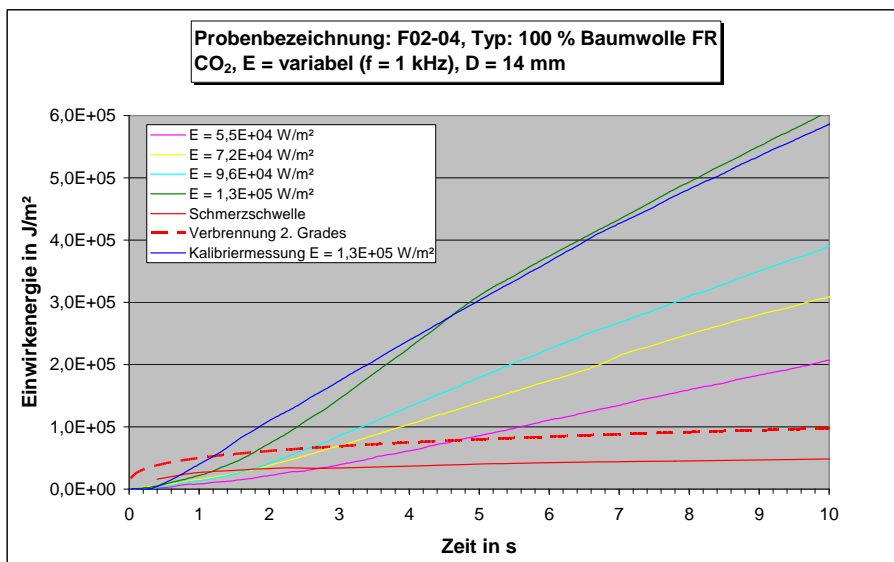


Abb. 5.26 Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-04 bei CO₂-Laserbestrahlung (Eintritt von Lochbildung)

In Abschnitt 6.2 erfolgt unter Berücksichtigung des Stoll/Chianta-Kriteriums und der Reflexzeiten für das Wegziehen der Extremität aus dem Gefahrenbereich die Bewertung. Anhang 4 zeigt eine Übersicht über die Toleranzzeiten der Schutzsysteme.

6 Bewertung der Ergebnisse

6.1 Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung

6.1.1 Transmission von Laserstrahlung

Anhand der Kleinsignal-Transmissionsmessungen konnte aufgezeigt werden, dass der spektrale Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Wellenlänge der auftreffenden Laserstrahlung sowie der optischen Eigenschaften der untersuchten Schutzsysteme um mehrere Größenordnungen differieren kann. Hinsichtlich eines geringen Transmissionsgrades wirken sich folgende Eigenschaften des Schutzsystems günstig aus:

- hohe Flächenmasse
- dichte Webart
- Beschichten des Gewebes (z. B. Aluminisieren)
- Folieren/Kaschieren des Gewebes mit metallischen oder synthetischen Stoffen.

Der spektrale Transmissionsgrad eines Schutzsystems für die entsprechende auftreffende Laserstrahlung bestimmt die unmittelbare Gefährdung der direkt unter dem Schutzsystem liegenden Haut. Um das damit verbundene Risiko zu beurteilen, müssen die von dem Schutzsystem transmittierten und auf die Haut treffenden Strahlungsanteile den MZB_{Haut} -Werten gem. DIN EN 60825-1 gegenübergestellt werden. Im Folgenden soll exemplarisch für Laserstrahlung der Wellenlänge 1064 nm dieser Vergleich angestellt werden.

Die untersuchten textilen Schutzsysteme auf Baumwollbasis (F01-01 bis F02-06) weisen für eine Wellenlänge von 1064 nm (Nd:YAG-Laser) spektrale Transmissionsgrade von bis zu 35 % ($T = 0,35$) auf. Dieses bedeutet, dass bei Bestrahlungsstärken oberhalb $1,6 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ für die unter der Oberbekleidung befindliche Haut an Armen der Grenzwert MZB_{Haut} ($5,5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$, angenommene Einwirkdauer: 1 s; gem. DIN EN 60825) überschritten werden kann.

Für eine beispielhafte Betrachtung eines HLGs mit einer mittleren Ausgangsleistung von $P_m = 2.000 \text{ W}$ (cw, $\lambda = 1064 \text{ nm}$, $d_{\text{kol}} = 20 \text{ mm}$) würde dieses bei einer angenommenen Exposition gegenüber dem direkten Laserstrahl Grenzwertüberschreitungen in Abhängigkeit der verwendeten Brennweite der Fokussieroptik für folgende Körperteile (bzw. für Abstände zur Fokusebene) zur Folge haben.

- Brennweite = 60 mm → Unterarm (gefährlicher Abstand $D \leq 300 \text{ mm}$)
- Brennweite = 100 mm → Oberschenkel (gefährlicher Abstand $D \leq 600 \text{ mm}$)
- Brennweite = 150 mm → Kopf (gefährlicher Abstand $D \leq 700 \text{ mm}$)
- Brennweite = 200 mm → Fuß (gefährlicher Abstand $D \leq 1.100 \text{ mm}$)

6.1.2 Versagensmechanismen der Schutzsysteme

In Abb. 6.1 ist das zeitliche Signal des Leistungsmessgerätes wiedergegeben. Zu erkennen sind bei den Proben, die einen niedrigen spektralen Transmissionsgrad aufweisen und die oberhalb einer bestimmten Bestrahlungsstärke durch Lochbildung zerstört werden (hier repräsentiert durch den roten u. blauen Graph), 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. Irreversible Werkstoffveränderungen beginnen bereits in diesem Bereich.
- Bereich 3: Bei Bereich 3 handelt es sich um einen Übergangsbereich. Die Zerstörungsschwelle des Schutzsystems ist überschritten, es tritt beginnende Lochbildung auf. Das Signal 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.

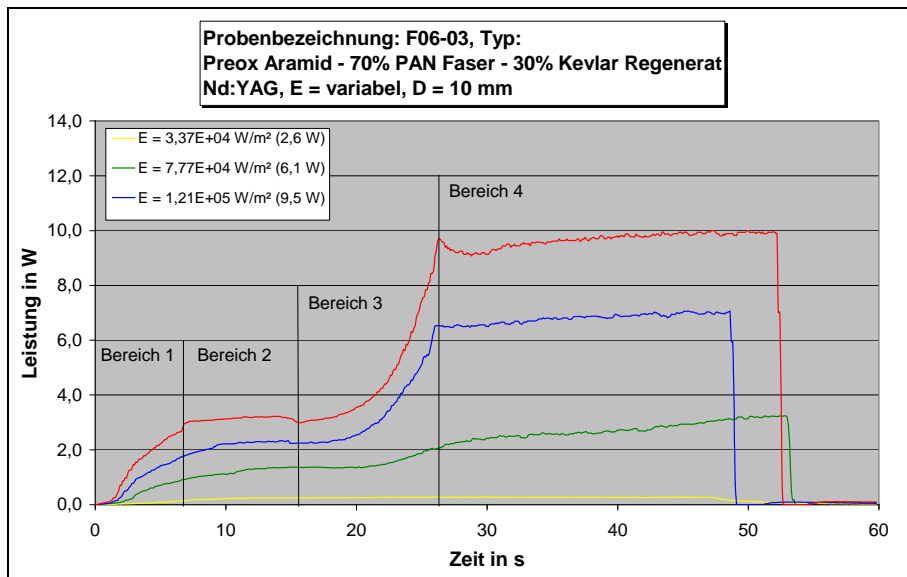


Abb. 6.1 Zeitliches Signal des Leistungsmessgerätes bei Nd:YAG-Laserbestrahlung des Schutzsystems F06-03

Diese Bereichseinteilung korreliert mit den Ergebnissen der Kalorimetrie (s. a. Abschnitt 6.2). Berücksichtigt werden muss hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Daten, dass ein konstanter Verlauf der Kurve ($E = const$) bei Angabe leistungsbezogener Daten (Abb. 6.1) bei der Angabe energiebezogener Daten mit einer linearen Steigung ($\Delta H/\Delta t = const.$) korreliert.

Wie anhand der Abb. 6.2 deutlich wird, kann auch hier diese Bereichseinteilung vorgenommen werden, die bei der Bestrahlung von Leder mit Nd:YAG-Laserstrahlung beobachtet werden kann. Bei der überwiegenden Anzahl der untersuchten textilen Flächengebilde „verschwimmen“ die Übergänge der einzelnen Bereiche auf Grund der Trägheit des Messsystems. Eine Trennung der verschiedenen Strahlungsanteile (Laserstrahlung, Wärmestrahlung) und übertragenden Energie (Wärmeleitung) ist bei diesem Messprinzip nicht möglich.

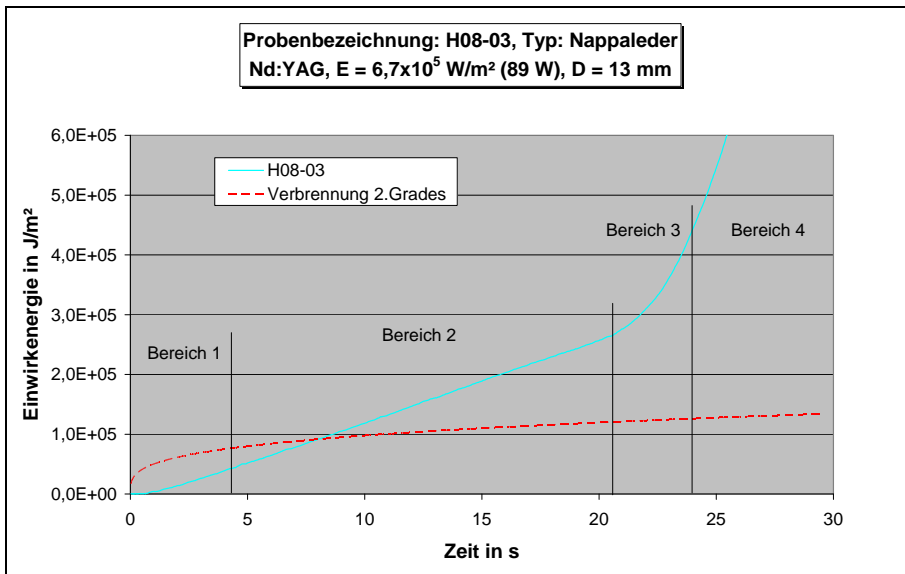


Abb. 6.2 Zeitliches Signal des Kalorimeters bei Nd:YAG-Laserbestrahlung von Nappaleder

Generell lässt sich das Verhalten der Schutzsysteme und der physikalischen Wechselwirkungen mit der Haut anhand von zwei idealisierten Verhaltenstypen beschreiben (Abb. 6.3):

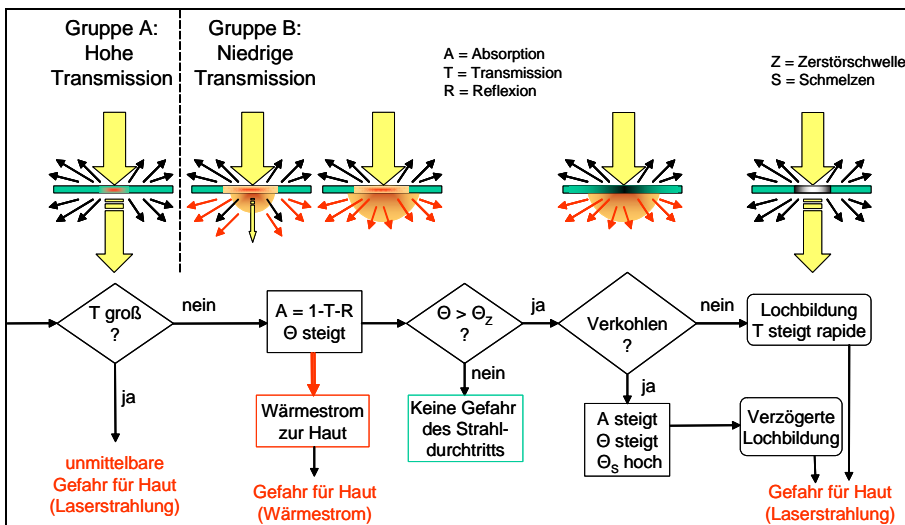


Abb. 6.3 Schematische Darstellung des Verhaltens von Schutzsystemen

a) Gruppe A: Laserstrahlungsemission

Bei entsprechend hoher Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung kommt es zur unmittelbaren Exposition der Haut gegenüber Laserstrahlung. Die Energie der Laserstrahlung wird in Abhängigkeit der optischen Eigenschaften der Haut gemäß dem Lambert-Beerschen-Gesetz absorbiert. Das Wirkungsspektrum von Laserstrahlung im betrachteten Spektralbereich von NIR bis MIR Strahlung ist thermischer Art. Dieses bedeutet, dass die absorbierte Laserstrahlung zu einem lokalen Wärmeintrag mit Temperaturerhöhung der Haut führt. NIR bis MIR-Strahlung dringt in Abhängigkeit der Wellenlänge (λ) unterschiedlich tief in die Haut ein; ($\lambda = 1 \mu\text{m} \rightarrow 1 \text{mm}$)

Tiefe -Subcutis; $\lambda > 3 \mu\text{m}$ → einige $10 \mu\text{m}$ Tiefe -Stratum Corneum/Epidermis). Ausgehend von der direkten Strahl-/Gewebe-Wechselwirkungszone wird die Wärme durch Wärmeleitung in umliegendes Gewebe übertragen (SUTTER, 2002; SLINEY et al., 1980).

Unterschieden werden hinsichtlich der Laserbestrahlung „Kurzzeitbestrahlung“ und „Langzeitbestrahlung“. Bei einer kurzzeitigen Bestrahlung tritt eine lokale Erwärmung der Haut in der Wechselwirkungszone auf, wobei Energie in Form von Wärmeleitung in unmittelbar benachbartes Gewebe abfließt.

Bei einer Langzeitexposition bei niedrigen Bestrahlungsstärken werden Einflüsse des Blutkreislaufs auf die Wärmeleitung und Wärmeabfuhr relevant. Dieses bedeutet, dass Energie über das Blut abtransportiert wird und somit die Temperaturerhöhung durch die Durchblutung und Wärmeabfuhr begrenzt wird. Bei Langzeitexpositionen ist die Eindringtiefe des Temperatenausgleichs eine Funktion der Bestrahlungsdauer.

Schlussfolgerung

→ Für die betrachteten unbeabsichtigten Expositionen der PSA in Fehlerfällen und den Reflexzeiten bis zum Entfernen des bestrahlten Körperteils ist bezüglich der Einwirkdauern von Kurzzeitbestrahlung auszugehen. Für die Beurteilung des Eintritts von Schädigungen der Haut durch Laserstrahlungsexposition sind die Maximal zulässigen Bestrahlungen (MZB_{Haut} -Werte) gemäß der technischen Norm DIN EN 60825-1 zu Grunde zu legen.

b) Gruppe B: Wärmeübertragung

Bei ausgeprägt niedriger Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung wird ein erhöhter Anteil der Laserstrahlung von dem Schutzsystem (PSA) absorbiert (abzüglich der Remission $A = 1 - T - R$). Dieses führt zu einem Wärmeeintrag mit Temperaturerhöhung im Schutzsystem.

Entscheidend für das Verhalten des Schutzsystems in Abhängigkeit der Bestrahlungsstärke und -dauer sind seine thermisch-physikalischen Eigenschaften (u. a. Zerstörschwelle). Wird die Zerstörschwelle des Schutzsystems nicht überschritten, so werden Anteile der vom Schutzsystem absorbierten Energie durch Wärmeübertragung an die Haut geleitet.

Eine Überschreitung der Zerstörschwelle des Schutzsystems führt zu einer irreversiblen Veränderung der mechanischen und optischen Eigenschaften des Werkstoffs. Zu unterscheiden sind Schutzsysteme, bei denen es auf Grund von Karbonisierung in der Wechselwirkungszone temporär zu einem Anstieg der Absorption mit nachfolgender Lochbildung kommt, und Systeme, bei denen die Lochbildung direkt einsetzt. Mit Beginn der Lochbildung steigt die Exposition der hinter dem Schutzsystem befindlichen Haut stark an. In den meisten Fällen werden die MZB_{Haut} -Werte kurzzeitig nach Einsetzen der Lochbildung überschritten.

Die Temperaturerhöhung des Schutzsystems durch Laserstrahlung wird über verschiedene Wärmeübertragungsarten, d. h. Wärmeleitung sowie Wärmestrahlung (und Konvektion*), an die unmittelbare Umgebung, und somit auch an die in Kontakt mit dem Schutzsystem oder in geringem Abstand zum Schutzsystem befindliche Haut abgegeben. Die Wärmeübertragung ist irreversibel und findet dabei immer vom höheren Energieniveau auf das niedrigere statt, d. h. vom Schutzsystem auf die menschliche Haut. Bewertet man die Wärmemenge auf die Fläche, durch die sie transportiert wird, so spricht man von Wärmestromdichte (W/m^2).

*Durch *Konvektion* wird thermodynamisch gesehen nur innere Energie oder Enthalpie übertragen, indem Atome oder Moleküle gasförmiger oder flüssiger Materialien sich bewegen.

Bei der Wärmeleitung findet zwischen Festkörpern und Fluiden ein Wärmefluss infolge von Temperaturunterschieden statt. Die quantitative Beschreibung der Wärmeleitung erfolgt durch das Fourier'sche Grundgesetz des molekularen Wärmetransports mit dem Temperaturgradienten:

$$\text{Formel 1: } j_q = -\lambda \text{ grad } \vartheta \quad (6.1)$$

mit

j_q = Wärmestromdichte

λ = Wärmeleitfähigkeit

$\text{grad } \vartheta$ = Temperaturgradient

Die Wärmestromdichte j_q entspricht der in der Zeit δ_t transportierten Wärmemenge δ_Q durch eine Fläche A . Der Proportionalitätsfaktor λ ist die Wärmeleitfähigkeit, die angibt, wie viel Wärme pro Sekunde durch ein Volumen von einem Kubikmeter pro Kelvin Temperaturunterschied fließt.

Bei dielektrischen Festkörpern findet die Wärmeleitung durch das Übertragen von kinetischer Energie beim Zusammenstoßen von Molekülen und Atom statt. Dabei übertragen Moleküle mit kinetisch höherer Energie einen Teil ihrer Energie auf benachbarte Moleküle mit geringerer kinetischer Energie.

Die Wärmestrahlung ist Teil des elektromagnetischen Spektrums, die ein Körper abhängig von seiner Temperatur emittiert. Der Wellenlängenbereich der Wärmestrahlung beträgt $0,8 \mu\text{m} - 100 \mu\text{m}$. Mit zunehmender Temperatur wächst die Intensität der Wärmestrahlung stark an (Stefan-Boltzmann-Gesetz), und das Emissionsmaximum verschiebt sich zu kürzeren Wellenlängen (Wiensches Verschiebungsgesetz). Einen starken Einfluss auf die abgestrahlte Intensität hat die Oberflächenbeschaffenheit des Körpers und die Größe. Wärmestrahler werden abhängig von ihren Strahlungseigenschaften in ideale Strahler (schwarze Strahler) und reale Strahler (graue Strahler) eingeteilt. Graue Strahler sind Körper, deren Absorptionsgrad kleiner dem eines schwarzen Strahlers (< 1) ist.

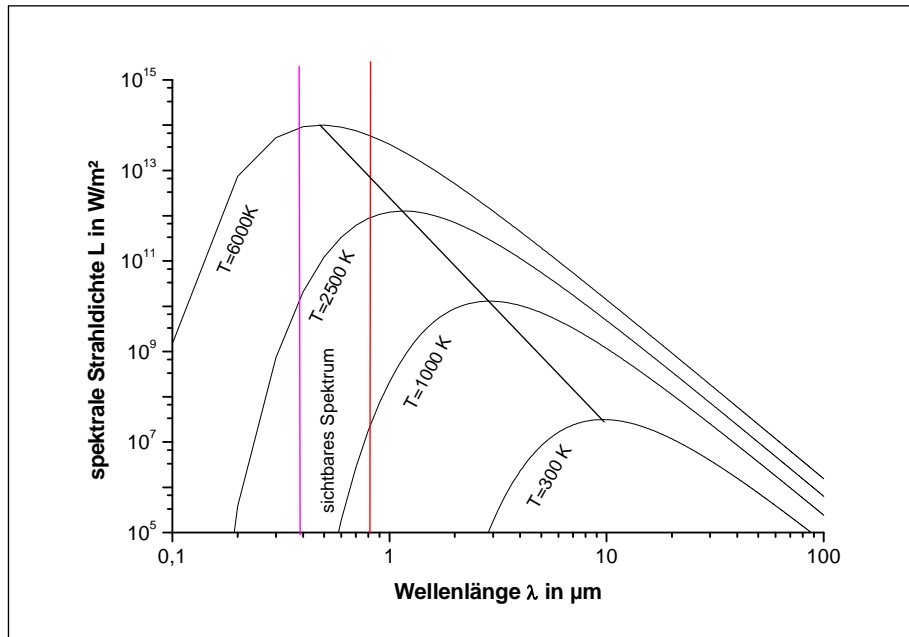


Abb. 6.4 Spektrale Strahldichte eines schwarzen Strahlers

Alle untersuchten Schutzsysteme können der Gruppe der realen Strahler (graue Strahler) zugeordnet werden.

Das Stefan-Boltzmann-Gesetz sagt aus, dass die Lichtemission eines Strahlers eine Funktion der Temperatur ist. Dabei ist die spezifische Ausstrahlung eines schwarzen Strahlers proportional der vierten Potenz der Temperatur.

$$\text{Formel 2: } M_e = \sigma \cdot T^4 \quad (6.2)$$

mit der Stefan-Boltzmann-Konstante $\sigma = 5,670 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$.

Mit dem Wienschen Verschiebungsgesetz kann aus der Lage des Maximums der Wellenlänge die Temperatur λ_{max} bestimmt werden.

$$\text{Formel 3: } \lambda_{\text{max}} \cdot T = \text{const} \quad (6.3)$$

Wie der Abb. 6.4 entnommen werden kann, ist der Temperaturverlauf umso flacher, je größer die Wellenlänge ist; im Gegensatz zum steilen Anstieg auf der kurzwelligen Seite. Das Maximum der Kurve verschiebt sich mit steigender Temperatur zum kurzwelligen Bereich.

Der Wärmetransport durch Konvektion zeichnet sich durch die Übertragung der Wärmeenergie mittels Teilchenbewegung aus. Sie findet nur in Fluiden statt. Für den hier betrachteten Fall der Übertragung der Wärme von dem Schutzsystem zur darunterliegenden Haut kann der Wärmetransport durch Konvektion gegenüber den zuvor genannten Wärmetransportarten vernachlässigt werden.

6.2 Kalorimetrische Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des Stoll/Chianta-Kriteriums

Gegenstand dieses Abschnitts ist die Beschreibung des Stoll/Chianta-Kriteriums für Verbrennungen der Haut und des menschlichen Reflexverhaltens bei Hitze-einwirkung. Die mit Hilfe der kalorimetrischen Messungen erzielten Ergebnisse werden unter Berücksichtigung des Stoll/Chianta-Kriteriums und der Reflexzeiten bewertet.

6.2.1 Schädigungsgrenzen nach dem Stoll/Chianta-Kriterium

Kontinuierliche Strahleinwirkung über längere Zeiträume (d. h. die biologischen Zeitkonstanten liegen im Bereich des betrachteten Einwirkzeitraumes) verursacht im Gewebe bei stationären Zuständen - von Energiezufuhr und Energieableitung - eine Temperaturerhöhung, die proportional der eingestrahelten Leistung und umgekehrt proportional der Wärmeleitung ist. In der folgenden Tabelle sind die Schädigungen menschlichen Gewebes in Abhängigkeit der Gewebetemperatur dargestellt.

Tab. 6.1 Schädigungen menschlichen Gewebes in Abhängigkeit der Gewebetemperatur (Gefahren bei Laseranwendungen an menschlicher Haut, Strahlenschutzkommission Bonn, 2000)

Reaktion des Gewebes	Gewebetemperatur
Enzymatische Veränderungen	40 °C - 50 °C
Proteindenaturierung, Koagulation	60 °C - 65 °C
Kollagendenaturierung	80 °C
Gewebeaustrocknung	90 °C - 100 °C
Verkohlung/Karbonisierung	> 300 °C

Für Kurzzeitbestrahlung ist das Kriterium „Zeit zur Flucht/Zeit zum Wegziehen“ bzw. die „Expositionsbegrenzung“ entscheidend. Einflussgröße ist zum einen die Schädigungsgrenze der Haut; zum anderen sind bei Abschirmung der Haut durch Schutzbekleidung Wärmeübertragungs-Prozesse vom Schutzsystem zur Haut bestimmend.

Die thermische Schädigung der Haut bis zur vollständigen Epidermisnekrose lässt sich gemäß Henriques und Moritz empirisch durch die Temperatur-Zeit-Funktion beschreiben (HENRIQUES, 1947) (Abb. 6.5).

Formel 4:
$$\Omega = 1.0 = \int_0^t \frac{d\Omega}{dt} dt = \int_0^t P e^{-(\Delta E / RT_x)} dt \quad (6.4)$$

mit:

$d\Omega/dt$ = Schädigungsrate

t = Zeit in Sekunden

P = Integrationskonstante (resultierend aus experimentellen Untersuchungen)

R = Gaskonstante

ΔE = Inaktivierungsenergie (resultierend aus experimentellen Untersuchungen)

T_x = Gewebetemperatur (Basalschicht*) zurzeit t

* unterste Schicht der Epidermis

$\Omega = 1,0$ entspricht dabei einer vollständigen Nekrose der Epidermis (HENRIQUES, 1947).

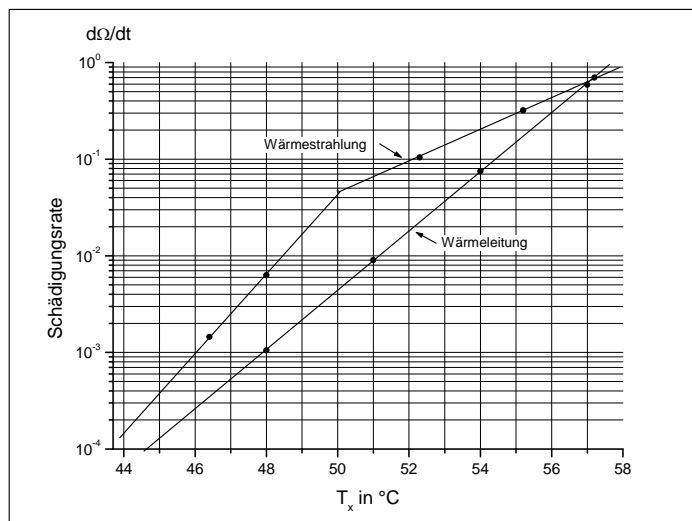


Abb. 6.5 Vergleich der Schädigungsraten bei Wärmeleitung und Wärmestrahlung in Abhängigkeit der Hauttemperatur (HENRIQUES, 1947)

Stoll und Chianta haben diese Modelle in den 60er Jahren vor dem Hintergrund der Bewertung von persönlicher Schutzbekleidung gegenüber thermischen Belastungen weiterentwickelt. Entscheidend für die Schädigungsrate des menschlichen Gewebes ist die maximale Temperatur des menschlichen Gewebes. Folgende Postulate werden von Stoll gemacht:

- Temperaturerhöhungen im Bereich < 44 °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 °C = 1; 50 °C = 100. (STOLL et al., 1968).

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) (STOLL et al., 1968; STOLL et al., 1969; WEAVER et al., 1969) (Abb. 6.6).

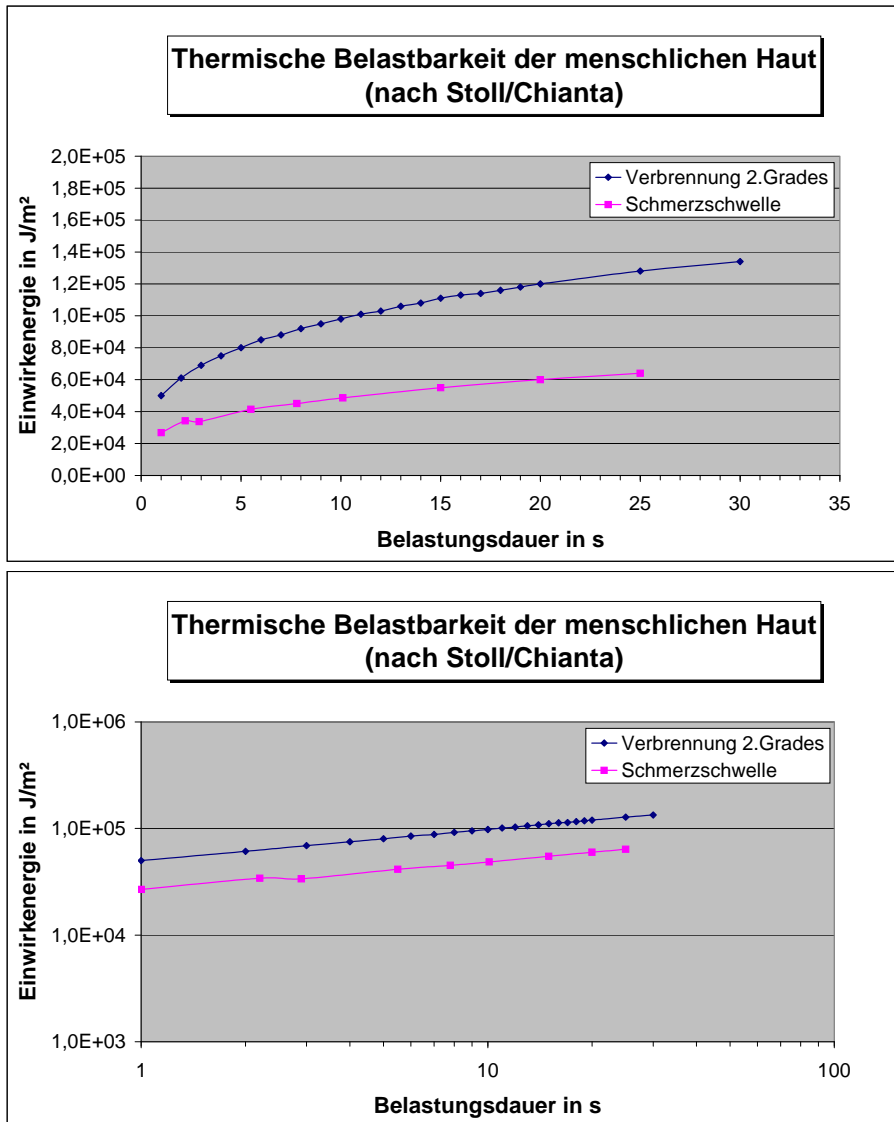


Abb. 6.6 Grenze für das Auftreten von Verbrennungen 2. Grades und Schmerz gemäß Stoll/Chianta (oben: lineare, unten doppelt logarithmische Darstellung)

Ebenfalls kann in Abhängigkeit der absorbierten Wärmestromdichte die Zeitspanne von der Schmerzempfindung bis zum Auftreten einer Verbrennung 2. Grades für die ungeschützte Haut abgelesen werden (Abb. 6.7).

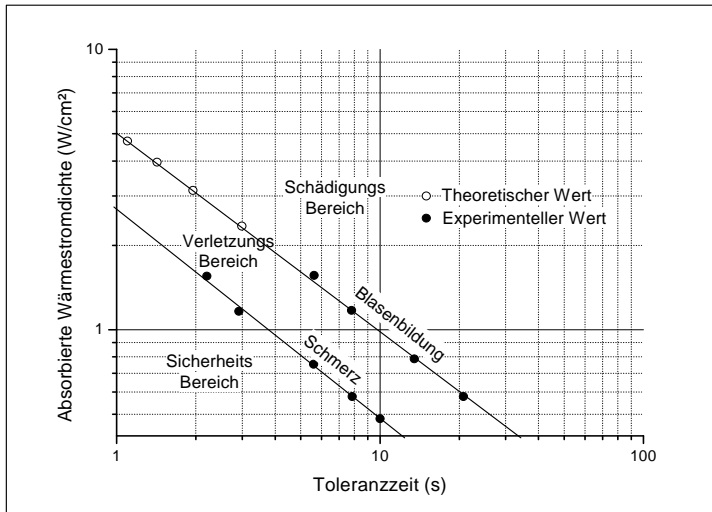


Abb. 6.7 Toleranzzeit der ungeschützten menschlichen Haut für das Auftreten von Schmerz und Verbrennungen 2. Grades (Blasenbildung) gemäß Stoll/Chianta (STOLL et al., 1968; STOLL et al., 1969)

Wie aus dem Diagramm geschlossen werden kann, steigt bei einer geringeren absorbierten Wärmestromdichte die Gesamt-Toleranzzeit und die Toleranzzeit t^* von der Schmerzempfindung bis zur Verbrennung 2. Grades an.

Die mit dem Kalorimeter aufgezeichneten Messwerte werden den Grenzkurven nach Stoll/Chianta 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.

6.2.2 Reaktionszeit zum Entfernen der exponierten Körperteile aus dem Gefahrenbereich/maximale Einwirkdauern

Entscheidende Größen für das Schädigungsausmaß oberhalb Basalschicht-Temperaturen von 44 °C bei Kurzzeitbestrahlung sind:

- die Wärmestromdichte (absorbierte Leistung) und
- die Expositionsdauer (Einwirkdauer).

Für die Begrenzung der Schädigung ist bei gegebener Wärmestromdichte (gegebene Laser-Bestrahlungsstärke und optischer sowie thermomechanischer Eigenschaften des Schutzsystems) die Limitierung der Einwirkdauer erforderlich. Dieses bedeutet, dass nach Überschreitung einer Reizschwelle (Temperaturreiz) das exponierte Körperteil reflexartig aus dem Gefahrenbereich entfernt werden muss.

Reflexbogen

Grundlagen für das Schmerzempfinden und das Reflexverhalten - und damit für die maximalen Einwirkdauern der thermischen Belastung - sind in der Neurophysiologie beschrieben (SCHMIDT et al., 1987).

Das physiologische Verhalten bei Reizeinleitung lässt sich anhand des sog. Reflexbogens veranschaulichen (Abb. 6.8). Ein Reflexbogen besteht aus den Elementen Rezeptor (Sinnesorgan), sensorische (afferente) Nervenfasern, zentralem Nervensystem (ZNS Gehirn oder Rückenmark), motorische (efferente) Faser und Effektor (Muskel oder Drüse). Ein Reflex ist eine stereotypische Reaktion des menschlichen Organismus auf einen Reiz, die beim Überschreiten einer Reizschwelle initiiert wird. Die Reflexzeit ist dabei die Zeit vom Reizbeginn bis zum Aktionspotenzial des Muskels.

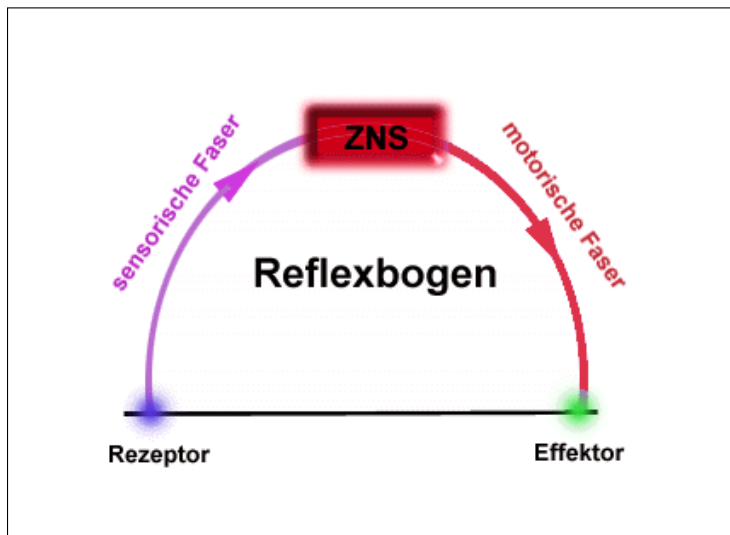


Abb. 6.8 Schematische Darstellung eines Reflexbogens (SCHMIDT et al., 1987)

Hinsichtlich der Reflexe werden sogenannte monosynaptische Reflexbögen und polysynaptische Reflexbögen unterschieden.

- Bei monosynaptischen Reflexbögen befinden sich Rezeptor und Effektor im gleichen Organ; d. h. es erfolgt eine direkte Übertragung auf das efferente Neuron ohne zwischengeschaltete Zellen im Rückenmark. Die Reflexzeiten betragen zwischen 30-40 ms. Beispiel für monosynaptische Reflexbögen sind Eigenreflexe, wie z. B. der Patellasehnenreflex.
- Polysynaptische Reflexbögen enthalten mehrere Synapsen (polysynaptischer Reflex). Rezeptor und Effektor liegen nicht im gleichen Organ; d. h. es sind mehrere Interneurone zwischen afferentem und efferentem Nerv eingeschaltet. Der Fremdre reflex dauert daher deutlich länger als der Eigenreflex (~ 1 s). Bei polysynaptischen Reflexen ist die Reflexzeit von der Reizintensität abhängig. Die Reflexzeit verkürzt sich dabei mit zunehmender Reizintensität. Die Afferenzen eines Fremdre reflexes kommen aus Rezeptoren von inneren Organen, Muskeln, Gelenken und insbesondere von der Haut (Beispiel für einen polysynaptischen Reflex ist der Rückziehreflex bei Berührung heißer Oberflächen).

Schlussfolgerung

Bei Bestrahlung der persönlichen Schutzbekleidung bzw. der Haut bei Tätigkeiten mit HLG handelt es sich um eine unbeabsichtigte, kurzzeitige Exposition. Der Reflexvorgang, d. h. die Wahrnehmung einer unbeabsichtigten Laserbestrahlung und die thermische Belastung der Haut mit nachfolgendem Rückziehreflex des exponierten Körperteils, ist den polysynaptischen Reflexen zuzuordnen. Weitergehende Informationen sind jedoch erforderlich, um die Reflexzeit näher einzugrenzen.

Reflexzeit

Verantwortlich für die Aufnahme und Erregung thermischer Reize sind die sog. Nociceptoren. In der Regel sind die Nociceptoren polymodal, d. h. sie verarbeiten gleichzeitig auch mechanische sowie chemische Reize. Histologisch sind Nociceptoren freie nichtkorpuskuläre Nervenendungen (SCHMIDT et al., 1987). Entscheidend für die Auslösung der Reflexe sind die Zusammenhänge zwischen noxischem Reiz und dem Schmerz. Bestimmt wird die Schmerzschwelle im Rahmen der subjektiven Algesimetrie, wobei die Schmerzschwelle diejenige Reizschwelle ist, bei der gerade eine Schmerzempfindung auftritt. Bezogen auf Hauttemperaturen liegen die Schmerzschwellen im Bereich von 44 °C - 45 °C (HARDY, 1953; HARDY, 1968).

Die Reaktionszeiten für das Überschreiten einer Reizschwelle und die reflexartige Bewegung des Körperteils aus dem Gefahrenbereich bestimmen die maximalen Einwirkdauern der thermischen 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 sind verfügbare Erkenntnisse aus dem Bereich Wärmestrahlung/Laserstrahlung und Wärmeleitung bei Kontakt mit heißen Oberflächen zusammengefasst.

Bezüglich der Exposition gegenüber optischer Strahlung korrespondiert eine Temperatur von 44 °C - 45 °C mit einer Schädigungsschwelle, wenn die Exposition für einige Sekunden anhält (dieses trifft für die betrachteten Reflexzeiten von $0,5 \text{ s} \leq t \leq 5 \text{ s}$ zu). Hautschädigungen, die aus sehr kurzen und sehr intensiven Wärmestrahlungsexpositionen hervorgerufen werden ($\ll 1 \text{ s}$), werden als sogenannte „flash-burns“ bezeichnet. Für Expositionsdauern $< 0,5 \text{ s}$ sind für eine Überschreitung der Schädigungsgrenze deutlich höhere Bestrahlungsstärken erforderlich als für längere Expo-

sitionsdauern. Zu industriellen Strahlquellen liegen hierzu nur wenige Daten vor. Diesbezügliche in der Literatur verfügbare Daten resultieren überwiegend aus Studien zur Simulation der Wirkung von Nuklearsprengkörpern (BUETTNER, 1952; EVANS et al., 1955). Hiernach entsteht Blasenbildung (d. h. Verbrennung 2. Grades) oberhalb $24 \text{ W/cm}^2 \equiv 2,4 \times 10^5 \text{ W/m}^2$ bei Expositionsdauern von 0,5 s und bei einer Wirkfläche von 2 cm^2 ; zu beachten ist, dass die Schädigungsschwelle neben der Expositionsdauer von der bestrahlten Fläche (Wirkfläche) abhängt. Für eine deutlich kleinere Fläche ($< 1 \text{ mm}^2$) ist die Wärmeleitung signifikant größer, welches höhere Bestrahlungsstärken für eine Schädigung erforderlich macht (HENRIQUES, 1947). Dieses Verhalten der Haut bei Exposition gegenüber optischer Strahlung korreliert auch mit der Stoll/Chianta-Kurve (SLINEY et al., 1980).

Eine umfangreiche Anzahl von Studien über thermisch basierte Hautschädigungen durch Laserbestrahlung wurde von der US Army in Fort Knox und an der Universität von Cincinnati School of Medicine (Ende der 60er Jahre) durchgeführt (ROCKWELL et al., 1974; BROWNELL et al., 1969). Diese Daten bilden die Basis für die nachfolgende statistische Bewertung und die Überführung in MZB_{Haut} -Werte.

Informationen zu Reflexzeiten aus dem Bereich „Wärmeleitung bei Kontakt mit heißen Oberflächen“ können der technischen Norm DIN EN 563 entnommen werden, die für kurze Berührungen von Bauteilen (Wärmeleitung) mit heißen Oberflächen ermittelt wurden (Tab. 6.1).

Tab. 6.2 Kontaktdauern/Reflexzeiten gemäß DIN EN 563

Kontaktdauer 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.		

Daten für Verbrennungsschwellen für sehr kurze Berührungen von 0,5 s basieren nicht direkt auf wissenschaftlichen Forschungen, sondern werden durch Extrapolation aus den Kurven für längere Einwirkdauern abgeleitet (DIN 653 Temperaturen berührbarer Oberflächen, Abb. 6.9).

Daten für die maximale Belastungszeit bis zur Schmerzempfindung in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke finden sich auch in der Norm DIN 33403-3, „Klima am Arbeitsplatz und in der Arbeitsumgebung“, die auch auf die grundlegenden Erkenntnisse von Henriques, Stoll/Chianta und Green zurückzuführen sind. Angegeben ist in Abb. 6.10 die Wärmestrahlungsexposition gegenüber langwelliger Strahlung für unbedeckte (ungeschützte) Hautpartien.

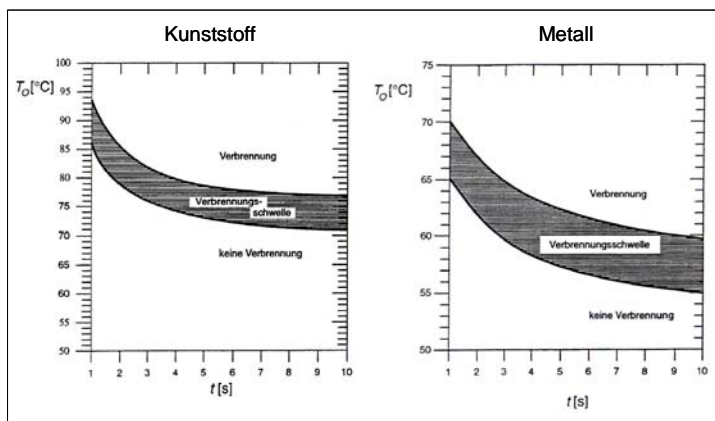


Abb. 6.9 Verbrennungsschwellen-Bereich für den Kontakt von Haut mit heißen glatten Oberflächen (DIN EN 563)

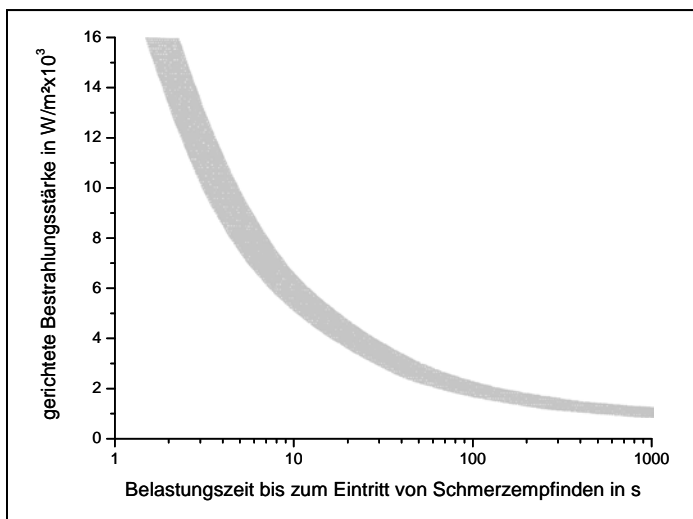


Abb. 6.10 Schmerzgrenze der unbedeckten Haut in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke der Wärmestrahlung (mod. nach Webb, Stoll & Green) aus DIN 33403-3

Schlussfolgerung

Auf Basis des vorliegenden Kenntnisstandes wird im Rahmen der Risikobewertungen von persönlicher Schutzbekleidung für HLG von einer Reflexzeit zum Entfernen von Körperteilen aus dem Gefahrenbereich zwischen 1 s bis 4 s ausgegangen.

6.2.3 Zusammenfassende Bewertung der Schutzsysteme unter Berücksichtigung der physikalischen Wechselwirkungen mit der Haut und des Stoll/Chianta-Kriteriums

Die mit dem Kalorimeter aufgezeichneten Messwerte werden den Grenzkurven nach Stoll/Chianta vergleichend gegenübergestellt. Bewertet wird die jeweilige Toleranzzeit t_T im Vergleich zu einer Reflexzeit zwischen 1 und 4 Sekunden (Abb. 6.11 - Abb. 6.15). Bei Zugrundelegung dieser Reflexzeit liegt der kritische Bestrahlungsstärkebereich, in dem die Stoll/Chianta-Grenzwerte überschritten werden und in dem die Toleranzzeit gleich oder kleiner der Reflexzeit wird, für die meisten untersuchten Schutzsysteme zwischen $5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ und $1 \cdot 10^6 \text{ W/m}^2$.

Im Folgenden sind zur Veranschaulichung der Ergebnisse ausgewählte Diagramme dargestellt. Die entsprechenden Zahlenwerte geordnet nach Schutzsystemen bzw. Lasern befinden sich in tabellarischer Übersicht im Anhang 4.

Einfluss der Bestrahlungsstärke

Mit Zunahme der Bestrahlungsstärke - für ein betrachtetes Schutzsystem - nehmen die Zeitdauern bis zum Überschreiten der Schmerzschwelle sowie der Grenze für das Auftreten von Verbrennungen 2. Grades sowie die Toleranzzeit ab. Dieses Verhalten resultiert aus der Einkopplung einer höheren Laserstrahlungsenergie, wodurch die Temperatur des Schutzsystems schneller zunimmt und mehr Energie in Form von Wärmeleitung und Wärmestrahlung an das Kalorimeter (die Haut) abgegeben wird.

So wird bei CO₂-Laserbestrahlung der Baumwoll-Schutzbekleidung F02-01 mit einer Bestrahlungsstärke von $5,5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$ die Schmerzgrenze nach 5 Sekunden überschritten; die Toleranzzeit beträgt ca. 2,5 Sekunden, sodass ein Wegziehen der äußeren Extremitäten noch möglich ist. Im Vergleich wird bei einer Bestrahlungsstärke von $1,3 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ die Schmerzgrenze nach 2,5 Sekunden überschritten. Die Toleranzzeit beträgt ca. 1 Sekunde. Unter Berücksichtigung der Reflexzeiten ist eine Toleranzzeit des Schutzsystems von einer Sekunde als kritisch zu bewerten. Oberhalb Bestrahlungsstärken von $2,2 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ 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, da die Extremität nicht schnell genug aus dem Gefahrenbereich entfernt werden kann.

Einfluss der Wellenlänge der Laserstrahlung

Die optischen Eigenschaften (spektraler Transmissions-, Remissions-, Absorptionsgrad) bestimmen entscheidend die Strahl-/Schutzsystem-Wechselwirkungen. Im Vergleich zu Dioden- und Nd:YAG-Laserstrahlung wird bei den meisten Schutzsystemen CO₂-Laserstrahlung oberflächennah absorbiert. Durch Einkopplung der Energie und Transport vom Schutzsystem an die Haut ergeben sich kürzere Zeiten für das Überschreiten der Grenzkurven nach Stoll und Chianta.

Einfluss der optischen und thermomechanischen Eigenschaften des Schutzsystems

Im Vergleich bietet das Schutzsystem F07-01 bei Laserbestrahlung eine deutlich höhere Schutzwirkung. Bei CO₂-Laserbestrahlung werden erst im Bereich von Bestrahlungsstärken über 10⁶ W/m² die Schmerzschwellen im Bereich von einer Sekunde überschritten, und die Toleranzzeit ist kürzer als eine Sekunde.

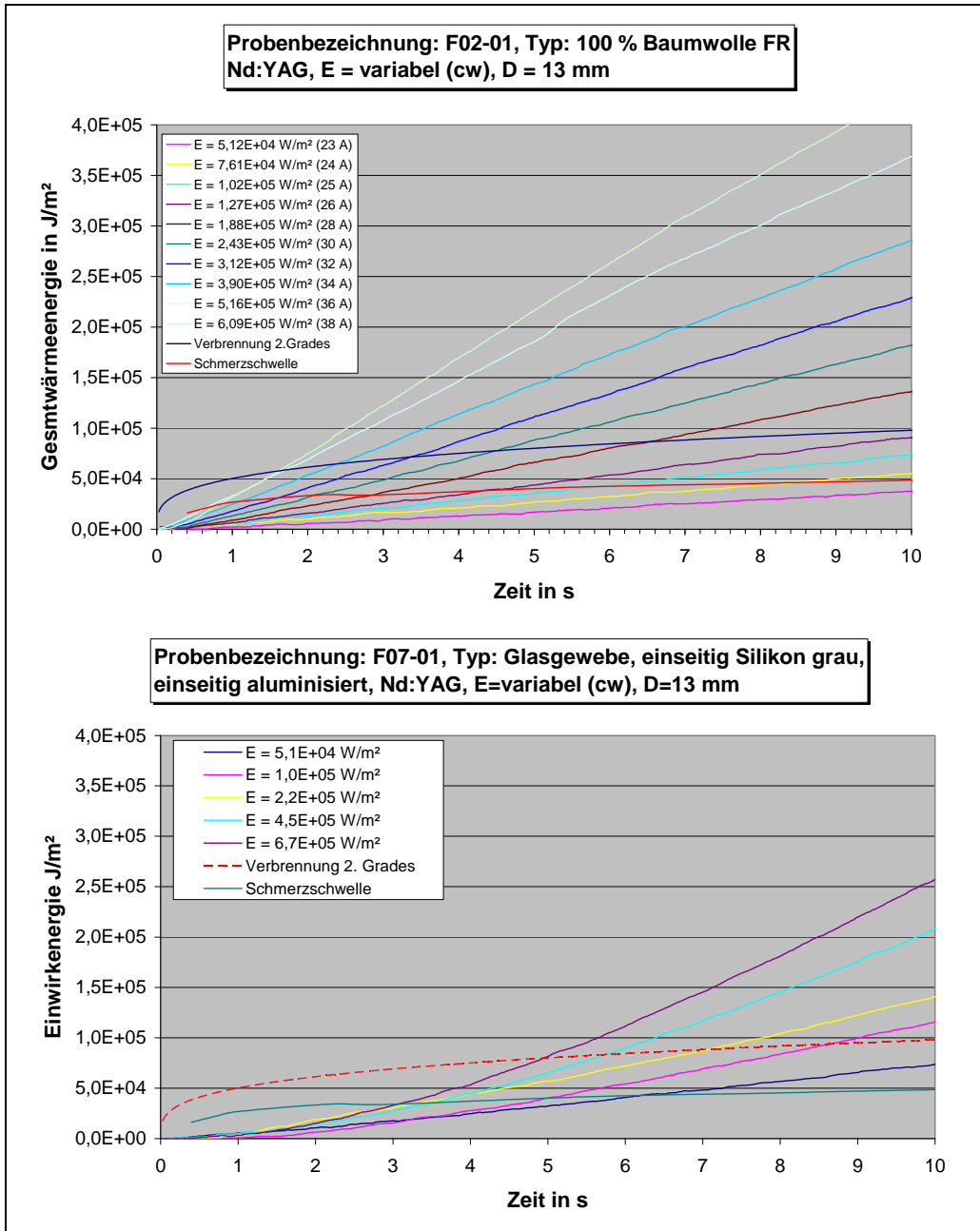


Abb. 6.11 Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung

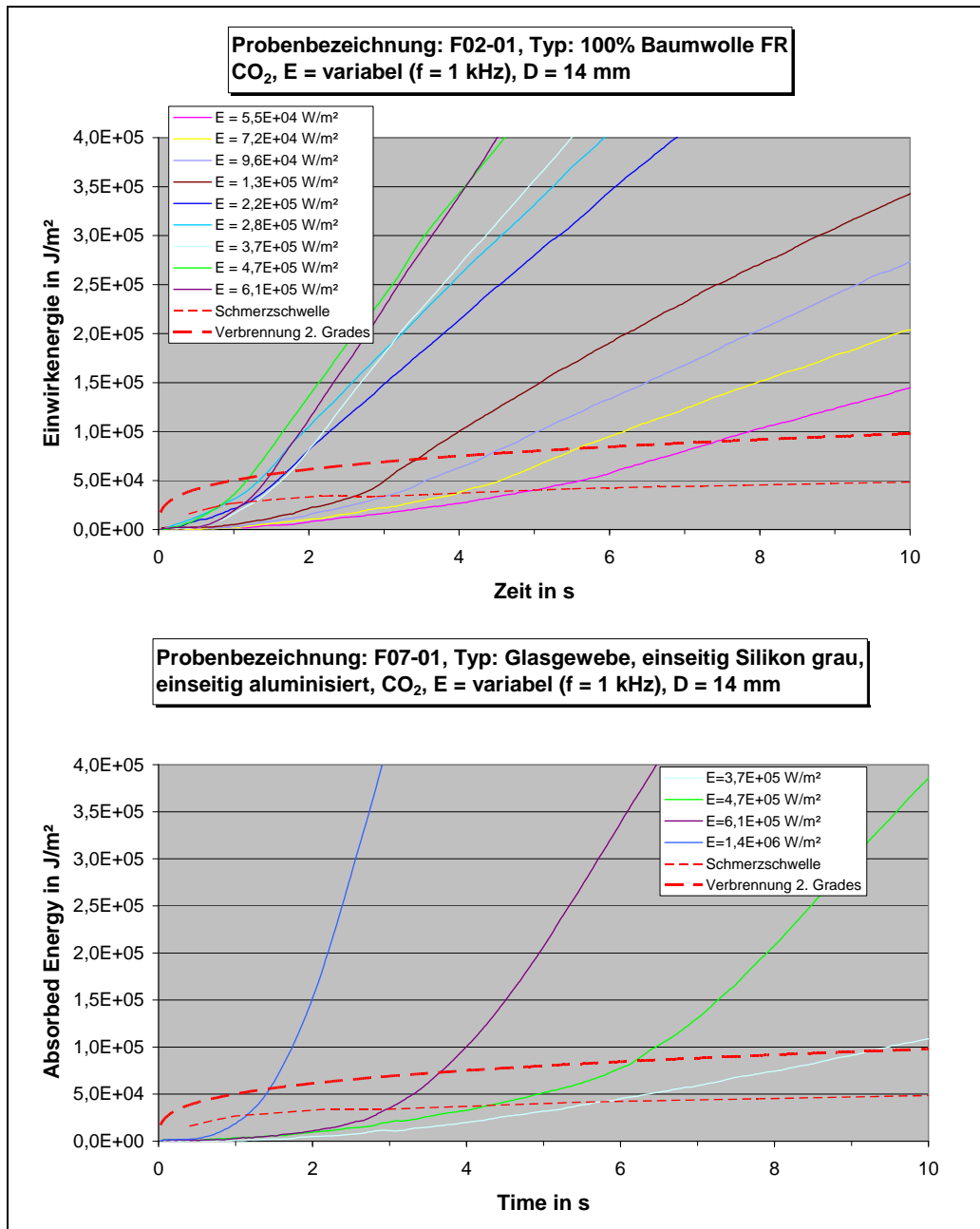
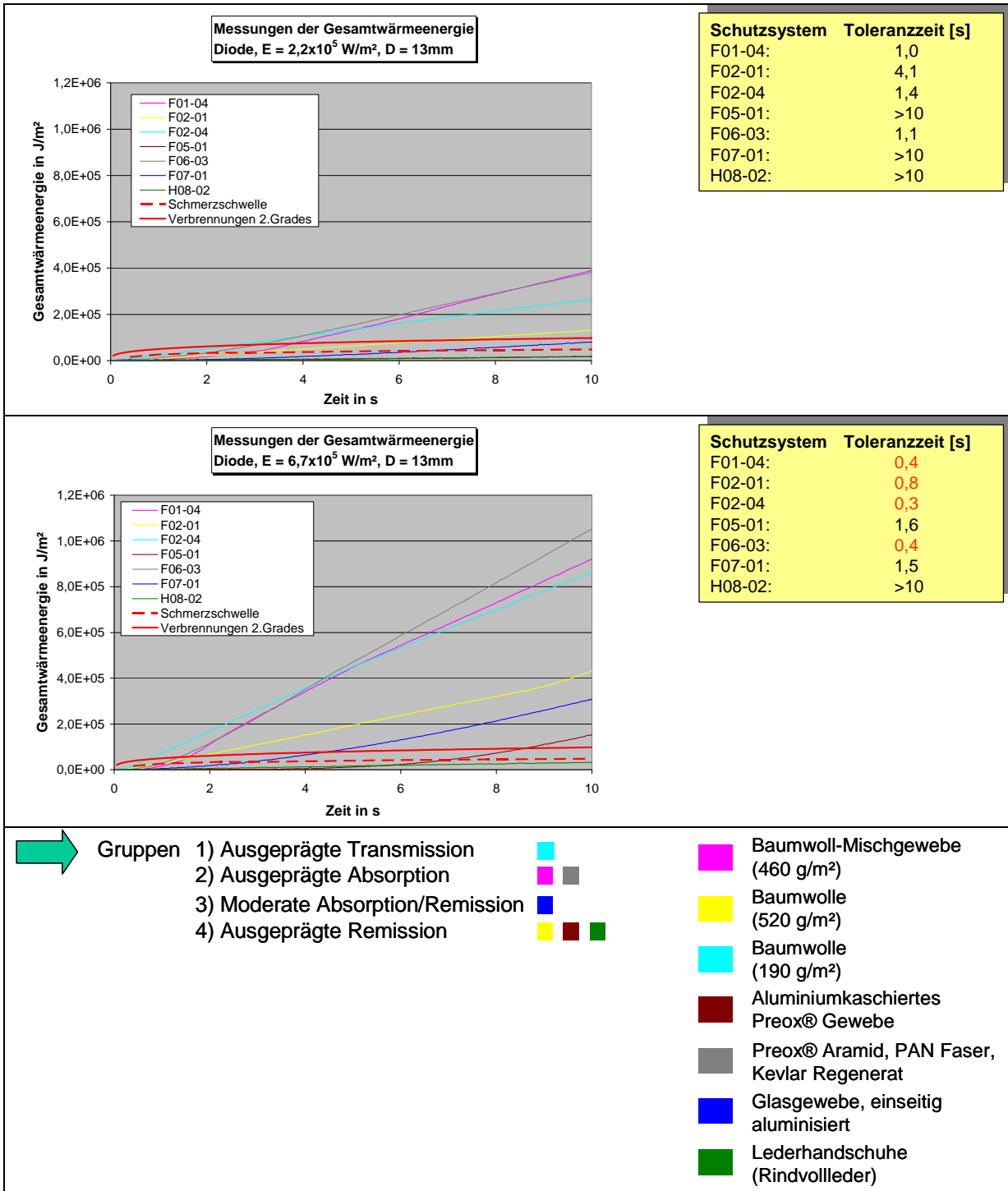
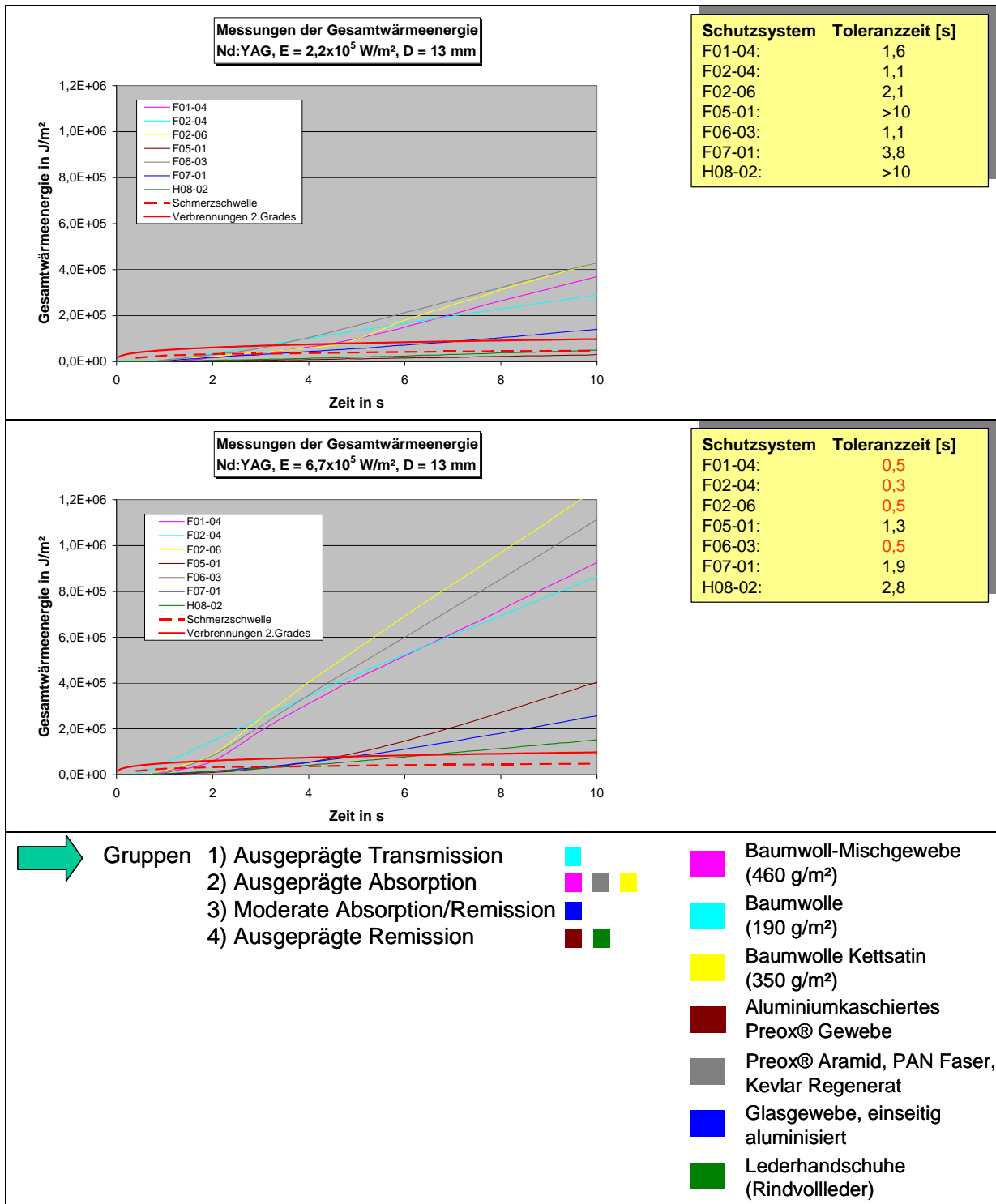


Abb. 6.12 Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 bei CO₂-Laserbestrahlung

In den folgenden Diagrammen sind typische Vertreter der einzelnen Werkstoffgruppen für ausgewählte Laserwellenlängen und Bestrahlungsstärken vergleichend gegenübergestellt, um den Einfluss der Schutzsysteme auf die Überschreitung der Grenzkurven bzw. auf die Toleranzzeit zu veranschaulichen.





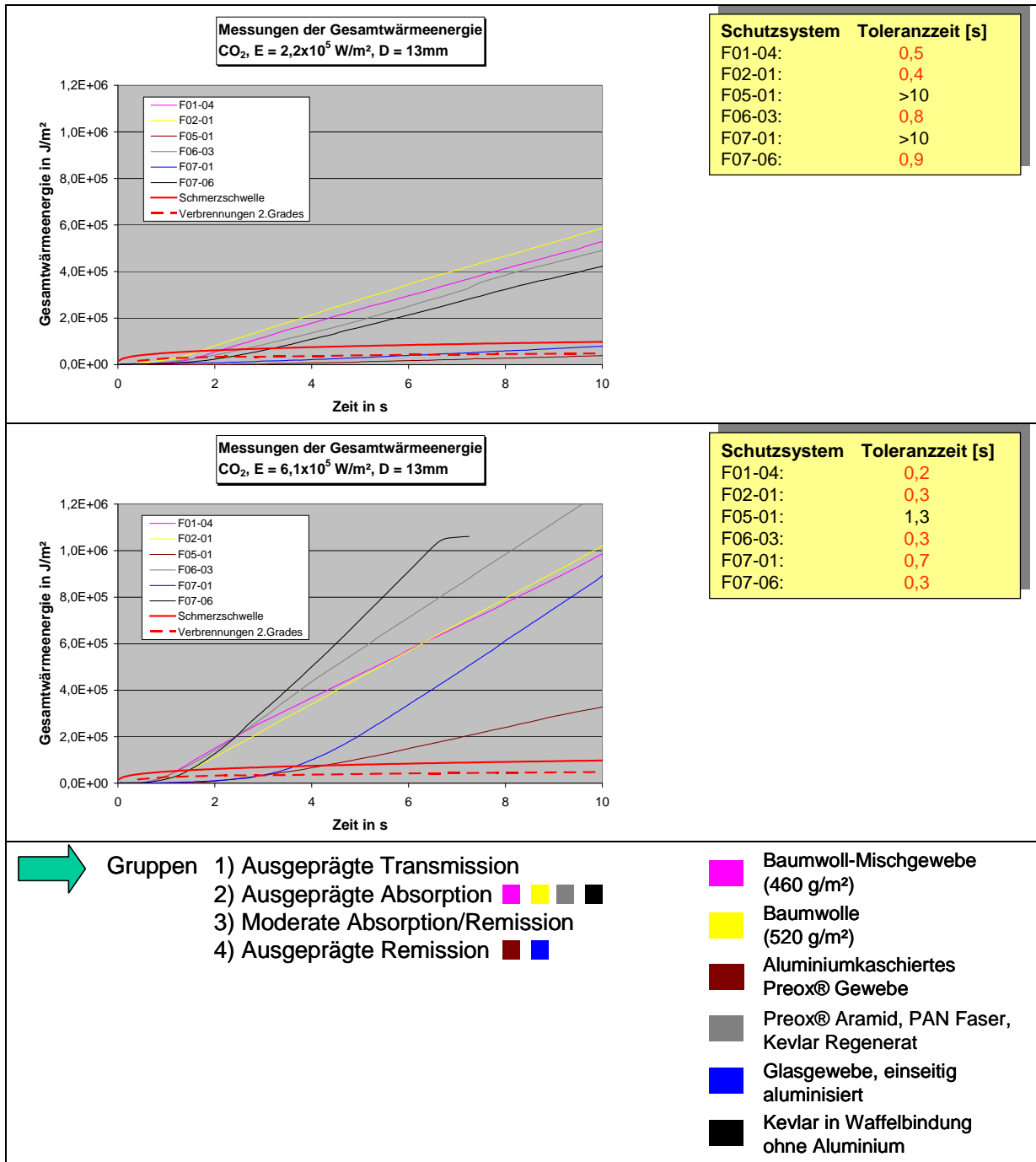


Abb. 6.15 Kalorimetrische Messungen verschiedener Schutzsysteme bei CO₂-Laserbestrahlung

Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus den Kleinsignal-Transmissions- und Remissionsmessungen können auf Grund ihres Verhaltens folgende Gruppen identifiziert werden:

- Gruppe 1: Schutzsysteme/Werkstoffe, die eine ausgeprägte Transmission aufweisen
- Gruppe 2. Schutzsysteme/Werkstoffe, die eine ausgeprägte Absorption aufweisen
- Gruppe 3: Schutzsysteme/Werkstoffe, die über eine moderate Absorption und Remission verfügen
- Gruppe 4: Schutzsysteme/Werkstoffe, die eine ausgeprägte Remission aufweisen.

Schutzsysteme, die eine hohe Transmission aufweisen, transmittieren die auftreffende Leistung direkt zur Haut und weisen demzufolge sehr geringe Toleranzzeiten auf. Vorteilhafter erweisen sich Systeme, die die Laserstrahlung absorbieren, aber nur wenig Wärme an die Haut ableiten, d. h. gute Isolationswirkung haben. Das günstigste Verhalten weisen Schutzsysteme auf, die eine im Vergleich hohe Remission für die entsprechende auftreffende Laserstrahlung und eine gute Isolationswirkung haben. Die Grenzkurven für die Schmerzschwelle und für Verbrennungen 2. Grades werden deutlich später überschritten und die Toleranzzeiten sind entscheidend größer.

Aus den Diagrammen können folgende Aussagen abgeleitet werden:

- die Schutzfunktion hängt entscheidend von der Wellenlänge der auftreffenden Laserstrahlung ab (940 nm, 1.064 nm, 10.600 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.

In der folgenden Abbildung (Abb. 6.16) ist ein Beispiel für ein Schutzsystem mit funktionalen Schichten (Schicht 1: Remission der Laserstrahlung; Schicht 2: Verminderung des Wärmetransports vom Schutzsystem an die Haut) gegeben.



Abb. 6.16 Aluminisiertes Kevlargetze (Rückseite: Waffelpique); links: bestrahlte Vorderseite; rechts Rückseite

7 Auslegungskriterien für Schutzsysteme

Schutzkleidung zum Schutz gegen Laserstrahlung muss alle Körperpartien, die potenziell bestrahlt werden können (ausgenommen Auge; da gem. DIN EN 207 im Laserbereich spezieller Augenschutz zu tragen ist) vollständig schützen. Die Anforderungen an die Schutzkleidung hinsichtlich zu schützender Körperpartien und des Schutzgrades resultiert aus der Risikoanalyse.

Es gibt Schutzkleidungsarten, die nur Körperbereiche, und solche, die den gesamten Körper schützen. Dabei kann es sich z. B. um eine Schürze, einen Kittel, einen zweiteiligen oder einen einteiligen Anzug handeln.

7.1 Empfehlungen zur Benutzung von Schutzsystemen

Persönliche Schutzkleidung zum Schutz gegen Laserstrahlung

Persönliche Schutzkleidung gegen Laserstrahlung für Tätigkeiten mit handgeführten und -positionierten Lasergeräten zur Materialbearbeitung der Laserklasse 3R und höher sollen dem Benutzer einen Mindestschutz bei unbeabsichtigter Laserstrahlungsexposition bieten. Sie soll dem Benutzer ermöglichen, nach Bemerkungen der Exposition (durch Wärmereiz) und nachfolgendem Rückziehreflex, Schädigungen für die Haut zu vermeiden bzw. zu minimieren.

In Betracht kommen Schutzkleidungskombinationen aus z. B. Overall, oder Bundjacke und Latzhose, oder Bundhose und Jacke/Kittel, in Kombination mit Schutzhandschuhen und Schuttschuhen sowie ggf. mit zusätzlicher Schürze.

Die Kleidungsstücke sollten bei üblichen Bewegungen am Arbeitsplatz stets eine Mindestüberlappung sicherstellen sowie einen verdeckten Reißverschluss oder Knopfleiste aufweisen, damit die Körperpartien sicher bedeckt und vor Laserstrahlung geschützt werden.

Schutzkleidung, die als Mindestschutz gegen Laserstrahlung prinzipiell geeignet ist, erfüllt in den meisten Fällen die Anforderungen an Schutzkleidung gegen Kontakt mit Flammen sowie konvektive Hitze und Strahlungswärme (geprüft und zertifiziert gemäß DIN EN 531 - Schutzkleidung für hitzeexponierte Industriearbeiter oder Schweißerschutzkleidung gemäß DIN EN 470-1). Im Bereich des Handschutzes stellen Schutzhandschuhe gegen thermische Risiken (DIN EN 407) oder Schweißerschutzhandschuhe (DIN EN 12477) ein vergleichbares Auswahlkriterium dar.

Bewertung und Auswahl

Bei der Auswahl von Körperschuttmitteln zum Schutz gegen Laserstrahlung sind die Forderungen nach bestmöglichem Schutz einerseits und nach Tragekomfort sowie zusätzlich bei Handschuhen nach Tastgefühl und Greifvermögen andererseits abzuwägen. Es ist darauf zu achten, dass die richtige Konfektionsgröße für Bekleidung und Schutzhandschuhe ausgewählt wird. Vor der Auswahl der Körperschuttmittel hat der Unternehmer eine Bewertung der von ihm vorgesehenen Körperschuttmittel vorzunehmen, um festzustellen, ob sie folgenden Anforderungen entsprechen:

Kriterium „Transmission“

Priorär zu beurteilen ist das Kriterium „Transmission“.

Weist das Schutzsystem auf Grund der optischen Eigenschaften eine hohe Transmission auf, so können die MZB_{Haut} -Werte der unter dem Schutzsystem befindlichen

Haut 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 thermischen Schädigungen (Verbrennungen 2. Grades) 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.

Kriterium „Wärmeübertragung“/Energiebilanz

Bei Schutzsystemen, die eine sehr geringe Transmission aufweisen, sodass die MZB_{Haut} nicht überschritten werden, ist 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 (Verbrennungen 2. Grades) wird die Grenzkurve nach Stoll/Chianta herangezogen.

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.

Kriterien „sekundäre Gefährdungen und Ergonomie“

Von den Schutzsystemen selbst darf entsprechend den Forderungen der Richtlinie für persönliche Schutzausrüstung keine Gefahr ausgehen. Dieses beinhaltet sekundäre Gefährdungen u. a. durch Entflammen, Schmelzen/Einbrennen in Haut und Schrumpfen (nicht mehr als 5 % EN 659).

Die verwendeten Schutzsysteme müssen ebenfalls in der Lage sein, gegen andere bei Tätigkeiten mit HLG auftretende Risiken zu schützen. Dieses können unter anderem Risiken durch Schmelzespritzer sowie heiße Oberflächen der Werkstücke oder des HLG sein.

Die Schutzsysteme müssen den ergonomischen Anforderungen und gesundheitlichen Erfordernissen der Benutzer genügen. Sie müssen dem Träger/Benutzer angepasst werden können, d. h. dass sie z. B. in entsprechenden Konfektionsgrößen erhältlich sind. Sie müssen einen entsprechenden Tragekomfort ermöglichen und je nach Verwendung/Hygieneanforderungen gewaschen werden können. Bei Handschuhen besteht die Anforderung an eine ausreichende Taktilität, um die sichere Bedienung des HLG und das Handling der Werkstücke zu ermöglichen.

Im Folgenden sind die wesentlichen Anforderungen an persönliche Schutzsysteme, die einen Mindestschutz gegen Laserstrahlung bei Tätigkeiten mit HLG aufweisen, zusammengefasst:

- 1) Die zu benutzenden Schutzsysteme (-werkstoffe) müssen einen ausreichenden Schutz hinsichtlich des Verhaltens gegenüber der vorhersehbaren maximalen Laserbestrahlung (VMB) bieten:
 - a) Ausreichend geringer Transmissionsgrad, sodass 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), sodass 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, sodass 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 die 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 Träger/Benutzer genügen.
- 5) Sie müssen dem Träger/Benutzer angepasst werden können.

In Abb. 7.1 ist das Flussdiagramm zur Auslegung von PSA für Tätigkeiten mit HLG dargestellt.

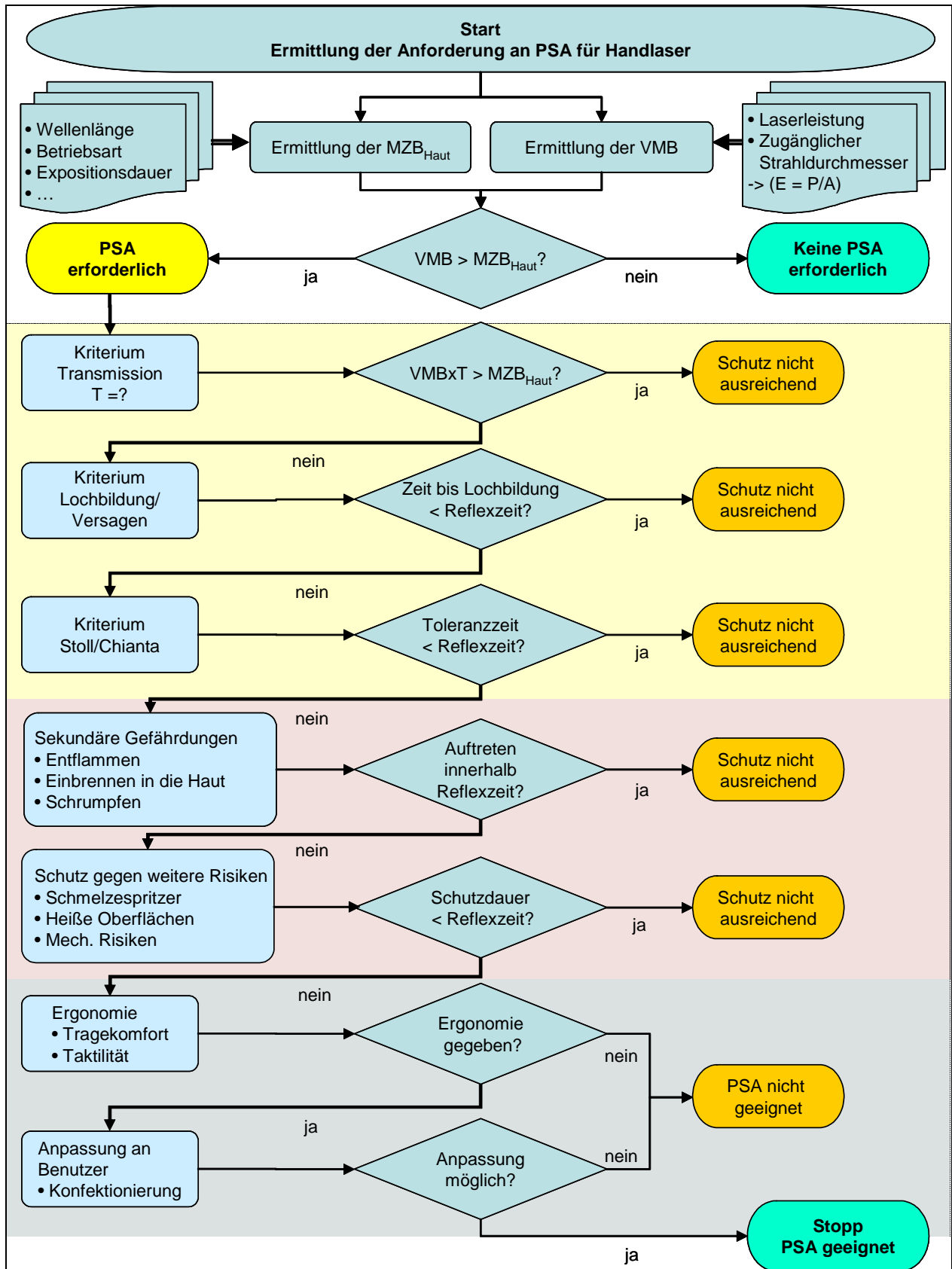


Abb. 7.1 Flussdiagramm zur Auslegung von persönlicher Schutzbekleidung für Tätigkeiten mit HLG

7.2 Empfehlungen zur Konzeption von optimierten Systemen zum Schutz gegen Laserstrahlung

Im Folgenden sind abgeleitet aus obigen Anforderungen konstruktive Lösungsansätze beschrieben.

a)

Das Schutzsystem muss in Abhängigkeit der zu erwartenden VMB eine ausreichend niedrige Transmission aufweisen. Hieraus ergeben sich Anforderungen an die Werkstoffauswahl, an die Flächenmasse bzw. die Dicke der funktionalen Schicht sowie an die Webart. Vorteilhaft sind funktionale Schichten aus Werkstoffen, die eine höhere thermische Beständigkeit aufweisen (Aramid, Preox, Glas), die bei noch akzeptablem Tragekomfort eine möglichst hohe Flächenmasse und eine enge Webart aufweisen.

b)

Da das Schutzsystem innerhalb der Reflexzeit kein Versagen (Erhöhung der Transmission/Lochbildung) aufweisen darf, müssen funktionale Schichten mit einer ausreichend hohen thermischen Beständigkeit verwendet werden. Von den Schutzsystemen darf keine Gefährdung durch Flammenbildung oder Brand ausgehen, das bedeutet, dass die funktionalen Schichten diesbezüglich technisch ausgerüstet werden müssen (flammhemmend).

c)

Prinzipiell kann die in das Schutzsystem eingekoppelte Energie durch Aufbringen von äußeren funktionalen Schichten zur Erhöhung der Remission/Reflexion verringert werden (z. B. aluminisiertes Gewebe). Zu prüfen ist hierbei, ob durch die Remission/Reflexion sekundäre Gefährdungen von der Laserstrahlung ausgehen. In jedem Fall ist die funktionale Schicht so auszulegen, dass die Laserstrahlung nur diffus reflektiert wird.

d)

Das Schutzsystem muss die Wärmeübertragung an die unter dem System befindliche Haut begrenzen. Durch Auswahl geeigneter Werkstoffe für die inneren funktionalen Schichten mit ausreichend niedrigen Wärmeleitkoeffizienten muss die Wärmestromdichte limitiert werden.

7.3 Musterbetriebsanweisung nach PSA Benutzungsverordnung

Gemäß der Verordnung über die Benutzung von persönlicher Schutzausrüstung, PSA-BV § 3, (2), hat der Arbeitgeber für jede bereitgestellte persönliche Schutzausrüstung die erforderlichen Informationen für die Benutzung in einer für die Beschäftigten verständlichen Form und Sprache bereitzuhalten.

Im Anhang 5 ist ein Beispiel für eine Musterbetriebsanweisung für die „Benutzung von persönlicher Schutzausrüstung (ausgenommen Augenschutz) für Tätigkeiten mit handgeführten und -positionierten Lasergeräten zur Materialbearbeitung der Laserklasse 3R und höher“ angegeben.

8 Zusammenfassung

Für die Auswahl persönlicher Schutzausrüstung für Tätigkeiten mit handgeführten oder -positionierten Laserbearbeitungsgeräten muss im ersten Schritt eine Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung für das jeweilige HLG und den HLG-Arbeitsplatz durchgeführt werden. Sie geben Aufschluss darüber, wie hoch die vorhersehbare maximale Bestrahlung (VMB)

- im bestimmungsgemäßen Betrieb
 - bei vorhersehbaren Fehlerfällen
 - bei vorhersehbarem Missbrauch
- an entsprechenden Körperpartien sein kann.

Auf Basis der Risikobeurteilung sind die Anforderungen an die Schutzbekleidung gegen Laserstrahlung zu definieren. Wesentliche Anforderungen zum Schutz gegen Laserstrahlung sind:

- Ausreichend geringer Transmissionsgrad, sodass die maximal zulässige Bestrahlung der Haut (MZB_{Haut} gem. DIN EN 60825-1) nicht überschritten wird.
- Ausreichender Widerstand gegen Lochbildung, sodass keine Schädigungen der Haut durch Überschreitung der MZB_{Haut} auftreten.
- Ausreichend lange Toleranzzeit, d. h. bei Absorption der Laserstrahlung begrenzter Wärmetransport des Schutzsystems an die Haut, sodass keine Schädigungen (Verbrennungen 2. Grades) der Haut innerhalb der Reflexzeit zum Wegziehen der Extremität auftreten.

Von den Schutzsystemen dürfen keine sekundären Gefährdungen (wie Entflammen, Brennen, Schrumpfen) ausgehen. Bei der Auswahl persönlicher Schutzbekleidung und Konzeption optimierter Schutzsysteme muss ein Kompromiss hinsichtlich Lasersicherheit und ergonomischen Eigenschaften wie Tragekomfort, Pflegeeigenschaften, und bei Schutzhandschuhen wie Griffigkeit und Taktilität angestrebt werden.

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.

Die Untersuchungen verdeutlichen die Notwendigkeit kalorimetrischer Messungen zur Beurteilung des Risikos für die unter dem Schutzsystem liegende Haut. Die Grenzwerte für das Auftreten von Verbrennungen 2. Grades werden zeitlich deutlich früher erreicht als die Zeitpunkte für das Versagen des Schutzsystem durch Lochbildung und nachfolgendem Durchtritt von Laserstrahlung. Dieses bedeutet, dass neben dem Transmissionsgrad die Toleranzzeit die „Kritische Größe“ für die Bewertung der Schutzfunktion darstellt.

Das Verhalten der Schutzsysteme hängt entscheidend von den Werkstoffeigenschaften, ihrer Verarbeitung und der Konditionierung ab. Trotz der Komplexität der Ergebnisse sind im Folgenden einige vereinfachende Aussagen abgeleitet (unter Berücksichtigung verschiedener Wellenlängen von 940 nm-10600 nm):

- Handelsübliche Baumwollbekleidung (T-Shirt, Hemd, Jacke, Handschuh; mit geringer Flächenmasse $< 300 \text{ g/m}^2$) bietet kaum Schutz gegen Laserstrahlung, wie sie bei Tätigkeiten mit HLG in Fehlerfällen auftreten kann (VMB: $E > 5 \cdot 10^4 \text{ W/m}^2$); Baumwoll-Mischgewebe mit hohem Kunstfaseranteil (Polyester, Polyamid) stellen auf Grund des Brandverhaltens eine hohe sekundäre Gefährdung für die Haut dar.
- Schutzausrüstung aus Baumwolle oder Baumwoll-Mischgeweben gemäß DIN EN 531 sowie DIN EN 470-1 flammhemmend ausgerüstet, mit einer Flächenmasse $\geq 300 \text{ g/m}^2$ bietet begrenzten Schutz gegen Laserstrahlung. Bei Bestrahlungsstärken von ca. $1 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ - $2 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ reduzieren sich die Toleranzzeiten je nach Strahlquelle auf ein bis zwei Sekunden und liegen damit im Bereich der Reflexzeiten.
- Schutzausrüstung aus Aramiden mit ausreichender Flächenmasse - aluminisiert, metall-kaschiert, foliert - gemäß DIN EN 531 sowie DIN EN 470-1 bietet im Vergleich einen deutlich besseren Schutz gegen Laserstrahlung; kritische Größe ist die Toleranzzeit; sie liegt bei dem untersuchten aluminisierten Kevlar®-Schutzsystem mit größter Flächenmasse oberhalb Bestrahlungsstärken von ca. $6 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ im Bereich einer Sekunde; die zum Teil hohe Steifigkeit der Gewebe (bzw. Beschichtung) hat einen eingeschränkten Tragekomfort zur Folge; sinnvoll sind Teilbedeckungen als Aufnäher oder Schürzen.
- Schutzausrüstung aus Glasfasergeweben weisen ebenfalls einen hohen Schutzgrad auf. Ohne zusätzliche Isolationslage liegt aber auch hier die Toleranzzeit oberhalb Bestrahlungsstärken von ca. $6 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ unter zwei Sekunden (Nd:YAG-Laser) bzw. unter einer Sekunde (CO₂-Laser). Die hohe Steifigkeit der Gewebe schränkt den Tragekomfort ein, das Pflegen/Reinigen der Systeme ist nicht immer gegeben; sinnvoll sind ebenfalls Teilbedeckungen als Aufnäher oder Schürzen.
- Handelsübliche Schutzhandschuhe aus Leder (Schweißerschutzhandschuhe) gemäß DIN EN 12477, ohne spezielle Ausrüstung, sind auf Grund des Schrumpfens (insb. bei CO₂-Laserstrahlung) nur bedingt als PSA gegen Laserstrahlung geeignet, obwohl sie gegenüber Nd:YAG und Diodenlaserstrahlung bis Bestrahlungsstärken von ca. $5 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$ einen ausreichenden Widerstand gegen Lochbildung und akzeptable Toleranzzeiten bieten.

Derzeit existieren noch keine normativen Regelungen für persönliche Schutzbekleidung gegen Laserstrahlung, in denen Anforderungen an die Schutzsysteme und ihre Prüfung definiert werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bieten eine Hilfestellung bezüglich der Auswahl von PSA, die einen Mindestschutz gegen Laserstrahlung gewährt. Auch geben sie Aufschluss über geeignete Prüfmethode zur Qualifizierung von persönlicher Schutzbekleidung für Tätigkeiten mit HLG mit Hinblick auf eine spätere normative Definition.

9 Ausblick

Mit den vorliegenden Projektergebnissen existiert für Tätigkeiten mit handgeführten und -positionierten Geräten zur Lasermaterialbearbeitung eine Grundlage,

- die für die Gefährdungsanalyse durch Laserstrahlung und die Risikobewertung genutzt werden kann,
- die Anforderungen an persönliche Schutzbekleidung und deren Prüfung formuliert,
- die Aussagen über die Schutzfunktion von textilen Geweben und Naturstoffen gibt
- und die Hilfestellung bei der Auswahl am Markt verfügbarer persönlicher Schutzbekleidung bietet.

Die Daten stellen somit einen Beitrag zur weiteren Entwicklung handgeführter und -positionierter Lasergeräte zur Materialbearbeitung und deren Anwendungsspektren dar.

Eine der anstehenden Aufgaben ist der Ergebnistransfer in entsprechende normative nationale und internationale Gremien. Dieses betrifft sowohl Arbeitsgruppen im Bereich der Lasersicherheit wie die ISO/TC 172/SC 9 und IEC/TC 76 sowie im Bereich der persönlichen Schutzausrüstung die ISO/TC 94/SC 13. Darüber hinaus werden die Ergebnisse auf nationaler Ebene in berufsgenossenschaftliche Regelwerke und Informationsschriften zur Unfallprävention einfließen.

Ziel ist es, im Bereich Lasersicherheit Sicherheits- und Benutzerinformationen zu formulieren und bereitzustellen; im Bereich der persönlichen Schutzausrüstung müssen Anforderungen an die Laserschutzbekleidung sowie an die Prüfverfahren zur Qualifizierung der PSA erarbeitet werden.

Aus technischer Sicht ist zum einen der Erkenntnisstand im Bereich der Prüfverfahren zu erweitern. Im Hinblick auf eine spätere normative Formulierung der Prüfverfahren ist zu klären, welche Prüfverfahren erforderlich sind, um die Schutzfunktion der PSA ausreichend zu qualifizieren. Wie gezeigt werden konnte, sollten hierzu

- die Prüfung der optischen Eigenschaften durch Kleinsignal-Messungen,
- die visuelle und durch Leistungsmessgeräte unterstützte Charakterisierung der Strahl/Stoff-Wechselwirkungen insbesondere der Zerstörschwelle und des vollständigen Versagens mit Laserstrahldurchtritt
- und insbesondere die kalorimetrische Messung der Einwirkenergie (auf die Haut) zur Beurteilung von Schmerz- und Verbrennungsschwellen gehören.

Dieser Arbeitspunkt beinhaltet auch die Verifizierung und Optimierung der Prüfverfahren, insbesondere des kalorimetrischen Prüfverfahrens, bezüglich der Gerätetechnik wie auch des methodischen Vorgehens.

Zum anderen besteht aus technischer Sicht ein deutliches Optimierungspotenzial im Bereich der persönlichen Schutzbekleidung. Anhand der Ergebnisse konnte aufgezeigt werden, dass Schutzsysteme mit funktionalen Schichten

- aus temperaturbeständigen Werkstoffen
- aus Werkstoffen, die einen ausgeprägten Reflexionsgrad für die auftreffende Laserstrahlung aufweisen
- aus Werkstoffen oder Geweben (Webart) mit guter Isolationswirkung gegenüber der Haut

vorteilhaft hinsichtlich der Schutzfunktion sind.

Im Rahmen weiterer Arbeiten sind zum einen die Laserstrahl-/Werkstoff-Wechselwirkungen (u. a. Auswirkungen möglicher Shielding-Effekte) eingehender zu untersuchen; zum anderen ist das Verhalten einzelner funktionaler Schichten wie auch von mehrschichtigen Verbänden umfassender zu analysieren. Auf dieser Basis können Schutzsysteme entwickelt werden, die entsprechend der Risikobeurteilung einen optimalen Kompromiss zwischen erforderlichem Laserschutz und Ergonomie, d. h. u. a. Tragekomfort, Pflegeeigenschaften und Anpassung an den Träger, bieten. Ziel ist die Erarbeitung von Konzepten für optimierte, anforderungsgerechte Laserschutzbekleidung sowie die Konfektionierung und nachfolgende Prüfung von Funktionsmustern.

Mit der Umsetzung dieser weiteren Maßnahmen kann ein entscheidender Beitrag zum sicheren Betreiben von handgeführten und -positionierten Lasergeräten zur Materialbearbeitung geleistet werden.

10 Literaturverzeichnis

Albert, S.: Reparaturschweißungen an Werkzeugen mittels Laserstrahltechnik. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 1998

Alunovic, M.; Kreutz, E.W.: Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1996, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, ISBN 3-89429-790-5

Barkhausen, W.: Sicherheit bei handgeführter Laserstrahl-Reinigung. In: Monographie Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, Halle, 2006, Hrsg.: BGFE, Köln 2006

Belforte, D.: World markets for industrial lasers and applications. In: Proceedings of the lasers and optoelectronics marketplace seminar, San Jose, CA, USA, 2003

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

Brownell, A. S.; Hysell, D. K. and Parr, W. H.: Millisecond exposure to simulated CO₂ laser radiation, Report 953, USAMRL Ft. Knox, KY, 1969

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

Buettner, K.: Effects of extreme heat and cold on human skin. Numerical analysis and pilot experiments on penetrating flash radiation effects, J. Appl. Physiol. 5:207, 1952

Evans, E.; Brooks, J.; Schmidt, F.; Williams, R. and Ham, W. T.; Jr.: Flash Burns studiens at human volunteers, Surgery 37:280, 1955

Haferkamp, H.; Berend, O. et al.: Neue Lösungsansätze in der Sicherheitstechnik für Handlaser. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

Haferkamp, H.; Drygalla, M.; Bunte, J.; von Busse, A.: Modularized laser beam cutting technology for dismantling applications. (IE-377-04) CI-1150-04, Welding in the World, 2004

Hardy, J.: J. Appl. Physiol. 5,725 (1953)

Hardy, J.: Pain following step increase in skin temperature, in "The Skin Senses", (D.R. Kenshalo, ed.), pp. 444-456, Charles C. Thomas, Springfield, IL., 1968

Henderson, R.; Schulmeister, K.: Laser Safety, Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 2004

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,
Moritz, A.R., Henriques, F.C., Jr.: Am. J. Path.23: 695, 1947

Hügel, H.: Strahlwerkzeug Laser, B.G. Teubner Stuttgart, 1992

Internationale Vereinigung für soziale Sicherheit (Hrsg.): Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen durch einen Störlichtbogen, 2002, ISBN 3-9807576-2-5

Jasnau, U.: Innovationsforum "Mobile und Variable Lasersysteme" - Neue Einsatzgebiete der Lasertechnologie in der Materialbearbeitung, 22.-23. Februar 2006, Rostock

Keitel, S.: Das Potential der Lasertechnik für die Handbearbeitung am Beispiel der Schweißtechnik. In: Tagungsband 1. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg: SLV Halle, 1998

Mayer, A.: Optech Consulting, Market Data-Laser Materials Processing. International Laser Marketplace, 2007

Neubert, J.: Einsatzpotenziale von Hochleistungsfaserlasern im Hinblick auf mobile Laserapplikationen. In: Tagungsband 4. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2004

Panzner, M.: Einsatz mobiler Lasertechnik zur Reinigung in der Restaurierung. In: Tagungsband 5. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2006

Püster, T.; Baur, R.: Normungsarbeit für Maschinen zur handgeführten und handpositionierten Laser Materialbearbeitung. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2002

Püster, T.; Berend, O.; Drygalla, M. et al.: Safety requirements for hand-held laser processing devices - current status of ISO 11553-2. Proceedings: International Laser Safety Conference - ILSC, 7.-10. März 2005, Marina del Ray, California, USA. editor/publisher: LIA. S. 260-268

Rasmussen, C.; Jasnau, U.: Sicherheit im Projekt Dock-Laser. In: Monographie Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, Halle, 2006, Hrsg. BGFE, Köln 2006

Rockwell, R. J., Jr. and Goldman, L.: Research on Human Skin Laser Damage Threshold. Final Report, Contract F41609-72-C-0007, USAF School of Aerospace Medicine, Brooks Air Force Base, TX, prepared by Department of Dermatology and Laser Lab Med. Center, University of Cincinnati (June 1974), 1974

Saffer, Jeffrey D.; Profenno, Louis A.: Patentschrift Laser-Schutzhandschuhe: Laser Beam Protective Gloves. Patentschrift: US Patent 4,947,487 (14.08.1990)

Schmidt, R. F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen, 23. Ausgabe, Springer Verlag, Berlin 1987

Schmid, C.: Ungewohnte Freiheitsgrade. In: Laser, 12 ff, 2001

Schmid, C.: Handgeführte Lasersysteme für die cw- und pw- Materialbearbeitung. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2002

Schmid, C.: Überblick über Geräte und Anwendungen handgeführter und teilmechanisierter Laserbearbeitung. In: Tagungsband 5. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006. Halle, Hrsg.: SLV Halle, 2006

Siekmann, H.: BIA-Info 12/2000: Schutz vor Verbrennungen an heißen Oberflächen. BGIA, Sankt Augustin, 2000

Sliney, D.; Wolbarsht, M.: Safety with Lasers and other Optical Sources, 1980

Stoll, A. M.; Chianta, M. A.: Burn production and prevention in convective and radiant heat transfer. Aerospace Medicine, Vol. 39, 1968, pp10397-1100

Stoll, A. M.; Chianta, M. A.: Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection. Aerospace Medicine, Vol. 40, 1969, pp. 1232-1238

Sutter, E.: Schutz vor optischer Strahlung. 2. Auflage: VDE Verlag, 2002, ISBN 3-8007-2667-X

Weaver, J. A. ; Stoll, A. M.: Mathematical model of skin exposed to thermal radiation. Aerospace Medicine, Vol. 40, 1969, pp 24-30

Zitierte europäische Dokumente: siehe Verzeichnis der europäischen Artikel und Richtlinien

Zitierte Normen-/Regelwerke: siehe Verzeichnisse der nationalen, europäischen und internationalen Normungsinstitutionen

11 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Anwendungsbereiche von HLG	10
Abb. 3.1	Diffus reflektierte Laserstrahlung	21
Abb. 3.2	Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik	21
Abb. 3.3	Strahlverlauf nach einer fokussierenden Optik (schematisch) (SUTTER, 2002)	22
Abb. 3.4	Typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG	24
Abb. 3.5	Unbeabsichtigte Laserbestrahlung von Fingern und Absorptionsverhalten verschiedener Stoffe im menschlichen Organismus	27
Abb. 4.1	Versuchsaufbau zur Kleinsignal-Transmissionsmessung	32
Abb. 4.2	Versuchsaufbau zur Kleinsignal-Remissionsmessung	32
Abb. 4.3	Messaufbau (schematisch) für die Bestrahlungsversuche.....	33
Abb. 4.4	Versuchsaufbauten zur Separierung von Laserstrahlungs- und Wärmestrahlungsanteilen (links: 1.064 nm; rechts: 10.600 nm)	35
Abb. 4.5	Verwendetes Kupferkalorimeter und Berechnungsprinzipien	37
Abb. 4.6	Einsatz der Hautsimulationsfolie im Rahmen von Voruntersuchungen für kalorimetrische Messungen (rote Markierung: Schädigungsbeginn)	38
Abb. 5.1	Spektraler Transmissionsgrad verschiedener Proben, gemessen mit Spektrometer und speziellem Bestrahlungsmessaufbau (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser/CO ₂ -Laser)	40
Abb. 5.2	Spektraler Remissionsgrad verschiedener Proben, gemessen mit Spektrometer (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser)	41
Abb. 5.3	Spektraler Absorptionsgrad verschiedener Proben, berechnet aus Transmissions- und Remissionsgrad (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser)	41
Abb. 5.4	Spektraler Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Flächenmasse für Nd:YAG-Laser	43
Abb. 5.5	Spektraler Transmissionsgrad in Abhängigkeit der Flächenmasse für CO ₂ -Laser.....	44
Abb. 5.6	Vergleich der Transmissionsgrade bei und ohne Einsatz einer Ulbrichtkugel	45
Abb. 5.7	Spektrometrie mit Nd:YAG-Laser im Bereich von $\lambda = 380 \text{ nm}-1680 \text{ nm}$	47
Abb. 5.8	Spektrometrie mit CO ₂ -Laser im Bereich von $\lambda = 380 \text{ nm}-1680 \text{ nm}$	47
Abb. 5.9	Vergleich der maximalen Temperatur des Schutzsystems F02-01 bei Bestrahlung mit CO ₂ - und Nd:YAG-Laser, gemessen mit Thermokamera	48
Abb. 5.10	Messung mit Temperaturverteilung des Schutzsystems F02-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung und Eintritt von Lochbildung.....	48

Abb. 5.11	Vergleich der maximalen Temperatur des Schutzsystems F07-01 bei Bestrahlung mit CO ₂ - und Nd:YAG-Laser, gemessen mit Thermokamera	49
Abb. 5.12	Visuelle Bewertung der Schutzsysteme F01-01, F02-01, F02-06, F05-01, F07-01, H8-02 und H8-03 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung.....	51
Abb. 5.13	Visuelle Bewertung der Schutzsysteme F02-01 und F07-01 bei CO ₂ -Laserbestrahlung	52
Abb. 5.14	Aufnahmen von Handschuhen, die mit einem CO ₂ -Laser bestrahlt wurden.....	53
Abb. 5.15	Zeitpunkte für das Eintreten von Lochbildung für verschiedene Schutzsysteme bei Nd:YAG-Laserbestrahlung.....	54
Abb. 5.16	Zeitpunkte für das Eintreten von Lochbildung für verschiedene Schutzsysteme bei CO ₂ -Laserbestrahlung	55
Abb. 5.17	Vergleich der Signalverläufe bei Leistungsmessungen eines Schutzsystems mit ausgeprägtem spektralen Transmissionsgrad und geringem Transmissionsgrad.....	56
Abb. 5.18	Leistungsmessungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 mit Nd:YAG-Laserstrahlung.....	57
Abb. 5.19	Leistungsmessungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 mit CO ₂ -Laserstrahlung	58
Abb. 5.20	Trennung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung des Schutzsystems F06-03 mit Nd:YAG-Laserstrahlung.....	58
Abb. 5.21	Trennung von Wärmestrahlung und transmittierter Laserstrahlung des Schutzsystems F02-01 mit CO ₂ -Laserstrahlung	59
Abb. 5.22	Kalibration des Kalorimeters (hier dargestellt bis $E \approx 4 \cdot 10^5 \text{ W/m}^2$).....	60
Abb. 5.23	Korrekturfaktor für Laserexposition des Kalorimeters	60
Abb. 5.24	Beispiele für den Korrekturbereich.....	61
Abb. 5.25	Vergleich der Kalibriermessungen des Kalorimeters mit den Ergebnissen der Realbestrahlung des Schutzsystems F02-01 bei CO ₂ - und Nd:YAG-Laserbestrahlung.....	62
Abb. 5.26	Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-04 bei CO ₂ -Laserbestrahlung (Eintritt von Lochbildung)	62
Abb. 6.1	Zeitliches Signal des Leistungsmessgerätes bei Nd:YAG-Laserbestrahlung des Schutzsystems F06-03.....	64
Abb. 6.2	Zeitliches Signal des Kalorimeters bei Nd:YAG-Laserbestrahlung von Nappaleder	65
Abb. 6.3	Schematische Darstellung des Verhaltens von Schutzsystemen	65
Abb. 6.4	Spektrale Strahldichte eines schwarzen Strahlers.....	68
Abb. 6.5	Vergleich der Schädigungsraten bei Wärmeleitung und Wärmestrahlung in Abhängigkeit der Hauttemperatur (HENRIQUES, 1947)	70
Abb. 6.6	Grenze für das Auftreten von Verbrennungen 2. Grades und Schmerz gemäß Stoll/Chianta (links: lineare, rechts doppelt logarithmische Darstellung)	71

Abb. 6.7	Toleranzzeit der ungeschützten menschlichen Haut für das Auftreten von Schmerz und Verbrennungen 2. Grades (Blasenbildung) gemäß Stoll/Chianta (STOLL et al., 1968; STOLL et al., 1969)	72
Abb. 6.8	Schematische Darstellung eines Reflexbogens (SCHMIDT et al., 1987)	73
Abb. 6.9	Verbrennungsschwellen-Bereich für den Kontakt von Haut mit heißen glatten Oberflächen (DIN EN 563)	76
Abb. 6.10	Schmerzgrenze der unbedeckten Haut in Abhängigkeit von der Bestrahlungsstärke der Wärmestrahlung(mod. nach Webb, Stoll & Green) aus DIN 33403-3	76
Abb. 6.11	Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung.....	78
Abb. 6.12	Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-01 und F07-01 bei CO ₂ -Laserbestrahlung	79
Abb. 6.13	Kalorimetrische Messungen verschiedener Schutzsysteme bei Dioden-Laserbestrahlung	80
Abb. 6.14	Kalorimetrische Messungen verschiedener Schutzsysteme bei Nd:YAG-Laserbestrahlung.....	81
Abb. 6.15	Kalorimetrische Messungen verschiedener Schutzsysteme bei CO ₂ -Laserbestrahlung	82
Abb. 6.16	Aluminisiertes Kevlargewebe (Rückseite: Waffelpique); links: bestrahlte Vorderseite; rechts Rückseite	83
Abb. 7.1	Flussdiagramm zur Auslegung von persönlicher Schutzbekleidung für Tätigkeiten mit HLG	87

12 Tabellenverzeichnis

Tab. 3.1	Technische Daten verwendeter HLG und Strahlquellen	23
Tab. 4.1	Kriterien zur visuellen Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung	36
Tab. 6.1	Schädigungen menschlichen Gewebes in Abhängigkeit der Gewebetemperatur (Gefahren bei Laseranwendungen an menschlicher Haut, Strahlenschutzkommission Bonn, 2000)	69
Tab. 6.2	Kontaktdauern/Reflexzeiten gemäß DIN EN 563.....	75

13 Abkürzungen und Formelzeichen

A	Absorptionsgrad
AK	Arbeitskreis
BaSO ₄	Bariumsulfat
BG	Berufsgenossenschaft
BGI	Berufsgenossenschaftliche Information
BGV	Berufsgenossenschaftliche Vorschrift
β	Winkel, Reflexionswinkel
C	Korrekturfaktor
CEN	European Committee for Standardization (Europäisches Komitee für Normung)
CO ₂	Kohlenstoff-Dioxid (Lasergas)
cw	Continuous wave (Dauerstrich-Betrieb)
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
d	Durchmesser
d _{kol}	Durchmesser des kollimierten Strahls
d _s	Durchmesser des Bestrahlungsflecks am Schutzsystem
D	Distance (Abstand)
E	Bestrahlungsstärke
E _{MZBHaut}	maximale Bestrahlungsstärke der Haut in W/m ²
E _{VMB}	Vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärke in W/m ²
EN	Europäische Norm
EG	Europäische Gemeinschaft
EWG	Europäische Wirtschaftsgemeinschaft
f	Fokusabstand (Brennweite)
FR	Flame-resistant (Flammhemmend)
FTIR	Fourier-Transformations-IR (Spektroskopie)
GZS	Grenzwert zugänglicher Strahlung
<i>grad</i> ϑ	Temperaturgradient
H	Bestrahlung
HLG	handgeführtes oder –positioniertes Lasergerät zur Materialbearbeitung
HR	hochreflektierend (Spiegel mit hochreflektierender Oberfläche)
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
\dot{q}	Wärmestromdichte
λ	Wellenlänge
L	spektrale Strahldichte
LASER	Light amplification by stimulated emission of radiation (Lichtverstärkung durch stimulierte Emission von Strahlung)
M	spezifische Ausstrahlung (eines schwarzen Strahlers)
MIR	Mittlere Infrarote Strahlung
Mrd	Milliarde
MZB	Maximal zulässige Bestrahlung
MZB _{Haut}	Maximal zulässige Bestrahlung der Haut

Nd:YAG	Neodym:Yttrium-Aluminium-Granat (Laserkristall)
NIR	Near infrared radiation (Nahe Infrarote Strahlung)
NOHD	Nominal Ocular Hazard Distance, Sicherheitsabstand
P	Leistung, Strahlungsleistung in W
PAN	Polyacrylnitril (Faser)
PC	Personal Computer
P_M	maximale Ausgangsleistung
P_m	mittlere Ausgangsleistung
PREOX®	preoxidiertes Polyacrylnitril (Faser)
PU	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid (Kunststoff)
$d\Omega/dt$	Schädigungskonstante (Haut)
Φ	Strahlungsfluss
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
r	Abstand
R	Reflexionsgrad
R	Gaskonstante
RL	Richtlinie
δ	Divergenz
SC	Subcommittee
SGB	Schutzgrenzbestrahlung
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante
t	Zeit
T	Transmissionsgrad
TC	Technical committee
$T_{\max (v)}$	Temperatur
TEM ₀₀	Transversaler elektromagnetischer Grundmode, Gaußmode
UV	Ultraviolett
VIS	visible (sichtbarer Spektralbereich)
VMB	vorhersehbare Maximalbestrahlung
WG	Working Group
ZNS	Zentrales Nervensystem

14 Danksagung

Die Autoren danken Herrn Dipl.-Ing. G. Ott für seine Beiträge zu dieser Veröffentlichung.

Ihm sowie Herrn M. Janßen und Herrn Dr. R. Pipke (Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Dortmund) sei gedankt für die gute Betreuung und Unterstützung während der Durchführung dieses Forschungsvorhabens.

Des Weiteren danken die Autoren Herrn Dipl.-Phys. M. Brose (Berufsgenossenschaft für Feinmechanik und Elektrotechnik, Köln) für die Anregungen und Kommentare zur Durchführung des Forschungsprojektes sowie zur Veröffentlichung derselben.

Anhang 0 Hersteller von HLG und Dienstleister

Anh. 0, Tab. 1 Hersteller von HLG und Dienstleister

Name	Hersteller von HLG	Dienstleister	Produkte/Verfahren				sonstiges
			Schneiden	Schweißen	Auftrag-schweißen	Reinigen/Abtragen	
MV Laser	X	X	X	X	X		Heften/Traktoren
Jenoptik	X			X			+ Strahlquellen
Clean-Lasersysteme	X	X				X	
DSI Laser-Service GmbH		X		X	X		X
Alpha Laser	X			X	X		Lasengeräte zum Feinschweißen
SLV Halle GmbH	X			X			Heften
Soliton Laser- und Messtechnik GmbH	X					X	+ Strahlquellen
Rofin-Sinar Laser GmbH	X			X			+ Strahlquellen, Lasengeräte zum Feinschweißen
Trumpf	X			X			+ Strahlquellen, Lasengeräte zum Feinschweißen
EL.EN.	X			X		X	Restauration
LOT-Oriel	X					X	
Limo Lissotschenko Mikrooptik GmbH	X			X			+ Strahlquellen
Compact Laser Solutions	X					X	+Strahlquellen, Markieren
PROLAS	X			X			Schweißen von Polymeren
Mobil-Mark GmbH						X	Markieren
Dr. Teschauer AG	X	X				X	Markieren
SLV Mecklenburg-Vorpommern GmbH	X			X			
Laserinstitut Mittelsachsen LASERVORM GmbH	X			X	X		
Laser Zentrum Hannover	X	X	X	X			Härten
TU Clausthal	X	X	X	X	X		
FHG-IWS, Dresden		X				X	Restaurierung
Ingenieurbüro für Lasertechnik Dr. G. Michel		X		X	X		
Dr. Busch Laserwerkzeuge GmbH	X	X	X	X	X		

Stand 03/2007: Liste erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit

Anhang 1 Erläuterung der Prüfverfahren zur Bestimmung der Probendicke sowie Ermittlung der Bindungsart

Die Ermittlung der Dicke wurde für die textilen Gewebe nach der DIN EN ISO 5084 sowie für die Lederwaren nach DIN EN ISO 2589 durchgeführt.

In der DIN EN ISO 5084 werden Proben mit einer Messfläche von 20 cm² bei einem Druck von 10 cN/cm² an 5 verschiedenen Messpunkten untersucht. Aus den Einzelwerten werden der Mittelwert, die Standardabweichung, der Variationskoeffizient sowie der absolute Vertrauensbereich ermittelt. Bei verschiedenen Proben konnten jedoch keine Mehrfachmessungen durchgeführt werden, da keine ausreichend große Messfläche zur Verfügung gestanden hat.

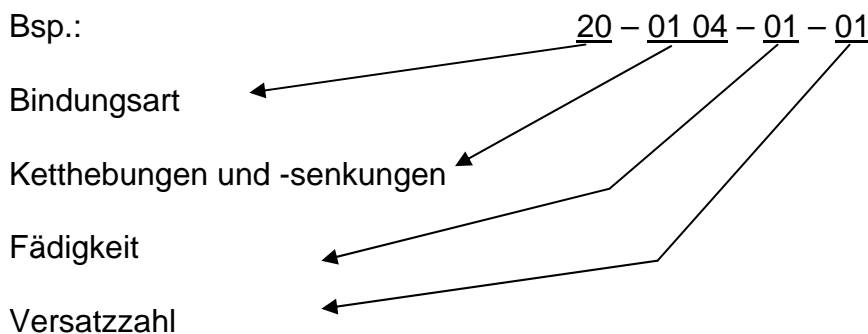
Die Proben der Schweißerschutzhandschuhe wurden nach DIN EN ISO 2589 mit einem Druck von 500 cN/cm² und einer Messfläche von A = 0,785 cm² untersucht. Es erfolgten 3 Messwerverfassungen. Daraus wurden die angegebenen Werte ermittelt und dargestellt.

Eine detaillierte Darstellung des Prüfaufbaus wird in den Normen nicht angegeben. [DIN96][DIN02]

Zur Erklärung der Bindungskurzzeichen (Schlüssel): In der DIN 61101 Teil 2 werden die einzelnen Kennzeichen näher erläutert und lösen die vormals üblichen Schreibweisen ab. Die Ergebnisse in der vorhandenen Tabelle werden mit dem neuen Schlüssel angegeben.

Bindungskurzzeichen (Schlüssel)

Bsp.:



Das Bindungskurzzeichen setzt sich aus der Bindungsart, Ketthebung bzw. Kettensenkung, Fädigkeit und Versatzzahl zusammen. Diese Punkte erhalten eine eindeutige Nummer und sind durch Bindestriche voneinander getrennt.

Die erste zweistellige Zahl gibt die eindeutige Bezeichnung der Bindungsart an. Genauere Erläuterungen der einzelnen Kodierungen sind in Anh. 1, Tab. 1 dargestellt.

Anh. 1, Tab. 1 Kodierungen der Bindungsarten

Nummernteil	Bindungsart
10	Leinwandbindung oder eine einfache Ableitung davon, beginnend links unten in der Bindungspatrone mit einer Ketthebung
11	Leinwandbindung oder eine einfache Ableitung davon, beginnend am weitesten links unten in der Bindungspatrone mit einer Kettsenkung
20	Körperbindung oder eine einfache Ableitung davon, beginnend links unten in der Bindungspatrone mit einer Ketthebung
21	Körperbindung oder eine einfache Ableitung davon, beginnend am weitesten links unten in der Bindungspatrone mit einer Kettsenkung
30	Atlasbindung beginnend links unten in der Bindungspatrone mit einer Ketthebung
31	Atlasbindung beginnend am weitesten links unten in der Bindungspatrone mit einer Kettsenkung

Der zweite Nummernteil setzt sich aus einer Folge von zweistelligen Zahlen, die durch einen Abstand voneinander getrennt sind, zusammen. Er gibt die Anzahl der Ketthebungen sowie Kettsenkungen bis zur Rapportierung an. Der Beginn ist abhängig von der zweiten Ziffer des ersten Nummernteils.

Mit der Zählung wird jeweils links unten im Bindungsrapport begonnen.

Bsp.: 03 01 bedeutet in Abhängigkeit von der ersten Ziffer des ersten Nummernteils

Entweder: 3 Ketthebungen, 1 Kettsenkung

Oder: 3 Kettsenkungen, 1 Ketthebung

Aus der Addition dieser beiden Zahlen dieses Nummernteils ergibt sich die Höhe des Bindungsrapports (Rapport im Schuss).

Die gemäß Nummernteil 2, in Abhängigkeit von den nachfolgenden Nummernteilen, fortlaufende Entwicklung muss so lange durchgeführt werden, bis eine vollkommene Wiederholung der bisherigen Entwicklung und damit der Rapport erkennbar ist (Rapport in der Kette).

Der dritte Nummernteil des Bindungskurzzeichens gibt mit einer zweistelligen Nummer ggf. mit mehreren durch Abstände getrennten Zahlen die Anzahl der nebeneinander gleichbindenden Kettfäden an.

01 = 1-fädig

03 = 3-fädig

04 02 = 4- und 2-fädig

Der vierte Nummernteil bezieht sich auf die Versatzzahl. Diese wird für Körperbindungen sowie Atlasbindungen und deren Ableitungen angegeben.

Die Versatzzahl gibt hierbei an, um wie viel Schussfäden die Ketthebung und Senkung von Kettfaden zu Kettfaden bzw. von Kettfadengruppe zu Kettfadengruppe zu versetzen sind (jeweils von links unten nach rechts oben).

Bei der Leinwandbindung und deren Ableitung gibt es keinen Versatz. Hierbei wird durch die Zahlengruppe 00 angegeben, dass jeweils der folgende Kettfaden bzw. die folgende Kettfadengruppe entgegengesetzt zum vorhergehenden Kettfaden bzw. zur vorhergehenden Kettfadengruppe bindet.

00 = entgegengesetzt bindend

03 = Versatz jeweils um drei Schussfäden

01 03 = Versatz im Wechsel um einen, anschließend um 3 Schussfäden

DIN 61101 Teil 2, Dez. 1985: Gewebebindungen, Allgemeine Begriffe, Grundbindungen, Teil 2, Dez.1985

DIN EN ISO 5084: Textilien – Bestimmung der Dicke von Textilien und textilen Erzeugnissen, 1996

DIN EN ISO 2589: Leder – Physikalische und mechanische Prüfungen – Bestimmung der Dicke, 2002

Anhang 2 Spezifikation der für die Untersuchungen ausgewählten Werkstoffe

Anh. 2, Tab. 1 Für Bestrahlungsversuche ausgewählte Proben

Probe	Werkstoff	Bindungsart	Bindungsformel	Verwendung (in/für)	Flächenmasse in g/m ²	Dicke in mm
F01-01	(88 % Baumwolle, 12 %Nylon)	Kettkörper	20-0301-01-03	Oberbekleidung Flammenschutz EN 531, ENV 50354 in Verbindung mit Isolationslagen	240	0,624
F01-02-s-W	(88 % Baumwolle, 12 %Nylon)	Kettkörper	20-0301-01-03	Oberbekleidung EN 531, ENV 50354 in Verbindung mit Isolationslagen 5 x Wäsche, 4 x mit Waschmittel 1 x ohne	240	0,698
F01-03-m-W	(88 % Baumwolle, 12 %Nylon)	Kettkörper	20-0201-01-02	Oberbekleidung EN 531, ENV 50354 in Verbindung mit Isolationslagen 5x Wäsche	210	0,616
F01-04	(88 % Baumwolle, 12 %Nylon)	Kettkörper	20-0401-01-04	Oberbekleidung EN 531, ENV 50354 in Verbindung mit Isolationslagen	460	0,96
F01-05	(88 % Baumwolle, 12 %Nylon)	Kettkörper	20-0401-01-04	Oberbekleidung EN 531, ENV 50354 in Verbindung mit Isolationslagen	340	0,72
F02-01	(100 % Baumwolle FR)	Schussatlas	30-0104-01-02	Oberbekleidung EN 531 mit Flüssigmetallschutz, EN 470-1, ENV 50354 in Verbindung mit Isolationslagen	520	0,886
F02-02	Viskose/Wolle/Polyamid/Trevira	Kettkörper	21-0102-01-01	Oberbekleidung EN 531 mit Flüssigmetallschutz, EN 470-1	380	0,68
F02-03	CS/Wolle/Modacryl/Baumwolle/Viskose	Kettatlas	30-0401-01-02	Oberbekleidung dito	330	0,734
F02-04	100 % Baumwolle FR	Leinwandbindung	10-0101-01-00	Oberbekleidung EN 531 und Isolationsmaterial für Hitzeschutz	190	0,386
F02-05-gr-W	100 %Baumwolle FR	Leinwandbindung	10-0101-01-00	Oberbekleidung EN 531 und Isolationsmaterial für Hitzeschutz	190	0,518
F02-06	Baumwolle Kettsatin	Kettatlas	30-0401-01-03	Oberbekleidung EN 531, EN 470-1	350	0,6
F02-07	Conex 100 % Aramid + Sympatexmembran	Gleichgratkörper	20-0202-01-01	Oberbekleidung dito		0,406

F03-01	Basofil Baumwolle + leitfähiges Filament DKFFR	Kettkörper	20-0201-01-02	Oberbekleidung (Feuerwehr) EN 531 mit Flüssigmetallschutz, EN 470-1	330	0,764
F04-01	Außenwerkstoff: Nomex Filament Chamatex Innenwerkstoff: Nomex 3 Gestrück Billon Technik	Kettkörper, Rechts-Rechts-Gestrück	21-0103-01-01	Oberbekleidung (Motorsport) FIA (Innenlagen und Unterbekleidung)	180	1,96
F05-01	Aluminiumkaschiertes Preox® - Gewebe	Gleichgrat-körper	20-0202-01-01	Oberbekleidung EN 531 mit hohem Strahlungshitzeschutz		1,6
F06-01	Aluminiumkaschiertes Nomex Gewebe, schwarz			Handschuhe Flammschutz, Hitzeschutz		
F06-02	Nomex, einseitig Pu-kaschiert	Kettkörper	20-0201-01-02	Handschuhe dito	400	0,47
F06-03	Preox® -Aramid, 70 % PAN-Faser, 30 % Kevlar Regenerat	Gleichgrat-körper	20-0202-01-02	Handschuhe dito		0,76
F07-01	Glasgewebe einseitig Silikon grau/einseitig aluminisiert			Oberbekleidung, Handschuhe, Schürzen: Hitzeschutz, Flammschutz		
F07-02	Baumwolle Samt einseitig aluminisiert			Bekleidung dito		
F07-03	Baumwolle Inlet einseitig aluminisiert			Bekleidung, dito		
F07-04	Baumwolle Inlet beidseitig aluminisiert			Bekleidung, dito		
F07-05	Glasgewebe, beidseitig aluminisiert, einseitig zusätzlich PTFE			Bekleidung, dito	225	
F07-06	100 % Kevlar in Waffelbindung ohne Al	Oberseite: Leinwandbindung Unterseite: Waffelpikee	10-0101-01-00			1,92
F07-07	100 % Kevlar in Waffelbindung 60 g/m² aluminisiert					
F07-08	100 % Kevlar in Waffelbindung 130 g/m² aluminisiert					
F07-09	100 % Kevlar in Waffelbindung 165 g/m² aluminisiert					
F08-01	100 % Baumwolle			Freizeitbekleidung, leichte Handschuhe		
H08-02	Rindvollleder			Handschuhe Schweißerschutz		0,79
H08-03	Nappaleder			Handschuhe Schweißerschutz		1,223

Anhang 3 Spezifikation der für die Untersuchungen eingesetzten Lasergeräte (Strahlquellen)

Anh. 3, Tab. 1 Technische Spezifikationen der Nd:YAG Strahlquelle für die Kleinsignal-Transmissionsmessung

Strahlquelle	Lumera UPL 20
Wellenlänge	1.064 nm
Mittlere Leistung	16 W
Pulsenergie	100 nJ
Pulslänge	10 ps
Repetitionsrate	160 MHz
Strahlprofil	Gauß
Bestrahlungsfleckdurchmesser	1 mm

Anh. 3, Tab. 2 Technische Spezifikationen der CO₂-Strahlquelle für die Kleinsignal-Transmissionsmessung

Strahlquelle	Synrad G48-2-25(W)
Wellenlänge	10.600 nm
Mittlere Leistung	25 W
Repetitionsrate	5 kHz
Strahlprofil	Gauß
Bestrahlungsfleckdurchmesser	7 mm

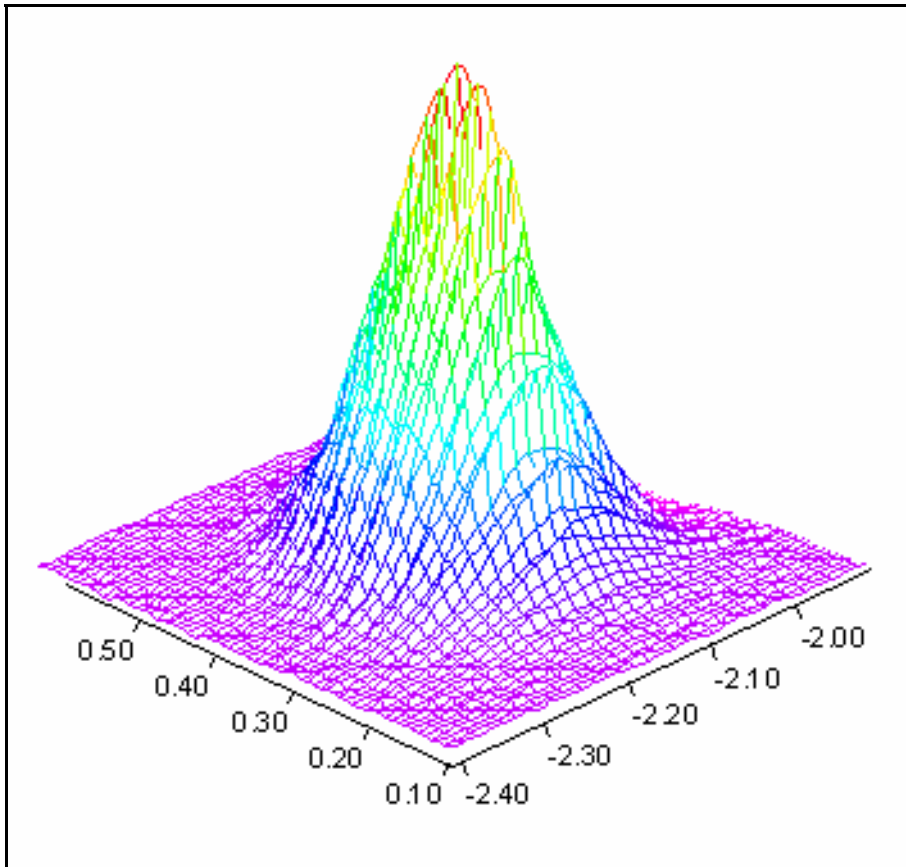
Anh. 3, Tab. 3 Technische Spezifikationen der für die Bestrahlungsversuche verwendeten CO₂-Laserstrahlquelle

Strahlquelle	Synrad G48-5-(S)W
Wellenlänge	10.600 nm
Mittlere Leistung	50 W
Repetitionsrate	5 kHz (quasi-cw)
def. Strahlprofil	Gaußförmig

Anh. 3, Tab. 4 Technische Spezifikationen der für die Bestrahlungsversuche verwendeten CO₂-Laserstrahlquelle

Strahlquelle	Coherent Diamond K250
Wellenlänge	10.600 nm
Mittlere Leistung	250 W
Pulsenergie	10 bis 500 mJ
Min. Pulslänge	1 µs
Max. Repetitionsrate	100 kHz*
def. Strahlprofil	Gaußförmig

* realisierte Repetitionsrate: = 1 kHz

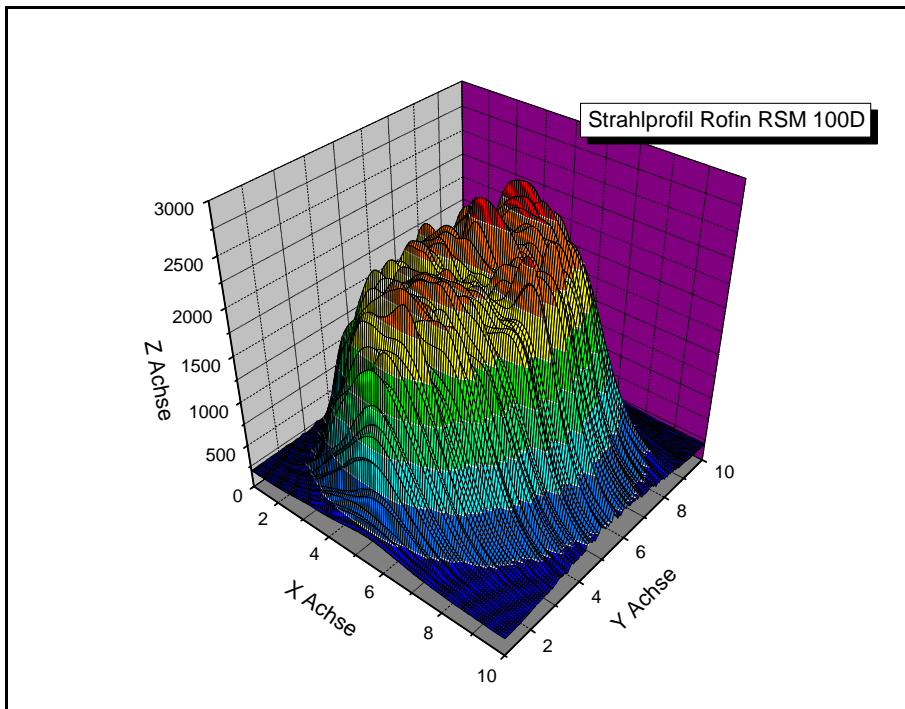


Anh. 3, Abb. 1 Strahlprofil bei Verwendung des CO₂-Lasers (willkürliche Achsenteilung)

Anh. 3, Tab. 5 Technische Spezifikationen der für die Bestrahlungsversuche verwendeten Nd:YAG-Laserstrahlquelle

Strahlquelle	Rofin RSM 100D
Wellenlänge	1.064 nm
Mittlere Leistung	100 W
Max. Pulsenergie	10 mJ
Min. Pulslänge FWHM	45 ns
Repetitionsrate	0 - 65 kHz*
def. Strahlprofil	Gaußförmig

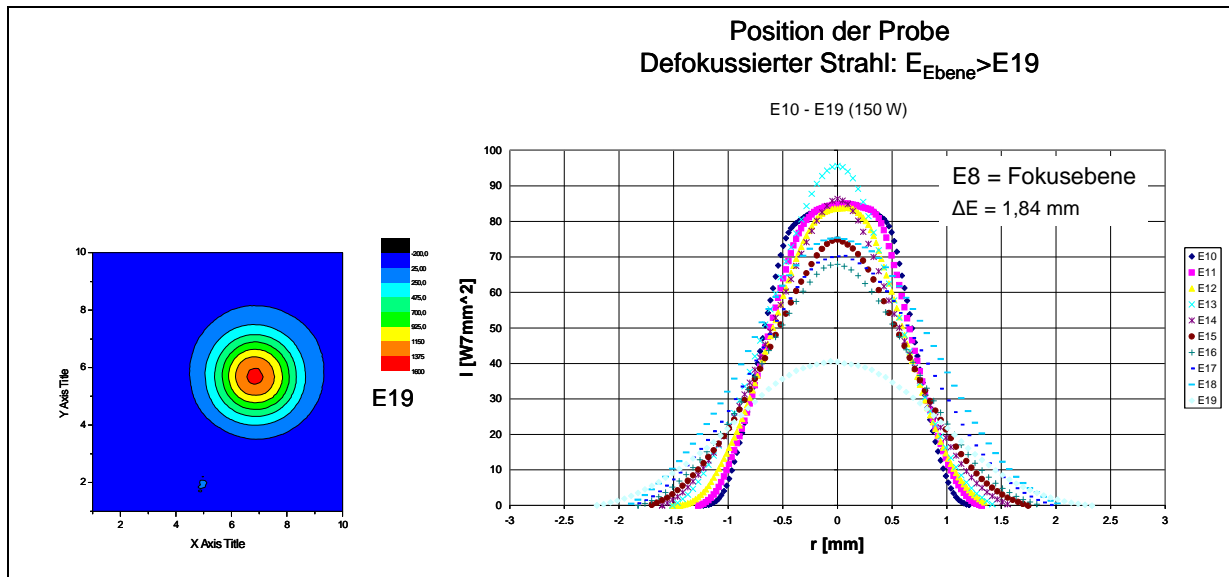
* realisierte Repetitionsrate: > 5 kHz (quasi-cw)



Anh. 3, Abb. 2 Strahlprofil der für die Bestrahlungsversuche verwendeten Nd:YAG-Laserstrahlquelle (willkürliche Achseneinteilung)

Anh. 3, Tab. 6 Technische Spezifikationen der für die Bestrahlungsversuche verwendeten Diodenlaser-Strahlquelle

Strahlquelle	Laserline LDF 600-250
Wellenlänge	940 nm
Mittlere Leistung	250 W
Betriebsart/Repetitionsrate	cw
Brennweite (f-theta)	163 mm
Strahlprofil def.	Gaußartig



Anh. 3, Abb. 3 Strahlprofil des für die Bestrahlungsversuche verwendeten Diodenlasers (willkürliche Achseneinteilung)

Anhang 4 Tabellarische Übersicht der Ergebnisse

(Visuelle und kalorimetrische Bewertung)

Anh. 4, Tab. 1 Ergebnisse unter Verwendung der CO₂-Laserstrahlquelle (Synrad)

Laserstrahlquelle: Synrad G-48-5-S(W)						
Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Strahldurchmesser D = 7 mm, Beobachtungszeit t = 10 s						
Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s
F01-01	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	1,1E-03	2,4x10 ⁴	5	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	9
			3,4x10 ⁵	1	4	8
F01-02	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	3,7E-03	2,4x10 ⁴	6	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	8
			3,4x10 ⁵	1	5	9
F01-03	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	5,2E-03	2,4x10 ⁴	4	-	-
			5,5x10 ⁴	1	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	8
			3,4x10 ⁵	1	3	6
F01-04	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	< 1,0E-05	2,4x10 ⁴	7	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	-
			3,4x10 ⁵	1	5	-
F01-05	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	3,1E-05	2,4x10 ⁴	5	-	-
			5,5x10 ⁴	1	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	-
			3,4x10 ⁵	1	5	-
F02-01	100 % Baumwolle FR	< 1,0E-05	2,4x10 ⁴	7	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	-
			3,4x10 ⁵	1	6	-

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Synrad G-48-5-S(W)
Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Strahldurchmesser D = 7 mm, Beobachtungszeit t = 10 s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s
F02-02	Viskose / Wolle / Polyamid / Trevira	< 1,0E-05	2,4x10 ⁴	4	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	-
			2,1x10 ⁵	1	10	-
			3,4x10 ⁵	1	6	-
F02-03	CS / Wolle / Modacryl / Baumwolle / Viskose	3,1E-05	2,4x10 ⁴	5	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	-
			3,4x10 ⁵	1	-	-
F02-04	100 % Baumwolle FR	3,2E-02	2,4x10 ⁴	5	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	9
			2,1x10 ⁵	1	1	4
			3,4x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.
F02-05	100 % Baumwolle FR	2,0E-02	2,4x10 ⁴	6	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	7
			2,1x10 ⁵	1	2	3
			3,4x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.
F02-06	Baumwolle Kettsatin	3,4E-04	2,4x10 ⁴	5	-	-
			5,5x10 ⁴	2	-	-
			2,1x10 ⁵	1	-	9
			3,4x10 ⁵	1	3	8
F02-07	Conex 100 % Aramid + Sympatexmembran	6,6E-04	2,4x10 ⁴	5	-	-
			5,5x10 ⁴	1	-	-
			2,1x10 ⁵	1	4	-
			3,4x10 ⁵	1	2	10

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Synrad G-48-5-S(W)

Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Strahldurchmesser $D = 7$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m^2	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s
F03-01	Basofil Baumwolle + leitfähiges Filament DKFFR	< 1,0E-05	$2,4 \times 10^4$	10	-	-
			$5,5 \times 10^4$	3	-	-
			$2,1 \times 10^5$	1	-	-
			$3,4 \times 10^5$	1	5	-
F04-01	Außenwerkstoff: Nomex Filament Chamatex, Innenwerkstoff: Nomex 3 Gestrick Billon Technik	6,3E-04	$2,4 \times 10^4$	-	-	-
			$5,5 \times 10^4$	2	-	9
			$2,1 \times 10^5$	1	-	4
			$3,4 \times 10^5$	1	-	2
F05-01	Aluminiumkaschiertes Preox®-Gewebe	< 1,0E-05	$2,4 \times 10^4$	-	-	-
			$5,5 \times 10^4$	-	-	-
			$2,1 \times 10^5$	-	-	-
			$3,4 \times 10^5$	2	-	-
F07-01	Glasgewebe einseitig Silikon grau/einseitig aluminisiert	1,0E-05	$2,4 \times 10^4$	-	-	-
			$5,5 \times 10^4$	-	-	-
			$2,1 \times 10^5$	-	-	-
			$3,4 \times 10^5$	10	-	-
F07-05	Glasgewebe, beidseitig aluminisiert, einseitig zusätzlich PTFE	< 1,0E-05	$2,4 \times 10^4$	-	-	-
			$5,5 \times 10^4$	4	-	-
			$2,1 \times 10^5$	1	-	-
			$3,4 \times 10^5$	1	2	-

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Anh. 4, Tab. 2 Ergebnisse unter Verwendung der CO₂-Laserstrahlquelle (Coherent)

Laserstrahlquelle: Coherent Diamond K250								
Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 14$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s								
Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F01-01	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	1,1E-03	5,5x10 ⁴	1,5	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	1,5	8,5	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	2	8	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	0,5	6	n. b.	
F01-02	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	3,7E-03	5,5x10 ⁴	1	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	1,5	9	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	0,5	7	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	6	n. b.	
F01-03	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	5,2E-03	5,5x10 ⁴	1	-	-	1,4	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	0,5	-	-	0,9	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	1	7	0,5	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	5,5	0,2	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	5	0,2	
F01-04	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	2	-	-	2,1	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	0,5	-	-	1,2	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	0,5	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	1,5	-	0,3	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	0,2	
F01-05	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	3,1E-05	5,5x10 ⁴	2	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	1	9,5	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	8	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Coherent Diamond K250

Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 14$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F02-01	100 % Baumwolle FR	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	2,5	-	-	2,4	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	1	-	-	1,4	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	3	-	0,5	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	2	-	0,5	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	1	-	0,3	
F02-02	Viskose / Wolle / Polyamid / Trevira	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	2,5	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	1	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	3,5	9,5	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	1	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	0,5	n. b.	
F02-03	CS / Wolle / Modacryl / Baumwolle / Viskose	3,1E-05	5,5x10 ⁴	1	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	4,5	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	0,5	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	0,5	n. b.	
F02-04	100 % Baumwolle FR	3,2E-02	5,5x10 ⁴	1,5	-	-	2	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	0,5	2,5	8	0,8	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	1	n. b.	
			3,7x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
			6,1x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
F02-05	100 % Baumwolle FR	2,0E-02	5,5x10 ⁴	1,5	4	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	0,5	2	4,5	n. b.	
			2,2x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
			3,7x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
			6,1x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Coherent Diamond K250

Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 14$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F02-06	Baumwolle Kettsatin	3,4E-04	5,5x10 ⁴	1	-	-	1,4	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	0,7	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	0,4	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	8,5	0,3	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	8	0,3	
F02-07	Conex 100 % Aramid + Sympatexmembran	6,6E-04	5,5x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	3	n. b.	
F03-01	Basofil Baumwolle + leitfähiges Filament DKFFR	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	1,5	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
F04-01	Außenwerkstoff: Nomex Filament Chamatex, Innenwerkstoff: Nomex 3 Gestrück Billon Technik	6,3E-04	5,5x10 ⁴	2	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	1	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	4	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	2	-	n. b.	
F05-01	Aluminiumkaschiertes Preox®-Gewebe	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	-	-	-	> 10	
			9,6x10 ⁴	-	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	1,5	-	-	> 10	
			3,7x10 ⁵	0,5	1	-	2,2	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	1,3	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Coherent Diamond K250

Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 14$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F06-01	Aluminiumkaschiertes Nomex®-Gewebe, schwarz	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung der Nomex®-Lage
			9,6x10 ⁴	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	4,5	-	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	2	4	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	
F06-02	Nomex®, einseitig PU- kaschiert	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	3	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	
F06-03	Preox®-Aramid, 70 % PAN-Faser, 30 % Kevlar Regenerat	4,7E-04	5,5x10 ⁴	< 0,5	-	-	3	Verkohlen Versprödung
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	2,7	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	4	-	0,8	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	0,6	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	1,5	-	0,3	
F07-01	Glasgewebe einseitig Silikon grau/einseitig aluminisiert	1,0E-05	5,5x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Silikon-Lage
			9,6x10 ⁴	-	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	2	-	-	> 10	
			3,7x10 ⁵	1	-	-	3,5	
			6,1x10 ⁵	0,5	1,5	-	0,8	
F07-05	Glasgewebe, beidseitig aluminisiert, einseitig zusätzlich PTFE	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	2	-	-	n. b.	Schmelzen des PTFE
			9,6x10 ⁴	1	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	0,5	1,5	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Coherent Diamond K250

Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 14$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F07-06	100 % Kevlar® in Waffelbindung, ohne Al	n. b.	5,5x10 ⁴	0,5	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	2,3	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	5	6	0,9	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	3	1	0,6	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	0,5	0,3	
F07-07	100 % Kevlar® in Waffelbindung, 60 g/m ² , aluminisiert	n. b.	5,5x10 ⁴	3	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	5,5	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	1,5	2,5	n. b.	
F07-08	100 % Kevlar® in Waffelbindung, 130 g/m ² , aluminisiert	n. b.	5,5x10 ⁴	6,5	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			9,6x10 ⁴	1	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	5,5	-	n. b.	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	3	-	n. b.	
F07-09	100 % Kevlar® in Waffelbindung, 165 g/m ² , aluminisiert	n. b.	5,5x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			9,6x10 ⁴	2	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	> 10	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	7,5	-	1,9	
			6,1x10 ⁵	< 0,5	3	-	0,7	
F08-01	100 % Baumwolle	n. b.	5,5x10 ⁴	< 0,5	3	4	n. b.	Entzünden, Verkohlen, Nachbrennen
			9,6x10 ⁴	< 0,5	2,5	3	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	1,5	2	n. b.	
			3,7x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	
			6,1x10 ⁵	n. b.	n. b.	n. b.	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Coherent Diamond K250

Wellenlänge $\lambda = 10.600$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 14$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
H08-02	Rindvollleder	6,3E-05	5,5x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	Schrumpfen,
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	-	5,5	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			6,1x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	0,5	n. b.	
H08-03	Nappaleder	< 1,0E-05	5,5x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	Schrumpfen,
			9,6x10 ⁴	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	6,5	1,1	
			3,7x10 ⁵	< 0,5	-	2	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			6,1x10 ⁵	< 0,5	-	0,5	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Anh. 4, Tab. 3 Ergebnisse unter Verwendung der Nd:YAG-Laserstrahlquelle

Laserstrahlquelle: Rofin RSM 100D								
Wellenlänge $\lambda = 1.064$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 13$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s								
Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F01-01	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	2,5E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	9,5	-	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	4	6	-	n. b.	
F01-02	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	1,2E-01	5,1x10 ⁴	3,5	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	2	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	1,5	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	0,5	3,5	9	n. b.	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	1	7	n. b.	
F01-03	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	1,0E-01	5,1x10 ⁴	2,5	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	1,5	-	-	3,4	
			2,2x10 ⁵	1	-	9,5	1,3	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	3	10	0,6	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	1	6,5	0,4	
F01-04	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	7,6E-03	5,1x10 ⁴	4	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	2	-	-	4	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	1,6	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	3,5	-	0,9	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	0,5	
F01-05	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	1,6E-02	5,1x10 ⁴	3	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	1,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	0,5	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	< 0,5	-	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Rofin RSM 100D

Wellenlänge $\lambda = 1.064$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 13$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F02-01	100 % Baumwolle FR	1,4E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	6	9,5	-	n. b.	
F02-02	Viskose / Wolle / Polyamid / Trevira	2,4E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	4	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	3	8,5	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	1	6,5	4	n. b.	
F02-03	CS / Wolle / Modacryl / Baumwolle / Viskose	2,3E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	8	-	-	n. b.	
F02-04	100 % Baumwolle FR	3,2E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	3,1	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	1,1	
			4,5x10 ⁵	-	-	-	0,5	
			6,7x10 ⁵	-	-	-	0,3	
F02-05	100 % Baumwolle FR	3,4E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	-	-	-	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Rofin RSM 100D

Wellenlänge $\lambda = 1.064$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 13$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F02-06	Baumwolle Kettsatin	5,4E-02	5,1x10 ⁴	5	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	3	-	-	3,7	
			2,2x10 ⁵	1,5	-	-	2,1	
			4,5x10 ⁵	0,5	3	-	0,9	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	10	0,5	
F02-07	Conex 100 % Aramid + Sympatexmembran	2,9E-04	5,1x10 ⁴	1	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	4	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	1,5	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	1	0,5	n. b.	
F03-01	Basofil Baumwolle + leitfähiges Filament DKFFR	1,9E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	4,5	-	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	3	-	-	n. b.	
F04-01	Außenwerkstoff: Nomex Filament Chamatex, Innenwerkstoff: Nomex 3 Gestrück Billon Technik	1,9E-01	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
F05-01	Aluminiumkaschiertes Preox®-Gewebe	< 1,0E-05	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	
			1,0x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			4,5x10 ⁵	2	8,5	-	> 10	
			6,7x10 ⁵	1	3	-	1,3	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Rofin RSM 100D								
Wellenlänge $\lambda = 1.064$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser D = 13 mm, Beobachtungszeit t = 10 s								
Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F06-01	Aluminiumkaschiertes Nomex®-Gewebe, schwarz	< 1,0E-05	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung der Nomex®-Lage
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	2,5	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	1	7,5	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	0,5	2,5	-	n. b.	
F06-02	Nomex®, einseitig PU- kaschiert	< 1,0E-05	5,1x10 ⁴	0,5	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	1,5	-	n. b.	
F06-03	Preox®-Aramid, 70 % PAN-Faser, 30 % Kevlar Regenerat	1,1E-02	5,1x10 ⁴	1	-	-	4,4	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	0,5	-	-	2,1	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	1,1	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	0,6	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	-	0,5	
F07-01	Glasgewebe einseitig Silikon grau/einseitig aluminisiert	1,6E-03	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Silikon-Lage
			1,0x10 ⁵	-	-	-	3,7	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	3,8	
			4,5x10 ⁵	2,5	-	-	2,2	
			6,7x10 ⁵	1	-	-	1,9	
F07-05	Glasgewebe, beidseitig aluminisiert, einseitig zusätzlich PTFE	1,2E-02	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	Schmelzen des PTFE
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	3,5	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	2	5	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	1	2	-	n. b.	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Rofin RSM 100D

Wellenlänge $\lambda = 1.064$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 13$ mm, Beobachtungszeit $t = 10$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F07-06	100 % Kevlar® in Waffelbindung, ohne Al	3,2E-02	5,1x10 ⁴	3,5	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			1,0x10 ⁵	2,5	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	1	-	-	1,9	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	4	-	1,1	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	1	0,6	
F07-07	100 % Kevlar® in Waffelbindung, 60 g/m ² , aluminisiert	2,4E-03	5,1x10 ⁴	8	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			1,0x10 ⁵	1	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	< 0,5	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	4,5	-	n. b.	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	2,5	2	n. b.	
F07-08	100 % Kevlar® in Waffelbindung, 130 g/m ² , aluminisiert	6,9E-04	5,1x10 ⁴	3,5	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			1,0x10 ⁵	1,5	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	0,5	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	6,5	7	n. b.	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	4	3,5	n. b.	
F07-09	100 % Kevlar® in Waffelbindung, 165 g/m ² , aluminisiert	1,8E-03	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®-Lage
			1,0x10 ⁵	3	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	1	-	-	> 10	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	9	-	2	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	4,5	-	1,1	
H08-02	Rindvollleder	4,3E-03	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Schrumpfen Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	3,5	-	-	> 10	
			4,5x10 ⁵	1	-	-	3,4	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	-	8	2,8	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Rofin RSM 100D								
Wellenlänge $\lambda = 1.064$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser D = 13 mm, Beobachtungszeit t = 10 s								
Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
H08-03	Nappaleder	1,5E-02	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Schrumpfen
			1,0x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			4,5x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			6,7x10 ⁵	5	-	-	4,2	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Anh. 4, Tab. 4 Ergebnisse unter Verwendung des Diodenlasers

Laserstrahlquelle: Laserline LDF 600-250								
Wellenlänge $\lambda = 940$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 13$ mm, Beobachtungszeit $t = 20$ s								
Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m^2	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F01-03	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	3,1E-02	$5,1 \times 10^4$	-			> 10	Verkohlen, Versprödung
			$1,0 \times 10^5$	5	-	-	2,3	
			$2,2 \times 10^5$	2	-	13	0,7	
			$4,5 \times 10^5$	1	4	8	0,4	
			$6,7 \times 10^5$	n. b.	n. b.	n. b.	0,2	
F01-04	88 % Baumwolle, 12 % Nylon	1,1E-03	$5,1 \times 10^4$	-	-	-	n. b.	Verkohlen, Versprödung
			$1,0 \times 10^5$	6	-	-	2,8	
			$2,2 \times 10^5$	2	-	-	1	
			$4,5 \times 10^5$	1	-	-	0,5	
			$6,7 \times 10^5$	< 0,5	2	-	0,4	
F02-01	100 % Baumwolle FR	1,3E-01	$5,1 \times 10^4$	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			$1,0 \times 10^5$	-	-	-	> 10	
			$2,2 \times 10^5$	-	-	-	4,1	
			$4,5 \times 10^5$	17	-	-	1,4	
			$6,7 \times 10^5$	9	11	-	0,8	
F02-04	100 % Baumwolle FR	3,1E-01	$5,1 \times 10^4$	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			$1,0 \times 10^5$	-	-	-	5	
			$2,2 \times 10^5$	-	-	-	1,4	
			$4,5 \times 10^5$	-	-	-	0,6	
			$6,7 \times 10^5$	-	-	-	0,3	
F02-06	Baumwolle Kettsatin	8,9E-03	$5,1 \times 10^4$	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			$1,0 \times 10^5$	5	-	-	2,7	
			$2,2 \times 10^5$	2	-	20	0,6	
			$4,5 \times 10^5$	0,5	4	12	0,3	
			$6,7 \times 10^5$	< 0,5	2	8	0,3	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Laserline LDF 600-250

Wellenlänge $\lambda = 940$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 13$ mm, Beobachtungszeit $t = 20$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m ²	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
F05-01	Aluminiumkaschiertes Preox®-Gewebe	< 1,0E-05	5,1x10 ⁴	-	-	-	n. b.	
			1,0x10 ⁵	-	-	-	n. b.	
			2,2x10 ⁵	8	-	-	n. b.	
			4,5x10 ⁵	1	9	-	2,7	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	4	-	1,6	
F06-03	Preox®-Aramid, 70 % PAN-Faser, 30 % Kevlar Regenerat	2,9E-03	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			1,0x10 ⁵	-	-	-	3,2	
			2,2x10 ⁵	1	-	-	1,1	
			4,5x10 ⁵	< 0,5	3	-	0,6	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	3	-	0,4	
F07-01	Glasgewebe einseitig Silikon grau/einseitig aluminisiert	5,9E-04	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Silikon- Lage
			1,0x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	15	-	-	> 10	
			4,5x10 ⁵	1	-	-	1,6	
			6,7x10 ⁵	0,5	-	-	1,5	
F07-06	100 % Kevlar® in Waffelbindung, ohne Al	3,1E-02	5,1x10 ⁴	20	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®- Lage
			1,0x10 ⁵	4	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	1	-	15	2	
			4,5x10 ⁵	0,5	5	8	0,9	
			6,7x10 ⁵	< 0,5	2	3	0,5	
F07-09	100 % Kevlar® in Waffelbindung, 165 g/m ² , aluminisiert	< 1,0E-05	5,1x10 ⁴	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung der Kevlar®- Lage
			1,0x10 ⁵	-	-	-	> 10	
			2,2x10 ⁵	7	-	-	> 10	
			4,5x10 ⁵	3	-	-	1,9	
			6,7x10 ⁵	1	5	9	0,8	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Laserstrahlquelle: Laserline LDF 600-250

Wellenlänge $\lambda = 940$ nm, Bestrahlungsfleckdurchmesser $D = 13$ mm, Beobachtungszeit $t = 20$ s

Probenbezeichnung	Werkstoff	Transmissionsgrad	Bestrahlungsstärke in W/m^2	Rauchbildung Zeitpunkt in s	Flammenbildung Zeitpunkt in s	Lochbildung Zeitpunkt in s	Toleranzzeit Zeitraum in s	Besonderheiten
H08-02	Rindvollleder	3,6E-03	$5,1 \times 10^4$	-	-	-	> 10	Schrumpfen
			$1,0 \times 10^5$	-	-	-	> 10	
			$2,2 \times 10^5$	-	-	-	> 10	
			$4,5 \times 10^5$	-	-	-	> 10	Verkohlen, Versprödung
			$6,7 \times 10^5$	8	-	15	> 10	
H08-03	Nappaleder	1,4E-02	$5,1 \times 10^4$	-	-	-	> 10	Schrumpfen
			$1,0 \times 10^5$	-	-	-	> 10	
			$2,2 \times 10^5$	12	-	-	> 10	
			$4,5 \times 10^5$	6	20	-	> 10	
			$6,7 \times 10^5$	n. b.	n. b.	n. b.	> 10	

*n. b. = nicht beurteilt, (-) = nicht im Beobachtungszeitraum aufgetreten

Anhang 5 Musterbetriebsanweisung für Laser-PSA

Betriebsanweisung für die Benutzung von persönlicher Schutzausrüstung (ausgenommen Augenschutz) für Tätigkeiten mit handgeführten und -positionierten Lasergeräten zur Materialbearbeitung der Laserklasse 3R und höher

1. Anwendungsbereich

Körperschutzmittel wie Schutzkleidung, Schutzhandschuhe, Schürzen.
Für die Benutzung für Tätigkeiten mit handgeführten und -positionierten Lasergeräten zur Materialbearbeitung der Laserklasse 3R und höher

2. Gefahren für Mensch und Umwelt, Gefahren für den Benutzer

- Gefahr durch Schutzsysteme, die eine unzuträgliche Transmission für Laserstrahlung, und/oder eine kurze Zeitdauer bis zur Lochbildung aufweisen, wodurch die maximal zulässige Bestrahlung der Haut überschritten wird.
- Gefahr durch Schutzsysteme, die bei Laserbestrahlung leicht entflammen und/oder in die Haut einbrennen.
- Schutzsysteme, die unter Wärmeeinwirkung zum Schrumpfen neigen, können eine Gefahr darstellen (Behinderung des Ausziehens bei gleichzeitigem Wärmetransport an die Haut).
- Gefahr durch reflektierte Laserstrahlung durch Schutzsysteme mit hoch reflektierenden Oberflächen (z. B. Aluminiumkaschierung).

3. Schutzmaßnahmen und Verhaltensregeln

- Es dürfen nur Schutzwerkstoffe benutzt werden, die hinsichtlich des Verhaltens gegenüber der vorhersehbaren maximalen Laserbestrahlung (VMB) einen ausreichenden Schutz bieten:
 - Ausreichend geringer Transmissionsgrad, sodass die maximal zulässige Bestrahlung der Haut (MZB_{Haut} gem. DIN EN 60825-1) nicht überschritten wird
 - Ausreichender Widerstand gegen Lochbildung (Zeitdauer bis zum Versagen durch Laserstrahldurchtritt größer als Reflexzeit zum Wegziehen der Extremität aus dem Gefahrenbereich).
 - Ausreichende Toleranzzeit (> Reflexzeit) zwischen Schmerzempfindung und Verbrennung; d. h. begrenzter Wärmetransport an die Haut.
- Die Ausrüstung darf nur nach Unterweisung unter Berücksichtigung der Gebrauchsanleitung des Herstellers benutzt werden.
- Vor der Benutzung ist die Ausrüstung auf augenscheinliche Mängel (ihren ordnungsgemäßen Zustand durch Sichtprüfung) zu überprüfen.
- Jeder Mangel an der Ausrüstung ist dem Vorgesetzten zu melden.

4. Verhalten bei Störungen und im Gefahrenfall

- Defekte PSA ist sofort auszutauschen.

5. Verhalten bei Unfällen, Erste Hilfe

- Jeder Unfall ist im Verbandbuch einzutragen.
- Bei Verbrennungen einen Arzt aufsuchen.

6. Pflege, Reinigung und Aufbewahrung

- Die persönliche Schutzausrüstung ist bei Arbeitsunterbrechung gemäß Herstellerinformationen in dafür vorgesehenen Behältnissen trocken und lichtgeschützt aufzubewahren.
- Die Ausrüstung darf nur entsprechend den Herstellerangaben gereinigt (gewaschen) werden. Hierbei darf die Schutzwirkung nicht beeinträchtigt werden.

7. Folgen der Nichtbeachtung

- Gesundheitliche Schäden durch Lasereexposition und Verbrennung der Haut möglich.

Datum:

Unterschrift: