

M O N O G R A F I E

Workshop

# Sicherheit bei der Laserstrahl- Handbearbeitung



**TBBG**

Textil- und  
Bekleidungs-  
Berufsgenossenschaft

[www.textil-bg.de](http://www.textil-bg.de)



**BGFE**

Berufsgenossenschaft  
der Feinmechanik  
und Elektrotechnik

[www.bgfe.de](http://www.bgfe.de)

**Tagungsunterstützung, Veranstalter und fachliche Ansprechpartner:**



SLV Halle GmbH, Köthener Straße 33a, 06118 Halle (Saale)  
Ansprechpartner: Herr Dipl.-Phys. H. Orlick  
[www.slv-halle.de](http://www.slv-halle.de)

Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA Dortmund)  
Ansprechpartner: Herr Dipl.-Ing. Günter Ott  
Friedrich-Henkel-Weg 1–25, 44149 Dortmund  
[www.baua.de](http://www.baua.de)



Herausgeber:

**Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik**

Gustav-Heinemann-Ufer 130, 50968 Köln

Alle Rechte vorbehalten

1. Auflage 2006

WORKSHOP

**SICHERHEIT BEI DER LASERSTRAHL-  
HANDBEARBEITUNG**

Martin Brose  
Malte Gomolka



Vorwort .....	5
Neue DVS-Richtlinien und DVS-Richtlinien- entwürfe zur Personalqualifizierung für die Laserstrahl-Handbearbeitung .....	7
Grundlagen der Normung zur Laserstrahl- Handbearbeitung .....	15
Das BAuA-Forschungsprojekt „Persönliche Schutzausrüstung beim Einsatz von hand- geführten Lasern“ – Erste Ergebnisse .....	27
Genauere Bestimmung der Laserstrahlparameter zur Vermeidung von Gefährdungen .....	41
Sicherheitstechnik handgeführter Lasersysteme in der Industrie .....	45
Lasersicherheit im Dock-Laser-Projekt .....	47
Sicherheit bei handgeführter Laserstrahl- Reinigung .....	59
Physikalische Grenzen der optischen Belastung von Laserschutzeinhausungen .....	65
JENOPTIK-Votan™ – Laserschutz am praktischen Beispiel .....	71
Prüfung von handgeführten Lasern/Normung – Wiederkehrende Prüfungen .....	77
Autoren-Adressverzeichnis .....	82

.....

In den letzten 5 Jahren hat die Entwicklung von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung (HLG) signifikante Fortschritte erzielt. Ausgehend von Handarbeitsplätzen mit handbewegtem Werkstück (unter anderem für die Schmuck und Dentalbearbeitung) wurden eine Reihe von handbewegten oder -positionierten Systemen zum Schneiden und Schweißen sowie zum Reinigen und Abtragen entwickelt.

Die Einsatzfelder der HLG sind unter anderem der Automobilbau (Prototypenfertigung), der Maschinenbau (Reparatur von Werkzeugen), der Schiffbau (Sektionalbau), wie auch die Denkmalpflege (Reinigung, Restauration) oder der Rückbau kerntechnischer Anlagen. Während in den ersten Jahren insbesondere von Forschungsinstituten Prototypen entwickelt wurden, bieten mittlerweile mehrere Firmen (überwiegend kleine und mittlere Unternehmen) Geräte zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung an. Oftmals führen die Unternehmen auch die Bearbeitung z. B. Reparatur eines defekten Werkzeuges mit einem HLG im Haus des Auftraggebers im Rahmen von Dienstleistungen durch.

Derzeit nimmt Deutschland im Bereich „Handlaser“ weltweit eine Führungsposition ein.

Auf Grund der Forschungsaktivitäten sowie des zunehmenden Einsatzes von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung und des daraus resultierenden Bedarfs an Regeln für den sicheren Umgang mit diesen Maschinen, hat sich in Deutschland der nationale Arbeitskreis im DIN, der 018 AK3 „Laser-Schnittstellen und Systeme“ diesem Thema im Jahr 2000 angenommen. Erarbeitet wurde ein Normentwurf, der auf internationaler Ebene im ISO/TC 172/SC9/WG 3 „Safety“ vorgestellt wurde und sich derzeit als ISO 11553-2 im Status eines F-DIS befindet.

Der Schritt zu einer breiten Anwendung der „Handlaser“ stellt die Konstrukteure und Hersteller vor komplexe Frage- und Aufgabenstellungen im Bereich der Arbeitssicherheit im Umgang mit diesen Geräten. Es ist schon jetzt abzuschätzen, dass es vor dem Hintergrund der notwendigen Flexibilität beim Umgang mit Handlasern oftmals schwierig oder unmöglich sein wird, lokale Laserbereiche derart einzurichten, so dass durch Strahlabschirmung (z. B. durch vollständige Kapselung des Gerätes, Einhausung des Bearbeitungsbereiches nach allen Seiten

– auch auf der dem „Handlaser“ abgewandten Werkstückseite) außerhalb der Abschirmung die Grenzwerte für zugängliche Laserstrahlung (GZS) der Klasse 1 sicher eingehalten werden. Derzeit werden oftmals die gesamten Räumlichkeiten, in denen HLG betrieben werden, als Laserbereich – mit den Raumwänden als periphere Laserabschirmung – definiert.

Auch werden sich Personen in diesen Laserbereichen (in der Regel GZS der Klasse 4) während der Bearbeitung aufhalten müssen, so dass sie der Gefährdung durch direkte oder reflektierte Laserstrahlung ausgesetzt sind. Anders als konventionelle Handwerkzeuge (z. B. Handbohrmaschine) können die HLG einen weiten Wirkbereich (Gefährdungsbereich) aufweisen. Die bisher erstellten „Handlaser“ verfügen nur zum Teil über Sicherheitseinrichtungen zum Arbeitsschutz; auch erreichen die Steuerungen nur niedrige Schutzkategorien (gemäß DIN EN 954-1 Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen). Anforderungen und Prüfbedingungen für persönliche Schutzkleidung (ausgenommen Laserschutzbrillen), die ein Mindestschutz gegen Laserstrahlung bietet, existieren nicht.

Für die Betreiber von HLG ist von berufsgenossenschaftlicher Seite die Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung BGV B2“ anzuwenden.

Der Workshop soll hinsichtlich des Betriebs von Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung über alle wichtigen Risiken und Schutzmaßnahmen beim Einsatz von handgeführten Lasern informieren. Er bietet einen Überblick über den Stand der Erkenntnisse bezüglich technischer und persönlicher Arbeitsschutzmaßnahmen beim Umgang mit HLG.

Wir möchten uns bei allen Referenten für die Beteiligung an dieser Veranstaltung bedanken. Gleichzeitig freuen wir uns über Ihre Teilnahme und wünschen dem Workshop am 29./30.11.2006 in der SLV Halle ein gutes Gelingen.

.....



# NEUE DVS-RICHTLINIEN UND DVS-RICHTLINIENENTWÜRFE ZUR PERSONALQUALIFIZIERUNG FÜR DIE LASERSTRAHL-HANDBEARBEITUNG ....

Dipl.-Phys. Henry Orlick, SLV Halle

Der Weg zur Einführung neuer Technologien in den Betrieben führt neben der Verfügbarkeit von Technik immer über die Qualifizierung des Personals. Sowohl für das Laserstrahlschweißen als auch das Elektronenstrahlschweißen stellen sich die Anforderungen an die Personalqualifikationen anders dar als bei den klassischen Lichtbogenschmelzschweißverfahren. Es werden u. a. die neue 3-stufige DVS®-EWF-Ausbildungsrichtlinie für das Laserstrahlschweißen (DVS®-EWF 1198) und die von der AG V 9.3 überarbeitete Richtlinie DVS®1187 zur Ausbildung der Laserstrahlfachkraft vorgestellt.

## Einleitung

Sowohl für das Laserstrahlschweißen als auch das Elektronenstrahlschweißen stellen sich die Anforderungen an die Personalqualifikationen anders dar als bei den klassischen Lichtbogenschmelzschweißverfahren. Dies resultiert daraus, dass die Vermittlung von Handfertigkeiten hier eine untergeordnete Bedeutung besitzt und vielmehr Kenntnisse zur Strahlquelle, der Fokussierung der Strahlen sowie den werkstofftechnischen Randbedingungen oder der Vorbehandlung der Teile im Vordergrund stehen.

Dass die Ausbildung notwendig ist, verdeutlicht allein schon der Investitionswert der Ausrüstungen. So ist es eigentlich unverständlich, wenn bei Investitionsgrößen, die leicht über einer Million EUR liegen können, lediglich die Unterweisungen des Maschinenherstellers zur Bedienung als ausreichend für die Ausbildung angesehen werden. Dies rächt sich dann auch oft beim Auftreten von Störfällen an der Maschine oder bei metallurgischen Problemstellungen.

Die Ausbildung auf dem Gebiet der Strahlschweißverfahren besitzt mit der betrieblichen Ausbildung von Bedienungspersonal für Elektronenstrahl-Schweißmaschinen nach dem DVS®-Merkblatt 2706 (von April 1979) bereits eine lange Vorgeschichte.

Für beide Strahlschweißprozesse werden heute Ausbildungen angeboten, die eine Anerkennung des Bedienpersonals nach der Europäischen Norm für Maschinenbediener, der DIN EN 1418, gewährleisten.

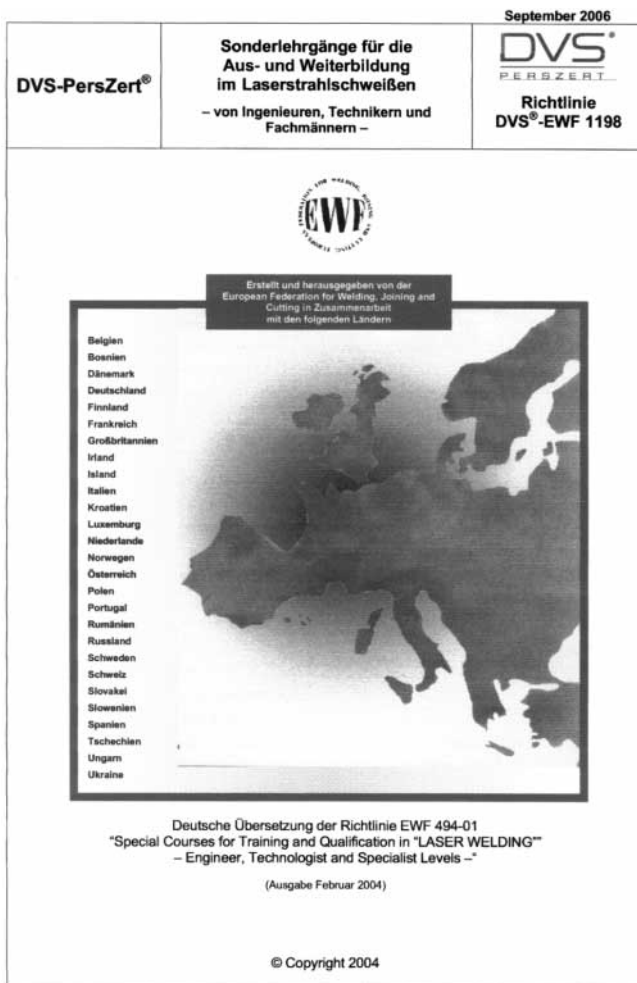
Neben den anlagenspezifischen Schulungen, die von den Herstellern bzw. Anbietern der Ausrüstungen üblicherweise mit der Übergabe der Anlagen angeboten werden, bestand ein Bedarf hinsichtlich einer auf die technischen, technologischen, metallurgischen und konstruktiven Belange zugeschnittenen Schulung des in der Strahltechnik tätigen Fachpersonals. Insbesondere die Maschineneinrichter und Vorarbeiter sollten über vertiefte allgemeine anlagen-unabhängige Kenntnisse verfügen. Unter dem Hintergrund des Einsatzes zunehmend universeller Laser- und Elektronenstrahltechnik mit sich stetig änderndem Produktionsprofil gingen die Anforderungen an die Ausbildung auf dem Gebiet der Strahltechnik über die einer Einweisung in die Anlagentechnik hinaus.

Ziel der Qualifikation von Personal für die Strahlbearbeitung nach DVS®- und EWF-Richtlinien ist es, qualifizierte strahltechnische Fachkräfte auszubilden, die Laser- und Elektronenstrahlanlagen einrichten und bedienen, Schweiß- und Schneid- bzw. Bohraufgaben sowie der Oberflächenbearbeitung selbständig und eigenverantwortlich lösen sowie im vom Hersteller vorgesehenen Rahmen die Anlagentechnik pflegen und warten können. Darüber hinaus wurde eine Differenzierung in den Aufgabengebieten notwendig, wobei zwischen den Anforderungen an Facharbeiter, Vorarbeiter/Meister und Ingenieure zu unterscheiden ist.

## Die deutsche Fassung der 3-stufigen EWF-Ausbildungsrichtlinie für das Laserstrahlschweißen EWF 494-01

Um auf dem Gebiet des Laserstrahlschweißens ein auf die europäischen Verhältnisse zugeschnittenes Ausbildungsprofil zu gestalten, wurde die EWF-Ausbildungsrichtlinie EWF 494-01 „Special Courses in Laser Welding (Engineer, Technologist and Specialist levels)“ erarbeitet, die 1999 verabschiedet wurde (Abb. 1).

Diese EWF-Richtlinie hat auf dem Gebiet der Laserstrahlschweißtechnik eine in Europa einheitliche Ausbildung zum Ziel. Die Ausrichtung auf einen Personenkreis reicht dabei vom Facharbeiter über den Technologen (Meister, Vorarbeiter) bis hin zum Ingenieur. Ausgehend von einem gemeinsamen Grundkonzept des Lehrganges unterscheidet sich die Lehrgangsdauer nach der angesprochenen Zielgruppe.



**Abb. 1: Die Richtlinie DVS®-EWF 1198 „Sonderlehrgänge für die Aus- und Weiterbildung im Laserstrahlschweißen von Ingenieuren, Technikern und Fachmännern“ (September 2006)**

Die Überarbeitung der Vorlage der deutschen Übersetzung der 3-stufigen EWF-Ausbildungsrichtlinie für das Laserstrahlschweißen EWF 494-01 wurde noch von der Arbeitsgruppe AG V 9.2 begonnen und dann von der neu gegründeten Arbeitsgruppe AG V 9.3 „Ausbildung Strahlschweißen“ vollendet und die deutsche Fassung verabschiedet. Sie wurde im September 2006 als Richtlinie DVS®-EWF 1198 veröffentlicht.

Die Struktur der Ausbildung nach dieser Richtlinie, die ihrerseits in Übereinstimmung mit anderen spezialisierten Modulen des EWF aufgebaut ist, der Inhalt der verschiedenen Module sowie der Stundenumfang in den einzelnen Stufen sind der Tabelle 1 zu entnehmen. Dabei muss angemerkt werden, dass der praktische Teil der Ausbildung einen bedeutenden Beitrag zur gesamten Laserstrahlschweißausbildung darstellt.

Zusätzlich zu dem Verständnis der Übungen werden die Teilnehmer detaillierte Berichte über die Bedeutung und die Interpretation der Ergebnisse erarbeiten.

Eine Ausbildungsstunde umfasst 50 Minuten Unterrichtszeit. Es ist nicht zwingend notwendig, exakt die vorgegebene Themenreihenfolge dieser Richtlinie zu befolgen; ein individueller Aufbau des Unterrichtsplanes ist zulässig.

Die Tiefe, mit der jedes Thema behandelt wird, ist durch die zugeordnete Anzahl der Unterrichtsstunden in der Richtlinie gekennzeichnet. Es handelt sich hier um die Mindestanforderung, die sich in der Thematik und der Tiefe der Prüfung widerspiegelt.

Die Teilnehmer sollten mit folgenden Themen vertraut sein, um die Ausbildung effizient absolvieren zu können:

- Metallurgie des Schweißens
- Schweißprozesse und Technologien
- Grundlagen der Nahtgestaltung und Charakterisierung von Nähten
- CNC-Programmierung,
- Sicherheit und Arbeitsschutz beim Schweißen
- Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen
- zerstörende und zerstörungsfreie Werkstoffprüfung

Die praktische Ausbildung an Laserstrahlschweißmaschinen erstreckt sich über 15 Stunden. Im Anschluss an die praktische Ausbildung erfolgt die Erstellung eines schriftlichen Berichtes. Es werden sechs Übungseinheiten organisiert, die folgende Themen beinhalten:

Drei Übungseinheiten sind der Technologie und der Anlagentechnik gewidmet. Zur Unterstützung werden Schweißversuche mit bekannten, schweißbaren Werkstoffen durchgeführt:

- Einfluss der Maschinenparameter auf Laserstrahlcharakteristiken bei CO<sub>2</sub>-Lasern (Gas, Anregung, Temperatur, Resonatoreinstellung und Abstimmung, ...)
- Einfluss der Maschinenparameter auf die Laserstrahlcharakteristiken bei Nd:YAG-Lasern (Temperatur, Abgleich des Resonators, Leistungsstabilität ...)
- Überwachung der Schweißparameter und Einsatz von Sensoren: Nahtverfolgung, Plasma, Temperatur, Lichtwellenleiter

Inhalt der Module	Stundenzahl für die Ausbildung in den Stufen		
	Ingenieur	Techniker/Fachmann	Fachkraft
	(E)	(T)	(S)
<b>Theoretische Ausbildung</b>			
Grundlagen der Laserstrahltechnik	13	9	3
Werkstoffe und ihr Verhalten bei Laserstrahlanwendungen	14	9	4
Konstruktion	4	2	1
Fertigung, Anwendungstechnologie	14	10	8
<b>Praktische Ausbildung und Übungen</b>			
Praktische Ausbildung	15	15	15
Erstellung des Berichtes	12	12	6
<b>Prüfung</b>	3	3	3
<b>Gesamt</b>	75	60	40

**Tabelle 1: Struktur der Ausbildung nach der Richtlinie DVS®-EWF 1198**

Drei Übungseinheiten widmen sich den direkten Laserstrahlschweißanwendungen für sowohl gut schweißbare Werkstoffe als auch solche, die als schwierig zu fügen angesehen werden:

- Einfluss der Schweißparameter auf die Nahtausbildung bei Nutzung von CO<sub>2</sub>-Lasern (Leistung, Fokus, Geschwindigkeit, Zusammenhang zwischen Strahlparametern und Schweißnahtgeometrie)
- Einfluss der Schweißparameter auf die Schweißnahtausbildung bei Nutzung von Nd:YAG-Lasern
- Einfluss der Strahlcharakteristiken auf das Werkstoffverhalten (Entstehung von Unregelmäßigkeiten in Laserstrahlschweißnähten (CO<sub>2</sub>-, Nd:YAG-Laser), Stähle mit hohem Kohlenstoffgehalt, beschichtete Stähle ...)

Die erfolgreich bestandene Prüfung nach dieser Richtlinie ersetzt den fachkundlichen Teil einer Funktionsprüfung (EN 1418 Anhang A, Abschnitte A 2.1.2a und A 2.2.3). Funktionskenntnisse bezogen auf die zu bedienende bzw. einzurichtende Laserstrahlschweißmaschine sind gesondert nachzuweisen (EN 1418 Anhang B).

## Die überarbeitete Richtlinie DVS® 1187 zur Ausbildung der Laserstrahlfachkraft – Schweißtechnik

Die Ausbildung zur Laserstrahlfachkraft nach der Richtlinie DVS® 1187 richtet sich in erster Linie an qualifizierte Facharbeiter, Meister und Techniker, die Aufgabenstellungen des Laserstrahlschweißens, -schneidens, der Oberflächenbearbeitung mit dem Laserstrahl und weiterer Laserstrahlbearbeitungsverfahren selbständig und eigenverantwortlich lösen sowie Bedienpersonal anleiten und beaufsichtigen sollen. Die Laserstrahlfachkraft soll ferner als Bindeglied zwischen Fertigungs- und Konstruktionsabteilung hinsichtlich laserstrahlgerechter Konstruktionen tätig sein. Die Erreichung des Ziels erfordert neben dem erfolgreichen Abschluss des Lehrganges eine anschließende berufliche Praxis auf dem Gebiet der Lasermaterialbearbeitung.

Der Lehrgang ist damit auch für Ingenieure und Fertigungsleiter interessant, die grundlegende und umfassende Kenntnisse über den Einsatz der Lasertechnologien in der Materialbearbeitung erhalten wollen.

Die überarbeitete Ausbildungsrichtlinie DVS® 1187 bietet eine anforderungsgerechte Qualifizierung. Damit erhalten die Teilnehmer im Gegensatz zum Lehrgang nach der alten Richtlinie (03/97) nicht erst nach erfolgreicher Teilnahme an allen Modulen das Zeugnis Laserstrahlfachkraft, sondern, je nach unternehmensspezifischem Schwerpunkt, ein qualifiziertes Abschlusszeugnis. Außerdem fanden in der inhaltlichen Ausgestaltung sowohl der theoretischen als auch der praktischen Ausbildung die neuesten Erkenntnisse auf dem Gebiet der Lasertechnik und der Lasertechnologien ihren Niederschlag (wie z. B. die Berücksichtigung der Laserstrahl-Hybridschweiß-Technologien (Abb. 2).

Für die Teilnahme an den Fachlehrgängen und an der Prüfung gelten die folgenden Mindestvoraussetzungen:

- Berufserfahrung: Nachzuweisende einschlägige Berufserfahrung in der Metallverarbeitung oder der Elektrotechnik; oder: eine abgeschlossene Berufsausbildung in einem metallverarbeitenden oder elektrotechnischen Beruf; oder: einen Abschluss als Techniker oder Ingenieur.
- Vertiefte Kenntnisse: Es wird empfohlen, dass die Teilnehmer über eine Qualifikation als Schweißfachmann DVS®-EWF1171, Schweißtechniker DVS®-EWF1172 oder Schweißfachingenieur DVS®-EWF1173 verfügen. Andernfalls sollten sie mit den aufgeführten Themen der Beiblätter vertraut sein, um die Ausbildung effizient absolvieren und den Prüfungsanforderungen genügen zu können.



**Abb. 2: Laserstrahl-Hybridschweißen**

- CNC-Kenntnisse: Eine abgeschlossene Ausbildung in den Berufen Werkzeugmechaniker(in) oder Zerspansmechaniker(in); oder: eine abgeschlossene Ausbildung in Berufen mit CNC-Technik; oder: eine bestätigte CNC-Ausbildung an entsprechenden Werkzeugmaschinen, Robotersystemen oder ähnlichem bzw. eine nachgewiesene Berufserfahrung.

Die vertieften Kenntnisse können in Vorbereitungslehrgängen erworben und nachgewiesen werden, die dem Niveau der angeführten Ausbildungen in den geforderten Teilgebieten entsprechen müssen.

Der gesamte Vorbereitungslehrgang umfasst dabei 3 Teile:

Teil 1: Verfahren und Geräte

Teil 2: Verhalten der Werkstoffe beim Schweißen, Schneiden, Oberflächenbearbeitung und anderen Laserstrahlbearbeitungsverfahren

Teil 3: CNC- und Roboteranwendungen

Interessenten, welche die Voraussetzungen nicht erfüllen können, werden erst nach einem erfolgreichen Eingangstest zur Ausbildung und Prüfung im Lehrgang zugelassen.

Die Fachlehrgänge sind thematisch gegliedert, in Grundlagenteil und Fachteil unterteilt und schließen mit Prüfungen ab. Die Inhalte sind in den Beiblättern festgehalten. Eine Übersicht über die Lehrgangsstruktur zeigt Tabelle 2.

Die Ausbildungsdauer der Fachlehrgänge ist ebenfalls in den Beiblättern festgelegt. Sie beträgt für den Fachlehrgang Schweißtechnik 40 Unterrichtseinheiten, für den Fachlehrgang Schneidtechnik 38 Unterrichtseinheiten und für den Fachlehrgang Oberflächentechnik 36 Unterrichtseinheiten.

Die Ausbildungsmaßnahme findet ausschließlich an Ausbildungsstätten statt, die im Hinblick auf Ausstattung und Fachkompetenz vom DVS® für diese Ausbildung zugelassen sind. Die für die Durchführung von Lehrgängen und die Abnahme von Prüfungen beauftragten Personen müssen vom DVS® anerkannt sein.

Der erfolgreiche Abschluss eines der Fachlehrgänge erfüllt die Anforderungen an die Inhalte von anerkannten Kursen zur Ausbildung von Laserschutzbeauftragten.

<b>Fachlehrgang</b> <b>Schweißtechnik</b> (DVS®1187, Beiblatt 1)	<b>Fachlehrgang</b> <b>Schneidtechnik</b> (DVS®1187, Beiblatt 2)	<b>Fachlehrgang</b> <b>Oberflächentechnik</b> (DVS®1187, Beiblatt 3)
<b>Abschluss:</b> - Laserstrahlfachkraft - Schweißtechnik (DVS®1187, Beiblatt 1) <b>Zusätzlich:</b> - EWF 494-01, Specialist Level - Fachkundl. Ausbildung DIN EN 1418, Anhang A - Sachkunde Laserschutz- beauftragter nach gültiger UVV	<b>Abschluss:</b> - Laserstrahlfachkraft - Schneidtechnik (DVS®1187, Beiblatt 2) <b>Zusätzlich:</b> - Sachkunde Laserschutz- beauftragter nach gültiger UVV	<b>Abschluss:</b> - Laserstrahlfachkraft - Oberflächentechnik (DVS®1187, Beiblatt 2) <b>Zusätzlich:</b> - Sachkunde Laserschutz- beauftragter nach gültiger UVV
<b>Eingangstest</b> (falls keine Qualifikation nach DVS®1187, Pkt. 2.2 u. 2.3 bzw. Pkt. 3)		
<b>Alternativ zu DVS®1187 2.2, vertiefte Kenntnisse nach</b>		
DVS®1187, Beiblatt 1	DVS®1187, Beiblatt 2	DVS®1187, Beiblatt 3
<b>Zulassungsvoraussetzungen nach DVS®1187:</b> Pkt. 2.1: Berufserfahrung Pkt. 2.2: Vertiefte Kenntnisse durch Qualifikation SFM (DVS®-EWF1171) / ST (DVS®-EWF1172) / SFI (DVS®-EWF1173) Pkt. 2.3: CNC-Kenntnisse		
<b>Alternativ nach DVS®1187, Pkt. 3:</b> Vorbereitungslehrgang - Teil 1: Verfahren u. Geräte - Teil 2: Werkstoffe - Teil 3: CNC- u. Roboter- anwendungen		

**Tabelle 2: Übersicht über die Lehrgangsstruktur der Ausbildung zur Laserstrahlfachkraft nach der überarbeiteten Richtlinie DVS® 1187**

Jeder Fachlehrgang schließt mit einer Prüfung ab. Die Prüfung besteht aus einem praktischen und einem theoretischen Teil. Der theoretische Teil besteht aus einer schriftlichen Prüfung. Zur Prüfung werden nur Lehrgangsteilnehmer zugelassen, die mindestens an 90 % der lehrplanmäßigen Unterrichtsstunden teilgenommen haben.

Die Prüfung erfolgt in Anlehnung an die Richtlinie DVS®-EWF-1163 „Prüfungsordnung für die Schweißwerkmeister-DVS®-EWF-Schweißpraktikerprüfungen“ (Punkt. 3, 3.1, 3.2) sowie an die Richtlinie DVS®-EWF-1174 „Prüfungsordnung für die Schweißfachingenieur-, Schweißtechniker- und Schweißfachmannprüfung (sonstige Punkte).“

Abweichend zu den genannten Richtlinien gilt, dass bei einer Prüfungsleistung über 60 % eine mündliche Ergänzungsprüfung entfällt; Prüfungen können frühestens nach 6 Wochen und spätestens nach 2 Jahren wiederholt werden. Die Prüfungen selbst sind vor einer DVS-Prüfungskommission durchzuführen.

Bei regelmäßiger Teilnahme an einem Fachlehrgang wird diese mit einer Bescheinigung bestätigt. Nach erfolgreicher Prüfung wird das Zeugnis „Laserstrahlfachkraft – ...“ mit dem Zusatz des Fachlehrganges z. B. „... – Schweißtechnik“ erteilt.

Der Fachlehrgang „Laserstrahlfachkraft – Schweißtechnik“ (Richtlinie DVS® 1187, Beiblatt 1) entspricht den Inhalten des DVS®-EWF-Lehrganges „Sonderlehrgänge zur Aus- und Weiterbildung für das Laserstrahlschweißen (in den Stufen Ingenieur, Techniker/Fachmann und Fachkraft)“ in der Stufe Fachkraft (EWF Richtlinie 494-01 „Specialist level“).

Für die Teilnahme an dem Fachlehrgang und an der Prüfung gelten folgende vertieften Kenntnisse:

- Schweißverfahren und -techniken
- Werkstoffkunde
- Grundlagen der Nahtgestaltung und Charakterisierung von Nähten



- Unregelmäßigkeiten in Schweißverbindungen
- Zerstörende/zerstörungsfreie Werkstoffprüfung
- Sicherheit und Arbeitsschutz

Der Fachlehrgang „Laserstrahlfachkraft – Schweißtechnik“ gliedert sich in:

- |                                     |        |
|-------------------------------------|--------|
| ● Theoretische Ausbildung           | 16 UE  |
| ● Praktische Ausbildung und Übungen | 21 UE  |
| ● Prüfung                           | 3 Std. |

Jede Unterrichtseinheit (UE) beträgt 50 Minuten, jede Stunde (Std.) beträgt 60 min. Folgende Zeugnisse bzw. Bescheinigungen werden bei erfolgreicher Teilnahme an dem Fachlehrgang „Laserstrahlfachkraft – Schweißtechnik“ erlangt:

- Laserstrahlfachkraft – Schweißtechnik nach DVS® Richtlinie 1187 Beiblatt 1 Schweißtechnik
- Zeugnis DVS®-EWF Lehrgang „Sonderlehrgänge zur Aus- und Weiterbildung für das Laserstrahlschweißen (in den Stufen Ingenieur, Techniker/Fachmann und Fachkraft)“ in der Stufe Fachkraft. (Diplom EWF 494-01 Specialist level).
- Fachkundlicher Ausbildungsteil einer Funktionsprüfung der DIN EN 1418 Anhang A, Abschnitt A 2.1.2b und 2.2.4. (die Funktionskenntnisse bezogen auf die zu bedienende bzw. einzurichtenden Laserstrahlschweißmaschine sind gesondert nachzuweisen (EN 1418 Anhang B).
- Erwerb der Sachkunde als Laserschutzbeauftragte entsprechend gültiger Unfallverhütungsvorschrift „Laserstrahlung“

Eine Übergangsregelung sieht vor, dass Teilnehmer mit erfolgreicher Teilnahme an den Modulen 1 und 3 entsprechend der Richtlinie DVS® 1187 in der Fassung vom März 1997 berechtigt sind, das Zertifikat „Laserstrahlfachkraft – Schweißtechnik“ des Fachlehrganges bei der Ausbildungsstelle zu erwerben.

Die Arbeitsgruppe Schulung und Prüfung (AG SP) verabschiedete 2005 die neue Richtlinie DVS® 1187 einstimmig mit der Maßgabe, dass die Inhalte der europäischen Richtlinie EWF 494-01 in dem entsprechenden Umfang enthalten sind. Die neue Richtlinie DVS® 1187 „DVS®-Lehrgang Laserstrahlfachkraft. Fachkraft für die

Metallbearbeitung durch Laserstrahl“ wurde im Juni 2006 veröffentlicht.

Die Richtlinie bleibt weiterhin eine reine DVS®-Richtlinie, da sie zwar einen Querverweis zur EWF-Richtlinie 494, Level Fachkraft, enthält (Qualifikation nach Beiblatt 1), diese aber nicht komplett in allen drei Levels ersetzen kann. Hier besitzt die bereits vorhandene und in der AG V 9.3 verabschiedete deutsche Fassung der EWF 494-01 weiterhin Gültigkeit (als Richtlinie DVS®-EWF 1198 veröffentlicht).

### Der Entwurf für eine DVS®-Richtlinie zur Ausbildung des Personals für die Laserstrahl-Handbearbeitung DVS® 1187-2

Die Laserstrahl-Handbearbeitung eröffnet neue Felder für die Anwendung der Lasertechnik. Materialbearbeitungen, die bisher an die Grenzen der konventionellen Lasersystemtechnik stießen und sich dadurch kaum durchführen ließen, können mit mobilen Systemen erfolgreich umgesetzt werden. Der Laser bzw. der Laserstrahl kann nun beispielsweise zum Werkstück kommen und die Bearbeitung mit mobilen, handgeführten bzw. handpositionierten Laserbearbeitungsköpfen ohne große Programmierzeiten realisiert werden. Andererseits wurde durch die Entwicklung der Laserstrahl-Handarbeitsplätze die Möglichkeit geschaffen, Bauteile unter dem feststehenden Laserstrahl zu „händeln“ und damit entsprechend zu bearbeiten. Diese beiden Entwicklungsrichtungen der Laserstrahl-Handbearbeitung erlauben dem Anwender den Einsatz des Lasers in Bereichen, die vorher nicht vorstellbar waren (Abb.3).



**Abb. 3: Handgeführtes Laserstrahlschweißen**  
(Quelle: MobilLaser Tec GmbH)

Nachdem mit dem Entwurf der ISO 11553-2 die Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte auf den Weg gebracht wurden, war es an der Zeit, eine entsprechende Richtlinie zur Ausbildung des Personals für die Laserstrahl-Handbearbeitung zu erarbeiten. Diese Richtlinie soll eine Ausbildung auf Bedienniveau beinhalten; Praxis geht vor theoretischem Wissen.

In der AG V 9.3 wurde zu Beginn dieses Jahres der Entwurf für eine DVS®-Richtlinie zur Ausbildung des Personals für die Laserstrahl-Handbearbeitung DVS® 1187-2 erarbeitet, der momentan in der Diskussion ist und im Jahr 2007 verabschiedet werden soll.

Ziel des in dieser Richtlinie beschriebenen DVS®-Lehrgangs soll es sein, qualifiziertes lasertechnisches Personal für die Laserstrahl-Handbearbeitung auszubilden, das selbständig und eigenverantwortlich Laserbearbeitungen mittels Laserstrahl-Handarbeitsplätzen und handgeführter bzw. handpositionierter Laserbearbeitungssysteme ausführen kann. Der DVS®-Lehrgang wird sich in die Fachlehrgänge „Schweißen/Schneiden mit handgeführten und handpositionierten Lasersystemen“ und „Auftragschweißen mit handgeführten und handpositionierten Lasersystemen“ untergliedern, die sich wiederum in einen Grundlagenteil und einen Fachteil unterteilen.

## Zusammenfassung

Die Arbeitsgruppen V 9.1/AA 15.1 und V 9.2/AA 15.2 beschlossen 2001, Ausbildungsthemen gemeinsam in einer neuen Arbeitsgruppe zu bearbeiten. Die neu gegründete Arbeitsgruppe AG V 9.3 „Ausbildung Strahlschweißen“ hatte sich zum Ziel gesetzt, in enger Zusammenarbeit mit dem Ausschuss für Bildung die Ausbildungsrichtlinien des DVS im Bereich Strahlschweißen vor allem am Bedarf der Wirtschaft auszurichten und die deutschen Interessen in den entsprechenden Gremien des EWF zu vertreten. Mit der Verabschiedung der deutschen Fassung der 3-stufigen EWF-Ausbildungsrichtlinie EWF 494-01 für das Laserstrahlschweißen, der Überarbeitung der Richtlinie DVS® 1187 zur Ausbildung der Laserstrahlfachkraft und dem Entwurf einer DVS®-Richtlinie zur Ausbildung für handgeführte Laserstrahlschweißsysteme sind wesentliche Schritte in dieser Richtung unternommen worden.

.....



**Thomas Püster, Olaf Berend**, Laser Zentrum Hannover e.V.

**Martin Brose**, Berufsgenossenschaft Feinmechanik und Elektrotechnik

## Einleitung

Die Lasertechnologie befindet sich in einem ständigen Fortschritt. Die Gesamterlöse für den Weltmarkt sind im Jahr 2003 um ca. 5% angestiegen, wohingegen die Nischenmärkte – die 20% des Gesamtmarkts darstellen – überproportional gewachsen sind [1]. Neben neuen Entwicklungen im Bereich Ultrakurzgepulster Laser sowie Faserlaser, wurden CO<sub>2</sub>-, Festkörper- und Diodenlaser ständig weiterentwickelt. Beides führt zu optimierten Eigenschaften und eröffnet neue Anwendungsfelder.

Mit der Verfügbarkeit von leistungsfähigen und kompakten Festkörper-, Dioden- und zunehmend Faserlasern sowie geeigneten Faserbasierten Strahlführungssystemen haben sich in den letzten Jahren neue Anwendungsfelder für handgeführte und -positionierte Lasergeräte (HLG) zur Materialbearbeitung in der Industrie eröffnet. HLG verknüpfen die Vorzüge der Lasertechnologie und konventioneller Technologien, wie dem Lichtbogenschweißen oder Brennschneiden mit dem Vorteil eines handgeführten oder -positionierten Werkzeugs: sehr flexible Nutzung ohne Einsatz aufwändiger Handhabungstechniken und Programmierung.

Aus Sicht der Maschinensicherheit und dem sicheren Umgang mit den HLG können jedoch diese Geräte im Vergleich zu automatischen, speicherprogrammierbaren, überwachten Laserbearbeitungsanlagen besondere Gefährdungen hervorrufen. Diesen Gefährdungen muss in geeigneter Weise durch Schutzmaßnahmen begegnet werden, um ein akzeptables Sicherheitsniveau zu erreichen. Zurzeit existieren eine Reihe von Normen und Richtlinien zur Lasersicherheit innerhalb der Normungsgremien IEC und ISO.

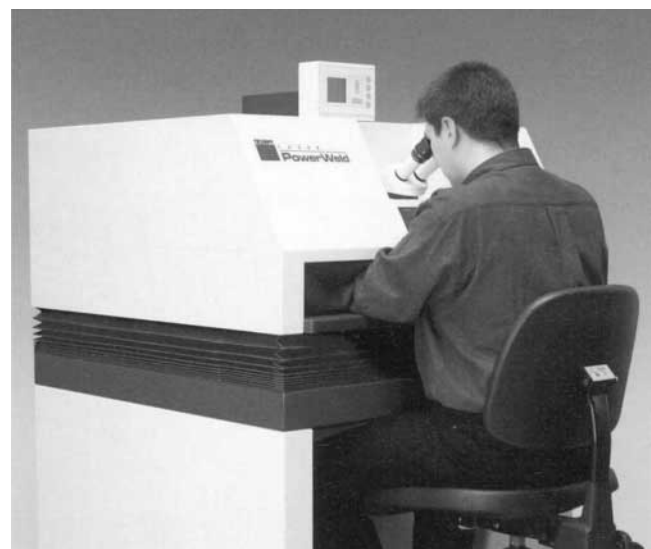
Während besondere Sicherheitsanforderungen für Lasergeräte (inkl. handgehaltene) im Bereich der medizinischen Anwendungen bereits 1995 in der IEC 60601-2-22 definiert wurden, existiert kein internationaler Standard, der Sicherheitsanforderungen an HLG für in-

dustrielle Anwendungen definiert. Um dieser Situation zu begegnen, wurde im Jahr 2000 ein Ansatz gestartet, um eine neue Produktnorm (Typ-C-Norm) für handgeführte und -positionierte Lasergeräte zur Materialbearbeitung zu erarbeiten (ISO 11553-2).

Im Folgenden werden typische derzeitige Anwendungen von HLG vorgestellt. Besondere Gefährdungen und Sicherheitsanforderungen, die berücksichtigt werden müssen und Eingang in das Normenwerk finden, werden diskutiert. Darüber hinaus werden Beispiele für die Integration von Sicherheitsmaßnahmen in die HLG am Beispiel von Schneidapplikationen vorgestellt.

## Anwendungen handgeführter und handpositionierter Laserbearbeitungsgeräte

Laserhandarbeitsplätze sind seit vielen Jahren in der Dental- und Schmuck-Industrie bekannt. Vorrangig werden CO<sub>2</sub>- oder Festkörperlaser für das Feinschweißen, Abtragen oder Markieren eingesetzt. Mit diesen Laseranlagen können kleine und komplex gestaltete Werkstücke lokal mit hoher Präzision bearbeitet werden. Typisch für diese Art von Laserbearbeitungsgeräten ist eine eingehauste Bearbeitungszone mit Sichtfenster oder Objektiven, beide als Laserschutzfilter ausgelegt, in die der Bediener durch Armmanschetten mit seinen Händen in die Bearbeitungszone greifen kann. Für die Bearbeitung werden die Werkstücke manuell positioniert und relativ zum Laserstrahl mit den Händen bewegt (Abb. 1). Der Laserstrahl wird mit-



**Abb. 1: Dental-Laser (Trumpf)**

tels Fußschalter ein und ausgeschaltet. Mit Ausnahme der Hände im Gefahrenbereich gewährt das Konstruktionsprinzip dieser Anlagen eine ausreichende Isolierung der Laserstrahlung [2].

Mit der Entwicklung und Verfügbarkeit leistungsfähiger und kompakter Festkörperlaser sowie auch Dioden- und Faserlaser hat sich in den letzten Jahren ein Reihe neuer Anwendungsfelder in der Industrie, unter anderem in den Bereichen Automobilbau, Werkzeugbau und Schiffbau, eröffnet. Die Geräte werden zum Schweißen, Auftragschweißen, Löten und Schneiden sowie zum Reinigen von Oberflächen eingesetzt. Aber auch im Bereich der Kunstrestauration ist der Laser ein flexibel einsetzbares Werkzeug zum schädigungsfreien oder minimal invasiven Bearbeiten von Kunstgegenständen. Dieses betrifft auch Anwendungen in Außenbereichen wie z. B. Restaurationsarbeiten an denkmalgeschützten Fassaden. Geräte dieses Typs bestehen überwiegend aus einem ortsfesten oder mobilen Festkörperlaser, der über eine Lichtleitfaser mit der handgeführten, -positionierten Handhabungseinheit verbunden ist. Die Handhabungseinheit ist je nach Bauart offen, teilgeschlossen oder bildet mit dem Werkstück eine vollständige Einhausung. Die Gefährdungen und damit die Anforderungen an die Sicherheitstechnik (unter anderem Steuerungs-, Kontroll-, trennende Sicherheitseinrichtungen) sowie die technischen Möglichkeiten zur Umsetzung hängen stark vom Gerätetyp und der Applikation ab.

HLG können immer dann vorteilhaft eingesetzt werden, wenn die Aufgabe besteht, komplexe Bauteile lokal und flexibel ohne aufwändige Handhabungstechnologie und Programmierung einzusetzen. Die Vorteile der Lasertechnologie im Vergleich zu konventionellen Technologien, wie z. B. dem Lichtbogenschweißen, oder Brennschneiden (geringer Wärmeeintrag, schmale Schneidfugen bzw. geringe Emissionsraten) können nun auch für mobile Handgeräte genutzt werden.

Typische Schweiß- oder Auftragschweißanwendungen sind die Reparatur von Werkzeugen, wie Gesenken oder Gussformen oder anderer hochbelasteter Bauteile einer Maschine (siehe auch Abb. 2). In der Automobilindustrie wurden verschiedene HLG für das Schweißen und Löten entwickelt, die für das Fügen von Blechteilen im Bereich der Prototypenfertigung oder im Motorsport verwendet werden [3, 4].



**Abb. 2: Laser-Reparatur von Gesenken (MobilLaser Tec GmbH)**

Verschiedene HLG sind für Schneidanwendungen verfügbar, die hauptsächlich für die Zerlegung von Anlagen oder immobilen Komponenten wie z. B. Anlagenteile von Kernkraftwerken oder asbesthaltige Bauteile [5–8] (siehe auch Abb. 3), eingesetzt werden.



**Abb. 3: Laserschneiden von Chrom-Nickel-Stahl bei der Zerlegung eines Kernkraftwerkes (EWN)**

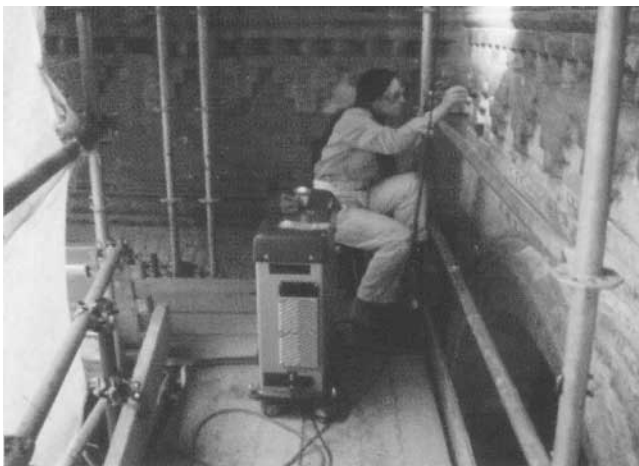
HLG für Markierungsaufgaben werden immer dann eingesetzt, wenn Bauteile – als integraler nicht abmontierbarer Bestandteil großer Anlagenteile – lokal bearbeitet werden sollen.

Die Reinigung von Oberflächen umfasst einen weiten Anwendungsbereich. Beispielhaft ist ein mittels Diodenlaser versorgtes HLG für die Entlackung von Strommasten [9] (siehe auch Abb. 4) zu nennen.



**Abb. 4: Laserentlacken von Strommasten und Formen (laserclean)**

Aber auch in dem Bereich der Kunstrestauration sind HLG flexibel einzusetzende Werkzeuge, um Kunstwerke bei minimaler Schädigung zu reinigen oder zu bearbeiten. Neben Tätigkeiten in geschlossenen Räumen umfasst die Anwendung von HLG auch Außenanwendungen in großen Höhen, z. B. an Fassaden von historischen Gebäuden [10, 11] (siehe auch Abb. 5).



**Abb. 5: Laserreinigen von historischen Fassaden (El.En.)**

Ausgehend von diesen Applikationen sind eine Reihe weiterer Anwendungen unter anderem im Schiffbau (Sektionalbau) oder im Fassadenbau in der Diskussion oder bereits im Planungsstadium.

Im Wesentlichen bestehen handgeführte oder handpositionierte Laserbearbeitungsgeräte, die in der Industrie

oder für die Kunstrestauration eingesetzt werden, aus folgenden Komponenten/Bauteilen:

- dem stationären oder mobilen Lasergerät
- dem Strahlführungssystem
- der Strahlformungseinheit im Bearbeitungskopf und
- falls erforderlich, dem unterstützenden Handhabungssystem als integrales Bauteil des Laserbearbeitungskopfes.

Neben CO<sub>2</sub>-Lasern, deren Strahlführung über Strahlführungsrohre mittels Teleskoparmen realisiert wird, werden vermehrt Festkörper-, Diodenlaser und in den letzten Jahren auch Faserlaser eingesetzt, weil die Strahlführung über Lichtleitfasern realisiert werden kann, welches den Gebrauch der HLG erleichtert.

Das im Bearbeitungskopf integrierte unterstützende Handhabungssystem kann entweder ein ausschließlich durch Muskelkraft angetriebenes System, eine teilweise mechanisierte Einheit mit Motorantrieb für den Vorschub (zwischen Elementen des HLG und des Werkstückes) oder für die Manipulation der Strahlführung und -formung (z. B. Scanner-Optiken, adaptive Optiken) sein, um die manuelle Überwachung oder Positionierung zu unterstützen. Das Handhabungssystem in Verbindung mit der Laseranordnung repräsentiert hierbei eine Maschine.

Hinsichtlich des Zugangs zu Laserstrahlung können diese Gerätetypen den Definitionen von offenen, teilweise geschlossenen oder vollständig geschlossenen Geräten zugeordnet werden; im letztgenannten Fall bildet das Handhabungssystem mit dem Werkstück einen geschlossenen Bearbeitungsbereich.

Die Gefährdungen und in Schlussfolgerung die Anforderungen an die Sicherheit (Sicherheitssteuerung, Interlocks, Isolation des Laserstrahls) wie auch den technischen Möglichkeiten für ihre Umsetzung hängen entscheidend von der Bauart bzw. der Konstruktion des handgeführten Laserbearbeitungsgerätes und der Anwendung ab.

## Derzeitiger Stand des Normentwurfes

Auf Grund der Forschungsaktivitäten und der zunehmenden Herstellung und Anwendung von Prototypen handgeführter und handpositionierter Lasergeräte zur Material-

bearbeitung auf der einen Seite und dem Bedarf nach Regeln für den sicheren Umgang mit den Geräten auf der anderen Seite, nahm sich die nationale Arbeitsgruppe des DIN „Laser, Schnittstellen und Systeme“ (O18 AK3) im Jahr 2000 diesem Thema an und erarbeitete einen Normentwurf.

Aufgrund der Zuordnung des deutschen Gremiums zur ISO Arbeitsgruppe WG 3 „Safety“ im SC 9 „Electrooptical Systems“ der ISO/TC 172 „Optics and optical instruments“ wurde der Normentwurf als Maschinen-Sicherheitsnorm mit dem Titel „Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte“ konzipiert. Dieser Entwurf wurde nachfolgend als „New work item proposal“ auf internationaler Ebene im Rahmen der „Joint working groups“ ISO/TC172/SC9/WG3 und IEC/TC76/WG10 vorgestellt.

Nachdem das ausgearbeitete Dokument des Normentwurfs die sich anschließenden Stufen der Normentstehung durchschritten hat, befindet es sich jetzt im Status eines „final draft international standard“ (F-DIS). Der Normentwurf ist eingeordnet in den Kreis der Normen zur Sicherheit von Maschinen. Bei der Norm handelt es sich um eine so genannte Typ C-Norm, d. h. sie ist eine Produkt-/Fachnorm mit direktem Bezug zu einer Maschinengattung.

Da der Normentwurf ISO 11553-2 in direktem Bezug zu den Grund- und Gruppennormen im Bereich der Sicherheit von Maschinen steht (Typ A und Typ B Normen), müssen zukünftige Entwicklungen und Veränderungen internationaler bzw. europäischer Regularien bei der Überarbeitung des Dokuments berücksichtigt werden.

Derzeit betrifft dieses vor allem Änderungen im Bereich der Spezifikationen für Lärm und Vibrationen. Auf Grund neuer europäischer Richtlinien müssen die diesbezüglichen Anforderungen in den Normentwurf integriert werden.

### Motivation für die Erarbeitung einer Sicherheits-Norm für handgeführte Laserbearbeitungsgeräte

Verglichen mit anderen neuen Technologien war anfänglich die Situation bezüglich der Gefährdungspotenziale und qualifizierter Sicherheitsanforderungen für handge-

führte Laserbearbeitungsgeräte durch mangelnde Kenntnis und Vorurteile auf allen Seiten gekennzeichnet – bei Herstellern, Anwendern und Behörden. Auch betonten insbesondere Hersteller, Vertreiber und potentielle Anwender ihre Bedenken hinsichtlich einer zu strikten Auslegung von Regularien, die ein mögliches Hemmnis für eine breite Anwendung handgeführter Laserbearbeitungsgeräte darstellen könnten [12].

Diese Situation zeigt sehr eindringlich den Bedarf, potentielle Gefährdungen im Umgang mit handgeführten Laserbearbeitungsgeräten zu analysieren und eindeutige Sicherheitsanforderungen zu definieren, um einen einheitlichen Standard weltweit zu erreichen.

Obwohl eine Anzahl technischer Normen im Bereich Lasersicherheit im Bereich der internationalen Normungskomitees IEC und ISO existiert (z.B. IEC 60825, IEC 60601-2-22, ISO 11553-1), gibt es mittlerweile ein mannigfaltiges Spektrum von handgeführten Laserbearbeitungsgeräten für die Materialbearbeitung, für die kein internationaler Standard bezüglich der Sicherheitsanforderungen besteht.

Das „Warum“ nach einer speziellen Regelung für handgeführte Laserbearbeitungsgeräte kann im technischen Sinn beantwortet werden, wenn man die besonderen mit dem Umgang von HLG verbundenen Gefährdungen betrachtet, die sich zum Teil deutlich von anderen Lasermaschinen abheben (unter anderem Sicherheit vor Laserstrahlung, Arbeit in engen Räumen, hochgelegene Arbeitsplätze, Gefährdung von unbeteiligten Personen bei Außenanwendungen, siehe auch Abschnitt 4). Die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Konstruktion sowie die Benutzer-Informationen müssen die technischen Besonderheiten (Schnittstellen, Strahlführung, Steuerungstechnik, trennende Sicherheitseinrichtungen) der Gesamtmaschine (Lasergerät mit handgeführter Handhabungseinheit) berücksichtigen.

Aus normativer Sicht kann das „Warum“ nach einer speziellen Regelung für HLG für die europäische Ebene anhand der vom Rat der europäischen Gemeinschaft niedergelegten EU-Richtlinien erläutert werden. Die EU-Richtlinien sind Rahmenbedingungen für die sichere Verwendung einer Technologie und für den Schutz von Angestellten in Europa. Zwei Hauptartikel sind die Grundlage für mehrere gesetzliche Vorschriften und technische



Standards, welche in Beziehung zur Maschinen- und Arbeitsplatzsicherheit stehen:

- Artikel 95 (ex-Artikel 100a) verfolgt das Ziel der Harmonisierung auf dem Europäischen Markt und bestimmt einen Mindeststandard für die Maschinensicherheit
- Artikel 137 (ex-Artikel 118) hat den Schutz von Angestellten vor Gefahren zum Ziel

Insbesondere der Artikel 95 und die korrespondierende Maschinenrichtlinie (2006/42/EG) stellen für die Hersteller von Maschinen zur handgeführten Laser-Materialbearbeitung eine wichtige Basis dar, da er Mindeststandards für die Maschinensicherheit fordert und so Wettbewerbsbenachteiligungen im internationalen Handel durch stark unterschiedliche Sicherheitsstandards vermeiden hilft. Es ist daher wichtig, dass sich Entwickler und Hersteller von Maschinen zur handgeführten Laser-Materialbearbeitung aktiv in Normungsgremien beteiligen, um die dem Stand der Technik entsprechende Sicherheitstechnik als Mindeststandard zu definieren und praxisorientierte Regelungen zu erarbeiten.

Artikel 137 (unter anderem Richtlinie 89/391/EG) bildet die Basis zur Erstellung von Regeln für den sicheren Umgang mit Maschinen zur handgeführten Laser-Materialbearbeitung und den Schutz von Personen, unter anderem den Bedienern. Hier sind insbesondere die Behörden für Arbeitsschutz gefordert, entsprechende Regularien zu erarbeiten.

Bei der Ausarbeitung einer Typ C Norm musste für den Anwendungsbereich ein praktikabler Konsens gefunden werden. Zum einen soll ein klar umrissener Anwendungsbereich definiert werden. Zum anderen soll die Norm alle praxisrelevanten Maschinentypen zur handgeführten Laser-Materialbearbeitung berücksichtigen, um nicht bestimmte Maschinen von der Normung auszuschließen oder eine Vielzahl von Einzelmaschinen-Normen erforderlich zu machen. Die Überlegungen führten zu dem Ergebnis, dass der Normentwurf Maschinen zur handgeführten Laser-Materialbearbeitung mit und ohne Handhabungssystem umfassen soll. Dieses bedeutet, dass Systeme,

- bei denen das Werkzeug
- oder/und das Werkstück handgeführt oder gehalten wird,
- berücksichtigt werden.

Das Handhabungssystem kann dabei wie folgt ausgeführt sein:

- als ausschließlich muskelbetriebene Einheit,
- als teilmechanisierte Einheit mit einem motorischen Antrieb für den Vorschub (zwischen Elementen des HLM und des Werkstücks) oder für die Manipulation der Strahlführung und -formung (z. B. Scanneroptik, adaptive Optiken oder Vergleichbares) zur Unterstützung der Handführung oder -positionierung, wobei das Handhabungssystem mit der Laseranordnung eine Maschine darstellt.

Somit sind sowohl Maschinen mit feststehendem Laser und manuell – ohne Handhabungseinheit – bewegtem Werkstück z. B. zur Schmuck- oder Zahnersatzbearbeitung, wie auch Maschinen, bei denen die Handhabungseinheit relativ zum Werkstück handgeführt oder -positioniert wird, eingeschlossen. Die Handhabungseinheit kann dabei über eine Strahlführung mit dem Lasergerät verbunden sein, oder das Lasergerät ist in der Einheit integriert (z. B. zukünftige leistungsstarke Diodenlaser). Beispiele für derartige Maschinen sind unter anderem Anlagen zur Reinigung technischer Oberflächen oder Kulturgüter, Anlagen zum Schneiden, Schweißen, Löten oder Härten.

Eine deutliche Abgrenzung muss zu Systemen gezogen werden, die nicht für die Materialbearbeitung eingesetzt werden, wie z. B. Laserpointer, Messlaser oder Nivellierlaser (Baulaser). Auch können die normativen Regelungen keine Anwendung für Medizin-Laser zu diagnostischen oder therapeutischen Zwecken finden, da diese Produkte bereits in der IEC 60601-2-22 normativ behandelt werden.

Die Gesamtstruktur des neuen Normenwerkes wurde in Anlehnung an die Norm ISO 11553-1 „Safety of machinery – laser processing machines“ erstellt. Betonung wurde auf die besonderen Gefährdungen und Sicherheitsanforderungen an handgeführte und -positionierte Lasergeäte zur Materialbearbeitung gelegt, welches durch Anpassung bereits aus Teil 1 existierender Abschnitte und Ergänzung neuer Punkte erfolgte.

Im Folgenden werden beispielhaft einige Gefährdungen und Sicherheitsanforderungen an HLG vorgestellt, die besondere Relevanz hinsichtlich der Konstruktion einer sicheren Maschine haben und den Hersteller in seiner konstruktiven Arbeit unterstützen sollen.

## Inhärente Gefährdungen

Bezüglich der inhärenten Gefährdungen im Vergleich zu automatisierten Laserbearbeitungsmaschinen muss Gefährdungen durch Laserstrahlung in besonderen Situationen Beachtung geschenkt werden. HLG mit handgeführtem Laserbearbeitungskopf oder manuell zu bedienendem Handhabungssystem können typischerweise in alle Richtungen bewegt werden. Weil einige Bauarten der HLG über keine lokale (prozessnahe) Abschirmung verfügen, kann direkte Laserstrahlung in alle Raumrichtungen propagieren. Bei einigen Anwendungen, wie z. B. dem Schneiden oder der Bearbeitung von für die Laserstrahlung transparenten Werkstücken kann Laserstrahlung an der Rückseite des Werkstückes zugänglich werden. Da sich der Bediener in unmittelbarer Umgebung der Prozesszone aufhält, können Lärm, Wärmestrahlung, gas- und partikelförmige Gefahrstoffe sowie der Austrieb von heißen Schmelzespritzern weitere Gefährdungen verursachen.

Ein wichtiger Aspekt bei der Konstruktion von HLG ist die Beachtung ergonomischer Aspekte (unter anderem Gewicht, Handhabung), da bei Nichtbeachtung akute und chronische Gesundheitsbeeinträchtigungen des Bedieners die Folge sein könnten.

## Gefährdungen durch externe Einflüsse (Störungen)

Besondere Beachtung muss Gefährdungen geschenkt werden, die von mangelhafter Konstruktion oder fehlerhafter Auslegung der Schnittstellen (nicht-konforme Auslegung zu den Spezifikationen) herrühren: Art der Schnittstelle, Belastung, Laserleistungsgrenzen, Steuerungs-/Regelungssystem, Software). Insbesondere in Anwendungsfällen, in denen mehrere HLG mit einem Lasergehärt verbunden sind, muss die Sicherheitssteuerung einen sicheren Betrieb aller angeschlossenen HLG gewährleisten.

## Besondere Gefährdungen

Auf Grund der großen Anwendungsbreite der HLG müssen weitere besondere Gefährdungen berücksichtigt werden.

Bei Arbeiten in beengten Räumen können bei Einsatz bestimmter Prozessgase Gefährdungen durch Aufkonzentration von Gefahrstoffen im Raum oder durch Verarmung der erforderlichen Sauerstoffkonzentration in der Atemluft entstehen. Ohne geeignete lufttechnische Maßnahmen (Absaugung) können lasergenerierte Luftschadstoffe (LGACs) in beengten Räumen schnell gesundheitsschädliche Konzentrationen erreichen. Auch kann die Gefährdung durch reflektierte Laserstrahlung für den Bediener höher als unter normalen Raumverhältnissen sein.

Handgeführte und -positionierte Geräte zur Lasermaterialbearbeitung können in Außenanwendungen und sogar auf hochgelegenen Arbeitsplätzen eingesetzt werden. Besondere Beachtung muss hierbei dem Absturz sowie den Umwelteinflüssen (Temperatur, Regen, Nebel, Wind, Druck, Lichtverhältnisse) beigemessen werden.

## Risiko Beurteilung

Wie oben beschrieben, können Gefährdungen aus Inkompatibilität der Komponenten eines HLG resultieren. Bei der Risikobeurteilung eines HLG ist es daher wichtig, dass alle Komponenten der Maschine erfasst werden: das Lasergehärt, die Strahlführung, das handgeführte Laserbearbeitungsgerät beziehungsweise der Bearbeitungskopf und/oder das Handhabungssystem. Die Risikoanalyse muss alle Betriebszustände über den gesamten Lebenszyklus abdecken. Dieses beinhaltet unter anderem auch den Transport, die Inbetriebnahme, den Betrieb und die Außerbetriebnahme.

## Sicherheitsanforderungen

### Schutz vor Gefährdungen durch den Laserstrahl

Oberstes Ziel des Schutzes vor Gefährdungen bei der Anwendung von HLG ist die Vermeidung gesundheitlicher Beeinträchtigungen von Personen durch Laserstrahlung. Dieses bedingt die Umsetzung technischer, organisatorischer und/oder persönlicher Schutzmaßnahmen. Die Art der Maßnahme und die diesbezüglichen Anforderungen ergeben sich aus der entsprechenden Risikobeurteilung. Vorrangig ist im bestimmungsgemäßen Betrieb des HLG eine Exposition von Personen durch technische Maßnahmen auszuschließen. Da verfahrensbedingt eine Reihe von HLG über keine lokale Abschirmung der Prozess-

zone verfügen, muss als Mindestforderung auf persönliche Schutzausrüstung – Laserschutzbrillen, Schutzkleidung – zurückgegriffen werden. Die Vermeidung der Gefährdung drückt sich in der Norm durch die Anforderung hinsichtlich einer Unterschreitung der Maximal zulässigen Bestrahlungsstärken (MZB) gemäß IEC 60825-1 aus.

### **Autorisierungs-Einrichtung**

Da die Entfernung zwischen HLG und dem Lasergerät mehrere Meter betragen kann und da mehrere HLG zur gleichen Zeit mit einem Lasergerät verbunden werden können, muss das HLG über eine eigene Autorisierungseinheit verfügen (bzw. muss sich eine Autorisierungseinrichtung in unmittelbarer Nähe zum HLG befinden: z. B. am Hosengürtel getragene Bedieneinheit).

### **Kontroll- und Bedieneinrichtungen**

Die wichtigste Anforderung ist die Vermeidung einer ungewollten Laserstrahlungsemission. Bei HLG, die mit einem externen Lasergerät über ein Strahlführungssystem verbunden und die eine größere Distanz von dem Lasergerät entfernt sind, so dass die Bedienelemente des Lasergerätes nicht schnell und einfach zu erreichen sind, ist es erforderlich, dass die Steuerungs- und Bedieneinrichtungen in dem Handgerät integriert werden.

### **Steuerungseinrichtungen und -schaltungen**

Wenn ein Lasergerät mehrere unabhängig voneinander arbeitende HLG mit Laserstrahlung versorgt, muss jedes HLG über eine eigene/gesonderte Start/Stopp-Steuerung verfügen. Um sicherzustellen, dass der Hersteller die sicherheitsrelevanten Steuerungsteile hinsichtlich ihrer Eignung verifiziert, wurde die Anforderung formuliert, dass der Hersteller die erreichte Sicherheitskategorie der Steuerung gemäß ISO 13849-1 angibt. Wenn das HLG mit einem externen Lasergerät verbunden ist, bezieht sich die Steuerungskategorie auf das HLG in Kombination mit dem Lasergerät. Der Hersteller ist für die Einordnung in die entsprechende Steuerungskategorie verantwortlich.

### **Not-Aus-Steuerung**

Für die Sicherheit von HLG ist entscheidend, dass die Not-Aus-Steuerung das handgeführte Lasergerät zur Materialbearbeitung in Verbindung mit dem Lasergerät (Strahlquelle) deaktiviert. Wenn der Not-Aus-Taster des Lasergerätes nicht einfach und schnell für den HLG Bediener erreichbar ist (mehrere Meter Entfernung zwischen bei-

den Geräten), oder in Fällen wo ein Lasergerät mehrere HLG mit Laserstrahlung versorgt, muss der Not-Aus-Taster in das HLG integriert werden. Eine Alternative ist die Platzierung des Not-Aus-Tasters in unmittelbarer Nähe des HLG/des Bedieners; z. B. am Hosengürtel getragene Bedieneinheit.

### **Vorkehrungen für die Isolation der Laserstrahlung**

Da die HLG typischerweise über ein Strahlführungssystem mit dem Lasergerät verknüpft sind, erfolgt die Isolation der Laserstrahlung durch Blockieren oder Ablenkung des Strahles (z. B. mittels Strahlverschluss) vor Eintritt in das Strahlführungssystem. Für die Strahlisolation muss ein fehlersicherer/ausfallsicherer Strahlverschluss innerhalb oder außerhalb des Lasergerätes verwendet werden. Eine Positionsanzeige muss eindeutig indizieren, ob sich der Strahlverschluss in geschlossener oder offener Position befindet. Um in Abhängigkeit der jeweiligen Anlagenkonfiguration die Lasersicherheit zu gewährleisten, können mehrere Isolationseinrichtungen erforderlich sein (z. B. wenn ein Lasergerät mehrere unabhängige HLG versorgt, und ein manueller Eingriff in einem Strahlengang erforderlich ist, während der Strahl über eine andere Strahlführung zu einem weiteren HLG geleitet wird).

### **Einhausung/Schutzwände**

Auf Grund der unterschiedlichen Anwendungen und entsprechender Konstruktionen der HLG können keine präzisen konstruktiven Anforderungen an die Einhausung bzw. Schutzwände formuliert werden. Die Anforderungen ergeben sich aus der zugehörigen Risikoanalyse. Wenn es aus technischer Sicht möglich ist, sollte die Bearbeitungszone aus Gründen der Lasersicherheit vollständig abgeschirmt/ingehaust werden (z. B. mit dem Werkstück als integraler Teil). Hierdurch kann in bestimmten Anwendungsfällen erreicht werden, dass das HLG im bestimmungsgemäßen Betrieb so sicher wie ein Laser der Klasse 1 (gemäß IEC 60825-1) betrieben werden kann. In diesen Fällen muss die Sicherheitssteuerung derart ausgelegt werden, dass bei einem Abheben des HLG vom Werkstück die Laserstrahlung unmittelbar isoliert wird.

Jedoch z. B. für Schneidanwendungen oder der Reinigung von Oberflächen kann eine lokale Prozesseinhausung nicht realisiert werden. In diesen Fällen müssen die Anforderungen an eine periphere Abschirmung im Rahmen der Risikoanalyse ermittelt werden. Für die überwiegende Anzahl der HLG-Anwendungen muss der Laserbereich

durch periphere Abschirmungen/Schutzwände begrenzt werden. Nur in sehr wenigen Fällen (leistungsschwache Laser) reicht es aus, die NOHA (nominal ocular hazard area) zu bestimmen. Der Bereich ist entsprechend zu kennzeichnen und der Zutritt ist zu untersagen. In beiden Fällen ist die Berücksichtigung von Fehlerbedingungen sehr wichtig. Insbesondere, wenn HLG frei handgehalten sind und in alle Raumrichtungen bewegt werden können (z. B. für Reinigung oder Kunst-Restaurierung), kann die Laserstrahlung unter Fehlerbedingungen in alle Raumrichtungen propagieren.

Abhilfe kann durch technische Maßnahmen wie z. B. Online-Prozessüberwachungen erreicht werden, die bei Fehlern den Strahl isoliert. Verschiedene Ansätze werden zurzeit im Rahmen von Forschungs- und Entwicklungsprojekten verfolgt (unter anderem Detektion reflektierter Laserstrahlung, Wärmestrahlung, optische Messung des Abstandes vom Auskoppelfenster zum Werkstück).

Systeme zur Überwachung der Position/Lage des HLG relativ zur Person oder dem Raum, oder zur Detektion der Laserstrahlungspropagation im Raum mit dem Ziel einer schnellen Isolation der Laserstrahlung in Fehlerfällen sind in der Diskussion.

### Schnittstellen

Die gesamte Versorgung des handgeführten oder -positionierten Lasergeräts zur Materialbearbeitung (Strom, Gas, Wasser, Strahlführungseinheit) muss derart ausgelegt werden, dass Anforderungen, die aus dem bestimmungsgemäßen Betrieb, dem Betrieb unter Fehlerbedingungen wie auch aus vorhersehbarem Missbrauch resultieren, erfüllt sind. Bezüglich der Strahlführung ist zu beachten, dass in Fehlerfällen keine Laserstrahlung aus dem Strahlführungssystem unbeabsichtigt emittiert wird (Trennung von Komponenten, Faserbruch), d. h. dass die Laserstrahlung in Fehlerfällen sicher isoliert wird.

### Emissions-Warneinrichtung

Wie in der Norm IEC 60825-1 gefordert, muss jedes HLG über eine sichtbare oder hörbare Warneinrichtung verfügen, wenn Laserstrahlung emittiert werden kann. Da sich der HLG-Bediener typischerweise im Laserbereich aufhält und persönlichen Augenschutz trägt, wird besonders betont, dass optische Warneinrichtungen auch deutlich wahrnehmbar bzw. sichtbar sind, wenn Laserschutzbrillen getragen werden.

### Schutz vor lasergenerierten Luftschadstoffen (LGACs)

Bei den meisten Anwendungen von HLG entstehen gesundheitsschädliche gas- und partikelförmige Luftschadstoffe. Da sich der HLG-Bediener in unmittelbarer Nähe zum Prozessbereich befindet, müssen – als Minimalanforderung – die Luftschadstoffe effizient erfasst und nachfolgend einem Abluftreinigungssystem zugeführt werden. Auf Grund der verschiedenen Bauformen der HLG muss die Risikobeurteilung ergeben, welche Art der Erfassung und Abluftreinigung für den jeweiligen Anwendungsfall bzw. das HLG geeignet ist. Generell zu empfehlen ist die Erfassung der Luftschadstoffe in unmittelbarer Nähe der Prozesszone (Entstehungsort); dieses bedingt jedoch oftmals die Integration einer Erfassungseinheit in das HLG, wodurch die Komplexität und die Baugröße des HLG zunehmen.

### Beispiele für die Umsetzung von Sicherheitsanforderungen (Sicherheitstechnik)

In der Vergangenheit hat sich der Durchbruch handgeführter Lasergeräte zur Materialbearbeitung durch verschiedene Einflüsse verzögert. Ein wesentlicher Grund war und ist das Fehlen eines auf HLG zugeschnittenen angepassten Sicherheitskonzeptes. Ein derartiges Sicherheitskonzept wurde erfolgreich für das erste HLG für Schneidanwendungen im Jahr 2001 vom Laser Zentrum Hannover (LZH) erarbeitet und umgesetzt. Im Folgenden werden beispielhaft die wesentlichen Sicherheitseinrichtungen des HLG für Laserschneidanwendung vorgestellt (siehe auch Abb. 6 und 7).

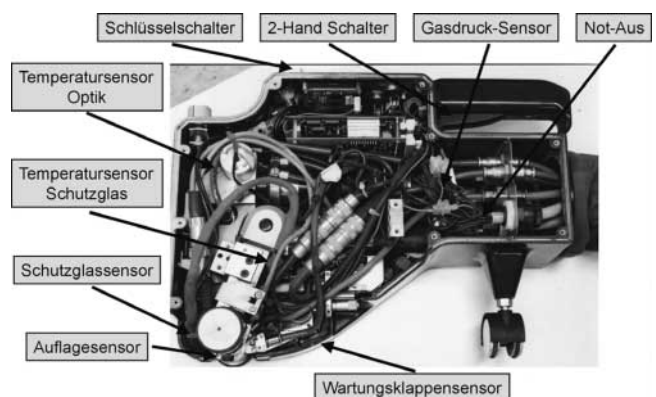


Abb. 6: Technische Sicherheitseinrichtungen eines handgeführten Lasergeräts zum Laserschneiden (LZH)





**Abb. 7: Handgeführtes Lasergerät zum Laserschneiden (LZH)**

Eine der wesentlichen Aufgaben besteht in der Auslegung der Steuerung sowie insbesondere sicherheitsrelevanter Steuerungsteile. Neben der Übertragung von allgemeinen Signalen für den Betrieb des HLG müssen bestimmte sicherheitsrelevante Funktionen sicher überwacht und die diesbezüglichen Signale sicher übertragen werden. Dieses hatte beim Handschneidlaser zur Folge, dass eine Anzahl von 24 Kabeln benötigt würde, gleichbedeutend mit einem schweren Kabelstrang, der den Bedienungskomfort des HLG einschränkt. Allein 10 Kabel werden für eine sichere Steuerung benötigt; wobei die höchste Steuerungskategorie „Kategorie 4“ nach IEC 13849-1 (vergl. DIN EN 954-1) realisiert wurde.

Für den sicheren Umgang mit einem HLG ist die Integration eines Sicherheitssensors für die Überwachung der relativen Position zwischen HLG und Werkstück erforderlich. Die Steuerung verhindert die Freigabe der Laserstrahlung, wenn das HLG nicht bestimmungsgemäß auf dem Werkstück positioniert ist und isoliert unmittelbar die Laserstrahlung, wenn das HLG vom Werkstück abgehoben wird. In Verbindung mit einer lokalen Abschirmung der Prozesszone wird sichergestellt, dass keine Laserstrahlung aus der Prozesszone in Richtung des Bedieners reflektiert wird. Da jedoch bei Schneidanwendungen der Laserstrahl durch das Werkstück bzw. die Schnittfuge propagieren kann, ist das HLG weiterhin der Laserklasse 4 zuzuordnen. Dieses bedeutet, dass der Laserbereich durch eine periphere Abschirmung begrenzt werden muss.

Im Vergleich hierzu können HLG zum Oberflächenmarkieren (nichttransparenter Werkstücke) durch Installation einer lokalen Abschirmung der Bearbeitungszone im be-

stimmungsgemäßen Betrieb so sicher wie Laserklasse 1 Geräte betrieben werden.

Allgemein können verschiedene Sensoren für die Überwachung der relativen Position des HLG zum Werkstück eingesetzt werden. Im Folgenden sind einige Beispiele industriell etablierter Sensorsysteme aufgeführt:

- Düse/Prallblech
- Ultraschall Sensor
- Faseroptischer Sensor
- Interferometrie Sensor
- Triangulations Sensor
- Magnetischer Sensor
- Kapazitiver Sensor
- Induktiver Sensor
- Mechanische Sonde (Stift)

Jedes der Verfahren hat seine jeweiligen Vor- und Nachteile. Die meisten der genannten Verfahren sind auf Grund ihrer Querempfindlichkeit gegenüber Druckveränderungen, Sekundär- oder Umgebungslicht, lasergenerierten Luftschadstoffen in der Prozesszone oder hohen Temperaturen nicht für die Anwendung bei HLG geeignet. Auch begrenzten Eigenschaften des mit dem HLG zu bearbeitenden Werkstoffs (unter anderem elektrische Leitfähigkeit), die Genauigkeit und die Baugröße des Sensors den Einsatz bestimmter Sensorsysteme für HLG.

Für das hier beispielhaft beschriebene HLG zum Laserschneiden wird eine mechanische Sonde in Verbindung mit einem induktiven Sensor eingesetzt. Die mechanische Sonde ist in Kontakt mit dem zu bearbeitenden Werkstück; in der Arbeitsposition schaltet sie den verschleißbeständigen induktiven Sensor. Der Vorteil dieser Kombination liegt in der Widerstandsfähigkeit gegenüber oben genannten Einflüssen. Die mechanische Sonde kann bei rauen Bedingungen eingesetzt werden, wenn der induktive Sensor in ausreichendem Abstand zu störenden Umgebungseinflüssen positioniert wird. Das gesamte System zeichnet sich durch eine kompakte und leichte Bauform aus, wodurch es sich für die Integration in HLG sehr gut eignet. Um unzulässige Neigungen/Winkellagen des HLG auszuschließen, werden zwei Sensorsysteme in das HLG integriert. In Kombination mit einer Zweihand-Sicherheitsschaltung für die Bedienung (Strahlfreigabe) des HLG wird die Manipulation des Sicherheitssystems erschwert.

Darüber hinaus verfügt das HLG über eine Reihe weiterer Sicherheitseinrichtungen, um den Bedienungsstatus bzw. Fehlfunktionen anzuzeigen, wie z. B. Überschreitung der zulässigen Temperatur der Lichtleitfaser, Eintritt eines Faserbruchs, Unterbrechung der Strahlführungskomponenten (Trennen von Schnittstellen). Des Weiteren werden die optischen Komponenten im HLG, wie Umlenkspiegel, Fokussierlinse und Schutzglas mittels optischer und thermischer Sensoren überwacht, um eine sichere Strahlpropagation vom Lasergerät bis zum Werkstück zu gewährleisten. Um den Bediener vor Gefährdungen durch lasergenerierte Emissionen zu schützen, ist eine Absaugvorrichtung zur Erfassung der aus der Schnittfuge ausgehenden Emissionen integriert worden, die an ein Filtersystem angeschlossen werden kann.

Vor der Konstruktion und Fertigung des HLG wurde eine Risikobeurteilung durchgeführt. Die Risikoanalyse und -beurteilung umfasst alle Betriebsarten und Bedingungen über den gesamten Lebenszyklus des HLG:

- Transport
- Verknüpfung des HLG mit einem Lasergerät und den Versorgungseinheiten
- Inbetriebnahme
- Bestimmungsgemäßer Betrieb
- vorhersehbare Fehlerfunktionen
- vorhersehbarer Missbrauch
- Wartung
- Außerbetriebnahme und Entsorgung des HLG

Um die Fehlerbedingungen zu analysieren, wurden die Sicherheitsmaßnahmen des HLG mittels „failure mode and effect analysis“ (FMEA) bewertet.

Um die Flexibilität des HLG zu erhöhen und das Gewicht zu reduzieren, wurde in einer zweiten Entwicklungsstufe die Sicherheitssteuerung auf Basis eines sicheren Bus-Systems (International actuator sensor interface standard ASI; IEC62026-2) realisiert. Die Hauptvorteile des Systems sind die simultane Übertragung normaler und sicherer Signale mittels geschirmtem 2-adrigem Kabel. Die Stromversorgung der Antriebe und Steuergeräte kann über die Busleitung erfolgen, indem eine speziell entwickelte Energieentnahmeeinheit eingesetzt wird.

Der Micro-Controller wurde dezentral in einer vom Bediener am Gürtel getragenen Einheit platziert. Er über-

wacht alle Signale hinsichtlich Plausibilität. Ein Sicherheitsmonitor ermöglicht die Programmierung verschiedener Sicherheitsbefehle wie unter anderem Not-Aus, verschiedene Abschaltfunktionen (Stopp-Kategorien), Zwei-Hand-Schaltung. Das Bus-System kann mit der Sicherheitssteuerung des Lasergerätes steuerungstechnisch verknüpft werden.

Die konsequente Auslegung aller sicherheitsbezogenen Steuerungsteile sowie die Konformität mit allen normativen Anforderungen mündeten in einer Zertifizierung (Konformitätsbescheinigung, CE) des HLG.

## Zusammenfassung

Für die nahe Zukunft kann postuliert werden, dass handgeführte und -positionierte Laser zur Materialbearbeitung wegen ihrer besonderen Vorteile ein eigenes Marktsegment erobern. Auf Grund ihrer besonderen Gefährdungen – im Vergleich zu automatisierten Laseranlagen – ist es erforderlich, Mindest-Sicherheitsanforderungen an die Konstruktion und den Betrieb zu definieren. Mit dem Typ C Normentwurf FDIS ISO 11553-2 wurde ein internationales Normenwerk erarbeitet, das sich an die Hersteller von HLG wendet, und Mindest-Sicherheitsanforderungen an die Konstruktion von HLG beschreibt sowie Informationen für den sicheren Umgang (Benutzerinformationen) bietet. Hierdurch lassen sich zum einen Wettbewerbsnachteile im Weltmarkt auf Grund unterschiedlicher Sicherheitsstandards minimieren; zum anderen werden grundlegende Sicherheitsstandards für HLG definiert.

Die Arbeit an der Norm hat auch aufgezeigt, dass bezüglich der Konstruktion und des sicheren Umgangs mit verschiedenen HLG-Bauformen eine Reihe von technisch-wissenschaftlichen Fragen beantwortet werden müssen. Diese betreffen unter anderem technische Maßnahmen wie die Sicherheitssteuerung, die Abschirmungen, sowie organisatorische und persönliche Maßnahmen wie Training und Ausbildung von HLG-Bedienpersonal und persönliche Schutzausrüstung (unter anderem Schutzkleidung).

Derzeit werden in Deutschland Arbeiten in den Bereichen „Training und Ausbildung“ von Normungsgremien sowie zur „Qualifizierung von persönlicher Schutzausrüstung für handgeführte Laser zur Materialbearbeitung“ im Rahmen eines Forschungsprojektes durchgeführt. Die Ergebnisse

werden direkt in die entsprechenden Normenwerke eingebracht.

Weitere Aktivitäten im Bereich der Sicherheit von HLG sollten die Entwicklung günstiger, klein bauender und schnell schaltender Sicherheitseinrichtungen zur Überwachung der Bewegung des HLG zum Ziel haben, um bei möglichen Fehlerbedingungen eine sofortige Isolation der Laserstrahlung zu gewährleisten.

## Literatur

- [1] Belforte, D. (2003) World markets for industrial lasers and applications, in Proceedings of the lasers and optoelectronics marketplace seminar, San Jose, CA, USA
- [2] Knechtel, H. (2000) Laserschweißen im Werkzeug- und Formenbau – Möglichkeiten und Grenzen, in Proceedings 2. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, Halle, Germany
- [3] Schmid, C. (2001) Ungewohnte Freiheitsgrade, Laser, 12 pp.
- [4] Schmid, C., Haferkamp, H.; Goede, M., Drygalla, M., Lotz, K.U. (2000) Manually operated laser welding and cutting device, MM Industrial Magazine Western Europe, 27–29
- [5] Haferkamp, H., Drygalla, M., Goede, M. et al. (2000) Hand-guided Laser Material Processing, in Sheet Metal 2000, Proceedings of the 8th International Conference, Birmingham, England, 291–300
- [6] Haferkamp, H., Goede, M., Schmid, C., Drygalla, M. (2000) Manually operated laser welding and cutting device, MM Industrial Magazine Western Europe, Vol. 16, No. 3, 27–29
- [7] Tönshoff, H.K., Haferkamp, H., Goede, M. et al. (2000) Hand-guided Laser Material Processing Extends the Possibilities of Users, Annals of the German Academic Society for Production Engineering (WGP). 2000 Production Engineering, Vol VII/1, 125–130
- [8] Haferkamp, H., Drygalla, M., Bunte, J., von Busse, A. (2004) Modularized laser beam cutting technology for dismantling applications. (IE-377-04) CI-1150-04, Welding in the World
- [9] Brüninghoff, H. (2002) Schicht für Schicht-Laser-strahl-reinigen von Hochspannungsmasten, EuroLaser, No. 4, 38 pp.
- [10] Ostrowski, R., Marczak, J., Jach, K., Sarzynski, A. (2003) Selection of radiation parameters of lasers used for artworks conservation, in Proceedings of the SPIE – The International Society of Optical Engineering, No. 5146, 99–107
- [11] El. En. Group (1999) Laser energy – power of creativity, company brochure
- [12] Püster, T., Baur, R. (2002) Normungsarbeit für Maschinen zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung, in Proceedings 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, Halle, Germany
- [13] ISO 13849-1 (1997) Safety of machinery – Safety related parts of control systems, Part 1: General principles of design
- [14] pr ISO 11553-1 (2002) Safety of machinery – Laser processing machines – Safety requirements
- [15] IEC 60825-1: A2 (2001) Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide
- [16] IEC 60825-4: A2 (2003) Safety of laser products – Part 4: Laser guards
- IEC 60601-2-22 (1995) Medical electrical equipment-Part 2: Particular requirements for the safety of diagnostic and therapeutic laser equipment
- [17] IEC 62026-2 (1999) Control circuit devices and switching elements for low-voltage switchgear and controlgear – Part 3: Actuator sensor interface (AS-i)

.....

# DAS BAUA FORSCHUNGSPROJEKT „PERSÖNLICHE SCHUTZAUSRÜSTUNG BEIM EINSATZ VON HANDGEFÜHRTEN LASERN“ – ERSTE ERGEBNISSE .....

Thomas Püster, Oliver Meier, Laser Zentrum Hannover e.V.  
Dirk Wenzel, Hendrik Beier, Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.\*

## Einleitung

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

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

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

## Anwendungsbereiche

Ausgehend von Handarbeitsplätzen mit handbewegtem Werkstück in der Schmuck- und Dentalindustrie [3,4] wurden eine Reihe von handgeführten oder -positionierten Systemen zum Schneiden, zum Schweißen, für die Oberflächenbearbeitung, wie Auftragschweißen, Löten und Härten, sowie zum Abtragen bzw. Reinigen entwickelt [5–8]. Die Einsatzfelder der HLG sind unter anderem der Automobilbau, der Maschinen- und Werkzeugbau wie auch die Denkmalpflege oder der Rückbau komplexer Anlagen. Anwendungen im Schiffbau sind derzeit in der Erprobung [9]; der Einsatz von HLG für den Fassadenbau (auf Baustellen) ist geplant. In Abb. 1 sind derzeitige und geplante Anwendungsbereiche von HLG dargestellt.

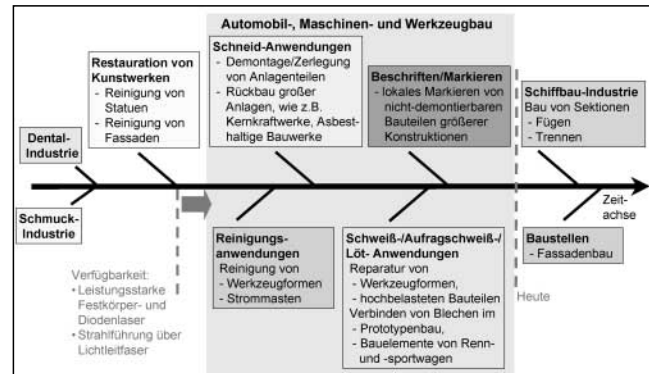


Abb. 1: Anwendungsbereiche von HLG

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

## Derzeitiger Stand bezüglich Gefährdungen und Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit HLG

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

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

Es gibt nur äußerst vereinzelt veröffentlichte Daten über das Verhalten von Schutzbekleidung bei Bestrahlung durch Laserstrahlung. Alunovic und Kreutz [10] unter-

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

suchten stichprobenartig Baumwoll-Arbeitsbekleidung. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Oberbekleidung eine nur äußerst geringe Schutzfunktion gegenüber Laserstrahlung aufweist.

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

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

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

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

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

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

### Status-Quo im Bereich Mess- und Prüfverfahren

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

- Anleihen hinsichtlich der Prüfung der Schutzfunktion von technischen Textilien und Leder gegen Laserstrahlung können aus den Prüfverfahren für Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen und bedingt von Laserschutzwänden (nur hinsichtlich der Begrifflichkeiten; VMB u. SGB) genommen werden:
- DIN EN 12254, Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen
- DIN EN 60825-4, Sicherheit von Lasereinrichtungen, – Teil 4: Laserschutzwände

Gemäß der DIN EN 12254 werden die Proben hinsichtlich der Kriterien „spektraler Transmissionsgrad“ sowie „Beständigkeit gegen Laserstrahlung“ geprüft. Dieses bedeu-



tet, dass die Abschirmungen ihre Schutzeigenschaften (bezüglich Transmission oder Durchtritt von Laserstrahlung) unter der Bestrahlung nicht verlieren dürfen. Dabei sind bestimmte Durchmesser der Bestrahlungsflecke einzuhalten.

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

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

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

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

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

## Untersuchte Werkstoffe/Schutzsysteme

Gesamtziel des Projektes ist die Erarbeitung und Bereitstellung systematischer Daten bezüglich persönlicher Schutzkleidung gegen Laserstrahlung, um einen sicheren Umgang mit Geräten zur handgeführten und handpositionierten Laser-Materialbearbeitung zu ermöglichen.

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

Die Produkte lassen sich folgenden Bereichen zuordnen:

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

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

- textile Flächegebilde auf Naturfaserbasis
- textile Flächegebilde auf Kunstfaserbasis
- textile Flächegebilde auf Mischgewebefaserbasis (Natur-/Kunstfaser)
- mit organischen oder anorganischen Werkstoffen kaschierte textile Flächegebilde
- textile Flächegebilde auf Glasfaserbasis
- Flächegebilde auf Naturstoffbasis (Leder)

Weitere Kriterien zur Charakterisierung der textilen Flächegebilde sind die Gewebe-Bindungsart (unter anderem Leinwand- Köper-, Atlasbindung), die Flächenmasse, Dicke des Flächegebildes sowie die chemische Behandlung (Additivierung, Imprägnierung).

Bei den für die Untersuchungen ausgewählten textilen Flächegebilden handelt es sich um schwerentflammbare Materialien unterschiedlicher Flächenmasse, wie sie für Hitzeschutzkleidung nach EN 531 und EN 470-1 verwendet werden. Bis auf Gestricke sind alle Materialien als Außenlage vorgesehen. Sie erfüllen die Anforderungen an die begrenzte Flammenausbreitung CODE A (geprüft nach 10 s Beflammung entsprechend ISO 15025, Verfahren A, Flächenbeflammung) sowie mindestens CODE B1 für konvektive Hitze (geprüft nach EN 367 mit 80 kW/m<sup>2</sup> Wärmestromdichte) und CODE C1 (geprüft

nach EN 366/EN ISO 6942 bei  $20 \text{ kW/m}^2$  Wärmestromdichte) für Strahlungswärme.

Das Aramid (Nomex®)-Filament-Gewebe stammt aus dem Bereich der Rennfahrer-Schutzkleidung. Es wird als Außenlage eingesetzt. Eine (oder zwei) zusätzliche Lage des Nomex®-Gestrickes erhöht die Wärmeisolation bei einwirkender konvektiver Wärme oder Strahlungswärme. Die weiteren mit verschiedenen Stoffen (Aluminium, Polyurethan) kaschierten Aramid-Gewebe entstammen dem Hitzeschutzbereich bzw. Feuerwehrebereich (Handschuhe). Die Glasfasergewebe entsprechen Flächegebilden, wie sie zum Hitzeschutz eingesetzt werden. Untersucht werden Glasgewebe, die einseitig oder beidseitig mit Aluminium beschichtet sind.

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

Für die Bestrahlungsversuche wurden zunächst vorrangig flächenförmige Proben verwendet.

### Abschätzung der vorhersehbaren Maximalbestrahlung an Schutzsystemen

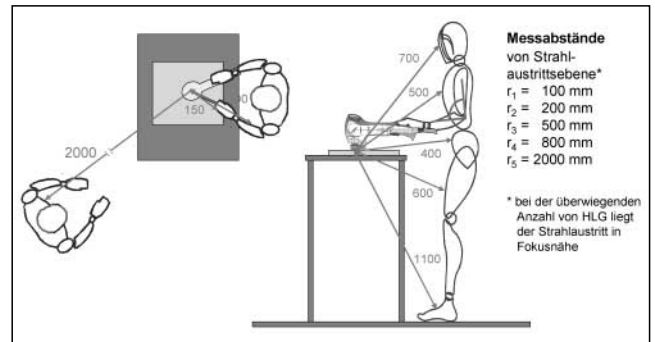
Bei der Beurteilung der Schutzsysteme (PSA) hinsichtlich ihres Schutzes gegenüber Laserstrahlung muss sowohl vom bestimmungsgemäßen Betrieb als auch vom Auftreten vorhersehbarer Fehlerfälle ausgegangen werden.

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

Vorhersehbare Fehlerfälle sind:

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

Für die Abschätzung der vorhersehbaren maximalen Bestrahlung in einem bestimmten Abstand zur Strahlaustrittsöffnung ist die genaue Kenntnis der eingesetzten HLG in Verbindung mit der Laserstrahlquelle erforderlich. Bestim-



**Abb. 2: Typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG**

mende Parameter sind die verwendete Laserleistung, die eingesetzte Strahlformung (Aufweitung, Kollimation, Fokussierung) sowie die Divergenz des Laserstrahls.

In der oben stehenden Darstellung (Abb. 2) sind typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG angegeben.

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

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

### Gegenüberstellung der VMB mit Grenzwerten (MZB)

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

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

Unter Berücksichtigung dieser Zeitbasen wurden Werte für die maximal zulässige Bestrahlung der Haut ( $\text{MZB}_{\text{Haut}}$ )



bei direkter Laserbestrahlung berechnet. Eine Gegenüberstellung der Abschätzungen der VMB an den Schutzsystemen durch direkte Laserstrahlung und diffus gestreute Laserstrahlung für verschiedene Laserparameter und Abstände zum Strahlaustritt führt zu folgenden Ergebnissen bzw. Beurteilungen:

### Direkte Laserstrahlung (nach Optik)

#### 1) Nd:YAG-Laser (2–4 kW)

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

#### 2) Diodenlaser (400 W)

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

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

### Diffus gestreute Laserstrahlung

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

#### 1) Nd:YAG-Laser (2–4 kW)

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

#### 2) Diodenlaser (400 W)

Bei Laserleistungen bis 400 W werden die Grenzwerte der MZB<sub>Haut</sub>

auch für kleine Abstände (Hand/Unterarm) nicht überschritten.

## Ergebnisse der Untersuchungen an persönlicher Schutzausrüstung

### 1. Charakterisierung der Schutzsysteme hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften (Kleinsignal-Prüfverfahren)

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

Eingesetzt werden zum einen marktübliche Spektrometer mit Integratoreinheit (Ulbrichtkugel). Daneben werden spezielle Versuchsaufbauten erstellt, um bei verschiedenen Wellenlängen die Kleinsignal-Transmission und Remission bestimmen zu können. Für die speziellen Versuchsaufbauten wurden ebenfalls Ulbrichtkugeln eingesetzt (Nd:YAG-Laser: Beschichtung: BaSO<sub>4</sub>, Durchmesser: 200 mm; CO<sub>2</sub>-Laser: Beschichtung: Infragold, Durchmesser: 100 mm), um ein integrales Signal der über die Raumrichtungen transmittierten/remittierten Strahlungsanteile zu erhalten. Die Versuche werden mit einem Nd:YAG- sowie einem CO<sub>2</sub>-Laser im quasi cw-Betrieb durchgeführt.

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

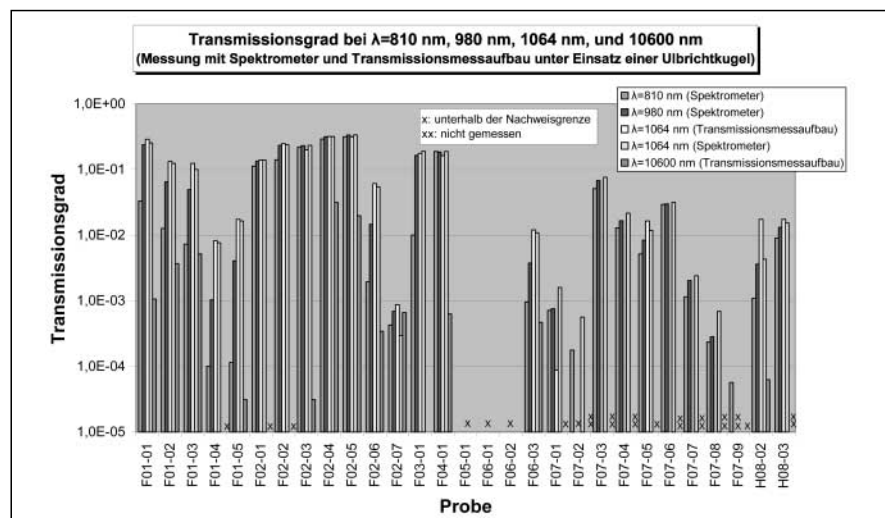


Abb. 3: Spektraler Transmissionsgrad verschiedener Proben gemessen mit Spektrometer und speziellem Bestrahlungsmessaufbau (Diodenlaser/Nd:YAG-Laser/CO<sub>2</sub>-Laser)

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

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

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

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

Wie anhand der Abb.3 zu erkennen ist, korrelieren die mit dem speziellen Kleinsignal-Transmissionsmessaufbau ermittelten Ergebnisse sehr gut mit den Ergebnissen der Transmissionsmessung unter Einsatz des Spektrometers.

### **CO<sub>2</sub>-Laser ( $\lambda = 10600 \text{ nm}$ )**

Die untersuchten Schutzsysteme weisen bei CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung im Vergleich zu Diodenlaser- und Nd:YAG-Laserbestrahlung einen deutlich geringeren spektralen Transmissionsgrad auf. Ursächlich hierfür ist das wellenlängenabhängige optische Verhalten der Schutzsysteme (unter anderem 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 CO<sub>2</sub>-Lasern besteht.

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

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

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

Folgende Prüfverfahren werden eingesetzt:

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

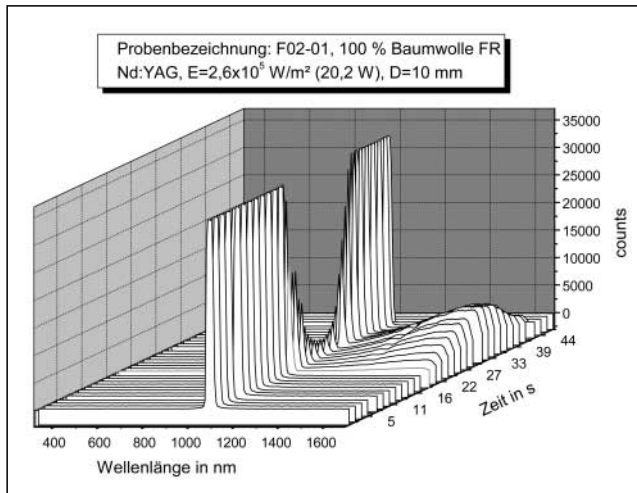
### **Spektrometrische Bewertung**

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

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

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

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

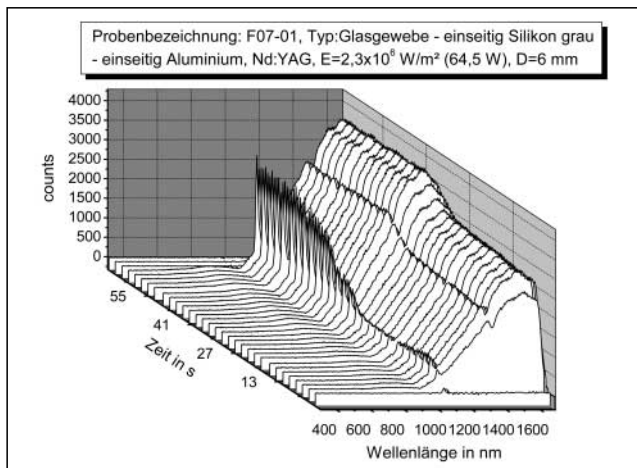


**Abb. 4: Spektrometrie mit Nd:YAG-Laser im Bereich von  $\lambda = 380 \text{ nm} - 1680 \text{ nm}$**

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

### Ergebnisse der Leistungsmessung

Zur Messung der transmittierten Gesamtleistung der Schutzsysteme wird ein Powermeter der Firma Coherent,



**Abb. 5: Spektrometrie mit Nd:YAG-Laser im Bereich von  $\lambda = 380 \text{ nm} - 1680 \text{ nm}$**

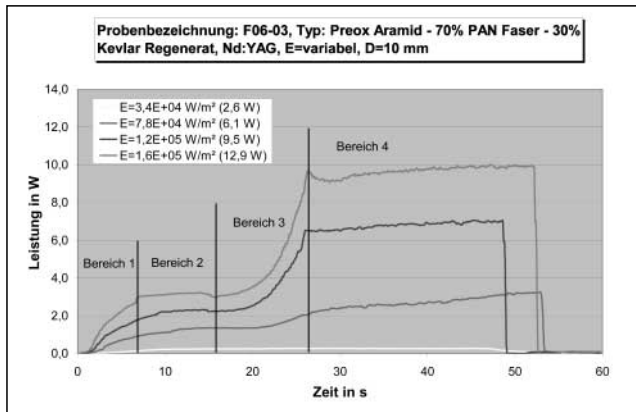
Typ Labmaster Ultima bzw. Fieldmaster GS, verwendet. Das Powermeter erlaubt den Anschluss von Thermopile-Detektoren (LM-10 HTD, LM-45 HTD, LM-100 HTD) für verschiedene Leistungsbereiche.

Hinsichtlich einer Bewertung der Schädigungen für die Haut ist die Frage zu beantworten, welche Strahlungsanteile auf direkt vom Schutzsystem transmittierter Laserstrahlung zurückzuführen sind und welche Strahlungsanteile durch Wärmestrahlung resultieren. Im NIR-Wellenlängenbereich kann diese Frage durch Einsatz von Spektrometern oder Separierung der Strahlungsanteile mittels HR-Spiegel (für entsprechende Laserstrahlung) beantwortet werden. Um im IR-Bereich (10600 nm) die Wärmestrahlungsanteile von der transmittierten Laserstrahlung zu trennen, wird vor den Detektor ein Saphir-Kristall positioniert, das ein Filter für Wellenlängen oberhalb von  $6 \mu\text{m}$  darstellt. Bei Einsatz des Saphir-Kristall wird nur der Wärmestrahlungsanteil vom nachgeschalteten Detektor gemessen. Mittels einer Vergleichsmessung ohne Saphir-Kristall, bei der die Gesamtstrahlungsanteile (transmittierte Laserstrahlung + Wärmestrahlung) detektiert werden, kann die Differenz der beiden Signale berechnet werden; sie entspricht den transmittierten Laserstrahlungsanteilen (bei niedrigen Temperaturen des Schutzsystems [mittels Thermokamera gemessen] werden die gemessenen Wärmestrahlungsanteile bezüglich der oberhalb von  $6 \mu\text{m}$  auftretenden – durch den Filter ausgeblendeten – Wärmestrahlungsanteile gemäß der Stefan Boltzman Kurve korrigiert).

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

**Bereich 1:** Mit Beginn der Laserstrahlungsexposition wird Laserstrahlung vom Schutzsystem absorbiert und es tritt eine lokale Erwärmung auf. Der Detektor empfängt die mit ansteigender Temperatur des Schutzsystems emittierte zunehmende Wärmestrahlung, welches in einem Anstieg der Amplitude erkennbar ist.

**Bereich 2:** Bei dem betrachteten Schutzsystem stellt sich unter den gegebenen Parametereinstellungen ein quasi stationärer Zustand ein, d. h. die



**Abb. 6: Zeitliches Gesamtsignal des Leistungsmessgerätes bei Nd:YAG-Laserbestrahlung des Schutzsystems F06-03**

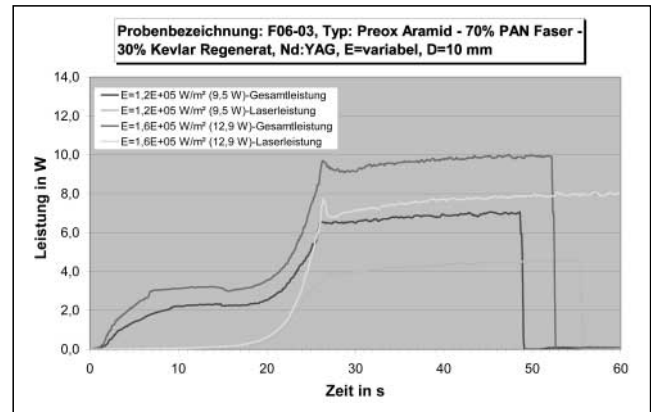
Wärmestrahlung ist über einen begrenzten Zeitabschnitt annähernd konstant.

**Bereich 3:** Bei Bereich 3 handelt es sich um einen Übergangsbereich. Die Zerstörschwelle des Schutzsystems ist überschritten, es tritt beginnende Lochbildung auf. Die Amplitude der gemessenen Strahlungsanteile steigt an.

**Bereich 4:** Das Schutzsystem hat partiell versagt und Laserstrahlung tritt durch das entstandene Loch im Schutzsystem hindurch. Die Amplitude des Messsignals entspricht der durchtretenden Laserstrahlleistung abzüglich diskreter Anteile, die im Randbereich des Loches in das Schutzsystem eingekoppelt werden.

Diese Bereichseinteilung korreliert mit den Ergebnissen der Kalorimetrie. Berücksichtigt werden muss hinsichtlich der Vergleichbarkeit der Daten, dass ein konstanter Verlauf der Kurve ( $E = \text{const.}$ ) bei Angabe leistungsbezogenen Daten (Abb.6) bei der Angabe energiebezogener Daten (Abb.6) mit einer linearen Steigung ( $\Delta H/\Delta t = \text{const.}$ ) korreliert.

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



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

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

### Visuelle Bewertung

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

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

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 (unter anderem in Folge Wasserentzug/Fettentzug)
Entzündung	Einleitung einer thermischen Verbrennung eines Schutzsystem-Werkstoffes
Nachbrennen	Selbstständige thermische Verbrennung des Schutzsystem-Werkstoffes nach Abschalten der Energie (Nachbrennzeit)
Flammenbildung	Entstehung einer Flamme durch Entzündung von Gasen, die bei der Laserbestrahlung vom Schutzsystem-Werkstoff emittiert werden
Rauchbildung	Verdampfen des Werkstoffes unter Bildung von Rauch

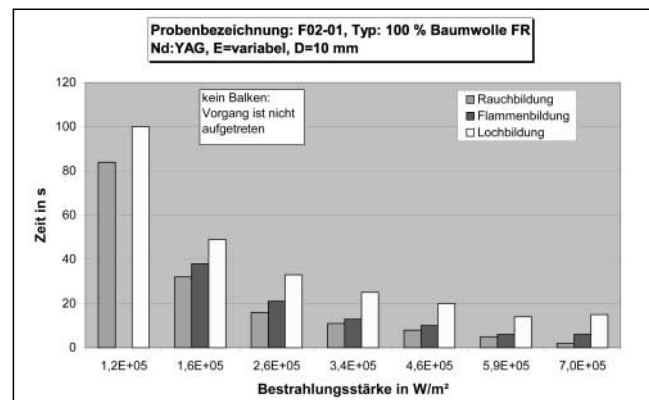
**Tabelle 1: Kriterien zur visuellen Bewertung des Verhaltens der Schutzsysteme bei Laserbestrahlung**

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

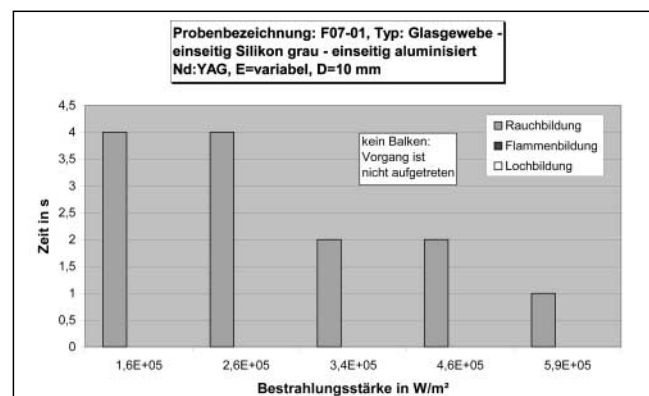
### 3. Kalorimetrische Bewertung der Ergebnisse unter Berücksichtigung des Stoll-Chianta Kriteriums

Für die Bewertung des Verhaltens des jeweiligen Schutzsystems werden Schädigungskriterien der Haut und Toleranzzeiten des Schutzsystems von der Wahrnehmung einer Bestrahlung bis zum Auftreten einer Schädigung herangezogen.

Für Kurzzeitbestrahlung ist das Kriterium „Zeit zur Flucht/ Zeit zum Wegziehen“ bzw. die „Expositionsbegrenzung“ entscheidend. Einflussgrößen sind zum einen die Schädigung



**Abb. 8: Visuelle Bewertung des Schutzsystems F02-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung**



**Abb. 9: Visuelle Bewertung des Schutzsystems F07-01 bei Nd:YAG-Laserbestrahlung**



gungsgrenze der Haut wie auch die Wärmeübertragungsprozesse vom Schutzsystem zur Haut.

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

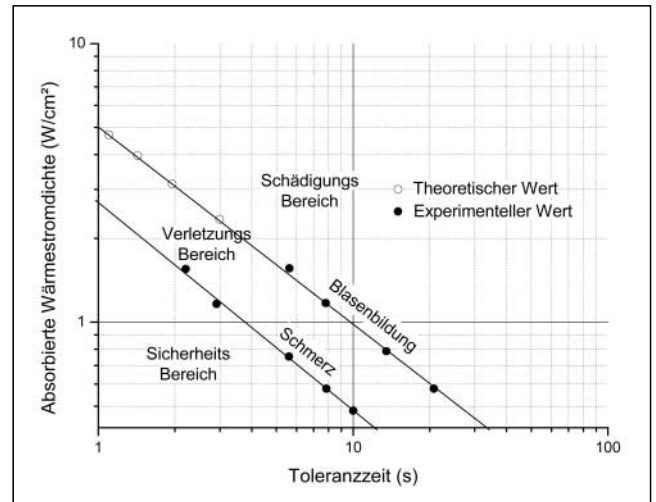
Stoll und Chianta [13] haben diese Modelle in den 60er Jahren vor dem Hintergrund der Bewertung von Persönlicher Schutzausrüstung gegenüber thermischen Belastungen weiterentwickelt. Für die Schädigungsrate des menschlichen Gewebes ist die maximale Temperatur des menschlichen Gewebes entscheidend:

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

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

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

Die mit dem Kalorimeter aufgezeichneten Messwerte werden den Grenzkurven nach Stoll/Chianta vergleichend gegenübergestellt. Überschreitungen der jewei-



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

ligen Grenze indizieren Schmerz bzw. Verbrennungen 2. Grades.

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

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

Die Reaktionszeiten für das Überschreiten einer Reizschwelle und die reflexartige Bewegung des Körperteils aus dem Gefahrenbereich bestimmen die maximalen Einwirkdauern der Belastung auf die menschliche Haut. In der Literatur finden sich nur wenige Daten über Reflexzeiten bei thermischer Reizung der Nociceptoren (insbesondere durch Wärmestrahlung und -leitung).

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

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		

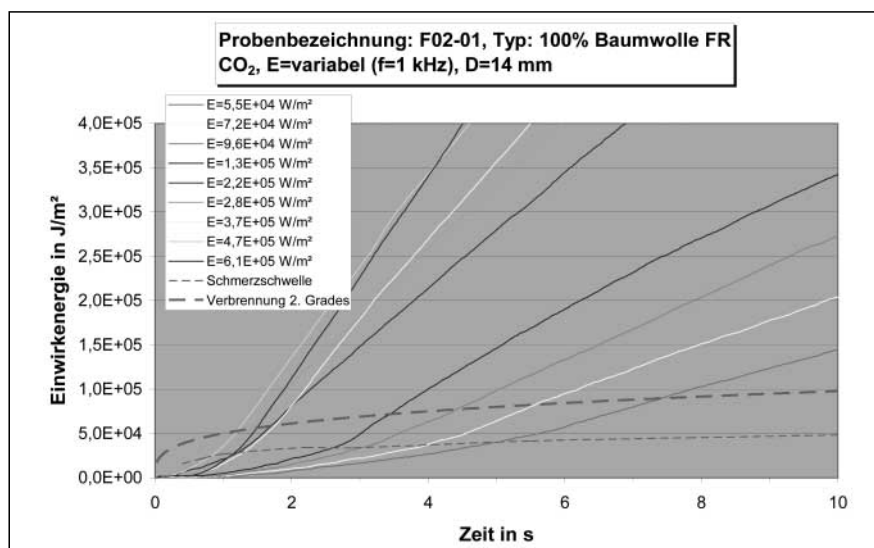
**Tabelle 2: Kontaktdauern/Reflexzeiten gemäß DIN EN 563**

Als Basisgröße für die Reflexzeiten beim Entfernen von Körperteilen aus dem Gefahrenbereich wird im Rahmen dieser Untersuchungen von PSA für Handlaser von Zeiträumen zwischen 1 s bis 4 s ausgegangen.

Auf Basis dieser Annahme wird eine Bewertung der Beispiel-Schutzsysteme F02-01 und F07-01 hinsichtlich des Schutzniveaus bei Laserbestrahlung im Folgenden vorgenommen. Bei CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung des Schutzsystems F02-01 mit einer Bestrahlungsstärke von  $5,5 \times 10^4 \text{ W/m}^2$  wird die Schmerzgrenze nach 5 Sekunden überschritten (Abb. 11). Die Zeitspanne von der Schmerzempfindung bis zum Eintritt von Verbrennungen 2. Grades beträgt ca. 2,5 Sekunden. In diesem Fallbeispiel ist ein Wegziehen der äußeren Extremitäten durchaus noch möglich.

Im Vergleich wird bei einer Bestrahlungsstärke von  $1,3 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  die Schmerzgrenze nach 2,5 Se-

kunden überschritten. Die Zeitdauer von der Schmerzgrenze bis zum Überschreiten der Verbrennung 2. Grades, d. h. die Toleranzzeit beträgt ca. 1 Sekunde. Bezüglich der Reflexzeiten ist eine Toleranzzeit von einer Sekunde des Schutzsystems als grenzwertig zu betrachten. Oberhalb von Bestrahlungsstärken von  $2,5 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  wird die Schmerzschwelle nach einer Sekunde überschritten und



**Abb. 11: Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F02-01 bei CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung**

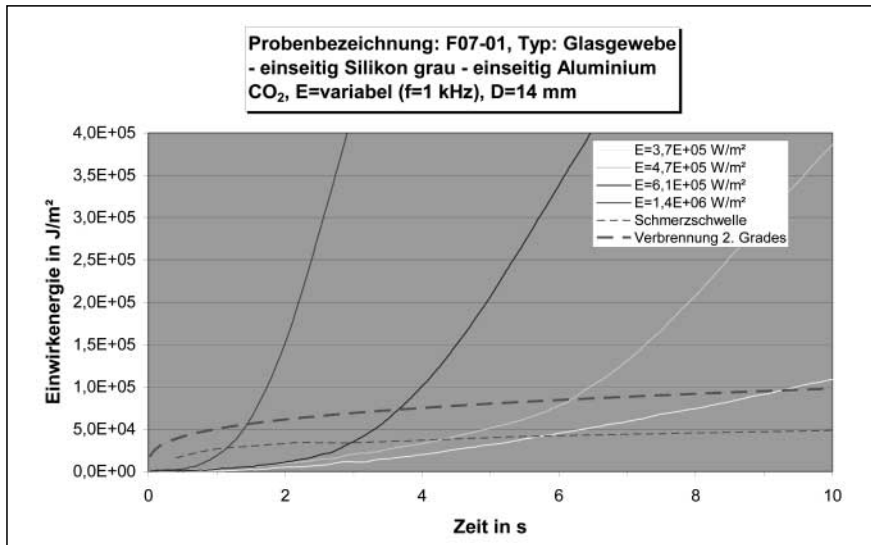


Abb. 12: Kalorimetrische Messungen des Schutzsystems F07-01 bei CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung

die Toleranzzeit bis zum Eintritt von Verbrennungen 2. Grades liegt deutlich unter einer Sekunde (0,5 s bis 0,75 s). Dieses bedeutet, dass unter Berücksichtigung der Reflexzeiten von ca. einer Sekunde eine hohe Gefährdung hinsichtlich einer irreversiblen Hautschädigung besteht.

Im Vergleich zu dem Schutzsystem F02-01 bietet das Schutzsystem F07-01 bei CO<sub>2</sub>-Laserbestrahlung eine deutlich höhere Schutzwirkung (Abb. 12).

Bei Bestrahlungsstärken im Bereich von  $3,7 \times 10^5 \text{ W/m}^2$  wird die Schmerzgrenze nach 6 Sekunden überschritten. Die Toleranzzeit des Schutzsystems bis zum Überschreiten der Schädigungsgrenze (Verbrennungen 2. Grades) beträgt 3 Sekunden. Erst im Bereich von Bestrahlungsstärken größer als  $10^6 \text{ W/m}^2$  werden die Schmerzschwellen im Bereich von einer Sekunde überschritten und die Toleranzzeit ist kürzer als eine Sekunde.

### Zusammenfassung: Auslegungskriterien für Schutzsysteme

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

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

#### Gruppe A: Erhöhte Laserstrahlungstransmission

Bei entsprechend hoher Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung kommt es zur unmittelbaren Exposition der Haut gegenüber Laserstrahlung. Die MZB-Werte gemäß

der technischen Norm IEC DIN EN 60825-1 der unter dem Schutzsystem befindlichen Haut können innerhalb sehr kurzer Zeiträume ( $< 1 \text{ s}$ ) überschritten werden. Dieses kann bereits innerhalb der Reflexzeiten, in denen das betroffene Körperteil aus dem Gefahrenbereich weggezogen wird, zu Schädigungen der Haut führen.

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

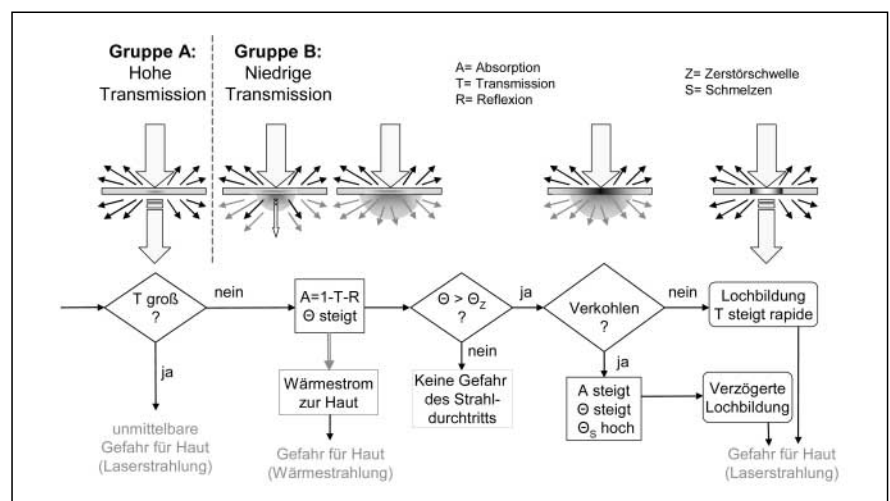


Abb. 13: Schematische Darstellung des Verhaltens von Schutzsystemen



**Gruppe B: Wärmeübertragung**

Bei ausgeprägt niedriger Transmission des Schutzsystems für Laserstrahlung wird ein hoher Anteil der Laserstrahlung von dem Schutzsystem (PSA) absorbiert (abzüglich der Remission  $A = 1 - T - R$ ). Dieses führt zu einem Wärmeeintrag mit Temperaturerhöhung im Schutzsystem. Bei diesen Schutzsystemen, die eine sehr geringe Transmission aufweisen, so dass die  $MZB_{\text{Haut}}$  innerhalb der Reflexzeit nicht überschritten werden, ist vorrangig die durch Absorption in das Schutzsystem eingekoppelte Laserstrahlung und durch Wärmeübertragung von dem Schutzsystem an die Haut transportierte Energie zu bewerten. Als Grenzwert für das Auftreten von thermischen Schädigungen der Haut (Verbrennungen 2. Grades) wird die Grenzkurve nach Stoll/Chianta herangezogen. Mit Beginn der Lochbildung steigt die Laserstrahlungsexposition der hinter dem Schutzsystem befindlichen Haut stark an. In den meisten Fällen werden die  $MZB$ -Werte kurzzeitig nach Einsetzen der Lochbildung überschritten. Zu bewerten ist, ob die Lochbildung innerhalb (kritisch) oder außerhalb der Reflexzeit auftritt.

Die Anforderungen an die funktionalen Schichten eines Schutzsystems resultieren aus dem thermomechanischen Verhalten des Schutzsystems (unter anderem Zerstörungsschwelle) sowie dem Vergleich der Zeitdifferenz zwischen Schmerzempfindung und dem Eintritt von Schädigungen (Verbrennungen 2. Grades), d. h. der sog. Toleranzzeit, mit den Reflexzeiten:

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

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

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

**Tabelle 3: Probenbezeichnung**

## Literatur

- [1] Schmid, C.: Handgeführte Lasersysteme für die cw- und pw-Materialbearbeitung. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2002
  - [2] Neubert, J.: Einsatzpotenziale von Hochleistungsfaserlasern im Hinblick auf mobile Laserapplikationen. In: Tagungsband 4. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2004
  - [3] Albert, S.: Reparaturschweißungen an Werkzeugen mittels Laserstrahltechnik. In: Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 1998. Halle, Hrsg: SLV Halle, 1998
  - [4] Haußmann, D.: Automatisierung von Handarbeitsplätzen. In: Tagungsband 3. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2002. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2002
  - [5] Haferkamp, H.; Schmid, C.; et al.: Handgeführtes Schneiden und Schweißen mit Nd:YAG-Hochleistungslasern. In: Tagungsband 2. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2000. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2000
  - [6] Berend, O.; Haferkamp, H.; Ostendorf, A. et al.: Analyse der Voraussetzungen zum handgeführten Laserstrahlhärten von Umformwerkzeugen. In: Tagungsband 4. Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2004. Halle, Hrsg: SLV Halle, 2004
  - [7] Brüninghoff, H.: Schicht für Schicht – Laserstrahlreinen von Hochspannungsmasten, In: Tagungsband Aachener Kolloquium für Lasertechnik, 18.–20. September 2002, Augsburg, Hrsg: Grütter, 2002, sowie in: EuroLaser, No. 4, 38 pp., 2002
  - [8] Forschungsbericht: Handgeführtes Werkzeugsystem zur lasergestützten Bearbeitung von Schneid- und Umformwerkzeugen, FKZ: AIF 13682 N1
  - [9] Innovationsforum „Mobile und Variable Lasersysteme“ – Neue Einsatzgebiete der Lasertechnologie in der Materialbearbeitung, 22.–23. Februar 2006, Rostock
  - [10] Alunovic, M.; Kreutz, E. W.: Abschirmungen an Laserarbeitsplätzen, Schriftenreihe der Bundesanstalt für Arbeitsschutz, 1996, Wirtschaftsverlag NW, Bremerhaven, ISBN 3-89429-790-5
  - [11] Saffer, Jeffrey D.; Profenno, Louis A.: Patentschrift Laser-Schutzhandschuhe: Laser Beam Protective Gloves. Patentschrift: US Patent 4,947,487 (14.08.1990)
  - [12] N.N.: BIA-Info 12/2000: Schutz vor Verbrennungen an heißen Oberflächen. BGIA, Sankt Augustin, 2000
  - [13] Stoll, A.M.; Chianta, M.A.: Method and Rating System for Evaluation of Thermal Protection. Aerospace Medicine, Vol. 40, 1968, pp. 1232–1238
  - [14] N.N.: Leitlinie für die Auswahl von persönlicher Schutzausrüstung gegen thermische Auswirkungen durch einen Störlichtbogen, 2002, ISBN 3-9807576-2-5
  - [15] Henriques, F.C., Jr.: Studies of Thermal Injury: V. The Predictability and the Significance of thermally Induced Rate Processes leading to Irreversible Epidermal Injury. Arch. Path. 43: 489-502, 1947
  - [16] Schmidt, R.F.; Thews, G.: Physiologie des Menschen, 23. Ausgabe, Springer Verlag, Berlin 1987
- CEN guide 414 Safety of machinery – Rules for the drafting and presentation of safety standards (CEN 2004-12-15)
- Zitierte Normen-/Regelwerke: siehe Verzeichnisse der nationalen, europäischen und internationalen Normungsinstitutionen

# GENAUE BESTIMMUNG DER LASERSTRAHLPARAMETER ZUR VERMEIDUNG VON GEFÄHRDUNG

Klaus G. Hänsel, PRIMES GmbH

## Einleitung

Handgeführte Laser zum Laserstrahlschweißen oder auch zum Laserstrahlschneiden unterscheiden sich erstaunlich wenig von den ortsgebundenen Lasermaterialbearbeitungssystemen. Noch geringer werden die Unterschiede wenn nur der Roboter, der üblicherweise den Fokussierkopf oder den Scannerkopf über dem Werkstück bewegt, ersetzt wird durch eine Laserstrahlfachkraft.

Es kommen nur „augenfeindliche Laser“ zum Einsatz, die alle typischen Merkmale von Laserstrahlung weitestgehend bis zum Auftreffen auf das Werkstück beibehalten. Gefahren können jedoch oft erst reduziert und vermieden werden, nachdem sie erkannt wurden.

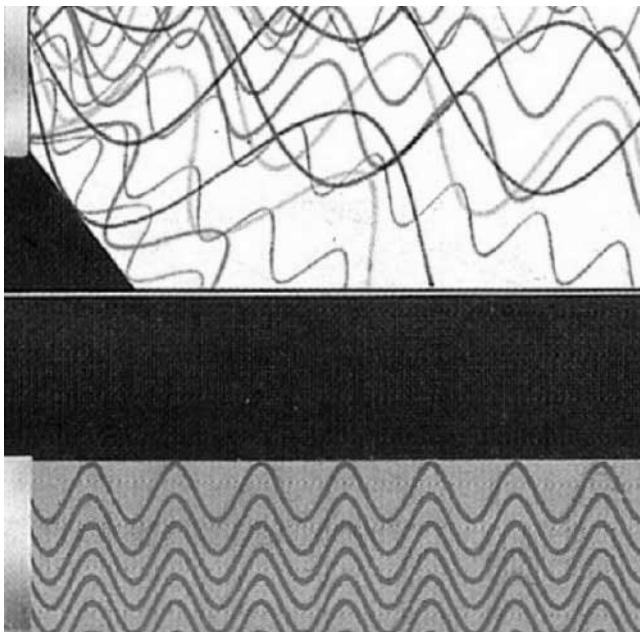


Abb. 1: Weißlichtlampe und monochromatischer Laser

## Lasersystem – Varianten

Um dem Bediener ähnlich gute oder noch bessere Bewegungsfreiheiten zu ermöglichen, wurde der Festkörperlaser als ideale Strahlquelle für handgeführte Lasersysteme favorisiert. Die heute verfügbaren unterschiedlichen Varianten, wie lampen- oder diodengepumpte Nd:YAG Laser,



Abb. 2: TRUMPF-Scheibenlaser mit 6000 W Leistung

Scheibenlaser oder Faserlaser, bzw. auch Hochleistungs-Diodenlaser erfordern eine Vorauswahl der „richtigen“ Strahlquelle. Alle Strahlquellen bleiben in der Regel ortsfest und werden über eine Lichtleitfaser mit einem Bearbeitungskopf verbunden. Der Bearbeitungskopf enthält alle erforderlichen Komponenten zur Strahlformung und zur Strahlfokussierung.

Bevorzugte Strahlquellen und ihre Wellenlängen:

Diodenlaser	$\lambda$ 808, 815, 940–980 nm
Single Mode Ytterbium-Faserlaser	$\lambda$ 1064 nm
Single Mode Erbium-Faserlaser	$\lambda$ 1530–1600 nm
Single Mode Thulium-Faserlaser	$\lambda$ 1800–2100 nm
Multi Mode Ytterbium-Faserlaser	$\lambda$ 1070–1080 nm
Nd:YAG Laser	$\lambda$ 1064 nm
Ytterbium Scheibenlaser	$\lambda$ 1030 nm

Es wird hier bereits deutlich, dass sehr unterschiedliche Wellenlängenbereiche zum Einsatz kommen. Doch nicht allein die unterschiedlichen Wellenlängen sollten Beachtung finden. Die Ausgangsleistungen der verwendeten Strahlquellen sind extrem unterschiedlich. Leistungen zwischen 10 W bis 10 kW werden in Fasern eingekoppelt an deren Ende unterschiedliche Bearbeitungsköpfe montiert werden können.

Es könnte unterschieden werden zwischen Schweißkopf, Schneidkopf oder Scannerkopf. Auch kombinierte Strahlführung und Strahlformung wird eingesetzt, zum Beispiel in Bearbeitungsköpfen zum Schweißen mit integriertem Scanner.



Abb. 3: Scanner-Kopf für fasergekoppelte Laser

Für den Laien ist nicht unbedingt erkennbar, was sich in einem derartigen Gerät verbirgt. Hier sei insbesondere den Herstellern zu empfehlen auf drei wesentliche Details zu achten:

- **Beschriftung** mit allen relevanten Angaben entsprechend den Vorgaben der Berufsgenossenschaft
- **Optische** Betriebsanzeige
- **Akustische** Betriebsanzeige

## Gefahren-Potential

Leider sind die maximalen Laserstrahl-Leistungen, die aus dem Bearbeitungskopf austreten könnten, nicht für jede im Arbeitsbereich befindliche Person eindeutig erkennbar. Dabei ist stets wieder darauf hinzuweisen, dass bereits Leistungen von wenigen W zumindest eine Gefahr für die Augen darstellen können.

Erschwerend ist für den Fachkollegen, der noch nicht umfangreich geschult ist, die Abschätzung des jeweiligen Strahlparameter-Produktes, welches typisch zwischen 80 mm mrad und 0,3 mm mrad liegen kann, sowie der möglichen Leistungsdichten, die sowohl im Fokus als auch außerhalb vom Fokusbereich auftreten könnten.

In diesem Zusammenhang sei nochmals auf die wellenlängenrelevanten Unterschiede in dem nachfolgenden Beispiel hingewiesen.

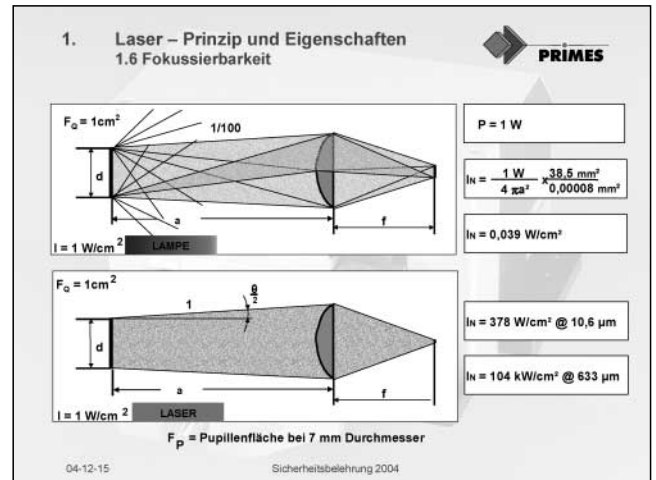


Abb. 4: Leistungsdichte Weißlicht: Laserstrahl

Bereits mit wenigen W unfokussierter Strahlung können im Auge Netzhautbelastungen von einigen kW/cm² erzeugt werden. Das menschliche Auge übernimmt die Fokussierung selbst.

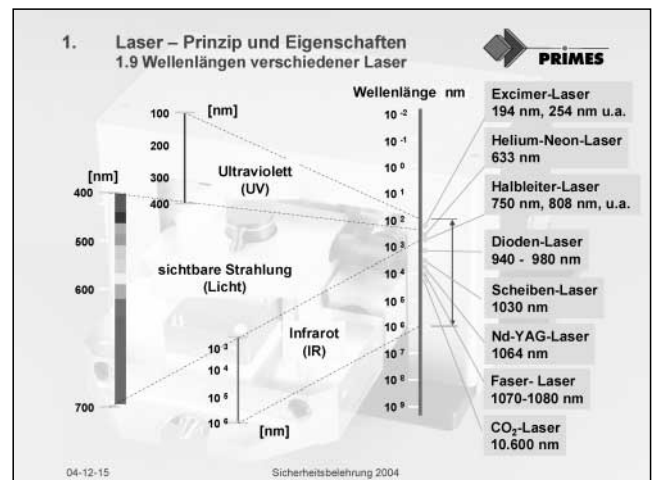


Abb. 5: Wellenlänge verschiedener Laser

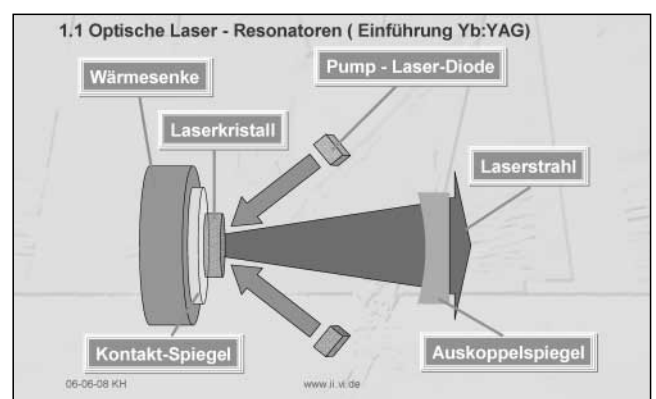


Abb. 6: Schema es Yb:YAG-Scheibenlasers

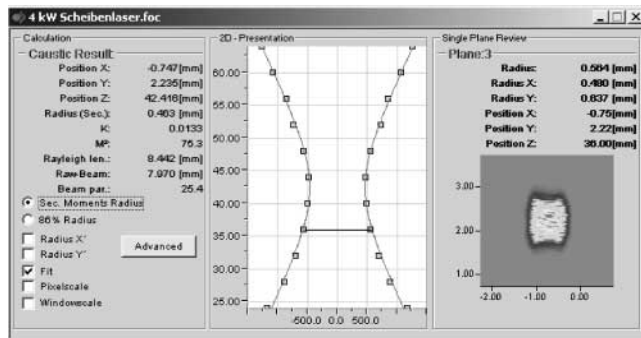


Abb. 7: 4000 W-Scheibenlaser fokussiert

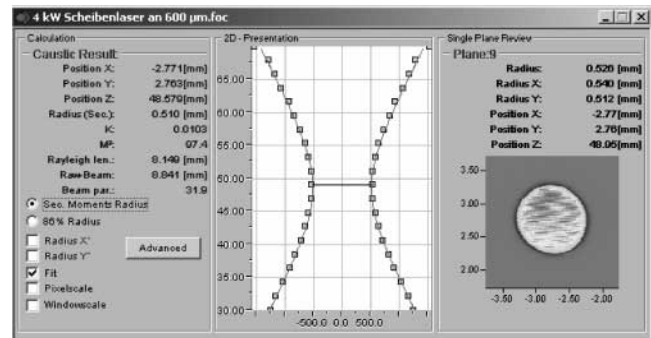


Abb. 9: 4 kW-Diodenlaser an 600 µm-Faser

Das Strahl Parameter Produkt BPP (Beam Parameter Product) bestimmt neben dem Kerndurchmesser der Übertragungsfaser die Fokussierbarkeit und damit auch die erreichbaren Leistungsdichten im bzw. nahe dem Fokus. Unterschiedliche Kerndurchmesser der Übertragungsfasern zwischen 50 und 1000 µm sowie unterschiedliche Abbildungsverhältnisse erhöhen die Unsicherheit bezüglich der möglichen maximalen Leistungsdichten im Fokusbereich dann nochmals.

Mit einem 4 kW-Scheibenlaser werden problemlos Leistungsdichten im Bereich von ca. 3 MW/cm<sup>2</sup> erreicht.

Mit einem 4 kW-Diodenlaser scheinen nur 0,5 MW/cm<sup>2</sup> erreichbar zu sein. Hier ist jedoch neben den unterschiedlichen Wellenlängen ganz besonders der verwendete Faserdurchmesser zu beachten. Während der 4 kW-Scheibenlaser mit einer 200 µm-Faser übertragen wurde, kam in der Abb. 2 eine 600 µm-Faser zum Einsatz.

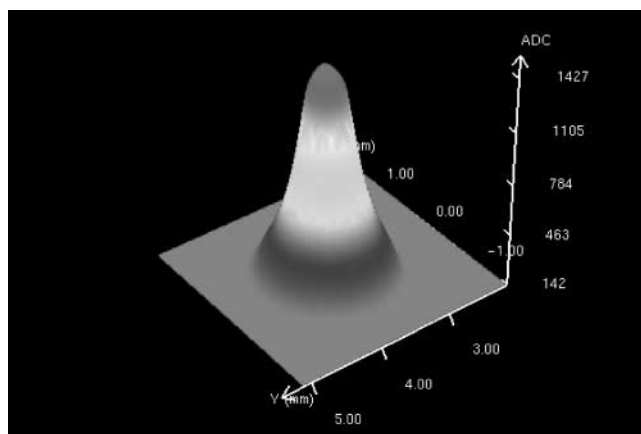


Abb. 8: 4000 W-Diodenlaser

Selbst geringe Leistungen, wie der nachfolgend dargestellte Diodenlaser mit Faserkopplung für das mobile Schweißen von Kunststoffen, erzeugen ein hohes Gefährdungspotential im sichtbaren Wellenlängen-Bereich.

Je nach Abstand zum Austritt aus der Bearbeitungsoptik lassen sich hier bei einer Wellenlänge von 808 nm mit einer 2 W-Diode bereits Leistungsdichten zwischen 10 und 50 W/cm<sup>2</sup> erzeugen.

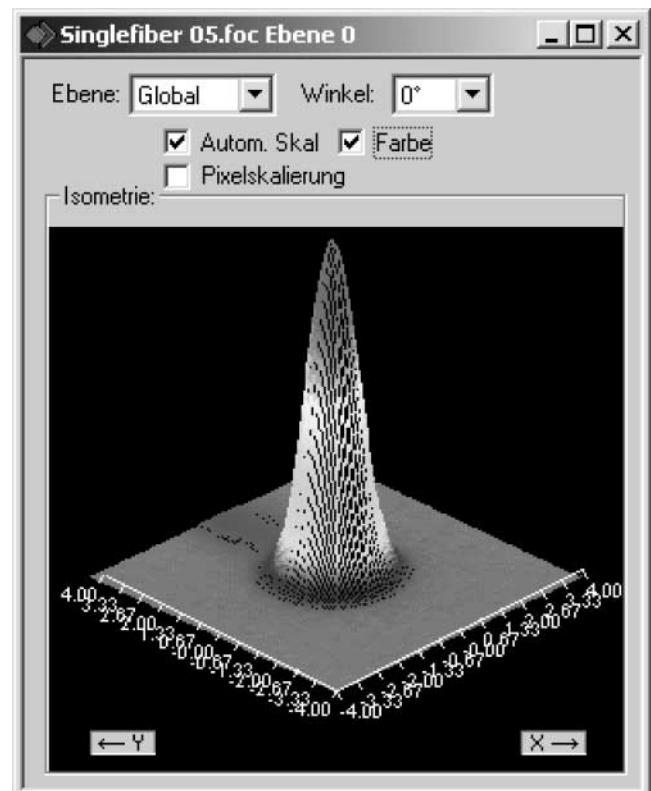
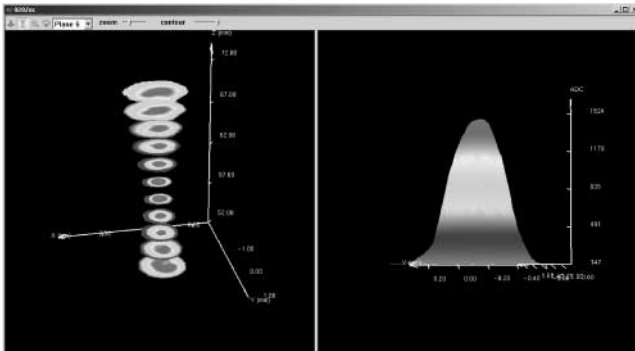


Abb. 10: 2 W-Diodenlaser nahe am Faseraustritt





**Abb. 11: Faserlaser 10 kW @ 1070 nm**

Zum Vergleich ist nachfolgend ein Laser mit der Wellenlänge 1070 nm und 10.000 W Leistung dargestellt, der in Kombination mit verschiedenen Aufweitungssystemen einerseits höchste Leistungsdichten im Bereich zwischen 5 und 30 MW/cm<sup>2</sup> ermöglicht oder mit extrem langen Brennweiten fokussiert werden kann.

Die längeren Brennweiten vergrößern den Toleranzbereich zum Positionieren der Fokusebene auf der Werkstückoberfläche. Dies kommt dem Einsatz von handgeführten Lasersystemen durchaus entgegen.

Nachteilig ist jedoch die verhältnismäßig geringe Abnahme der Leistungsdichten in zunehmender Entfernung zum Bearbeitungskopf, aus dem die Strahlung austritt.

## Literatur

### Journal Paper

- [1] Kolenchak, Mc Kinney, Ireland, Berger, Herriot, Reedy (2004) „Competitive High-Power Laser Technology Overview“ – IL-VI Optics Inc. 2004

### Studies & Lectures

- [2] Hänsel, Pethan, Schröder (2005) „Future Tools for Shipyard Industries“ – Dock Laser Study
- [3] Reinhardt Poprawe (2005) Laser Technology ILT RWTH – Aachen
- [4] Kramer, Schwede, Brandl, Hänsel, Klos; (2004) „Laser Micro Machining – Tool Check“ ICALEO paper M 409 San Francisco 2004

### Reports & Company Brochures

- [5] Shcherbakov; IPG Press Release; Ytterbium doped fiber lasers (2005) „Typical Specifications“ & Shcherbakov, „Fiber Lasers – Actual Status & Targets“ (2005) BIAS-Seminar Bremen, May 24th 2005
- [6] Reinhardt Poprawe (2005) Laser Technology ILT RWTH – Aachen
- [7] Kramer, Schwede, Hänsel (2005) Automotive Workshop



**Michael Rothweiler**, Firma TRUMPF

Der Lasereinsatz bei der Materialbearbeitung hat sich in den vergangenen Jahren in unterschiedlichen Feldern erfolgreich etabliert. Er erfolgt in der Regel an stationären Maschinen, an denen in automatisierten Abläufen bewährte Sicherheitstechnik zum Einsatz kommt. Es werden Steuersignale, Prozessgase ebenso verknüpft wie alle aktuellen Anforderungen im Bereich der Erfassung bzw. Filterung von Schadstoffen, die während der Bearbeitung entstehen können.

Verschiedene Anwendungen erforderten im Laufe der Zeit größere Mobilität beim Lasereinsatz. Damit veränderten sich auch die Rahmenbedingungen für die Handhabung der Prozesse.

Stationäre Arbeitsplätze, bei denen das Werkstück von Hand positioniert und bearbeitet wird, sind in der Industrie schon seit der Einführung des YAG-Lasers im Einsatz. Bei diesem Verfahren, befinden sich die Hände des Bedieners im Arbeitsbereich und damit im Gefahrenbereich. Zusätzliche Anforderungen im Rahmen der Mobilität ließen neue Gefahren am jeweiligen Einsatzort entstehen.

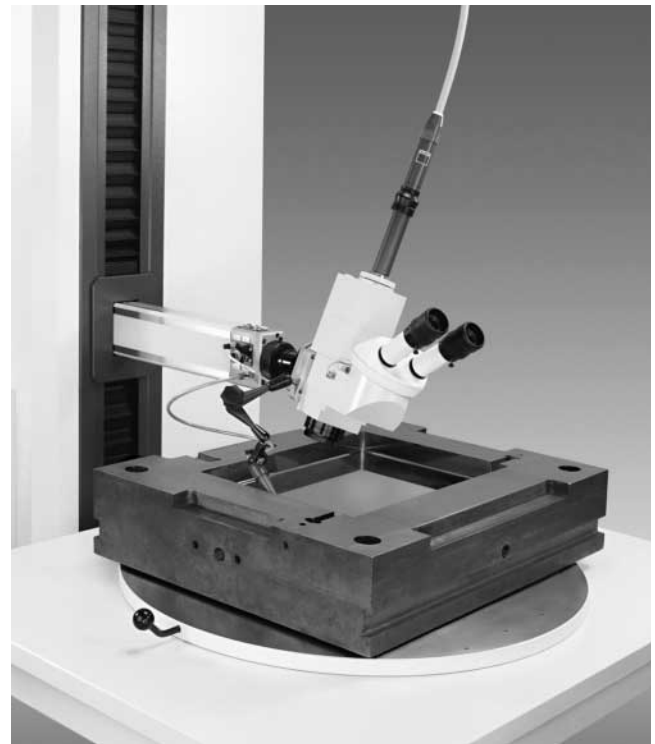
Mit Einführung so genannter handgeführter Lasergeräte (HLG) müssen unterschiedliche Sicherheitsanforderungen neu überdacht und geregelt werden. Bei diesen Geräten erfolgt die Strahlformung in der handgeführten Bedieneinheit, der Laserstrahl wird über eine Lichtleitfaser zugeführt.

Grundlegende gesetzliche Anforderungen im Arbeitsschutz in Deutschland, Europa bzw. international (weltweit) machen es notwendig, Verfahren hinsichtlich möglicher Gefahrenpotentiale im Vorfeld der Umsetzung zu analysieren. Der übergeordnete Aspekt ist dabei, ein Verfahren zu finden, das im Bereich der Lasermaterialbearbeitung die Sicherheitsanforderungen stationärer Maschinen ermöglicht, wie sie in der DIN EN ISO 11553-1, Sicherheit für Laserbearbeitungsmaschinen, festgeschrieben sind.

Bleibt nach begründeter Analyse nur die Umsetzung des Verfahrens mit einem so genannten offenen System, d. h. die Bearbeitung durch ein handpositioniertes Verfahren, gehen die sicherheitstechnischen Anforderungen über

die Festlegungen des ersten Teiles der oben genannten Norm hinaus, die normalerweise die komplette Kapselung des Arbeitsbereiches bei Laserklasse 1 vorschreibt. Die grundlegende Zielsetzung, den Bediener des Prozesses durch technische Maßnahmen zu schützen, lassen sich nicht mehr uneingeschränkt realisieren.

Bei offenen Systemen ergibt sich damit die Forderung nach dem Schutz der Augen bzw. der Hände während der Bearbeitung. Da sich der Bediener im Strahlungsbereich der Laserklasse 4 frei bewegt und seine Position in der Regel nicht abgefragt wird, kann der Schutz der Augen ausschließlich durch die entsprechende Laserschutzbrille gewährleistet werden.



**Abb. 1**

Beim Einsatz offener – im Arbeitsbereich nicht gekapselter – Systeme, zum Beispiel im Bereich der Entwicklung, ist ein separater Raum mit Warnleuchte erforderlich, nur so lässt sich der Schutz der Peripherie des Laser Arbeitsplatzes erreichen.

Der Bediener ist während der Bearbeitung mit Laserschutzbrille ausgestattet. Der Schutz der Hände wird durch den Einsatz geeigneter Handschuhe erreicht. Dabei ist die richtige Wahl derzeit eigentlich sehr schwierig.

Untersuchungen zur Definition geeigneter Materialien im Bereich der persönlichen Schutzausrüstung für handgeführte Laser laufen aktuell im Rahmen eines Projektes dem Partner aus Forschung und Industrie angehören. Das Projekt wird auch von der Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA) gefördert. Ergebnisse werden nach Projektabschluss 2007 erwartet.



Abb. 2



Abb. 3

Eine geschlossene Variante des Arbeitsplatzes kann im Normalbetrieb ohne Laserschutzbrille betrieben werden. Je nach Ausstattung des Arbeitsbereiches ist Handschutz erforderlich.



Abb. 4

Bei handgeführten Systemen ergeben sich zusätzlich folgende Aspekte. Die Bearbeitung darf nur unter Einhaltung bestimmter Voraussetzungen gestartet werden. Zu den bereits erwähnten Lasersicherheitstechnischen Überlegungen muss eine Aufsatzkontrolle gewährleistet sein, im Sinne eines sicheren Arbeitsergebnisses muss die Leistungssteuerung geschwindigkeitsabhängig erfolgen, um nur einige Aspekte zu benennen. Die Auslegung der Steuerungskategorie erfolgt nach DIN EN 954-1, sinnvollerweise anforderungsabhängig im Wesentlichen in Kategorie 3 bzw. 4.

Alle Forderungen ergeben sich aus DIN EN ISO 11553-2/„Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte“. Die Norm liegt derzeit als Entwurf vor.



Abb. 5

**Carsten Rasmussen**, FORCE Technology  
**Ulf Jasnau**, SLV M-V

Das europäische Forschungsprojekt „Dock-Laser“ (Increasing Efficiency and Quality in Shipbuilding and Shiprepair by Developing Mobile Laser Equipment for Dock-Area) wurde im Zeitraum September 2002 bis Februar 2006 von verschiedenen europäischen Unternehmen und Institutionen bearbeitet. Ziel des Projektes war es, Anwendungsmöglichkeiten für den Festkörperlaser unter den rauen Bedingungen des Schiffbaus zu erschließen. Dabei sollte die Flexibilität der Strahlführung beim Festkörperlaser für verschiedene mobile Anwendungsfälle genutzt werden:

- Einsatz eines Schweißtraktors für das Laserstrahl-MSG-Hybridschweißen langer geradliniger Schweißnähte
- Manuell geführtes Laserstrahlschweißen und -schneiden für die Schiffsausrüstung und
- Manuell zu positionierendes Laserstrahl-Heftschweißen für Stumpf- und T-Stöße in der Vormontage

Von vornherein wurde der Sicherheit beim Umgang mit dem Festkörperlaser und den mobilen Geräten ein hoher Stellenwert eingeräumt. In einem extra dafür geplanten Arbeitspaket bereitete insbesondere die Firma FORCE Technology in enger Zusammenarbeit mit den anderen Partnern den praktischen Einsatz der Geräte unter den Aspekten des Arbeitsschutzes vor. Erfahrungen aus vorangegangenen Projekten zum Einsatz von Festkörperlasern im Schiffbau lagen bei FORCE Technology mit dem Projekt „ShipYAG“ und bei der SLV M-V mit dem nationalen Projekt „VIRKOM“ vor.

Andere Partner des Konsortiums, z. B. die SLV Halle GmbH, konnten ebenfalls auf Erfahrungen bei dem Einsatz von Festkörperlasern in anderen Branchen zurückgreifen.

### Mobiler Lasereinsatz im Schiffbau – die Idee

Hervorgegangen ist das Projekt Dock-Laser aus der Idee, dass dank der flexiblen Strahlübertragung mittels Lichtleitfasern die Nutzung des Werkzeuges LASER bei der Bearbeitung von Großstrukturen in der Baustellenfertigung inzwischen möglich geworden ist. Durch die rasch fort-

schreitende Entwicklung der Festkörperlaser im Hochleistungsbereich lassen sich auch schiffstypische Blechdicken bearbeiten. Dies konnte im Projekt in praktischen Untersuchungen auf zwei europäischen Werften nachgewiesen werden.

Neben der Schaffung komfortablerer Arbeitsbedingungen für die Bediener durch Reduzierung der Emission von Rauch, Gasen, Wärme und UV-Strahlung sollte der Einsatz des Lasers im Bereich der Schiffsmontage eine Erhöhung der Effektivität der Produktion sowie eine Steigerung der Qualität durch reduzierte Deformationen und Oberflächenbeschädigungen ermöglichen.

Der Arbeitsplan sah nach einer Analyse des Ist-Zustands und einer Definition des Bedarfes die Prozess- und Geräteentwicklung für die identifizierten Anwendungsfälle vor. In Labor- und Praxistests wurden die Lösungen zur Einsatzreife gebracht.

Am Projekt beteiligt waren neben Werften als Endanwender der Lasertechnologie (Meyer Werft Papenburg sowie NAVANTIA Werft Puerto Real – Spanien) Forschungsinstitute (SLV Mecklenburg-Vorpommern; SLV Halle; VUZ Bratislava – Slowakei), Geräteentwickler (Fronius – Österreich, OMCB – Dänemark), ein unter anderem auf Arbeitssicherheit spezialisiertes Unternehmen (FORCE Technology – Dänemark) und eine Klassifikationsgesellschaft (DNV – Norwegen). Das Konsortium wurde unterstützt vom Center of Maritime Technologies e.V., Hamburg und BALANCE Technology Consulting, Bremen.

### Die Gerätetechnik

Für die verschiedenen Anwendungsfälle wurde eine Mobile Laser Basisstation (MBS) entwickelt, welche die gleichzeitige Ankopplung von 3 verschiedenen Laseranwendungen ermöglicht. Die Abfrage der Laserleistung erfolgte dabei nachzeitig. In einem 40“ Container wurden dazu ein Trumpf HL4006 Nd:YAG-Laser mit 4,5 kW Ausgangsleistung und die erforderliche Kühltechnik untergebracht. Gleichzeitig bot der Container Stauraum für sämtliche im Rahmen des Projektes „DOCKLASER“ entwickelten Peripheriegeräte, so dass mittels eines Trailers das gesamte Equipment jederzeit auf der Werft oder von Werft zu Werft umgesetzt werden konnte. In der Endphase des Projektes wurde aufgrund der Verfügbarkeit leistungsfähiger

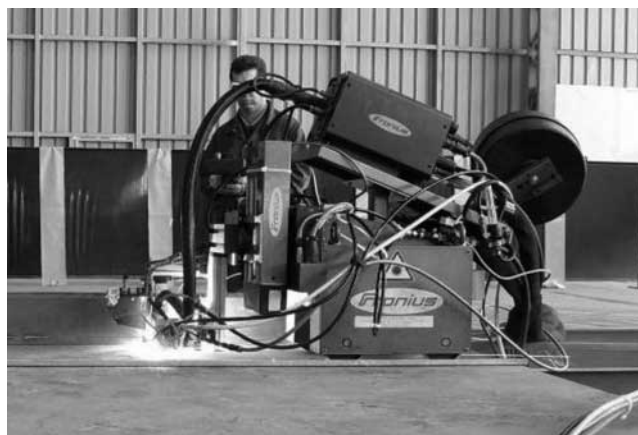
higerer Faserlaserquellen eine zweite MBS (Abb. 1) an der SLV Mecklenburg-Vorpommern entwickelt und auf der NAVANTIA Werft und der Meyer Werft erprobt, die mit einem 10 kW IPG Faserlaser YLR 10.000 bestückt ist und bei einem Drittel der Größe gegenüber der ersten MBS die 2,5-fache Ausgangsleistung mit einem erheblich höheren Wirkungsgrad bereitstellt. Bei dieser Laserkonfiguration ist nur der Anschluss einer Applikation möglich.



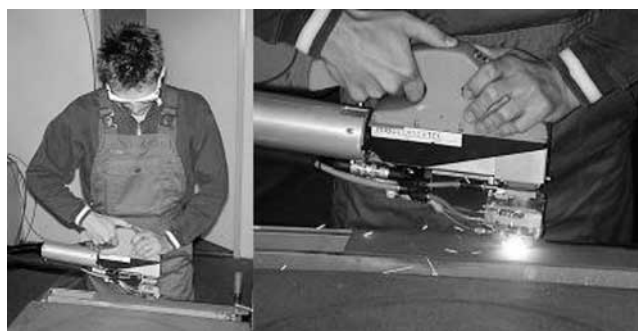
**Abb. 1: Mobile Laser-Basisstation zweiter Generation mit 10 kW Faserlaser der SLV M-V**

Für die Fertigung langer Laserstrahl-MSG-Hybridnähte in den Positionen PA und PB wurde entsprechend den Werftanforderungen von der Firma Fronius ein robustes Traktorschweißsystem entwickelt (Abb. 2). Dieses war ausgerüstet mit einem Laserstrahl-MSG-Hybridschweißkopf, einem 3-Linien-Lasersensor MTH 20 der Firma META zur Nahtverfolgung und einem Drahtvorschubkoffer. Über einen separaten Steuerschrank ist der Traktor verbunden mit der Mobilen Laser Basisstation, einer TPS 9000 Schweißstromquelle mit 900 A Maximalleistung bei 60% ED und der Sensorsteuereinheit. Bedient werden der Traktor und der Schweißprozess über ein Programmierhandgerät.

Basierend auf den Erfahrungen mit handgeführten, in der Automobilindustrie seit einigen Jahren angewendeten Laserschweißköpfen und entsprechend den Werftanforderungen entstand ein modularer Laserschweiß- und Laserschneidkopf mit integriertem Vortrieb, der durch den Bediener manuell entlang der entsprechenden Kontur geführt wird (Abb. 3). Dabei war das Hauptaugenmerk auf den Einsatz in der schiffbaulichen Ausrüstung gerich-



**Abb. 2: Laserstrahl-MSG-Hybridschweißtraktor in der Erprobung auf der NAVANTIA Werft Puerto Real, Spanien**



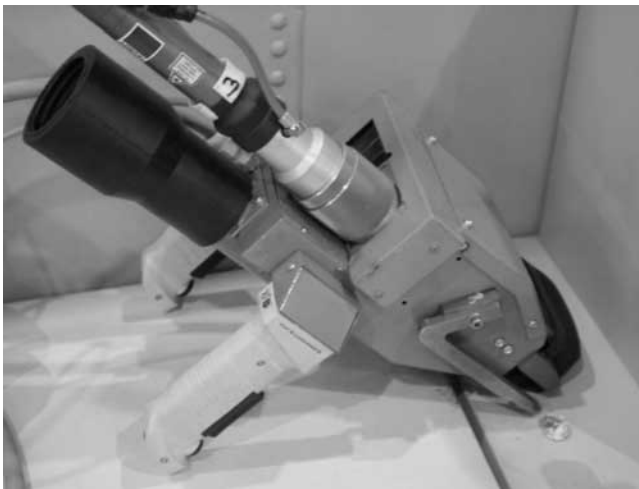
**Abb. 3: Manuell geführter Laserhandkopf für das Schweißen und Schneiden**

tet, um Befestigungen für Kabelkanäle und Rohre an das entsprechende Deck zu schweißen oder nachträgliche Ausschnitte an Deck vorzunehmen. Der Vorzug dieser Technologie gegenüber herkömmlichen Verfahren wie MAG-Schweißen oder Autogenbrennschnitt liegt dabei eindeutig in der geringeren Wärmeeinbringung in das entsprechende Material und dem damit verbundenen geringeren Verzug bzw. dem Erhalt existierender Korrosionsschutzanstriche. Mit einem Eigengewicht < 5 kg ermöglicht das Gerät bei maximaler Laserleistung von 4 kW Einschweißtiefen bis 5 mm und gute Schnittqualität in Schiffbaustahl bis 6 mm Materialstärke. Die Vorschubgeschwindigkeit liegt bei maximal 2,5 m/min und ist stufenlos regulierbar. Die Bedienung des Gerätes erfolgt unter Beachtung der Arbeitssicherheit im Zweihandbetrieb.

Entsprechend den Anforderungen der Werften und basierend auf bereits realisierten MAG-Heftgeräten entstand an der SLV Halle ein Laserheftkopf, der sowohl für Stumpfstoß-Heftschweißungen als auch, nach geringfügigen Umbauten, für T-Stoß-Heftschweißungen geeignet ist



(Abb. 4). Die Brennweite der Laserfokussierung beträgt 100 mm. Der Schweißkopf ist von Hand über der Naht zu positionieren. Nach Freigabe durch den Bediener wird automatisch eine Heftnaht von 40–50 mm Länge geschweißt. Einstellbar sind Leistungen bis 4 kW bei Schweißgeschwindigkeiten im Bereich von 0,5–2,5 m/min. Die Einstrahlposition an T-Stößen ist dabei auf 45° beschränkt. Der Schweißprozess ist komplett gekapselt, eine Querluftstromdüse zum Schutz der Optik und eine Schweißrauchabsaugvorrichtung sind integriert.



**Abb. 4: Manuell zu positionierendes Laserstrahl-Heftschweißgerät der SLV Halle**

## Vorgehensweise zur Lasersicherheit

Der Ausgangspunkt bei der Vorgehensweise zur Realisierung der Lasersicherheit bei den Arbeiten im Projekt waren die festgelegten Anwendungsfälle und die dafür vorgesehene Gerätetechnik (siehe auch Einleitung). Für alle drei Anwendungen kamen Geräte zum Einsatz, welche nicht im automatischen Betrieb arbeiten. In Anlehnung an [1] kann hier also von einem Betrieb mit kontinuierlicher Überwachung durch Beobachtung gesprochen werden. Dieser unter kontinuierlicher Beobachtung stattfindende Betrieb wird durch das manuelle Handhaben und/oder die notwendige Prozessbeobachtung sichergestellt.

Eine Klassifizierung der Geräte als Lasersysteme der Klasse 1 nach [2] war somit nicht das Ziel der Arbeiten zur Lasersicherheit im Projekt Dock-Laser. Angestrebt wurde eine Minimierung der Risiken auf ein vertretbares Niveau mit Hilfe von Risikoanalysen für die geplanten

Anwendungen in Anlehnung an die gültige Maschinenrichtlinie und [3] sowie die sich in der Entwurfsphase befindliche Norm zum Umgang mit handgeführten Lasersystemen [4]. Die Verringerung des Gefahrenpotentials auf ein als „sicher“ erachtetes Niveau kann dadurch auch für Geräte der Klasse 4 erreicht werden, siehe [7].

Von vornherein wurden umfangreiche Messungen der auftretenden Strahlung in verschiedenen Situationen geplant um festzustellen, inwiefern die Grenzwerte für die Maximal Zulässige Bestrahlung (MZB) außerhalb von lokalen Abschirmungen bzw. außerhalb eines bestimmten Radius um den Ort des Bearbeitungsprozesses ggf. überschritten werden.

Die zu Beginn des Projektes gewählte Vorgehensweise stimmt somit auch mit aktuellen Entwicklungen und Veröffentlichungen zu Fragen der Lasersicherheit überein, insbesondere sei hier auf [7] und [8] verwiesen. Vorliegende Erfahrungen im Umgang mit Behörden und überwachenden Organisationen bei den Projektpartnern sprachen ebenfalls für die gewählte Vorgehensweise, die hier kurz zusammengefasst dargestellt wird:

- Auswertung und Dokumentation vorhandener Normen und Richtlinien
- Dokumentation des aus den eingesetzten Laserquellen, der eingesetzten optischen Elemente (Strahlübertragung und Strahlformung) und der angewandten Prozesse resultierenden Gefahrenpotentials
- Messungen der auftretenden sekundären Strahlung als vorbereitende und begleitende Maßnahme für die Risikoanalyse zur Ableitung von notwendigen Maßnahmen für alle Anwendungsfälle in verschiedenen Stufen des Projektes:
  - Messungen im Labor der Fa. FORCE Technology zur Auswahl und Vorbereitung der Messtechnik
  - Messungen unter normalen Prozessbedingungen für alle Anwendungen mit den entwickelten Geräten
  - Messungen unter „worst-case“-Bedingungen für alle Anwendungen mit den entwickelten Geräten
  - Durchführung einer Risikoanalyse mit Gefährdungsbeurteilung für die definierten Anwendungen
- Vorstellung des Projektes, der geplanten Einsatzfälle und der Risikoanalyse bei den verantwortlichen Ingenieuren für Arbeitssicherheit der Werften sowie den zuständigen staatlichen Einrichtungen und anderen Institutionen

- Ausbildung bzw. umfangreiche Einweisung des beteiligten Personals der Endanwender (Werften) vor und während der Werfterprobung
- Die Vorgehensweise soll beispielhaft am Anwendungsfall „traktorgeführtes Laser-MSG-Hybridschweißen“ erläutert werden.

### Traktorgeführtes Hybridschweißen

Zu diesem Anwendungsfall ist zu bemerken, dass neben der Sicherheit bei der Arbeit mit Laserstrahlung auch die Arbeitssicherheit bei der Arbeit mit einem Schweißlichtbogen zu realisieren ist. Da es sich beim Lichtbogenschweißen um ein eingeführtes Verfahren in weiten Bereichen der Industrie handelt, sind Regeln und Maßnahmen im Umgang damit bekannt und den Beteiligten vertraut. Das Hauptaugenmerk bei der Arbeit lag somit auf den Besonderheiten des Lasereinsatzes.

### Auswertung und Dokumentation relevanter Literatur

Für die allgemeine Auswertung wurden ausschließlich europäische Normen und Richtlinien berücksichtigt. Als besonders relevant wurden die im Literaturverzeichnis aufgeführten Normen einbezogen. Wichtige Regelungen, Begriffserklärungen und Definitionen wurden in einem internen Dokument zusammengefasst [9]. Auch das Gefahrenpotential wurde anhand der aufgeführten Normen und weiterer Literatur in demselben internen Dokument erfasst.

Dieses entwickelte sich im Laufe des Projektes zu einem „lebenden“ Dokument welches ständig erweitert und ergänzt wurde. Es wurde in der ersten Phase des Projektes den Endnutzern für deren eigene Vorbereitung des Werfteinsatzes der Lasertechnik zur Verfügung gestellt und bildete damit die Basis für die Diskussionen mit den verantwortlichen Ingenieuren für Arbeitssicherheit der Werften sowie den zuständigen staatlichen Einrichtungen und anderen Institutionen.

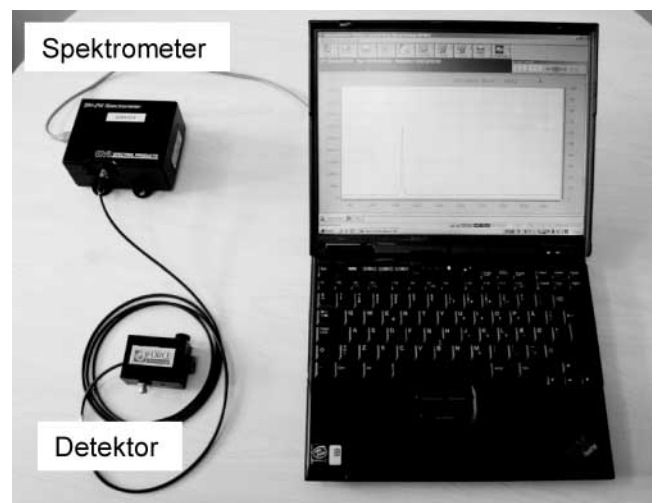
Insbesondere für bisher nicht mit Lasertechnik konfrontierte Endanwender (NAVANTIA Werft Puerto Real, Spanien) waren die zusammengefassten Aussagen eine Hilfe beim Einstieg in die nicht ganz so einfache Welt der Lasersicherheit.

### Messungen von sekundärer Strahlung

Die Messung insbesondere von aus den Bearbeitungsprozessen reflektierter Strahlung erfolgte in mehreren Etappen.

Zur Sicherstellung reproduzierbarer Messwerte führte die Firma FORCE Technology in ihrem Anwendungslabor vorbereitende Maßnahmen an Messtechnik und Auswertesoftware durch. Für alle während des Projektes durchgeführten Messungen kam die Technik aus Abbildung zum Einsatz:

- SM 241 Nah-Infrarot CCD Spektrometer (Hersteller: CVI-Laser) mit einem Spektralbereich von 880 nm bis 1600 nm und Detektor
- Software SM32PRO und Laptop



**Abb. 5: SM 241 Spektrometer mit SM32PRO Software und Laptop**

Als Laserquelle bei den vorbereitenden Messungen kam ein 4,5 kW Nd:YAG-Laser zum Einsatz. Damit war eine Vergleichbarkeit mit der im Projekt für die Technologieentwicklung eingesetzten Laserquelle sichergestellt.

Die Maximal Zulässige Bestrahlung (MZB) für das menschliche Auge bei der Arbeit mit einem Festkörperlaser der Wellenlänge 1.064 nm beträgt  $50 \text{ W/m}^2$ , siehe [2]. Mit diesem Wert waren also alle gemessenen Strahlungswerte zu vergleichen. Unter Beachtung der jeweiligen Situation und der Abstände der ermittelten Werte zum Prozessort waren diese bei der Risikoanalyse zu berücksichtigen.



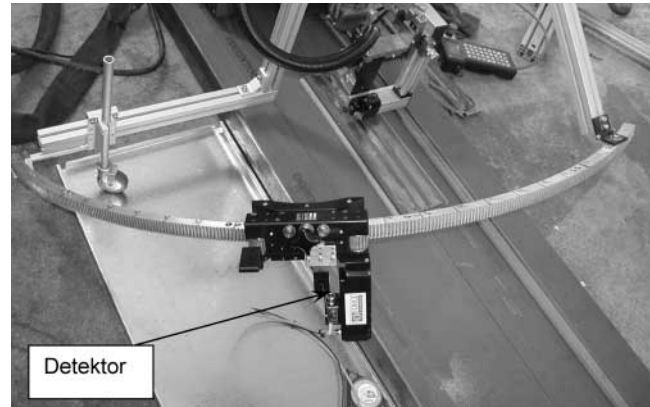
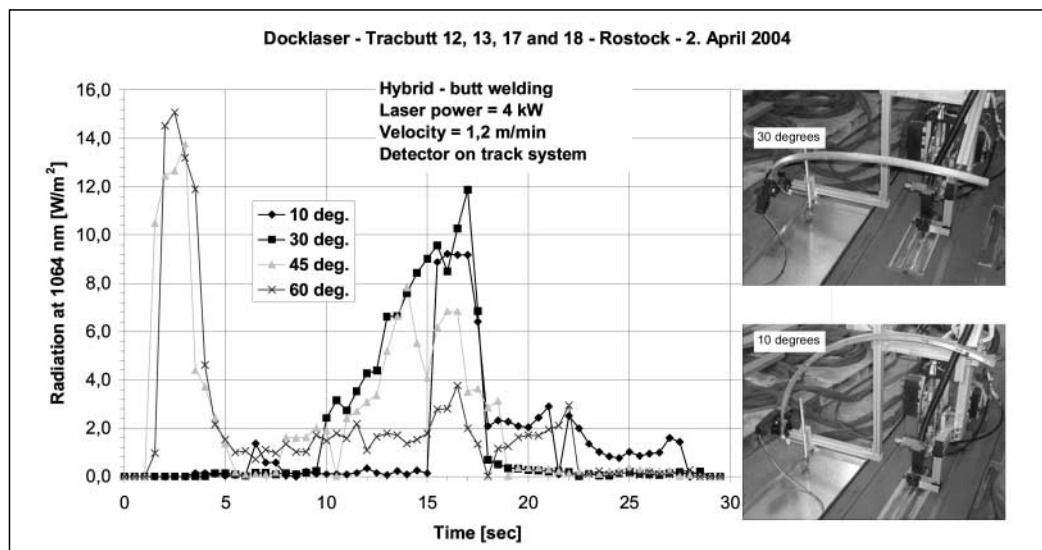
### Messungen bei normalem Prozessablauf

Die Ermittlung der Höhe der reflektierten Strahlung während des „normalen“ Prozessablaufes beim Hybridschweißen mit dem Traktor erfolgte während der Erprobung der Gerätetechnik an der SLV Mecklenburg-Vorpommern in Rostock. Als „normaler“ Prozessablauf wird hier ein Prozess definiert, in welchem die Laserstrahlung infolge des Tiefschweißeffektes zum größten Teil vom zu bearbeitenden Werkstoff (Schiffbaustahl) absorbiert wird.

Zum Einsatz kam bei den Messungen die durch FORCE Technology qualifizierte Messtechnik. Für das Schweißen mit dem Traktor stand ein lampengepumpter 4,5 kW Nd:YAG-Laser der Firma Trumpf zur Verfügung. Als Schweißstromquelle wurde eine Fronius – TPS 9.000 eingesetzt. Den im Projekt entwickelten Geräteprototypen eines Schweißtraktores zeigt Abb. 6.

Es wurden sowohl Messungen beim Schweißen von Stumpfstoßen als auch beim Schweißen von T-Stößen durchgeführt. Für die Messungen wurde ein mitfahrendes mechanisches Haltesystem für den Detektor des Spektrometers entwickelt. Dieses System gestattete es, verschiedene Winkel des Detektors in vertikaler Ausrichtung in einem konstanten Abstand von 800 mm zum Prozess einzustellen, siehe Abb. 6. Zusätzlich konnte der Detektor in der eingestellten vertikalen Winkellage um den Prozess orbital verfahren werden, und dies auch während der laufenden Messungen. Messwerte konnten somit nicht nur im „Vorüberfahren“, sondern auch „mitfahrend“ über einen längeren Zeitraum des Prozesses aufgezeichnet werden.

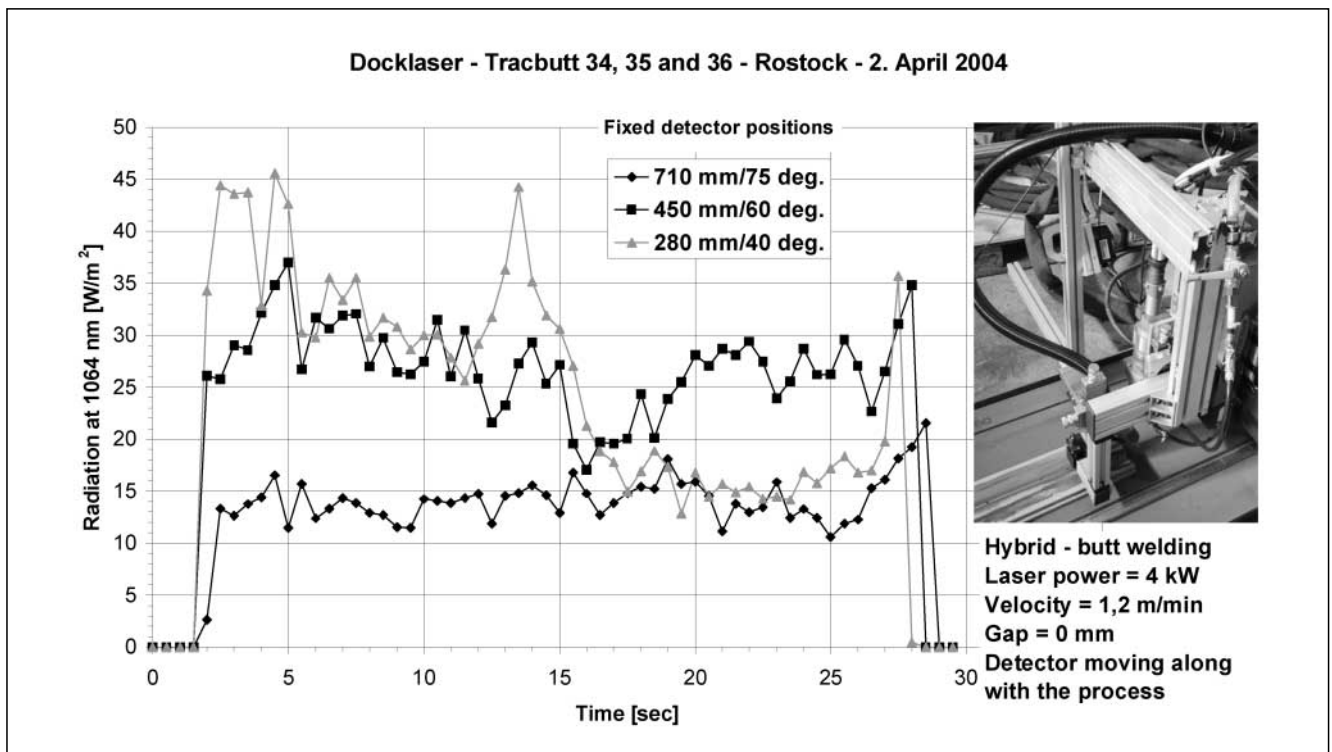
**Abb. 7: Reflektierte Strahlung beim Hybridschweißen von Stumpfnähten im Intervall 1062,78 bis 1065,51 nm (mitfahrender und um den Prozess orbital bewegter Detektor)**



**Abb. 6: Traktor mit mitfahrendem mechanischem Haltesystem für den ebenfalls beweglich angeordneten Detektor des Spektrometers**

Es wurden Messungen unter verschiedenen Randbedingungen durchgeführt. Abb. 7 zeigt die auftretende reflektierte Strahlung beim Schweißen eines Stumpfstoßes bei mitfahrendem Detektor in einem Abstand von 800 mm, während dieser zusätzlich orbital um den Prozessort bei verschiedenen konstant gehaltenen vertikalen Winkeln zum Prozess bewegt wird.

Die höheren Strahlungswerte am Anfang der Messungen bei den Winkellagen 45° und 60° erklären sich mit dem Start des Hybridschweißprozesses, bei welchem der Laser zuerst gezündet wird, dann der Lichtbogen zündet und dann der Traktor seine Fahrt beginnt. Trotz dieser Starterscheinung liegen die ermittelten Werte der reflektierten Strahlung am Prozessbeginn und während des Prozesses weit unter dem MZB-Wert für die Augen von 50 W/m².



**Abb. 8: Reflektierte Strahlung beim Hybridschweißen von Stumpfnähten im Intervall 1062,78 bis 1065,51 nm bei drei verschiedenen Detektorpositionen (Detektor mitfahrend bei konstanten Abständen und Winkeln)**

Abb. 8 zeigt die auftretende reflektierte Strahlung beim Schweißen von Stumpfstößen bei mitfahrendem Detektor für verschiedene konstant gehaltene Abstände und Winkellagen. Auch hier wird deutlich, dass die ermittelten Werte der reflektierten Strahlung während des Prozessablaufes unter dem MZB-Wert für die Augen liegen. Selbst bei einem Detektorabstand zum Prozess von 280 mm unter einem vertikalen Winkel von 40° bleibt die reflektierte Strahlung unterhalb des MZB-Wertes.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den Messungen während des normalen Prozessablaufes beim Hybridschweißen nur vereinzelt Strahlungswerte über dem MZB-Wert für die Augen ermittelt werden konnten, wenn der Abstand zum Prozess geringer als 500 mm war. Bei Abständen zwischen Detektor und Prozess von mehr als 500 mm waren die ermittelten Strahlungswerte stets geringer als der MZB-Wert für die Augen.

#### Messungen unter „worst-case“-Bedingungen

Die Ermittlung der Höhe der reflektierten Strahlung unter angenommenen „worst-case“-Bedingungen des Prozessablaufes beim Hybridschweißen mit dem Traktor erfolgte während der Erprobung der Gerätetechnik auf der

Meyer Werft in Papenburg. Es stand dieselbe Gerätetechnik wie bei den Messungen in Rostock zur Verfügung. Für den Anwendungsfall traktorgeführtes Hybridschweißen von T-Stößen, welcher durch das Schweißen in Position PB aus Sicht des Lichtbogens und das Schweißen in Position PC aus Sicht des Laserstrahles als kritischer Fall im Vergleich zur Stumpfnah einzuschätzen ist, wurden folgende „worst-case“-Bedingungen für die Messungen angenommen:

- Vollständiges Fehlen des auf das Gurtblech aufzusetzenden Stegblechs – Messung der auftretenden Strahlung entgegengesetzt der Einstrahlungsrichtung des Laserstrahles (hier wird insbesondere die am Gurtblech reflektierte Strahlung auf Grund fehlender Einkopplung ermittelt).
- Vorhandensein verschiedener Spaltweiten zwischen Gurt- und Stegblech – Messung der durch den Spalt durchtretenden Strahlung auf der dem Prozess abgewandten Seite des Stegblechs (Wurzelseite).
- Schweißen mit falschen Laserparametern (geringe Laserleistung) welche nicht zum Tiefschweißen führen – Messung der reflektierten Strahlung auf der Prozessseite des Stegblechs.

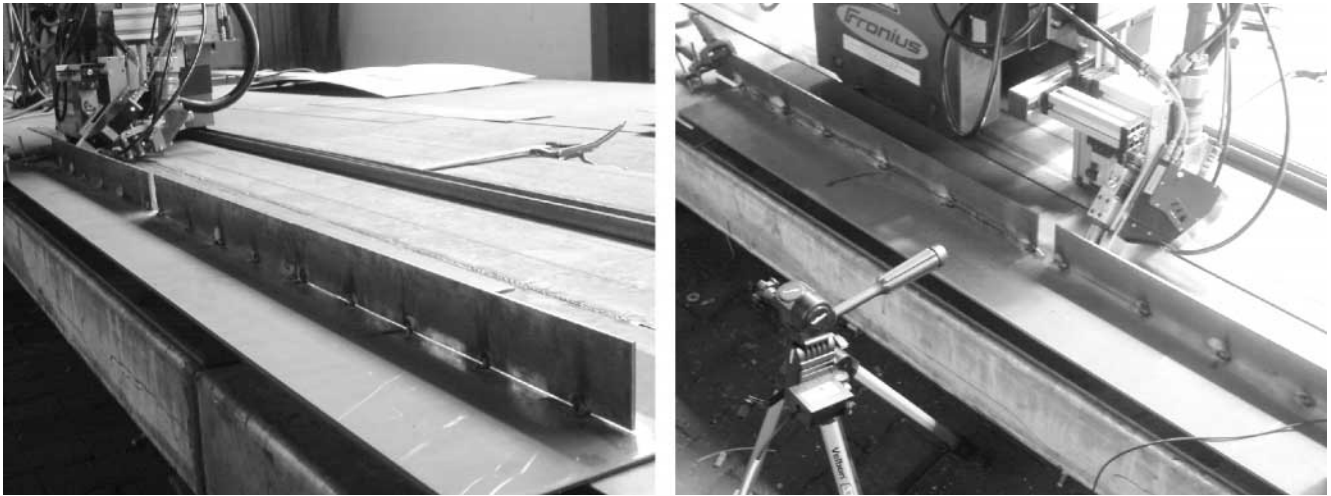


Abb. 9: Versuchsaufbau für Messungen unter „worst-case“-Bedingungen, hier bei verschiedenen Spaltweiten am T-Stoß

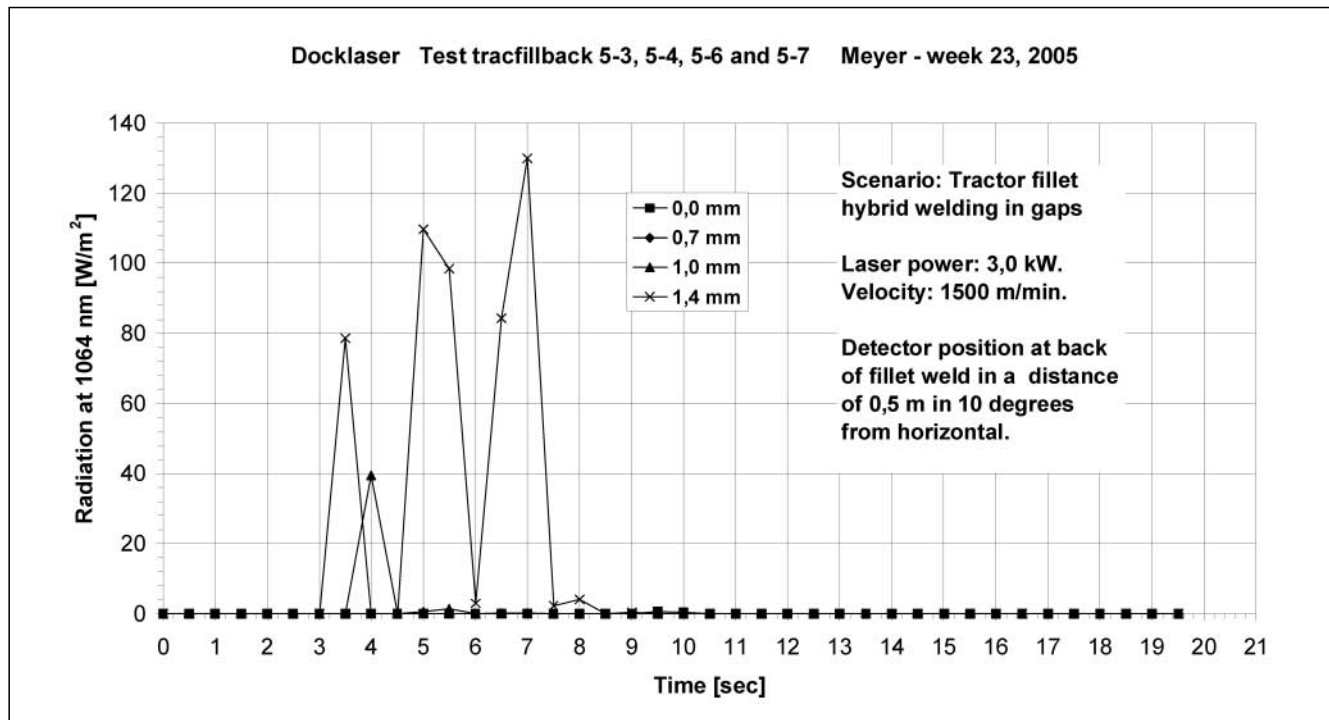


Abb. 10: Durchtretende Strahlung beim Hybridschweißen von T-Stößen mit unterschiedlichen Spaltweiten zwischen Gurt- und Stegblech, Detektor in einem Abstand von 500 mm und unter einem Winkel von 10° zur Horizontalen

Die Messungen wurden für diese Fälle mit einem feststehenden Detektor ausgeführt, wobei der Prozess am Detektor „vorbeifuhr“.

Abb. 9 zeigt den Versuchsaufbau für die Messungen bei verschiedenen Spaltweiten am T-Stoß.

Abb. 10 zeigt die Ergebnisse der entsprechenden Messungen. Bei den hier gewählten Parametern und bei Spaltweiten größer als 1,0 mm werden auf der Rückseite

des Stegbleches kritische Strahlungswerte gemessen, die erheblich über dem MZB-Wert für die Augen liegen.

Alle Messungen beim Hybridschweißen unter „worst-case“-Bedingungen wiesen ähnliche Ergebnisse auf. Es wurden Strahlungswerte über dem MZB-Wert für die Augen ermittelt. Bei der Risikoanalyse mit Gefährdungsbeurteilung war also insbesondere auf solche Fälle einzugehen und es waren Maßnahmen insbesondere zur Vermeidung solcher Risiken festzulegen.

### Risikoanalyse für die Traktoranwendung

Die Risikoanalyse wurde in Anlehnung an die sich im Entwurf befindliche Norm [4] zur Sicherheit beim Umgang mit handgeführten Lasersystemen erarbeitet. Außerdem flossen wesentliche Elemente der aus dem Qualitätswe-

sen bekannten FMEA (Fehler-, Möglichkeits- und Einfluss-Analyse) in diese Risikoanalyse ein.

Die Risikoanalyse für die Anwendungen im Dock-Laser-Projekt wurde in 13 Schritten vorgenommen. Diese Schritte werden im Folgenden beispielhaft dargestellt.

#### 1. Beschreibung des Arbeitsortes

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Beschreibung von Arbeitsort, Lage innerhalb der Werft und der Zugangsbedingungen für die am Arbeitsprozess beteiligten und nicht beteiligten Mitarbeiter und andere Personen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Paneelschweißstation in Halle 3</li> <li>– Zugang für relativ viele Mitarbeiter und andere Personen möglich</li> <li>– Schweißen von T-Stößen in PB/PC</li> <li>– Werkstückoberfläche geprimert und geschliffen möglich</li> <li>– Spaltbreiten von 0 ... 1,0 mm</li> </ul>

#### 2. Beschreibung der Arbeitsschritte

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Beschreibung der notwendigen Arbeitsschritte, der jeweiligen Arbeitssituation, dem notwendigen Prozess und den verwendeten Geräten	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Laserheftschiessen mit manuell positionierbarem Heftgerät oder mit dem Traktor selbst</li> <li>– Hybridschweißen der gehefteten T-Stöße</li> </ul>

#### 3. Definition möglicher Risikoszenarien

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Identifikation und Dokumentation möglicher Gefährdungen in den einzelnen Arbeitsschritten	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Arbeitsschritt Hybridschweißen in Position PB/PC: Schweißen mit falschen Laserparametern (geringe Leistung) führt zu reflektierter Strahlung oberhalb des MZB-Wertes für das menschliche Auge</li> </ul>

#### 4. Definition möglicher Gefährdungen/Schädigungen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Identifikation und Dokumentation möglicher Gefährdungen/Schädigungen infolge der Szenarien aus Punkt 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Schädigung von Auge und Haut durch reflektierte Strahlung mit zu hohen Strahlungswerten</li> </ul>

## 5. Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Gefährdungen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“												
Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Eintritts der Gefährdungen aus Punkt 4 anhand von 5 Faktoren; Festlegung Faktor W anhand folgender Tabelle:	– Gefährdung von Auge oder Haut wegen reflektierter Strahlung mit zu hohen Strahlungswerten auf Grund der Arbeit mit falschen Laserparametern: Die Abschätzung ergibt, dass diese Gefährdung unter bestimmten Bedingungen möglich ist, Festlegung Faktor <b>W = 3</b> .												
<table> <tr> <th>Wahrscheinlichkeit</th><th>Faktor</th></tr> <tr> <td>Praktisch unmöglich</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Vorstellbar, aber unüblich</td><td>2</td></tr> <tr> <td>Unter bestimmten Bedingungen möglich</td><td>3</td></tr> <tr> <td>Kann erwartet werden</td><td>4</td></tr> <tr> <td>Tritt ohne Zweifel ein</td><td>5</td></tr> </table>	Wahrscheinlichkeit	Faktor	Praktisch unmöglich	1	Vorstellbar, aber unüblich	2	Unter bestimmten Bedingungen möglich	3	Kann erwartet werden	4	Tritt ohne Zweifel ein	5	
Wahrscheinlichkeit	Faktor												
Praktisch unmöglich	1												
Vorstellbar, aber unüblich	2												
Unter bestimmten Bedingungen möglich	3												
Kann erwartet werden	4												
Tritt ohne Zweifel ein	5												

## 6. Mögliche maximale Expositionsdauer bei Eintritt der Gefährdung

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“										
Abschätzung der möglichen maximalen Expositionsdauer des Geschädigten bei Eintritt der Gefährdungen aus Punkt 4 anhand von 4 Faktoren; Festlegung Faktor E anhand folgender Tabelle:	– Maximal mögliche Expositionsdauer bei Eintritt des Einwirkens reflektierter Strahlung mit zu hohen Strahlungswerten auf Auge oder Haut auf Grund der Arbeit mit falschen Laserparametern: Die Abschätzung ergibt, dass eine Expositionsdauer von maximal 10 sec möglich ist (u. a. auch wegen der dauernd durchzuführenden Prozessüberwachung), Festlegung Faktor <b>E = 2</b> .										
<table> <tr> <th>Wahrscheinlichkeit</th><th>Faktor</th></tr> <tr> <td>0,25 sec</td><td>1</td></tr> <tr> <td>10 sec</td><td>2</td></tr> <tr> <td>100 sec</td><td>3</td></tr> <tr> <td>30.000 sec</td><td>4</td></tr> </table>	Wahrscheinlichkeit	Faktor	0,25 sec	1	10 sec	2	100 sec	3	30.000 sec	4	
Wahrscheinlichkeit	Faktor										
0,25 sec	1										
10 sec	2										
100 sec	3										
30.000 sec	4										

## 7. Mögliches Schadensausmaß bei Eintritt der Gefährdung

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“												
Abschätzung des möglichen Schadensausmaßes bei Eintritt der Gefährdungen aus Punkt 4 anhand von 5 Faktoren; Festlegung Faktor S anhand folgender Tabelle:	– Mögliches Schadensausmaß bei Eintritt des Einwirkens reflektierter Strahlung mit zu hohen Strahlungswerten auf Auge oder Haut auf Grund der Arbeit mit falschen Laserparametern: Die Abschätzung ergibt, dass ein bleibender schwerer Gesundheitsschaden (z. B. starke Beeinträchtigung der Sehkraft) möglich ist, Festlegung Faktor <b>S = 4</b> .												
<table> <tr> <th>Wahrscheinlichkeit</th><th>Faktor</th></tr> <tr> <td>Leichte heilbare Verletzung ohne Arbeitsausfall</td><td>1</td></tr> <tr> <td>Vollständig heilbare Verletzung mit Arbeitsausfall</td><td>2</td></tr> <tr> <td>Bleibender leichter Gesundheitsschaden</td><td>3</td></tr> <tr> <td>Bleibender schwerer Gesundheitsschaden</td><td>4</td></tr> <tr> <td>Tod</td><td>5</td></tr> </table>	Wahrscheinlichkeit	Faktor	Leichte heilbare Verletzung ohne Arbeitsausfall	1	Vollständig heilbare Verletzung mit Arbeitsausfall	2	Bleibender leichter Gesundheitsschaden	3	Bleibender schwerer Gesundheitsschaden	4	Tod	5	
Wahrscheinlichkeit	Faktor												
Leichte heilbare Verletzung ohne Arbeitsausfall	1												
Vollständig heilbare Verletzung mit Arbeitsausfall	2												
Bleibender leichter Gesundheitsschaden	3												
Bleibender schwerer Gesundheitsschaden	4												
Tod	5												



## 8. Gesamtrisiko ohne Berücksichtigung von Schutzmaßnahmen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Ermittlung des Gesamtrisikos GR bei Eintritt der Gefährdungen aus Punkt 4 ohne Berücksichtigung von Schutzmaßnahmen durch Multiplikation der Faktoren W, E und S	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <math>GR = W \times E \times S</math></li> <li>– <math>GR = 3 \times 2 \times 4</math></li> <li>– <b>GR = 24</b></li> </ul>

## 9. Schutzmaßnahmen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Festlegung und Beschreibung von <b>technischen</b> , <b>organisatorischen</b> und <b>persönlichen</b> Schutzmaßnahmen zur Verringerung des Gesamtrisikos	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <b>Technische Maßnahmen:</b> z. B. Schweißen nur mit hinterlegten und geprüften Parametersätzen und Detektion von zu hoher reflektierter Strahlung durch Sensoren verbunden mit Abschaltung des Prozesses</li> <li>– <b>Organisatorische Maßnahmen:</b> z. B. nur geschultes und mit Lasertechnik vertrautes Personal einsetzen oder Zugang zum Arbeitsbereich beschränken</li> <li>– <b>Persönliche Maßnahmen:</b> z. B. Tragen von geeigneten Schutzbrillen</li> </ul>

## 10. Wahrscheinlichkeit des Auftretens der Gefährdungen mit Schutzmaßnahmen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Erneute Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Eintritts der Gefährdungen aus Punkt 4 anhand von 5 Faktoren unter Berücksichtigung der festgelegten Schutzmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Die erneute Abschätzung ergibt, dass diese Gefährdung vorstellbar aber unüblich ist, Festlegung Faktor <b>W = 2</b>.</li> </ul>

## 11. Mögliche maximale Expositionsdauer bei Eintritt der Gefährdung mit Schutzmaßnahmen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Erneute Abschätzung der möglichen maximalen Expositionsdauer des Geschädigten bei Eintritt der Gefährdungen aus Punkt 4 anhand von 4 Faktoren unter Berücksichtigung von Schutzmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Die erneute Abschätzung ergibt, dass eine Expositionsdauer von maximal 0,25 sec möglich ist, Festlegung Faktor <b>E = 1</b>.</li> </ul>

## 12. Mögliches Schadensausmaß bei Eintritt der Gefährdung mit Schutzmaßnahmen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Erneute Abschätzung des möglichen Schadensausmaßes bei Eintritt der Gefährdungen aus Punkt 4 anhand von 5 Faktoren unter Berücksichtigung von Schutzmaßnahmen	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Die erneute Abschätzung ergibt, dass eine leichte heilbare Verletzung ohne Arbeitsausfall möglich ist, Festlegung Faktor <b>S = 1</b>.</li> </ul>



### 13. Gesamtreisrisiko unter Berücksichtigung von Schutzmaßnahmen

Allgemein	Beispiel „Traktor-Hybridschweißen“
Ermittlung des Gesamtreisrisikos GRR bei Eintritt der Gefährdungen aus Punkt 4 unter Berücksichtigung der in Punkt 9 festgelegten Schutzmaßnahmen durch Multiplikation der neu festgelegten Faktoren W, E und S	<ul style="list-style-type: none"> <li>– <math>GRR = W \times E \times S</math></li> <li>– <math>GRR = 2 \times 1 \times 1</math></li> <li>– <b><math>GRR = 2</math></b></li> </ul>

Ausgehend vom rechnerisch maximal möglichen Gesamtrisiko  $GR = 100$  bei Annahme eines möglichen Todes bzw. bei  $GR = 80$ , wenn man den Tod eines Geschädigten nicht für möglich erachtet, sind die durch Festsetzung von Faktoren und deren Multiplikation entstandenen Kennzahlen Gesamtrisiko und Gesamtreisrisiko für jede mögliche Gefährdung zu bewerten. Wird die Kennzahl Gesamtreisrisiko für zu hoch eingeschätzt ist zu prüfen, inwiefern durch weitere Schutzmaßnahmen diese Kennzahl weiter reduziert werden kann.

Bei der Bewertung von Gefährdungen mittels Faktoren und resultierenden Kennzahlen wird die Bedeutung organisatorischer Maßnahmen (hier: Einsatz geschulten Personals) und persönlicher Maßnahmen (hier: Benutzung Persönlicher Schutzausrüstung) für die Minimierung des Risikos deutlich.

Die beschriebenen 13 Schritte sind für jedes angenommene Risikoszenario und der daraus resultierenden Gefährdung bei jedem der im Projekt betrachteten Anwendungsfälle vorgenommen worden. Beim Hybridschweißen von T-Stößen wurden so z. B. 3 Risikoszenarien betrachtet.

#### Vorstellung des Projektes und Einweisung des Werftpersonals

Bereits in einem relativ frühen Projektstadium wurden die geplanten Arbeiten im Projekt den Verantwortlichen für Arbeitssicherheit auf den beiden Werften vorgestellt. Einbezogen wurden hier auch andere für die Arbeitssicherheit zuständigen Stellen, im Falle der Meyer Werft also die Metall-Berufsgenossenschaft und das Amt für Arbeitsschutz. Darüber hinaus wurde auch die in der Lasersicherheit in Deutschland federführende Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik – BGFE einbezogen.

Die Projektvorstellung beinhaltete neben der Darstellung der Projekthalte eine Vorstellung der Geräteprototypen während der Laborerprobung an der SLV M-V in Rostock und die vorgesehenen Maßnahmen zur Realisierung der Lasersicherheit während der Werfterprobung. Anhand der im Labor vorgeführten Geräte und der bereits realisierten Schutzmaßnahmen wurden gemeinsam weitere notwendige Maßnahmen mit Blick auf die Werfterprobung diskutiert. Die Maßnahmen wurden dann während der Werfterprobung berücksichtigt und flossen auch in die Risikoanalysen ein. Sowohl für die Meyer Werft in Papenburg als auch für die NAVANTIA Werft in Puerto Real konnte durch die gewählte Herangehensweise das Einverständnis für die Werfterprobung aller geplanten Anwendungsfälle erlangt werden.

Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Arbeit im Projekt sowohl aus Sicht der Lasersicherheit als auch aus Sicht der gesicherten Versuchsdurchführung war eine umfangreiche Einweisung der Kollegen der beiden Werften im Umgang mit den Geräteprototypen und Verfahren. Dabei musste unterschieden werden in die bereits mit CO<sub>2</sub>-Lasertechnik vertrauten Kollegen der Meyer Werft und die bislang noch nicht mit Lasertechnik konfrontierten Kollegen von der NAVANTIA Werft.

Die Mitarbeiter der Meyer Werft wurden durch eine gemeinsame zweiwöchige Versuchsdurchführung an der SLV M-V mit den Geräten und Prozessen sowie den Besonderheiten der eingesetzten Strahlquelle vertraut gemacht. Darüber hinaus wurden sie bei der Inbetriebnahme der Geräte vor Ort unterstützt.

Die Kollegen der NAVANTIA Werft in Puerto Real wurden über einen Zeitraum von vier Wochen durch die gemeinsame Inbetriebnahme der Geräte und die gemeinsame Versuchsdurchführung vor Ort in Puerto Real ein-

gewiesen und geschult. Dabei gestaltete sich die Verständigung wegen fehlender Kenntnis der englischen Sprache bei den Werkern zwar etwas schwierig, tat aber dem Erfolg dieser intensiven Einweisung letztendlich keinen Abbruch.

## Zusammenfassung

Auf beiden Werften konnten die in den Laborversuchen erreichten Ergebnisse reproduziert und auf größere Bearbeitungslängen übertragen werden. Gerade auch von den spanischen Kollegen wurde das Projekt auf Grund der Durchführung praktischer Forschungsarbeiten vor Ort und der Einbeziehung der Werker als Erfolg gewertet.

Auch aus Sicht der Lasersicherheit kann gesagt werden, dass sich die ergriffenen Maßnahmen bewährt haben. Unfälle oder kritische Situationen im Umgang mit der genutzten Technik traten nicht auf. Aus der praktischen Arbeit resultierende Erfahrungen wurden bei der Überarbeitung der Risikoanalysen berücksichtigt.

Risikoanalyse und Schutzmaßnahmen wurden auch beim Einsatz des 10 kW Faserlasers zum Ende des Projektes angewandt. Strahlungsmessungen bei der Arbeit mit dem 10 kW-Faserlaser wurden im Rahmen des Projektes nicht vorgenommen. Allerdings hat die SLV M-V in Zusammenarbeit mit FORCE Technology im Rahmen eines Industrieauftrages ähnliche Messungen beim Laserschweißen und beim Laser-MSG-Hybridschweißen mit dem 10 kW-Faserlaser durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Messungen fanden Eingang in ein Sicherheitskonzept und eine Risikoanalyse für eine stationäre Anwendung des Hybridschweißens mit einem Faserlaser auf einer europäischen Werft.

## Literatur

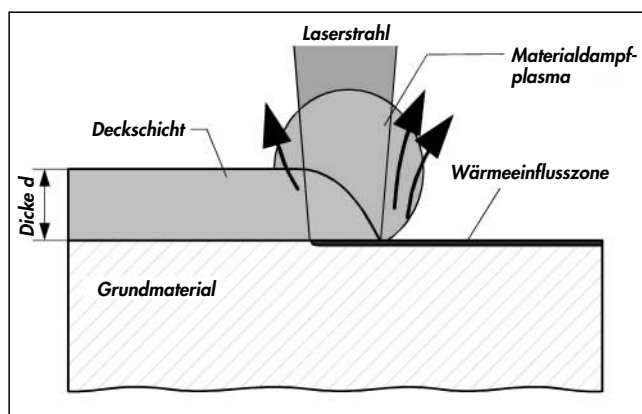
- [1] EN 60825-4: Safety of laser products – Part 4: Laser guards
- [2] EN 60825-1: Safety of laser products – Part 1: Equipment classification, requirements and user's guide
- [3] EN ISO 11553-1: Safety of machinery – Laser processing machines – Part 1: General safety requirements
- [4] prEN ISO 11553-2: Safety of machinery – Laser processing machines – Part 2: Safety requirements for hand-held laser processing devices
- [5] IEC/TR 60825-5: Safety of laser products – Part 5: Manufacturer's checklist for IEC 60825-1
- [6] EN 207: Personal Eye protection – Filters and eye-protectors against laser radiation
- [7] Schulmeister: Lasersicherheit in der industriellen Praxis – Klassifizierung neu diskutiert; in Photonik 3/2004
- [8] Schulmeister, Henderson: Laser Safety; Institute of Physics Publishing Ltd, London, 2004
- [9] Rasmussen: Guidelines for safe operation in the Dock-Laser project; internal document of the consortium Dock-Laser; Copenhagen, 2005

**Winfried Barkhausen**, Herzogenrath

Die Reinigung von Bauteil-Oberflächen durch Laserstrahlung ist vielfach eine schonende und ökonomische Alternative zu konventionellen Reinigungsmethoden. Der Umgang mit Laserstrahlung erfordert – insbesondere im „handgeführten“ Betrieb – angemessene Sicherheitsvorkehrungen.

Durch den Einsatz der Laserstrahltechnik zur Bauteilreinigung lassen sich sowohl ökologische wie auch ökonomische Vorteile gegenüber konventionellen Reinigungsmethoden erzielen. Mit der vergleichsweise jungen Technik ist bei Verzicht auf jegliche Strahlmittel und Chemikalien die rückstandsfreie Reinigung von nahezu jeglichen Bauteilen möglich. Dabei lässt sich durch die gezielte Wahl der Laserstrahlparameter ein äußerst schonender Abtrag der Schmutz- und Deckschichten erzielen, ohne das Grundmaterial zu beschädigen. Hierdurch eröffnen sich in der Laserstrahl-Reinigungstechnik vielfältige Anwendungsgebiete in unterschiedlichen Industriebereichen, wie z. B. bei der Werkzeugreinigung, der partiellen Entlackung, der Klebevorbehandlung oder der schonenden Restaurierung von Fassaden.

Für den Abtragprozess wirkt der fokussierte Laserstrahl sehr kurzzeitig und räumlich begrenzt auf die Oberfläche ein. Der einzelnen Laserpulse erreichen hierbei Pulsleistungen von bis zu 300.000 Watt, die in einem sehr kurzen Zeitraum von einige Nano-Sekunden ( $nS$  = eine Milliardstel Sekunde) die Deckschicht unter Umwandlung der Lichtenergie in thermische Energie (siehe Abb. 1) verdampfen.



**Abb. 1: Funktionsprinzip der Laserstrahl-Entschichtung**

Der Schichtabtrag durch Laserstrahlung wird immer dann erzielt, wenn eine materialspezifische Strahlungsintensität überschritten wird. Beim Reinigen metallischer Bauteile stoppt – nach dem vollständigen Abtrag der Deckschicht – der Abtragprozess automatisch beim Auftreffen der Strahlung auf das blanke Metall. Die Laserstrahlung wird dann fast vollständig reflektiert.

Der Abtrag der Deckschichten erfolgt beim Laserstrahl-Reinigungsverfahren allein durch gebündeltes, kurzzeitig einwirkendes Licht. Um einen flächigen Abtrag von Deckschichten zu realisieren, muss – wie in Abb. 2 dargestellt – eine Vielzahl von Laserpulsen gleichmäßig auf der Oberfläche verteilt werden.



**Abb. 2: Entschichtung durch fokussierte, linienförmig abgelenkte Laserstrahlung**

Dies geschieht z. B. durch ein schnelles linienförmiges Ablenken der Laserstrahlung mit einem elektronisch angesteuerten optischen Scannersystem. Durch manuelle Bewegung der Bearbeitungsoptik – senkrecht zu dieser variabel einstellbare „Abtraglinie“ – wird die Oberfläche flächig bearbeitet.

Als mögliche Laserstrahlquellen für die Reinigung von Bauteilen und Werkzeugen kommen sowohl gepulste Gasentladungslaser (z. B. CO<sub>2</sub>-Laser, Excimer-Laser) als auch Festkörperlaser (z. B. Nd:YAG-Laser) zum Einsatz. Der Vorteil von Nd:YAG-Lasern für eine handgeführte Laserstrahl-Reinigung besteht in der Möglichkeit, die Strahlung sehr flexibel über ein Kabel (Lichtleitfaser) zu übertragen. Durch die Flexibilität der Strahlführung kann in einem Umkreis von bis zu 50 m auf einfache Weise eine manuelle Entschichtung realisiert werden.

Prinzipiell gibt es bei den kommerziell erhältlichen Festkörper-Laserstrahl-Reinigungsgeräten zwei verschiedene Gerätekonzepte:

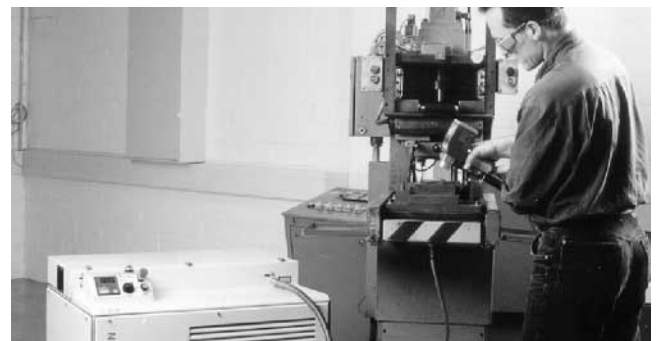
- blitzlampengepumpte Nd:YAG-Laser, die mit relativ großem Fokusbereich (Strahlfleck  $d > 2 \text{ mm}$ ), hoher Einzelpulsenergie ( $> 500 \text{ mJ}$ ) sowie bei niedrigen Pulsfrequenzen (Pulswiederholrate) ( $f_p < 100 \text{ Hz}$ ) arbeiten.
- kontinuierlich gepumpte, gütegeschaltete Puls laser, die mit kleinem Pulsdurchmesser ( $d < 1 \text{ mm}$ ), geringer Einzelpulsenergie ( $< 20 \text{ mJ}$ ) sowie sehr hohen maximalen Pulsfrequenzen ( $f_p > 30 \text{ kHz}$ ) arbeiten.

Diese Systeme unterscheiden sich in ihren Laserstrahl-Parametern (siehe Tabelle 1):

Die z. Z. leistungstärksten handgeführten Laserstrahl-Reinigungslaser verfügen über eine mittlere Laserleistung von 500 Watt. Typische Anwendungen für diese leistungsstarken Systeme sind:

- Entschichtung von Stahlbauwerken (z. B. Hochspannungsmasten, Brücken etc.) als Korrosionsschutzvorbereitung
- Reinigen großer Werkzeuge und Formen
- Entlackung großer Flächen in der Schiffs- und Flugzeugindustrie

Die Anwendungsbereiche für handgeführte Laserstrahl-Reinigungssysteme reichen damit von schonender Formenreinigung (siehe Abb. 3), über die substanzerhalten-



**Abb. 3: Manuelle Werkzeugreinigung im laufenden Produktionsprozess mit mobilem CL80Q-Reinigungslaser**

Laserstrahlparameter	typischer Bereich	Auswirkung Prozess/Lasersicherheit
mittlere Laserstrahlleistung	5 Watt–500 Watt	Mit steigender Leistung nimmt die Abtraggeschwindigkeit zu/Die Sicherheitsabstände NOHD werden mit steigender Leistung größer
Puls-Spitzenintensität	$10^6$ – $10^{10} \text{ W/cm}^2$	Für das Verdampfen der Deckschicht ist eine Mindestintensität erforderlich/Die Gefährdung des Einzelpulses nimmt zu
Strahlfleck (Fokusbereich)	0,1–5 mm	Effizienz des Abtrags hängt vom jeweiligen Material ab/Kleine Strahldurchmesser durch Fokussierung, große durch Kollimierung
Laser-Pulsdauer	5–500 ns	Lange Pulse führen zu einer höheren thermischen Beanspruchung/Gefährdungspotential nimmt mit kürzeren Pulsen zu
Laser-Pulsenergie	0,005–2 Joule	Hohe Pulsenergie führt zur Schädigung des Grundmaterials/Die Gefährdung des Einzelpulses nimmt zu

**Tabelle 1: Laserstrahlparameter von Nd:YAG-Lasern**



de Restaurierung von Kulturgütern (siehe Abb. 4) und historischen Fassaden (siehe Abb. 5) bist hin zur ökologi-

schen Entschichtung von Flugzeugen (siehe Abb. 6) und Stahlbauteilen (siehe Abb. 7).



**Abb. 4: Manuelle Laserstrahlreinigung ägyptischer Grabstätten mit CL20Q (batteriebetrieben)**



**Abb. 5: Manuelle Reinigung Sandsteinfassade Chicago mit CL120Q (Bearbeitungsoptik: OS H50L)**



**Abb. 6: Manuelle Tank-Innenreinigung Boing B52 mit CL500Q (Bearbeitungsoptik: OS H70L)**



**Abb. 7: Manuelle Reinigung Strommast mit CL500Q (Bearbeitungsoptik: OS H70L)**

Bei allen gezeigten Anwendungen wird die Bearbeitungsoptik mit dem linienförmig austretenden Laserstrahl vom Bediener manuell geführt. Die größte Gefährdung besteht hierbei für das Auge. Sowohl der Bediener selbst, wie auch alle weiteren Personen, die sich innerhalb des Laserbereiches befinden, tragen daher einen persönlichen Augenschutz.

Während bei stationären Anwendungen i. A. mit fest installierten Laserstrahl-Abschirmungen gearbeitet wird, kommen bei der manuellen Bearbeitung mobile Laserstrahl-Trennwände zum Einsatz (siehe Abb. 8). Bei Anwendungen im Freien kann durch geeignete Absperrung und Kennzeichnung der Laserbereich abgegrenzt werden.



**Abb. 8: Laserschutzeinrichtung bestehend aus mobilen Trennwänden und Laserbereich-Kennzeichnung**

Hier gilt gemäß Unfallverhütungsvorschrift BGV B2 §7:

(1) Verläuft der Laserstrahl von Lasereinrichtungen der Klassen 2 oder 3 A im Arbeits- oder Verkehrsbereich, hat der Unternehmer dafür zu sorgen, dass der Laserbereich deutlich erkennbar und dauerhaft gekennzeichnet ist.

(2) Der Unternehmer hat dafür zu sorgen, dass Laserbereiche von Lasereinrichtungen der Klassen 3 B oder 4 während des Betriebes abgegrenzt und gekennzeichnet sind. Er hat außerdem dafür zu sorgen, dass in geschlossenen Räumen der Betrieb von Lasereinrichtungen der Klasse 4 an den Zugängen mit Warnleuchten angezeigt wird.

(3) Von den Absätzen 1 und 2 darf beim Einsatz von Laserstrahlung über größere Entfernungen im Freien abgewichen werden, wenn durch andere organisatorische Maßnahmen sichergestellt wird, dass Personen keiner Laserstrahlung oberhalb der maximal zulässigen Bestrahlung ausgesetzt sind.

Der Sicherheitsabstand (NOHD) berechnet sich bei den gepulsten Laserstrahl-Reinigungsgeräten wie folgt:

Mittelwert-Kriterium:  $MZB_{MW} \text{ Auge} = 90 \times t^{0,75} \text{ J/m}^2$

Einzelpuls-Kriterium:  $MZB_{EP} \text{ Auge} = 0,05 \text{ J/m}^2$

Bei CW-gepumpten, gütegeschalteten Nd:YAG Lasern ergeben sich folgende Sicherheitsabstände:

Max. mittlere Leistung	Max. Einzelpuls-Energie	Brennweite Optik	Ungescannter Strahl			Gescannter Strahl (5-fach)
			Zeitbasis: 1 s	Zeitbasis: 10 s	Zeitbasis: 100 s	Zeitbasis: 10 s
$P_{\text{mitt}}$ (W)	Q (mJ)	f (mm)	NOHD (m)	NOHD (m)	NOHD (m)	NOHD (m)
20	1	120	11,4	8,5	6,4	3,8
80	6	100	18,9	14,2	10,6	6,3
120	10	100	23,2	17,4	13,0	7,8
150	12	100	25,9	19,4	14,6	8,7
300	18	160	58,6	44,0	33,0	19,7
500	25	160	75,7	56,8	42,6	25,4

**Tabelle 2: Sicherheitsabstände NOHD bei fasergekoppelten, cw-gepumpten, gütegeschalteten Nd:YAG-Lasern**



Eine hohe Gefährdung geht neben potentiellen Schädigungen des Auges durch die Laserstrahlung auch von der – mit zunehmender Laserleistung ansteigenden – Emission abgetragenen Materials aus. Bei der handgeführten Reinigung mit Laserstrahlung ist daher – insbesondere beim Abtrag gesundheitsbedenklicher Schichten – auf eine wirkungsvolle Absaugung zu achten. Speziell für die Laserstrahl-Reinigung konzipierte Bearbeitungsoptiken wie z. B. die OS H70L (siehe Abb. 9, 10) haben daher eine Absaugung direkt integriert. Berufsgenossenschaftliche Messungen der maximalen Arbeitsplatz-Konzentration MAK zeigen für ausgewählte Anwendungen die Wirksamkeit dieser Absaugungen.



**Abb. 9: Laserschutzbrille (PSA) und integrierte Absaugung im Einsatz**



**Abb. 10: Sicherheitstechnik bei OS H70L: integrierte Absaugung, „Doppelklick-Sicherheitsauslösung“**

Eine „vollkommene“ Sicherheitstechnik ist bei handgeführten Laserstrahl-Reinigungssystemen nur schwer zu realisieren. Nachfolgende technische Einrichtungen sind bei den Bearbeitungssystemen von Clean-Lasersysteme GmbH integriert bzw. optional verfügbar:

- Elektronische Relais-Halteschaltung für Strahl-Freigabe (OS H50L)
- Elektronische „Doppel-Klick“-Betätigung für Strahl-Freigabe (OS H70L)
- Entfernungssensor/Bauteilerkennung zu Strahlabschaltung bei fehlendem Bauteil
- Überwachung der Absaugung/Strahl-Unterbrechung im Fehlerfall
- Externe Interlockanschlüsse/kombinierbar mit Bewegungssensor (Bereichsüberwachung) oder Türkontakt

.....

# PHYSIKALISCHE GRENZEN DER OPTISCHEN BELASTUNG VON LASERSCHUTZEINHAUSUNGEN – LASERSICHERHEIT DURCH WÄRMELEITUNG .....

Joachim Franek, PIBF; Erwin Heberer, GELA

## Einleitung

In [1] werden neben den besonderen Eigenschaften der Ultrakurzpuls laser die physikalischen Grundlagen der Sicherheitsfunktion von Laserschutzwänden bei Hochleistungslasern diskutiert. Anhand eines Beispiels wird gezeigt, dass Wärmestrahlung der dominierende Kühleffekt einer Laserschutzwand ist. Um dies zu bestätigen sind Versuche mit einem Faserlaser mit 4 kW und dicken Schutzwänden durchgeführt worden. Durch eine besondere Versuchsanordnung kann der Einfluss der Wärmestrahlung eliminiert und die Schutzwirkung von Wärmeleitung untersucht werden. Die Materialeigenschaften von Aluminium und Stahl werden in Bezug auf die Schutzwirkung der Wärmeleitung diskutiert.

## Verwendete Materialeigenschaften

Eigenschaften	Dimension	Aluminium	Stahl
Wärmeleitfähigkeit	W/mK	158	61
Wärmekapazität	J/(cm³*K)	0,00243	0,00363
Schmelztemperatur	°C	660	1490

**Tabelle 1: Materialeigenschaften**

Weitgehend bekannt ist die „gute“ spezifische Wärmeleitfähigkeit von Aluminium, die mit dem niedrigen elektrischen Widerstand zusammenhängt. Für den Fall, dass bei der Bestrahlung mit Laserleistung die belastete Oberfläche ihre Schmelztemperatur erreicht und die Wärme eindimensional durch das Material transportiert wird (somit erhält man eine zeitunabhängige Temperaturverteilung), ergibt sich der resultierende Wärmefluss aus der Differenztemperatur multipliziert mit der Wärmeleitfähigkeit. In Tabelle 2 werden die Eigenschaften verglichen. Bei einem Verhältnis der spezifischen Wärmeleitungen der beiden Materialien von 2,6 ist das Verhältnis des eindimensionalen Wärmeflusses nur noch 1,13. Im Fall einer instationären Temperaturverteilung ist jedoch nicht die Wärmeleitfähigkeit die entscheidende Materialkonstante sondern die Wärmediffusivität. Die niedrigere relative Wärmekapazität (= Wärmespeicherung) (pro Volu-

men) des Aluminiums führt zu einem weiteren Transportweg der durch die Laserbestrahlung eingebrachten Wärme, womit sich der technische Vorteil des Aluminiums aus der spezifischen Wärmeleitung in einen Nachteil verwandelt. Deshalb sind die Versuche mit Stahl durchgeführt worden.

	rel. Leifähigkeit	rel. Wärmefluss	rel. Kapazität
Aluminium	1	1	0,67
Stahl	0,39	0,89	1

**Tabelle 2: Vergleich der Materialeigenschaften**

## Theorie der Wärmestrahlung

Wärmestrahlung kann durch das Stefan-Boltzmann-Gesetz der Schwarzkörperstrahlung beschrieben werden:

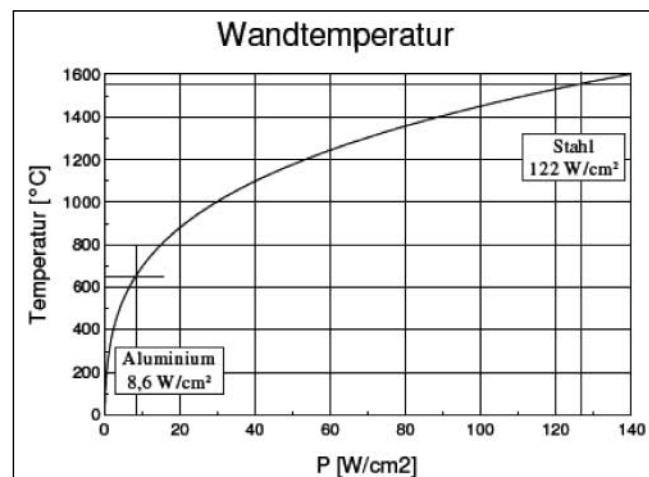
$$M_s = \sigma T^4$$

$$M_s: \text{spez. Ausstrahlung} \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$\sigma: \text{Stefan-Boltzmann-Konstante } 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{W}{m^2 K^4}$$

$$T: \text{Temperatur des Strahlers} [K]$$

In Bezug auf die Metalle Aluminium und Stahl ergibt sich aufgrund der stark unterschiedlichen Schmelztemperaturen eine abgestrahlte Wärmeleistung von 8,6 W/cm² für Aluminium und 122 W/cm² für Stahl.



**Abb. 1: Wärmestrahlung**

## Theorie der Wärmeleitung

Im Fall der stationären Verteilung der Temperatur ergibt die Theorie folgende Gleichung:

$$\vec{f} = -K \text{grad} v$$

Hier tritt als einzige Materialeigenschaft nur die Wärmeleitfähigkeit  $K$  auf.

Die Kontinuitätsgleichung der Wärmeleitung für den allgemeinen Fall lautet:

$$\rho c \frac{\partial v}{\partial t} + \left( \frac{\partial f_x}{\partial x} + \frac{\partial f_y}{\partial y} + \frac{\partial f_z}{\partial z} \right) = 0$$

Im Falle eines homogenen, isotropen Körpers, dessen Wärmeleitfähigkeit unabhängig von der Temperatur ist, ergibt sich:

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} - \frac{1}{\kappa} \frac{\partial v}{\partial t} = 0$$

$$\kappa = \frac{K}{\rho c}$$

Die einzige Materialeigenschaft für diesen (instationären) Fall ist die Diffusivität  $\kappa$ . Hier geht noch die spezifische Dichte  $\rho$  und die Wärmekapazität  $c$  ein.

Um die physikalischen Effekte dieser Differenzialgleichung anschaulich darzustellen, wird im Folgenden der eindimensionale Fall nach einem zeitlich kurzen Laserpuls betrachtet. Lösung:

$$T(x,t) = \frac{Q}{\rho c \sqrt{4\pi \kappa t}} e^{-\left(\frac{x^2}{4\kappa t}\right)}$$

Wobei  $Q$  die Wärmemenge durch einen Laserpuls – mit gaußscher Intensitätsverteilung – darstellt ( $x$ : Ortskoordinate,  $t$ : Zeit,  $T$ : Temperatur). Der Exponent zeigt eine gaußsche Verteilung der Temperatur nach dem Laserpuls an. Der

Vorfaktor eine mit  $\frac{1}{\sqrt{t}}$  abfallende Zeitabhängigkeit für  $t > 0$ .

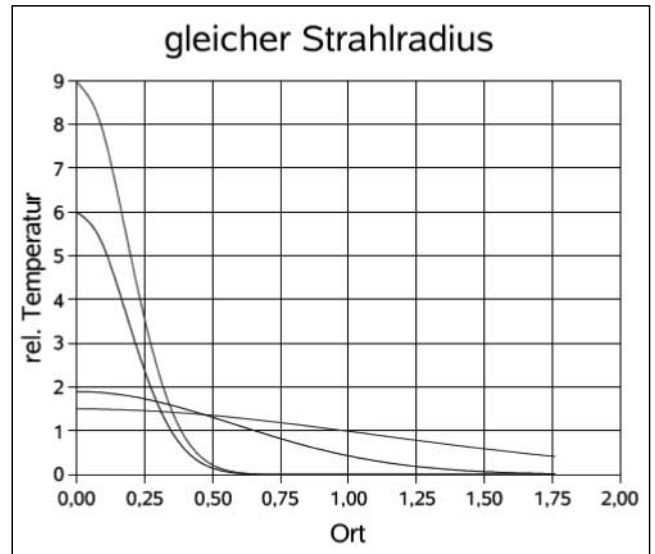


Abb. 2: gleicher Strahlradius

Abb. 2 zeigt die örtliche Temperaturverteilung für Aluminium (rot) und Stahl (blau) für zwei verschiedene Zeiten. Für den Fall mit gleichem Strahlradius auf Aluminium und Stahl ergibt sich für das initiale Temperaturverhältnis am Ort  $x = 0$  ein Faktor von 1,5, der das Verhältnis der Wärmekapazitäten widerspiegelt. In diesem Fall bewirkt die hohe Diffusivität des Aluminiums ein schnelleres Abfallen der Temperatur am Ort  $x = 0$  (siehe Abb. 3).

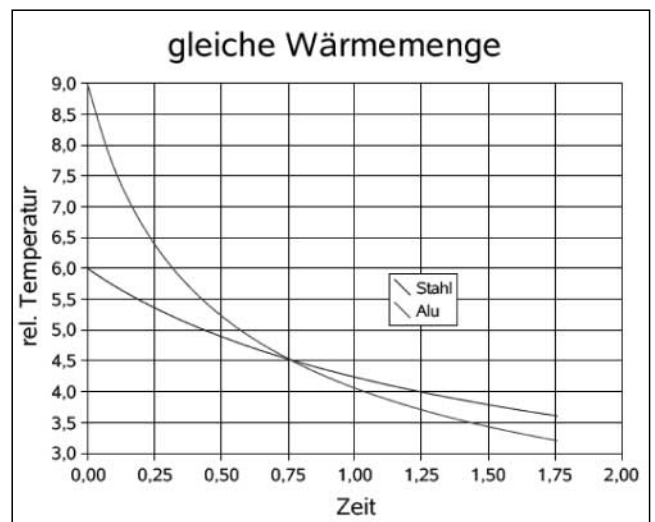
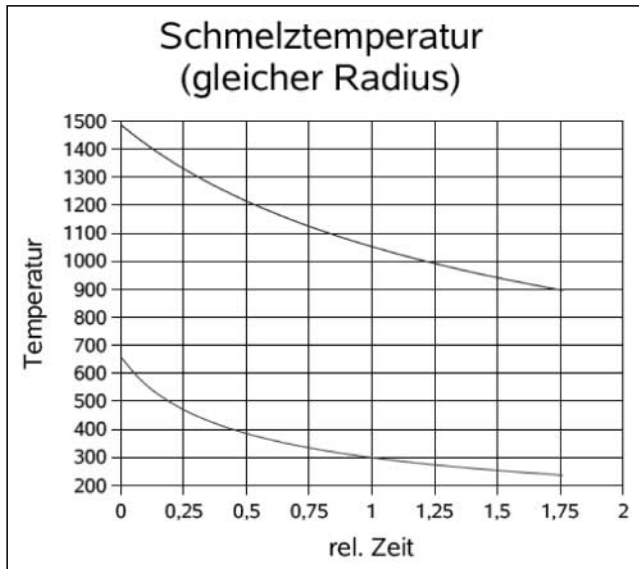


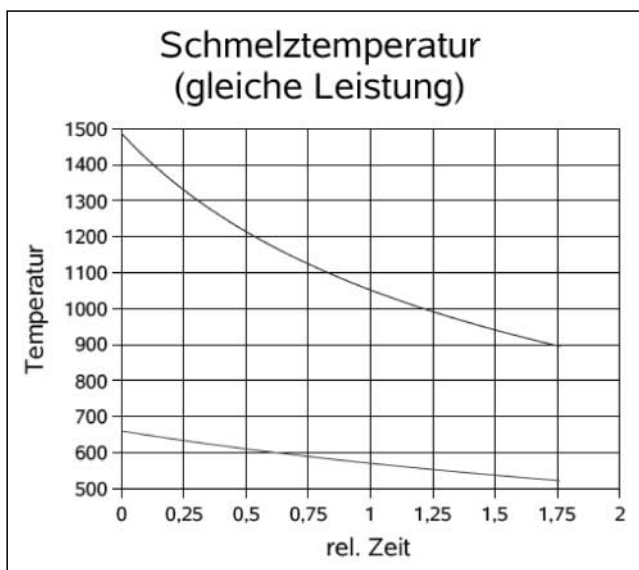
Abb. 3: Temperaturabfall im Zentrum

Da die Schmelztemperatur von Stahl höher liegt, stellt sich die Frage nach der relativen Laserleistung, die bei gleicher Pulsdauer im Zentrum des Strahles die Schmelztemperatur der beiden Materialien erreicht.



**Abb. 4: Zeitverlauf der Temperatur im Zentrum**

Abb. 4 zeigt den Temperaturabfall nach dem Laserpuls im Zentrum bei einem Laserleistungsverhältnis von 3,36. Dieses Verhältnis ergibt sich aus dem Produkt der relativen Wärmekapazitäten und der relativen Schmelztemperaturen. Für den Fall gleicher Leistungen muss der Strahlradius im Fall von Stahl verringert werden, um die Schmelztemperatur im Zentrum zu erreichen.

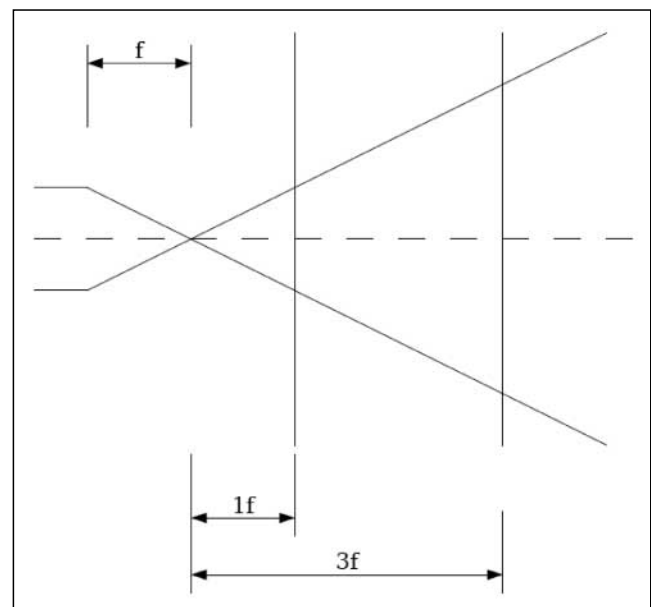


**Abb. 5: Zeitverlauf der Temperatur im Zentrum**

Abb. 5 zeigt den zeitlichen Verlauf nach einem Laserpuls. Der Abfall der Temperatur am Ort  $x = 0$  ist bei Stahl zurzeit  $t = 0$  6,37fach höher.

## Versuchsanordnung

Um den Einfluss der Wärmeleitung alleine (ohne den Effekt der Wärmestrahlung) zu ermitteln, wurde der Versuchsaufbau von Abb. 6 und Abb. 7 verwendet. Es wird fokussierte Laserstrahlung (Fokuslänge der Linse  $f = 200$  mm) verwendet. Hinter dem (geometrisch-optischen) Fokuspunkt wird im Abstand  $f_1$  die zu untersuchende Materialprobe positioniert. Im Abstand  $f_2$  wird ein Stahlblech desselben Materials bestrahlt, wobei der Abstand  $f_2$  so gewählt ist, dass die Schmelztemperatur gerade nicht erreicht wird.



**Abb. 6: Schema der Versuchsanordnung**



**Abb. 7: Foto des Versuchsaufbaus**

## Versuchsergebnisse

Abb. 8 zeigt das im Experiment benutzte Blech mit nicht angeschmolzener Oberfläche.



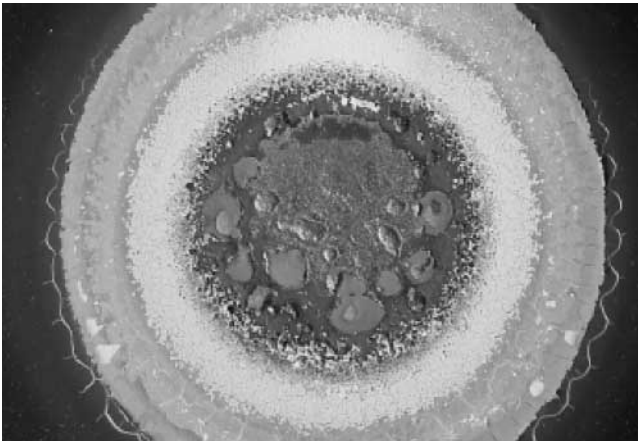


Abb. 8: Stahlblech (nicht angeschmolzen)

Für die Versuche im Abstand  $f_1$  sind zwei Materialproben verwendet worden: Stahlblech 9 mm und 20 mm dick. Die von diesen Proben abgestrahlte Leistung lässt sich aus dem Verhältnis der Abstände  $f_1$  und  $f_2$  berechnen. Im durchgeführten Experiment betrug das Verhältnis  $f_2/f_1 = 3$  und somit die durch die Wärmestrahlung abgeführte Wärmeleistung 11 % der gesamten Laserleistung. 89 % der Laserleistung sind so im Abstand  $f_1$  durch Wärmeleitung abgeführt worden. Die Schmelzenthalpie des herausgelaufenen Materials wird vernachlässigt.

Bei einer Blechdicke von 9 mm (siehe Abb. 9 und 10) trat nach 90 Sekunden Laserleistung durch das sich bildende Loch hindurch. Es entstand ein trichterförmiges Loch mit einem Durchmesser von 23 mm an der bestrahlten Seite.

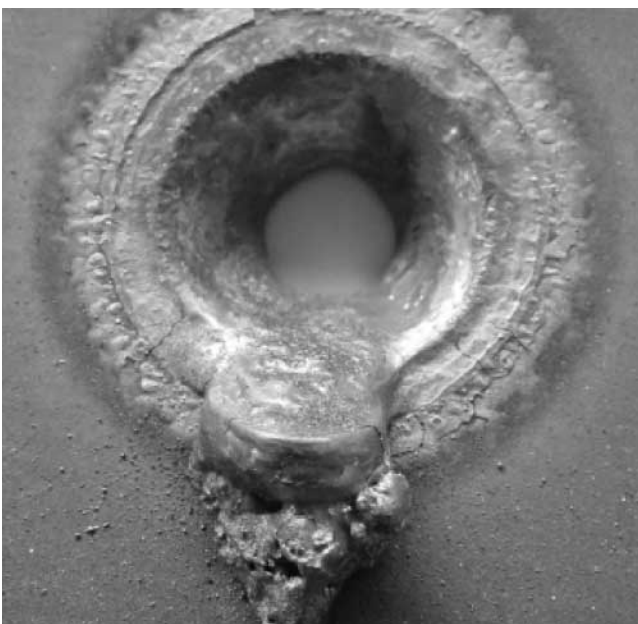


Abb. 9: Stahlblech, 9 mm dick

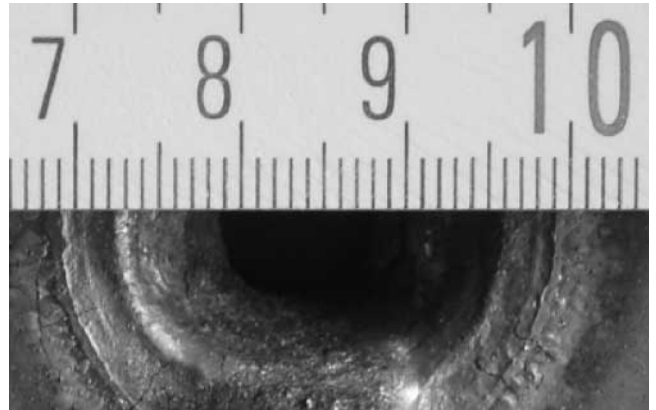


Abb. 10: Stahlblech, 9 mm dick,  $D = 23$  mm

Bei einem Blech mit einer Dicke von 20 mm trat das Versagen der Schutzwirkung nach 6 Minuten ein (siehe Abbildung 11 und 12). Der Lochdurchmesser beträgt 24 mm.



Abb. 11: Stahlblech, 20 mm dick



Abb. 12: Stahlblech, 20 mm dick,  $D = 24$  mm



## Zusammenfassung

Durch die besondere Versuchsanordnung konnte der Einfluss der Wärmeleitung auf Schutzwände (ohne den Einfluss der Wärmestrahlung) untersucht werden. In Bezug auf Hochleistungslaser mit einigen kW Ausgangsleistung ergeben sich Materialdicken bei Stahl von größer 10 mm.

Der Materialvergleich zwischen Aluminium und Stahl in Blechform ergibt aufgrund der bekannten Materialeigenschaften für den zeitlich instationären Fall, dass die bessere Wärmeleitfähigkeit von Aluminium durch die geringere Wärmekapazität und die geringere Schmelztemperatur überkompensiert wird.

Bei gleichem Strahlradius kann die Leistung in einem Puls mehr als 3fach höher sein, um die Schmelztemperatur zu erreichen. Den größeren Wärmefluss zeigt die etwa 6fache höhere Temperaturabnahme im Zentrum bei gleicher Laserleistung an.

## Literaturliste

- 1: Joachim Franek, Erwin Heberer, Anforderungen an Schutzkabinen bei UKP Lasern im Vergleich mit herkömmlichen Lasern, NIR2004

.....

## LASERSCHUTZ AM PRAKTISCHEN BEISPIEL: LASERSYSTEM „JENOPTIK VOTAN“ .....

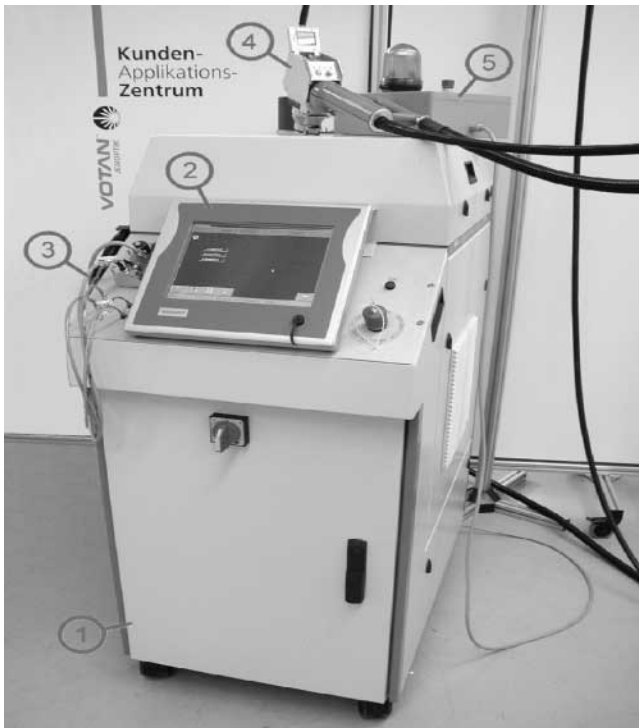
**Michael Nittner** JENOPTIK, 07739 Jena

Industrielle Laseranwendungen sind bis dato an ortsfeste Bearbeitungsstationen bzw. Roboter mit begrenzten Reichweiten gebunden. Vor diesem Hintergrund hat die JENOPTIK Automatisierungstechnik ein einhandgeführtes, mobiles Lasersystem zum Laserschweißen und Laserlöten von Blechen entwickelt. Mit diesem System zielt man insbesondere auf die Anwender in der Automobilindustrie und fokussiert hier auf die Einsatzgebiete der Nachbearbeitung im Karosseriebau und des Laserschweißens im Reparatursektor.

### Laserschutz am praktischen Beispiel

- Aufbau des mobilen Laserhandschweißgerätes
- Lasersicherheit
- Laserhandschweißkopf für Hochleistungsdiodenlaser
- Applikationen m
- Laserhandschweißkopf für Nd:YAG-Laser
- Zusatzdrahtzuführung





- 1 Laserquelle; Laserkühler; Lasersteuer- und Überwachungseinheit; Prozesssteuerung
- 2 Bedienfeld (Touch panel)
- 3 Medien- und Steueranschlüsse
- 4 Handbearbeitungskopf
- 5 Warnlampe und Notaus-Modul



- verschiedene Führungsmodule
- optionale Drahtzuführung

#### Technische Daten:

- Abmessungen 350 x 130 x 200 mm (L x B x H)
- Gewicht ca. 2,5 kg
- Arbeitsabstand 70 mm
- koaxiale Schutzgaszufuhr
- 2,5" Display zur Prozessbeobachtung
- Geschwindigkeitssensor



- geeignet für das Laserlöten und Wärmeleitungsschweißen bis zu Blechstärken von 1,3 mm

#### Technische Daten:

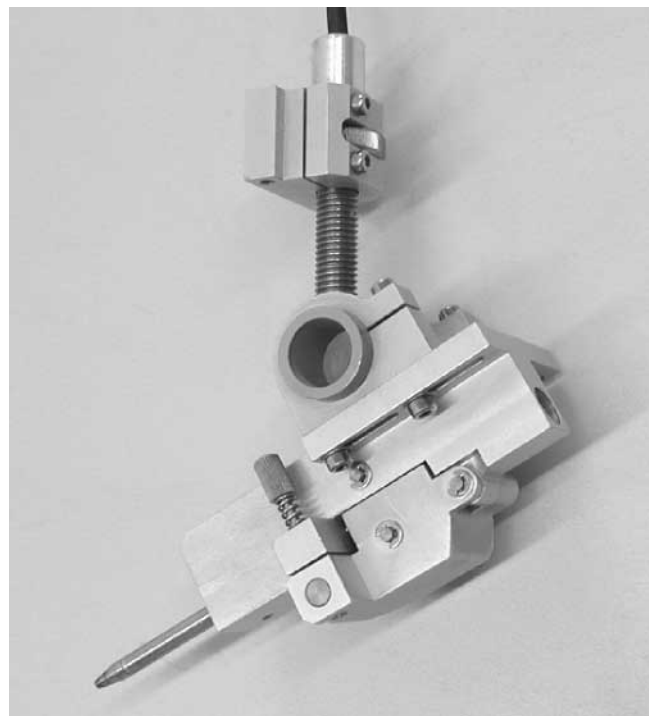
- Schnittstelle zu fasergekoppelten Nd:YAG-Lasern (Fa. Trumpf)
- für Laserleistung 1,6/2,0 kW
- Fokussdurchmesser 2,0/0,6 mm
- Arbeitsabstand 70 mm

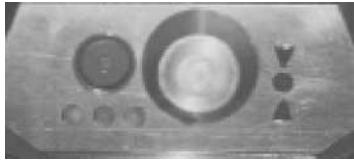
## Schnittstellen



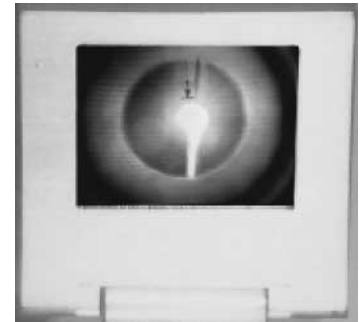
### Technische Daten:

- Antrieb durch Schrittmotor (Strombetrieb 250 mA)
- Geschwindigkeitsgeregelter Drahtvorschub bis 20 mm/s
- Drahtdurchmesser je nach verwendeten Transportrollen und Positionierdüsen 0,3–1,2 mm (Standard 0,8–1 mm)
- an einem „push-pull“-Drahtförderer adaptierbar





Status- und Parameteranzeige



Prozessbeobachtung,  
Prozesskontrolle

#### Status- und Parameteranzeige:

- LED betriebsbereit
- LED Programm-Start
- LED Laser emittiert
- LED Geschwindigkeitsfenster

#### Prozessmonitoring:

- TFT-Display
- online-Überwachung
- onscreen-Einblendung

#### ● Räder:

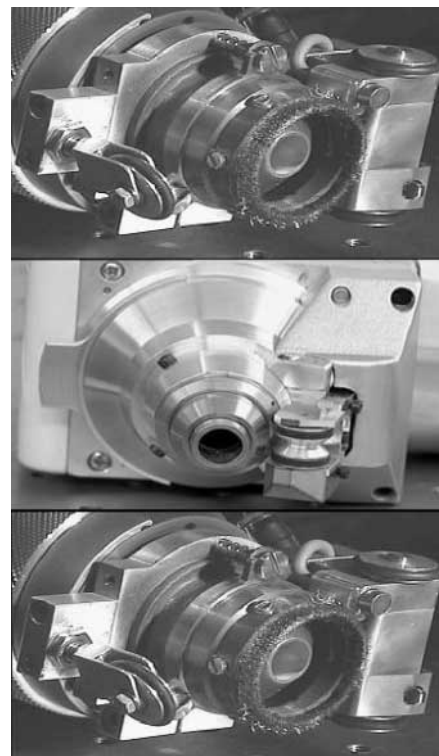
- konstanter Arbeitsabstand
- Geschwindigkeitsaufnahme

#### ● Federnder Bürstenring oder Düseneinsatz:

- Schutz vor Streustrahlung und
- Schutzgasumhüllung

#### ● Sicherheitssensoren:

- Induktiver Sensor (Metall)
- Mechanischer Taster





### Schweißdüse:

- koaxiale Schutzgasströmung
- Schnittstelle für Sensorik
- Aufnahmemöglichkeiten für weitere Aufsatzmodule



### Adaption der Führungsmodule:



Prozessbeobachtung  
Nahtanfang und Nahtende,  
Schmelzbaderhalten,  
Status- und Fehleranzeige

Feste Vorgabe und Über-  
wachung von Programmablauf-  
schritten durch MC,  
Interne Temperaturüberwachung  
Zustimmtaster



Mechanischer Schutz  
Beweglicher Bürstenring,  
Massive Hausung des  
gesamten Bearbeitungskopfes

Elektr. Schutz  
Metallerkennung durch  
induktiven Geber,  
Detektoren beim Aufsetzen  
auf das Werkstück durch  
mech. Taster integriert in den  
NOT-AUS-Kreis

## Laserhandschweißgerät – Sicherheitskreise am Bearbeitungskopf

Besonderer Schutz von Bedienern und unbeteiligten Personen bei handgeführten Laserbearbeitungssystemen (Sicherheitsmaßnahmen nach Risikostrategie 3)

### Maßnahmen:

- Notaus-Schaltgerät Kategorie 4
- Überwacher Start
- Überwachte Schütze
- Faserbruchüberwachung
- Zwei unabhängige Sicherheitskreise zur Überwachung des Aufsetzens auf Metalloberfläche
- Massives Gehäuse mit Videoüberwachung
- Streustrahlschutz



- **Automobilindustrie**
  - Bau von Prototypen
  - Reparaturen während der Produktion
- **Luft- und Raumfahrt**
  - Reparatur von Düsenbauteilen
- **Edelstahl tanks und Apparatekonstruktionen**
  - Bau von Edelstahltanks für Lebensmitteltransporte
  - Schweißanwendungen bei Schienenfahrzeugen
  - Speicherbehälter in der Nahrungsmittelindustrie
  - Behälter für die Pharmazeutische Industrie

Anwendungen sind:

- Verschweißen von Rissen und/oder Einsetzen von Flickern an der Rissstelle mit einem handgeführten Laserschweißkopf
- Ausbessern von Brandstellen (Vertiefungen) durch Auftragsschweißen mit einem handgeführten System
- Aufschweißungen u. a. an Turbinenbauteilen
- Verzugsarmes Schweißen an Strukturbauteilen
- Schweißen an großen Bauteilen

Effizientere Laserschweißverfahren an aufwendigen und teureren Bauteilen haben das Potential zu großen Kosteneinsparungen. Aus den Möglichkeiten des Laserhandschweißens ergeben sich Ansätze für weitere laserbasierte Schweißtechnologien an Titanlegierungsbauteilen wie z. B. Triebwerkbauteilen.

Bei der Reparatur von Schadstoffen in Bauteilwandungen kann die Lasertechnologie gegenüber dem WIG-Schweißen den Aufwand bei der Bauteilvorbereitung und Nacharbeit deutlich reduzieren.

**Dipl.-Ing. Malte Gomolka**, BGFE, Prüf- und Zertifizierungsstelle

## Einleitung

Bei Hand-Lasergeräten HLG (von Hand geführt, gehalten oder betätigt) zur Materialbearbeitung wird der Laserstrahl in der Bedieneinheit „geformt“ und tritt aus dieser aus. In der Regel ist das HLG über eine Strahl-Zuführungseinheit (z. B. Lichtleitfaser) mit einer externen Laserstrahlquelle verbunden.

Als Strahlquellen können diodengepumpte Festkörperlaser (Nd:YAG), diodengepumpte Faserlaser (Ytterbium) oder auch fasergekoppelte Hochleistungsdiodenlaser mit bis zu 3 kW Laserleistung zum Einsatz kommen.

Die Materialbearbeitung kann das Laserreinigen, Laserschweißen (-fügen), Laserhärten, Laserlöten oder Lasertrennen umfassen.

Hand-Lasergeräte ersetzen nicht automatisierte Laseranlagen für stationäre Anwendungen im Sinne von EN ISO 11553-1 „Laserbearbeitungsmaschinen“. Vielmehr ist die Anwendung dort zu sehen, wo konventionelle Bearbeitungsverfahren sich schwierig gestalten oder versagen und

- hohe Qualität
- geringe Wärmeeinbringung
- hohe Mobilität und Flexibilität und
- Verzicht auf aufwändiges Teachen

gefordert sind.

Die genannten Vorteile bedingen gleichzeitig ein erhöhtes Gefährdungspotenzial für Auge und Haut der Bedienperson als auch unbeteiligter Personen. Die Maschinenrichtlinie fordert in Anhang I Abs. 1.5.12, dass Lasereinrichtungen an Maschinen so abgeschirmt sein müssen, dass weder durch die Nutzstrahlung noch durch Sekundärstrahlung Gesundheitsgefahren verursacht werden. Diese primäre Gefährdung durch Laserstrahlung muss durch technische, organisatorische oder persönliche Schutzmaßnahmen ausgeschlossen werden.

Dieser Beitrag gibt in Kurzform fachpraktische Hinweise zu Konstruktion und Entwicklung, Herstellung, Beschaffung und Erwerb und Benutzung und Betrieb.

## Anforderungen an den Hersteller: prEN ISO 11553-2: 2006

Wesentliche Abschnitte dieses Normentwurfs in Bezug auf die Gefährdungen durch Laserstrahlung sind (inkl. einer kurzen Erläuterung):

### 5.2 Risikobeurteilung

Siehe DIN EN 1050 „Leitsätze zur Risikobeurteilung oder z. B. Download ([www.vti-bochum.de/ms/reudenbach\\_auswahl.htm](http://www.vti-bochum.de/ms/reudenbach_auswahl.htm)).

### 5.3.2 Schutz vor Gefährdungen durch Laserstrahlung während Betrieb und Wartungsarbeiten

Während des Betriebs dürfen Personen keiner Laserstrahlung über der MZB ausgesetzt sein. Die Bestrahlung von nicht autorisierten Personen muss durch technische oder Verwaltungsvorschriften verhindert werden; für autorisierte Personen im Laserbereich (oder auch Raumzone oder Laser-Überwachungsbereich) sind persönliche Schutzausrüstungen erforderlich.

In der Bearbeitungszone, also unmittelbar im Bereich Laserstrahl-Werkstück, muss die Exponierung von Personen mit Laserstrahlung größer der MZB ( $T = 30.000 \text{ s}$ ) durch einen lokalen Schutz (z. B. Verkleidung) und/oder durch PSA-Bereitstellung verhindert sein.

### 5.4.3 Freigabe der Betätigungseinrichtung

Das HLG muss (bei externer Laserstrahlquelle) eine Betätigungseinrichtung besitzen, die den unautorisierten Betrieb verhindert (z. B. Schlüsselschalter).

### 5.4.7 Not-Aus-Steuerung und Schutz vor unerwartetem Anlauf

Die Not-Aus-Steuerung muss EN 60204-1 und EN 418 entsprechen und die Laserstrahlquelle deaktivieren und den Laserstrahlfänger aktivieren. Weiterhin muss bei NOT-AUS die Stromversorgung der Stellteile des HLG abgeschaltet werden.

Unerwarteter Anlauf muss gemäß EN 1037 verhindert sein durch z. B. eine zuverlässige und abschließbare Energie-Trenneinrichtung.

#### 5.4.8.1 *Kontrolleinrichtungen und Schaltungen; Allgemeines*

Kontrolleinrichtungen und Schaltungen müssen EN 60204-1 entsprechen, für sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen muss die Kategorie nach EN 954-1 ermittelt werden.

#### 5.4.8.2 *Start-/Stopp-Steuerungen*

Die Laser-Stopp-Steuerung muss die Laserstrahlerzeugung deaktivieren durch Abschalten der Strahlquelle oder Isolieren des Laserstrahls.

#### 5.4.8.4.2 *Strahlführungssysteme*

Vom Strahlführungssystem (z. B. Lichtleitfaser) darf keine Laserstrahlung emittiert werden z. B. bei Faserbruch und nicht gesteckter Faser.

#### 5.4.8.5 *Verriegelungen und Steuerung von trennenden Schutzeinrichtungen*

Eine Schnittstelle muss vorhanden und beschrieben sein zum Anschluss z. B. externer Sicherheitsverriegelungen. Das Betätigen dieser Sicherheitsverriegelung muss den Laserstrahl isolieren bzw. die Strahlquelle abschalten. Das Außerkraftsetzen von Sicherheitsverriegelungen darf nur über einen verriegelbaren Betriebsartenwahlschalter erfolgen. Der Laserstrahl muss automatisch isoliert werden und der Automatikbetrieb verhindert sein. Diese Betriebsart muss deutlich signalisiert werden und der Strahlfänger muss geöffnet werden können.

#### 5.4.9 *Strahlisolierung*

Die ZU-Stellung des Laserstrahlfängers muss störungssicher erreicht werden können unter Berücksichtigung von EN 954-1.

#### 5.4.9.1 *Schutz gegen Gefährdungen, die durch Mate- rialien und Substanzen erzeugt werden*

Der Hersteller muss sicherstellen, dass schädliche Gase und Feststoffteilchen aus dem Arbeitsbereich entfernt und entsorgt werden. Geeignete technische Einrichtungen müssen mitgeliefert werden.

Sehen die Lieferbedingungen vor, dass der Endnutzer Absaug- und Filtereinrichtung beistellt, muss der Hersteller Informationen zu geeigneten technischen Maßnahmen liefern und ggf. zu persönlichen Schutzausrüstungen. Eine Stoffdatenbank (z. B. [www.hvbg.de/bgia/gestis-stoffdatenbank](http://www.hvbg.de/bgia/gestis-stoffdatenbank)) kann Unterstützung geben.

#### 6.1 *Periodische Prüfungen*

Der Hersteller muss Angaben machen zu periodischen Prüfungen nach einer bestimmten Gebrauchsdauer (Art und Umfang, Zyklen etc.).

#### 6.3 *Laserklassen-Zuordnung*

Der Hersteller muss das Gesamtgerät (HLG inkl. Strahlführungssystem und Strahlquelle) einer Laserklasse zuordnen. Die Betriebszustände Normalbetrieb, Instandhaltung/Wartung und Versagen/Fehler müssen berücksichtigt sein.

#### 7.1, 7.1.1 *Benutzerinformationen*

Der Hersteller muss detaillierte und produktbezogene Informationen liefern über den üblichen Gebrauch, über absehbar falschen Gebrauch, über korrekte Instandhaltungs- und Wartungsverfahren und über die Maßnahmen, die zu ergreifen sind, wenn Fehler auftreten.

Eine periphere Einhausung zur Eingrenzung des Laserbereichs muss auf Grundlage der Risikobeurteilung bestimmt werden. Parameter wie Wellenlänge, Strahlabmessungen am Laserausgang, Strahldivergenz und Lage der Strahltaile, maximale vernünftigerweise vorhersehbare Bestrahlungsdauer, kleinster vernünftigerweise vorhersehbarer Bestrahlungsabstand (direkte Emission oder reflektierter Strahl) und vernünftigerweise vorhersehbare Abstrahlrichtungen sind zu berücksichtigen.

Es sind detaillierte Angaben zu machen, sofern der Endnutzer die Einhausung oder andere Teile anbringt:

- Wand-, Tür- und Deckenauslegung (Bemaßung, Material, Oberfläche etc.)
- Sichtfenster (Typ, Schutzstufe etc.)
- Zuluft- und Abluftöffnungen
- Restspalte unterhalb und oberhalb der Einhausung (z. B. im Türbereich)
- Berücksichtigung von Gebäudefenstern und -türen, Deckenkran, angrenzenden Gebäude- und Installationseinrichtungen
- Not-Aus-Schalter (Art, Anbringungsort, Schnittstelle etc.)
- Türverriegelungsschalter (Art, Anbringungsort, Schnittstelle etc.)
- Absaug- und Filtereinrichtung
- Beschilderung
- Emissions-Warneinrichtung (innerhalb und außerhalb der Einhausung)

Kann aufgrund der Anwendung (z. B. bei Schneidanwendungen großer und immobiler Teile) keine Einhausung vorgesehen werden, so muss der Hersteller Angaben zum vernünftigerweise vorhersehbaren Laserbereich/Sicherheitsabstand NOHD machen.

Innerhalb dieses Bereichs müssen Personen inkl. des Bedienpersonals persönliche Schutzausrüstungen tragen. Diese ist in Abhängigkeit von der Risikobeurteilung eindeutig zu spezifizieren, z. B.

- Art und Schutzstufe der Laserschutzbrille
- Art und Typ weiterer Schutzkleidung wie Handschuhe, Gesichtsschutzschirm, Bekleidung etc.

Pauschalaussagen wie „geeignete oder angemessene technische Schutzmaßnahmen oder persönliche Schutzausrüstung“ sind zu unbestimmt. Hier besteht eine eindeutige Informationspflicht des HLG-Herstellers.

Bei prEN 11553-2 handelt es sich um eine Produktnorm/Typ C-Norm. Es kann davon ausgegangen werden, dass diese im Sinne der Maschinenverordnung harmonisiert wird (analog zu EN ISO 11553-1).

Hand-Lasergeräte im Sinne dieser Norm müssen mit EG-Konformitätserklärung und CE-Kennzeichnung versehen sein. Die Erklärung bezieht sich in der Regel nur auf das Produkt in dem Zustand, wie es in Verkehr gebracht wird. Das kann in der Praxis bedeuten, dass der Hersteller einerseits eine vollständige Maschine liefert bzw. in Verkehr bringt. Andererseits kann aber in Absprache und möglichst vertraglicher Festlegung mit dem Kunden/Endnutzer vereinbart werden, dass der Endnutzer nachträglich Teile anbringt oder Eingriffe vornimmt (Lasten-/Pflichtenheft).

Hierbei kann es sich im Fall von Hand-Lasergeräten auch um sicherheitsverriegelte periphere Einhausungen (kontrollierter Laserbereich, Zugang nur für autorisierte Personen mit einschlägiger Sicherheitsausbildung) handeln. Eindeutig ist dann der Hersteller gefordert, folgende Mindestangaben zu machen:

- Detaillierte Anleitung für die vom Benutzer zu treffenden Schutzmaßnahmen einschließlich bereitzustellender Schutzausrüstungen (siehe auch obige Auflistung)

In der EG-Konformitätserklärung des Herstellers muss in diesem Fall unbedingt darauf hingewiesen werden, dass die Lasereinrichtung erst allen grundlegenden Sicherheits-

und Gesundheitsschutzanforderungen entspricht, wenn die im Dokument Nr. ... (Betriebs-, Montage-, sonstige Anleitung oder Lasten-/Pflichtenheft) genannten erforderlichen Teile angebracht und/oder Eingriffe vorgenommen wurden.

### Anforderungen an den Betreiber: Betriebssicherheitsverordnung BetrSichV

Arbeitsmittel wurden bisher auf Grundlage nationaler Vorschriften (Unfallverhütungsvorschrift BGV A1) geprüft. Dieser Abschnitt befasst sich mit der weiterhin notwendigen Prüfung, nunmehr jedoch unter Berücksichtigung europäischer Vorgaben (95/63/EG „Prüfungen“), die mit ihrer nationalen Umsetzung in der Betriebssicherheitsverordnung zum 03.10.2002 gelten.

Mit der Erstellung von Technischen Regeln zur BetrSichV (TRBS) soll ein an der Praxis orientiertes neues Regelwerk einschließlich erforderlicher Prüfbestimmungen aufgestellt werden, das sich am Stand der Technik orientiert. Es verfolgt das Ziel, dass der Arbeitgeber bei Anwendung und Einhaltung der für ihn zutreffenden Technischen Regeln davon ausgehen kann, die Verordnung eingehalten zu haben (Vermutungswirkung). Die Vermutungswirkung ist mit der Veröffentlichung der Technischen Regeln im Bundesarbeitsblatt gegeben.

Anmerkung: Die Erstellung der TRBS 1201 „Prüfungen von Arbeitsmitteln und überwachungsbedürftigen Anlagen“ wurde auf der ABS-Sitzung (Ausschuss für Betriebssicherheit) im April 2006 beschlossen. Festlegung und Ermittlung von Prüfungen, Aussagen zur Festlegung des Sollzustands, zu der mit der Prüfung beauftragten Person, zu Prüfmethode und -umfang und zur Prüffrist sollen den Kern bilden.

Die BetrSichV fordert in § 3 (Gefährdungsbeurteilung) Absatz 3 (Prüfungen): „Für Arbeitsmittel sind insbesondere Art, Umfang und Fristen erforderlicher Prüfungen zu ermitteln. Ferner hat der Arbeitgeber die notwendigen Voraussetzungen zu ermitteln und festzulegen, welche die Personen erfüllen müssen, die von ihm mit der Prüfung oder Erprobung von Arbeitsmitteln zu beauftragen sind“.



§ 10 „Prüfung der Arbeitsmittel“ fordert:

- Nach Montage und vor der ersten Inbetriebnahme durch eine befähigte Person mit dem Zweck, sich von der ordnungsgemäßen Montage und der sicheren Funktion dieser Arbeitsmittel zu überzeugen.
- Wiederkehrende Prüfungen entsprechend den in § 3 (3) ermittelten Fristen durch eine befähigte Person mit dem Zweck, Schäden rechtzeitig zu entdecken und zu beheben und die Sicherheit zu gewährleisten.
- Außerordentliche Überprüfung durch eine befähigte Person nach außergewöhnlichen Ereignissen (Unfälle, längere Nichtbenutzung oder Naturereignisse); Zweck: Schäden rechtzeitig zu entdecken und zu beheben und die Sicherheit zu gewährleisten.
- Prüfung nach Instandsetzungsarbeiten durch eine befähigte Person auf den sicheren Betrieb des Arbeitsmittels.

Eine befähigte Person ist nach BetrSichV § 2 (7) eine Person, die durch ihre Berufsausbildung, ihre Berufserfahrung und ihre zeitnahe berufliche Tätigkeit über die erforderlichen Fachkenntnisse zur Prüfung der Arbeitsmittel verfügt.

Da TRBS 1201 zur Konkretisierung von Art, Umfang und Fristen von Prüfungen noch nicht existent ist, tut der Unternehmer gut daran, weiterhin das einschlägige bgl. Vorschriften- und Regelwerk (allgemein anerkannte Regel der Technik) als Orientierungshilfe anzuwenden.

Anmerkung: Was früher richtig war, muss heute nicht falsch sein. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Verpflichtung des Arbeitgebers zur Durchführung einer Gefährdungsbeurteilung nach BetrSichV § 3 zu anderen oder umfassenderen Maßnahmen führen kann.

Bei HLG bedeutet dies in der Praxis, dass der Arbeitgeber/Endnutzer vor der ersten Inbetriebnahme und/oder nach einem Standortwechsel berücksichtigen bzw. feststellen muss, ob noch Teile nachträglich anzubringen oder Eingriffe nachträglich vorgenommen werden müssen.

Über Art und Umfang dieser Aktivitäten muss – wie in Abschnitte 2 erwähnt – der Hersteller bei den Verkaufs- und Vertragsverhandlungen (Lasten-/Pflichtenheft) und in der Betriebs- oder Montageanleitung aufgeklärt haben:

- lokale oder periphere Schutzmaßnahmen
- Einhausung (ggf. sicherheitsverriegelt)
- Sicherheitsabstand NOHD
- Absaug- und Filtereinrichtung
- persönliche Schutzausrüstungen
- Kennzeichnung und Warnhinweise
- Schnittstellen

Dieses ist umso mehr von Bedeutung, wenn der Hersteller in seiner Konformitätsbewertung und -erklärung erklärt hat, dass erst mit diesen – vom Endnutzer zu treffenden Maßnahmen – alle einschlägigen Bestimmungen der Maschinenrichtlinie inkl. harmonisierter Produktnormen erfüllt werden.

BGV A3 „Elektrische Anlagen und Betriebsmittel“ und DIN VDE 0702 „Wiederholungsprüfungen an elektrischen Geräte“ geben Hinweise zu Prüfumfang und -fristen.

Bei der Sichtprüfung auf äußerlich erkennbare Mängel (vor der ersten Inbetriebnahme nach der Montage und nach jeder Montage an einem anderen Einsatzort und in regelmäßigen Abständen) und der Funktionsprüfung muss die befähigte Person z. B. auf Folgendes achten:

- Eignung für den Einsatzort
- Schäden am Gehäuse und an lokalen oder peripheren Schutzeinrichtungen (z. B. Bürstenkranz)
- äußere Mängel der Anschluss- und Verbindungsleitungen und der Medienschläuche (technische Gase, Kühlwasser etc.)
- äußere Mängel des Strahlführungssystems (Lichtleitfaser) inkl. der Faserstecker
- Mängel an Biegeschutz und Zugentlastung der Anschlussleitungen
- ordnungsgemäßer Zustand der Schutzabdeckungen
- Anzeichen von Überlastung und unsachgemäßem Gebrauch
- unzulässige Eingriffe und Änderungen
- sicherheitsbeeinträchtigende Verschmutzung und Korrosion
- Dichtheit
- einwandfreie Lesbarkeit von Aufschriften, die der Sicherheit dienen
- Schäden an Schaltern, Stellteilen, Betätigungs- und Sicherheitseinrichtungen, Anzeigeelementen und Emissions-Warnanzeigen
- ordnungsgemäße Absaug- und Filterleistung

- Beeinträchtigung der Prozessbeleuchtung
- Schäden an Schutzgläsern (Produkt- und Personenschutzgläser)

Ebenfalls in Anlehnung an die o. g. Vorschriften gelten folgende Prüffristen:

- persönliche Schutzausrüstung: vor jeder Benutzung – Art der Prüfung: auffällige Mängel
- ortsfeste Betriebsmittel: alle 4 Jahre – auf ordnungsgemäßen Zustand
- ortsveränderliche Betriebsmittel: alle 6–12 Monate – auf ordnungsgemäßen Zustand
- Lüftungstechnische Einrichtungen: alle 6–12 Monate – auf ordnungsgemäße Funktion
- Schutz- und Sicherheitseinrichtungen: in Abhängigkeit von Risikobeurteilung vor jeder Benutzung und/oder alle 1–6 Monate – ordnungsgemäßer Zustand und Funktion

## Zusammenfassung

Handgeführte Laserbearbeitungsgeräte finden aufgrund ihrer besonderen Vorteile zunehmend Akzeptanz. Auf die spezifischen Gefährdungen geht prEN ISO 11553-2 ein und definiert Mindestanforderungen an die Konstruktion und den Betrieb.

Insbesondere den Benutzer- und Montageinformationen kommt essenzielle Bedeutung zu, da unter Umständen der Endnutzer noch nachträglich sicherheitsrelevante Teile anbringen oder Eingriffe vornehmen muss, damit alle einschlägigen Bestimmungen der Maschinenrichtlinie erfüllt werden.

Z. B. periphere Einhausungen, Absaug- und Filtereinrichtungen und persönliche Schutzausrüstungen bilden Hauptschnittstellen zwischen Hersteller und Betreiber zur Verhinderung von Gesundheitsschäden durch Laserstrahlung.

## Literatur

Johanknecht, A. (2003), Die neue BetrSichV – Auswirkung auf Prüfungen

2006/42/EG (2006), Maschinenrichtlinie

EN 60825-1/A1 (2002), Sicherheit von Lasereinrichtungen, Teil 1: Klassifizierung von Anlagen, Anforderungen und Benutzer-Richtlinien

EN 60825-4/A1 (2002), Sicherheit von Lasereinrichtungen, Teil 4: Laserschutzwände

DIN EN 60825 Beiblatt 14 (2006), Sicherheit von Lasereinrichtungen, Teil 14: Ein Leitfaden für Benutzer

EN ISO 11553-1 (2005), Sicherheit von Maschinen, Laserbearbeitungsmaschinen, Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen

prEN ISO 11553-2 (2006), Sicherheit von Maschinen, Laserbearbeitungsmaschinen, Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte

BetrSichV (2002), Betriebssicherheitsverordnung

BGV A3 (2005), Elektrische Anlagen und Betriebsmittel

DIN VDE 0702 (2004), Wiederholungsprüfungen an elektrischen Geräten

BGV B2 (1995), Laserstrahlung

BGI 832 (2003), Betrieb von Lasereinrichtungen

Dipl.-Phys. Martin Brose, Berufsgenossenschaft  
der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE),  
Gustav-Heinemann-Ufer 130, 50968 Köln

Dipl.-Ing. Malte Gomolka, Berufsgenossenschaft  
der Feinmechanik und Elektrotechnik (BGFE),  
Gustav-Heinemann-Ufer 130, 50968 Köln

Dr. Rüdiger Pipke, Bundesanstalt für Arbeitsschutz und  
Arbeitsmedizin (BAuA), Friedrich-Henkel-Weg 1–25,  
44149 Dortmund

Dipl.-Ing. Günter Ott, Bundesanstalt für Arbeits-  
schutz und Arbeitsmedizin (BAuA), Friedrich-Henkel-  
Weg 1–25, 44149 Dortmund

Dipl.-Phys. Henry Orlick, SLV Halle GmbH,  
Köthener Straße 33 a, 06118 Halle (Saale)

Dipl.-Ing. Thomas Püster, Laser Zentrum Hannover e.V.,  
Hollerithallee 8, 30419 Hannover

Dipl.-Ing. Klaus Hänsel, Primes GmbH, Max-Planck-  
Straße 2, 64319 Pfungstadt

Michael Rothweiler, TRUMPF Werkzeugmaschinen  
GmbH, Johann-Maus-Straße 2, 71254 Ditzingen

Michael Nittner, JENOPTIK Automatisierungstechnik  
GmbH, Konrad-Zuse-Straße 6, 07739 Jena

Ulf Jasnau Schweißtechn. Lehr- und Versuchsanstalt  
Mecklenburg-Vorpommern GmbH, Alter Hafen Süd 4,  
18069 Rostock

Dipl.-Ing. Carsten-Jörn Rasmussen, FORCE Technology  
Broendby, Dänemark

Dr. Winfried Barkhausen, CLEAN-Lasersysteme GmbH,  
Kaiserstraße 100, 52134 Herzogenrath/Aachen

Dipl.-Phys. Joachim Franek; Erwin M. Heberer,  
GELA GmbH, Ottostraße 7, 63150 Heusenstamm

**Bestell-Nr. M 13**

1 - 15 - 11 - 06 - 5

Alle Rechte beim Herausgeber

Gedruckt auf umweltfreundlichem, chlorfreiem Papier