

QUALIFIZIERUNG KONSTRUKTIVER TECHNISCHER SCHUTZMAßNAHMEN FÜR HANDGEFÜHRTE LASERGERÄTE ZUR MATERIALBEARBEITUNG — ERGEBNISSE AUS DEM FORSCHUNGSPROJEKT F 2518 —

Thomas Puester¹, Dirk Herzog¹, Erik Romanus², Günter Ott², Martin Brose³

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

²Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, Friedrich-Henkel-Weg 1-25, D-44149 Dortmund

³Berufsgenossenschaft Energie Textil Elektro, Gustav-Heinemann-Ufer 130, D-50968 Köln

Einleitung

Aus Arbeitsschutzaspekten sollte die Markteinführung handgeführter Lasergeräte zur Materialbearbeitung mit der Qualifizierung von Sicherheitseinrichtungen einhergehen. Um diesen Anforderungen an eine sichere Konstruktion von HLG gerecht zu werden, wurde im Jahr 2007 ein Forschungsprojekt begonnen mit dem Ziel, sowohl Sicherheitskonzepte für HLG zu entwickeln und konstruktive sowie technische Maßnahmen zur HLG Lasersicherheit zu qualifizieren.

Internationale Normen (u.a. DIN EN ISO 12100) mit Bezug zur Maschinensicherheit verlangen gemäß des 3-stufigen Konzepts vorrangig nach einer inhärent sicheren Konstruktion, um die mit der Benutzung eines Geräts oder einer Maschine verbundenen Risiken zu mindern. Die Benutzung persönlicher Schutzausrüstung (PSA) wie Laserschutzbrillen oder Schutzkleidung stellt eine ergänzende Maßnahme dar, die zudem nur temporär eingesetzt werden sollte.

Handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung (HLG) werden oftmals für 3-D Anwendungen eingesetzt [1,2,3,4]. Meistens resultiert dieses in einer offenen Prozesszone, aus der Laserstrahlung propagieren kann. Typischerweise geben HLG-Hersteller in diesen Fällen dem Benutzer die Sicherheitsinformationen, dass die Risiken durch Laserstrahlung durch die Benutzung von PSA zu minimieren sind.

Nur wenige HLG bilden in Kombination mit dem Werkstück eine geschlossene Prozesszone (z.B. HLG zum Markieren [5], Überlappschweißen von ebenen Werkstücken [6] oder Steppnaht-Schweißen von Kehlnähten in der Schiffbauindustrie [7]). In diesen Fällen muss sichergestellt werden, dass Laserstrahlung nicht durch Spalten in der Abschirmung, Spalten im Werkstück oder zwischen Abschirmung und Werkstück propagieren kann.

Für beide oben genannten Bauarten von HLG müssen folgende Fragen beantwortet werden:

- Welche Risikograde entstehen insbesondere für Hochleistungs-HLG (Laserleistung im kW-Bereich) in vorhersehbaren Fehlerbedingungen?
- Welche konstruktiven, technischen Maßnahmen können vorgesehen werden, um die Risiken durch direkte oder gerichtet reflektierte Laserstrahlung in vorhersehbaren Fehlerfällen zu minimieren?
- Welche Anforderungen werden an sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen (SRP/CS) bzw. die Sicherheitssteuerung gestellt?

Bezüglich handgeführter Lasergeräte zur Materialbearbeitung bedeutet dieses, dass der Konstrukteur den Spagat machen muss zwischen folgenden Anforderungen:

- Erforderliche Sicherheits-Level (erforderlicher Performance Level),
- Baugröße und -gewicht der Bauteile (ergonomische Aspekte),
- Praktikabilität für den Einsatz in HLG (Querempfindlichkeiten),
- Investment Kosten.

Um Aufschluss über den Status-Quo von konstruktiven Sicherheitseinrichtungen von HLG zu erlangen, wurden Patent- und Literaturrecherchen vorgenommen sowie am Markt verfügbare Geräte inspiziert. Hiernach sind die meisten HLG [u.a.: 1-10], mit einer programmierbaren Logiksteuerung (programmable logic control -PLC) ausgestattet, die die Anwendung steuern/kontrollieren. Es sei jedoch an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass gewöhnliche PLC/SPS nicht sicherheitsbezogen sind und demzufolge nicht die Anforderungen an eine sichere Steuerung erfüllen. In der Literatur sind allerdings nur wenig Informationen bezüglich der Gefährdungsanalyse und Risikobeurteilung [11] sowie dem

Sicherheitskonzept von HLG [5,12] und dem Performance Level von sicherheitsbezogenen Teilen von HLG verfügbar. Es darf angenommen/postuliert werden, dass die überwiegende Anzahl der Sicherheitskonzepte von verfügbaren HLG und HLG-Prototypen die in den Normen definierten Anforderungen nicht oder nur unzureichend erfüllen.

Die Norm DIN EN ISO 11553-2 "Sicherheitsanforderungen an handgeführte Lasergeräte zur Materialbearbeitung" definiert mit Bezug zu den Steuerungen (Sicherheitssteuerungen), dass eine Bewertung der Performance Level (PL) bzw. der Steuerungskategorie vorgenommen werden muss [12]. Die nachfolgende Anmerkung legt dar, dass dieses typischerweise in einer Steuerungskategorie 3 gemäß DIN EN ISO 13849-1 resultiert. Jedoch bietet die Norm keine zusätzlichen Informationen oder Beispiele für den Benutzer wie eine Sicherheitssteuerung (inkl. Sensoren Steuerungsarchitektur) für HLG realisiert werden kann. Nur Beispiele für eine Risikobeurteilung werden im informativen Anhang gegeben.

Gefährdungsanalyse / Risikobeurteilung

Für ausgewählte HLG Bauarten bzw. -Anwendungen wurden verschiedene Szenarien vorhersehbarer Fehlerfälle betrachtet, bei denen gefährliche Laserstrahlung zugänglich werden kann. Anhand der Risikobeurteilung wurden Anforderungen an den maximal zulässigen Nachlauf des HLG für die Isolation der Laserstrahlung, d.h. die Gesamt-Systemreaktionszeit der Sicherheitssteuerung abgeleitet.

In Abhängigkeit der maximalen Ausgangsleistung (cw-Betriebsart), den Eigenschaften der strahlformenden Elemente und dem Abstand von Körperteilen zur Bearbeitungszone wurden vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärken (VMB) abgeschätzt. Angesetzt wurde ein typischer Abstand der Hand zur Prozesszone von 150 mm. Wie in Abbildung 1 dargestellt, liegen die VMB in einem Bereich von $5 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ bis $1 \cdot 10^7 \text{ W/m}^2$ [13]. Eine Gegenüberstellung der VMB mit den maximal zulässigen Bestrahlungsstärken (MZB_{Haut}) gemäß DIN EN 60825-1 ermöglicht die Bestimmung der maximal zulässigen Expositionszeit (t_2), oberhalb der eine Hautschädigung entsteht.

Durch Addition mit der Greifzeit (t_1) der Hand vom HLG-Griff oder vom HLG-Abschirmungsrand in die Expositionszone errechnet sich die maximal zulässige Nachlaufzeit ($t_{2N}=t_1+t_2$) des HLG für die sichere Isolation bzw. Deaktivierung der Laserstrahlung. Für die Greifgeschwindigkeiten der Hand werden Werte aus der DIN EN 999 ($K_1=2\text{m/s}$; $K_2=1,6\text{m/s}$) sowie aus der Literatur für heterotrope Loslass- und

Zielgreifbewegungen ($K_3=1\text{m/s}$) angesetzt [14].

Die für verschiedene Szenarien

- Abheben/Verkippen des HLG
- Greifen vom Handgriff bzw. Abschirmungsrand in die Expositionszone

kalkulierten maximal zulässigen Nachlaufzeiten verdeutlichen, dass insbesondere für High-Power HLG die Nachlaufzeit nur über den Term t_1 , d.h. über die Abmaße der Abschirmung oder den Abstand der Hand zur Expositionszone bestimmt wird. Je nach angesetzter Greifgeschwindigkeit ergeben sich bei einem beispielhaften Abschirmungsdurchmesser von 100 mm maximal zulässige Nachlaufzeiten zwischen 35 ms und 100 ms. Hieraus resultieren zum Teil hohe Anforderungen an die Auslegung der Sicherheitssteuerung.

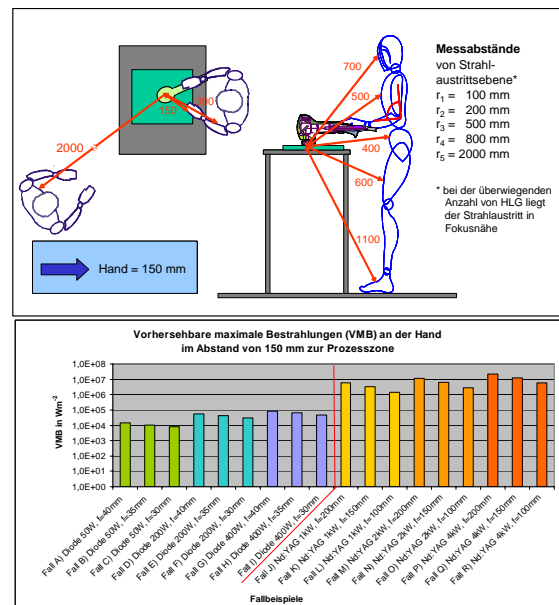


Abbildung 1: Typische Abstände von der Bearbeitungsposition zu Körperteilen beim Umgang mit HLG und vorhersehbare maximale Bestrahlungsstärken

Um Gefährdungen durch Laserstrahlung zu minimieren, sollen Laserbearbeitungsmaschinen und somit auch HLG an erster Stelle über konstruktive, technische Maßnahmen verfügen. Mit Bezug zu HLG werden folgende vier Bereiche betrachtet:

- HLG Aufsatzkontrolle: Überwachung, dass das HLG auf dem Werkstück aufgesetzt ist (nur anwendbar für HLG-Bauarten, die auf ein Werkstück aufgesetzt werden).
- HLG-Lage/Position: Überwachung der Lage/Position des HLG relativ zu einem Werkstück (anwendbar auch für HLG-Bauarten, die

frei geführt werden) zur Begrenzung der Freiheitsgrade der Laserstrahlpropagation in Fehlerfällen.

- HLG-Abschirmungsposition. Überwachung der Position/Dichtheit von Abschirmungen, Detektion von Spalten (anwendbar für HLG-Bauarten mit einer eingehausten Bearbeitungszone).
- Strahlführung, Detektion von Fehlern in optischen Elementen bzw. der Justierung.

Für jeden Bereich werden Anforderungen an die jeweilige Sicherheitsfunktion sowie an die sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung, die diese Sicherheitsfunktion ausführen, definiert. Bestimmt wird der sogenannte „required Performance Level (PL_r)“ gemäß DIN EN ISO 13849-1. In Abbildung 2 ist der Risikograph zur Bestimmung des erforderlichen Performance Levels dargestellt.

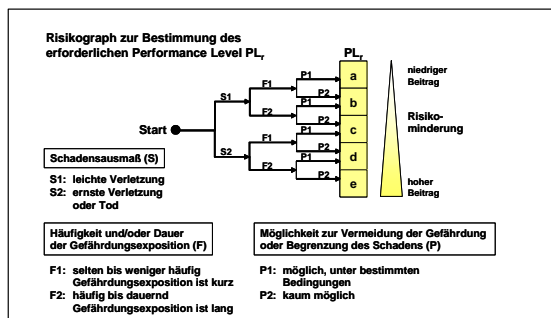


Abbildung 2: Risikograph zur Bestimmung des erforderlichen Performance Levels (PL_r) für jede Sicherheitsfunktion gemäß DIN EN ISO 13849-1

Zur Bestimmung der PL_r werden die HLG in drei Gruppen unterteilt:

- Mittlere Ausgangsleistung < 100 W
- Mittlere Ausgangsleistung < 1000 W
- Mittlere Ausgangsleistung > 1000 W

Für die Betrachtungen wird angenommen, dass alle HLG über eine fokussierende Optik mit einer Brennweite von 200 mm verfügen. Das Risiko wird für das ungeschützte Auge und die Haut bewertet.

Verschiedene konstruktive Sicherheitskonzepte z.B. für HLG mit Aufsatzkontrolle oder Distanzkontrolle und Überwachungen der Strahlführung werden betrachtet. Für jede Sicherheitsfunktion, die von einem sicherheitsbezogenen Teil der Steuerung (SRP/CS) ausgeführt wird, wird der erforderliche Performance Level (PL_r) bestimmt. Dieses beinhaltet Sensoren, die Sicherheitssteuerung (Logikeinheit) sowie die Aktuatoren (Sicherheitsstrahlverschluss). Die Ergebnisse sind in einer komplexen Liste zusammengefasst, von denen im Folgenden nur die

wesentlichen Schlussfolgerungen wiedergegeben werden.

Risiko für das Auge

In Fällen, wo das HLG in Kombination mit dem Werkstück eine eingehauste Bearbeitungszone aufweist und das HLG „so sicher wie ein Laserprodukt der Laser Klasse 1“ betrieben wird und keine PSA erforderlich ist, besteht in vorhersehbaren Fehlerbedingungen (u.a. Verkippen/Abheben) ein hohes Risiko für das Auge. Auf Grund des damit verbundenen hohen Beitrags der SRP/CS für die Risikominderung korrespondiert dieses mit hohem erforderlichen Performance Level von (PL_r: d/e). Für HLG mit einer offenen Prozesszone informieren die HLG-Hersteller typischerweise die Benutzer über die verbleibenden Restrisiken, die durch das Tragen von Laserschutzbrillen zu mindern sind. Jedoch muss unbedingt verifiziert werden, ob die Schutzstufen der Laserschutzbrillen auch ausreichend sind; insbesondere bei High-Power-HLG können technische Maßnahmen zur Reduzierung der zugänglichen Laserstrahlung in Fehlerfällen erforderlich werden.

Risiko für die Haut

In Abhängigkeit der Ausgangsleistung bzw. der resultierenden vorhersehbaren maximalen Bestrahlung (VMB) auf der ungeschützten Haut können leichte oder schwere Schädigungen (bei den betrachteten Wellenlängen: Verbrennungen) auftreten. Typischerweise korrespondiert dieses mit erforderlichen Performance Level der SRP/CS von bis zu (PL_r: c).

Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen

Die Sicherheitssteuerung und alle sicherheitsbezogenen Teile der Steuerung müssen so ausgelegt werden, dass die Anforderungen resultierend aus dem PL_r erfüllt werden.

Für die oben genannten vier Bereiche wurde eine Übersicht am Markt verfügbarer, potenziell geeigneter Sensoren erarbeitet.

Die Übersicht beantwortet folgende Fragestellungen:

- Welche physikalische Größe soll gemessen werden?
- Über welches Wirkprinzip soll der Sensor verfügen?
- Welche Arten von Sensoren und Sicherheitssteuerungen sind am Markt verfügbar?
- Welche Steuerungskategorien bzw. Performance Level (gem. DIN EN ISO 13849-1) können mit den SRP/CS erreicht werden?
- Über welche Baugröße und welches Gewicht verfügt der Sensor, der in das HLG integriert werden soll?

- Welche Eignung haben der Sensor und die Sicherheitssteuerung mit Bezug auf Empfindlichkeit, Querempfindlichkeiten, Systemreaktionszeit sowie Praktikabilität für die Verwendung in HLG?
- Wie hoch sind die Investitionskosten für die SRC/CS?

Auf Grundlage der Übersicht wurden folgende Sensoren für die weiteren Untersuchungen und ihre Eignung für HLG ausgewählt.

Sensoren zur Auflage- / Positionskontrolle

1) Berührend:

- Mechanische mini Kugelstößel (8federbelastet) in Verbindung mit
 - mechanischem Schalter oder
 - induktivem Sensor
- mechanical contact needle (current control)

2) Berührungslos

- induktive Sensoren
- kapazitive Sensoren
- Ultraschallsensoren

Neigung- und Beschleunigungssensoren

- MEMS-Neigungs-/Inklination Sensor
- MEMS-Beschleunigungssensor
- MEMS-Gyroscope

Temperatursensoren zur Überwachung der Strahlungsführung

- Temperatursensor (PT100), Platin-Chip
- Thermoelement Type K (NiCr-Ni)

Für jedes ausgewähltes SRP/CS (Sensor, Fensterdiskriminator, Grenzwertschalter, Sicherheitskleinststeuerung) und für die Kombination von SRP/CS, die eine Sicherheitsfunktion ausführen, werden die erreichten Performance Levels (PL) bestimmt.

Kriterien, die in der DIN EN ISO 13849-1 angegeben sind, wie Mean Time To Failure dangerous (MTTF_d), Diagnostic Coverage (DC), Systematic and Common-Cause Failures (CCF) und die Struktur der Steuerung werden betrachtet (Beispiele für die Anwendung werden in [15] gegeben).

Architektur der Sicherheitssteuerung

Die Struktur oder Architektur der Sicherheitssteuerung bestimmt in entscheidender Weise die Toleranz gegenüber Fehlerbedingungen. Eine erhöhte Zuverlässigkeit gegenüber Fehlerbedingungen bedeutet eine optimierte Risikominderung. Die Architektur bildet die Grundlage, anhand derer im nachfolgenden schritt sicherheitsbezogenen Parameter wie der Performance Level quantifiziert werden können.

Mit Bezug zu Maschinen können die meisten Architekturen von Sicherheitssteuerungen fünf allgemei-

nen übergeordneten Typen zugeordnet werden; oder deren Kombinationen. Diese übergeordneten Typen sind in der DIN EN ISO 13849-1 beschrieben. Sie werden unterteilt in Kategorien, beginnend mit Kat. B bis Kat. 4. In der folgenden Abbildung ist die Architektur einer Kat. 4 Steuerung dargestellt.

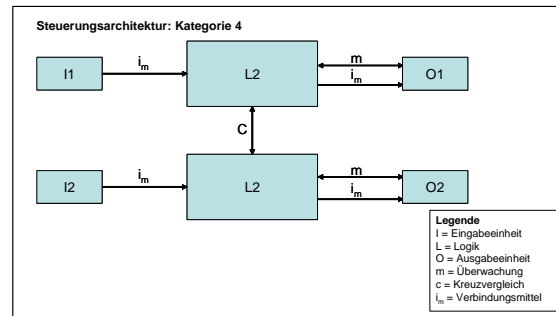


Abbildung 3: Systemstruktur einer Steuerungskategorie 4 gem. DIN EN 13849-1

Wie aus Abbildung 3 zu erkennen ist, besteht die vollständige Sicherheitssteuerung aus den folgenden Elementen:

- Der Eingabeeinheit (z.B. Sensoren),
- der Logiksteuerung und der Energieversorgung
- der Ausgabeeinheit (hier z.B. Shutter).

Die Architektur verfügt über zwei vollständig parallele Kanäle, von denen jeder über eine Logikeinheit überwacht wird, wobei beide Logikeinheiten Kreuzvergleiche vornehmen. Der Signalfluss zu den Ausgabeeinheiten wird von der Sicherheitslogik überwacht.

Gemäß der Ergebnisse der Risikobeurteilung (s.a. vorherigen Abschnitt) muss die vollständige Sicherheitssteuerung für HLG mindestens die Anforderungen der Steuerungskategorie Kat. 3 erfüllen oder besser die der Kat. 4 (gem. DIN EN ISO 13849-1). Dieses korrespondiert mit erforderlichen Performance Level von PL_r: c bis e.

Die Sicherheitssteuerung von HLG muss folgende Sicherheitsfunktionen ausführen:

1. Sicherheitsbezogene Stoppfunktion, eingeleitet durch eine Schutzeinrichtung; IEC 60204-1,
2. Start-/Wiederanlauffunktion, IEC 60204-1,
3. Vermeidung des unerwarteten Anlaufs, IEC 60204-1, DIN EN 1037
4. Zustimmungsfunktion (Zweihandsicherheitschaltung), IEC 60204-1, DIN EN 574
5. Funktion zum Stillsetzen im Notfall (Not-Halt), IEC 60204-1, DIN EN ISO 13850
6. Schwankungen, Verlust und Wiederkehr der Energiequellen, IEC 60204-1
7. Sicherheitsbezogene Parameter/Parametrisierung

Logikeinheit

Am Markt verfügbare Klein- oder Mini-Sicherheitssteuerungen bieten typischerweise Steuerungskategorien der Kat. 4. Sie verfügen über eine unterschiedliche Anzahl von sicheren Eingängen und Ausgängen. Überwiegend sind die Eingänge als digitale Eingänge ausgelegt, nur aufwendigere und damit auch teure Steuerungen verfügen über analoge Eingänge. Zusätzlich stellen diese Steuerungen oftmals auch Schnittstellen für die Kommunikation mit Netzwerken bereit (z.B. sicheres Ethernet, SafetyBUS p). In den meisten Fällen werden HLG jedoch als Standalone Einheiten betrieben und es erfolgt keine Einbindung in Netzwerke.

Die Ausgänge einer Sicherheitskleinststeuerung sind typischerweise als Halbleiter-Ausgänge oder Relais-Ausgang ausgelegt.

Wegen ihrer Größe und ihres Gewichts können auch Klein- oder Mini-Sicherheitssteuerungen aus ergonomischen Gründen nicht sinnvoll in HLG (Handkopf) integriert werden. Sie müssen zumeist in einer externen Steuereinheit/-box (in Kombination mit weiteren Komponenten, z.B. Netzteil) platziert werden. Die Steuerbox kann dabei mobil oder stationär sein.

Energieversorgung

Die Energieversorgungseinheit für die Sicherheitssteuerung muss ebenfalls so ausgelegt werden, dass die erforderlichen Performance Level (PL_r) eingehalten sind. Faktisch bedeutet dieses, dass bei Unterspannungs- und Überspannungszuständen die Sicherheitssteuerung im sicheren Zustand verbleiben oder einen sicheren Zustand einnehmen muss.

Eingabe Einheiten

Bei HLG besteht für die Konstrukteure und Hersteller die Aufgabe, die Eingabeeinheiten, d.h. die Sensoren in das HLG zu integrieren. Die Architektur der Sicherheitssteuerung und somit die erreichbare Steuerungskategorie bzw. Performance Level hängt aber entscheidend von den sicherheitsrelevanten Eigenschaften der Sensoren (Steuerungskategorie, PL) ab.

Fall 1)

Die Eingabeeinheiten (Sensoren) entsprechen den Anforderungen der Steuerungskategorie 3 oder höher. Dieses bedeutet, dass Fehlerbedingungen (Einzelfehler –Kat. 3 oder die Anhäufung von Fehlern –Kat. 4) erkannt werden und ein sicherer Zustand beibehalten wird. Diese „fehlersicheren“ Sensoren verfügen über 2-kanalige Ausgänge (z.B. PNP/NPN) und können mit zugelassenen 2-kanaligen Sicherheitsrelais oder Auswerteeinheiten verbunden werden.

Jedoch sind nicht alle Sensoren, die auf Grund ihres Wirkprinzips für den Einsatz in HLG geeignet wären, am Markt als Steuerungskategorie 3 oder 4 Bauteile verfügbar. Auch weisen Sensoren, die Kat. 3 oder Kat. 4 erfüllen, im Vergleich zu bewährten Bauteilen typischerweise deutlich größere Bauteilabmessungen und –gewichte auf; und sind damit nicht vorteilhaft für HLG einsetzbar.

Fall 2)

Um dennoch die Anforderungen an die Sicherheitssteuerung zu erfüllen, kann folgender Lösungsansatz verfolgt werden:

Es werden Sensoren eingesetzt, die Steuerungskategorien niedriger als Kat. 3 (z.B. Kat. 2) aufweisen; die Sensoren müssen aber in eine spezielle Steuerungsarchitektur eingebunden werden, um die Anforderungen der Kat. 3 oder höher für die Gesamtsteuerung zu erfüllen.

Diese auch in miniaturisierter Form am Markt angebotenen Sensoren erfüllen in der Regel die Anforderungen der Kat. 2 oder Kat. B. Um bei Verwendung dieser Sensoren eine Sicherheitssteuerung der Steuerungskategorie Kat. 3 oder höher zu erreichen, muss die Steuerungsarchitektur folgende konstruktive Anforderungen erfüllen:

- Redundanz (vollständig parallele Kanäle vom Sensor zu den Eingängen der Steuerung)
 - homogen (gleiche Wirkprinzipien und Bauteile in den parallelen Kanälen)
 - divers (verschiedene Wirkprinzipien und Bauteile in den parallelen Kanälen).

Eine Sicherheits-Logiksteuerung, die die Eingangssignale verschiedener Kanäle miteinander verknüpft, ist erforderlich, um die Signale zu verarbeiten und Ausgangssignale bereitzustellen.

Dieses ist für alle Bauteile in einem Kanal gültig. Falls der Sensor ein analoges Signal ausgibt und die Sicherheitskleinststeuerung nur über digitale Eingänge verfügt, muss ein A/D Wandler eingesetzt werden. Oftmals müssen die analogen Signale verarbeitet werden, bevor sie an die digitalen Eingänge der Sicherheitskleinststeuerung weitergeleitet werden. Typische Elemente sind Verstärker, sowie Fensterdiskriminatoren oder Grenzwertschalter. Ein Fensterdiskriminator liefert als Ergebnis des Vergleichs von eingehendem analogem Signal und dem eingestellten Grenzwert ein „low“ oder „high“ als Ausgangssignal. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass alle elektrischen/elektronischen Bauteile (z.B. Verstärker, Fensterdiskriminatoren) separat in jeden einzelnen Kanal integriert werden müssen, d.h. dass vom Sensor zum Eingang der Steuerung vollständig parallele Kanäle aufgebaut sind.

Ausgabe-Einheiten

Bei HLG übernehmen die Ausgabeeinheiten, d.h. die Aktuatoren, die Funktion der Freigabe oder Isolation der Laserstrahlung. Da es sich um eine sicherheitsrelevante Funktion handelt, darf ein Fehler in der Ausgabeeinheit nicht zu einem Verlust der Sicherheit, d.h. einer unbeabsichtigten Laserstrahlungsemission, führen. Fehler müssen mittels einer Signalführung von der Ausgabeeinheit zur Steuerung erkannt werden.

Mit Hinblick auf die Lasersicherheit bei HLG ist bei vielen HLG-Bauarten die lasergeräteseitige Sicherheitsplatine/-steuerung die Schnittstelle zur Ausgabeeinheit der HLG-Sicherheitssteuerung. Die lasergeräteseitige Steuerung muss so ausgelegt sein, dass der Laserstrahl mittels sicherem Strahlverschluss (Shutter) oder sicherer Deaktivierung der Laserstrahlung isoliert wird.

Da das Lasergerät ein integrales Bauteil des verwendungsfertigen HLG ist, besteht für den HLG-Hersteller somit die Aufgabe, die Leistungsfähigkeit der lasergeräteseitigen Steuerung zu verifizieren. Sie muss ebenfalls eine Steuerungskategorie der Kat. 3 oder höher bzw. korrespondierend PL von „c“ bis „e“ gemäß DIN EN ISO 13849-1 oder Safety Integrity Level SIL 1 to 3 gemäß IEC 62061 aufweisen.

Alternativ kann der Ausgang auch einen externen ausfallsicheren Strahlverschluss ansteuern, der im Strahlengang platziert wird. Falls die Bauart des Lasergerätes eine ungesteuerte Energietrennung erlaubt (Stopp Kategorie 0), kann der Ausgang der HLG-Sicherheitskleinststeuerung auch ein externes sicheres Relais/Schütz ansteuern. Diese Möglichkeit ist insbesondere für Faser- und Diodenlaser relevant, da es aus Gründen der Strahlqualität nachteilig ist, einen Strahlverschluss in die Faserführung einzubringen. Alle sicherheitsbezogenen Teile müssen die Anforderungen gemäß DIN EN ISO 13849-1 (Kat. 3 oder höher; $PL_r = d/e$) und IEC 62061 (SIL 3) erfüllen.

Weitere Ausgabeeinheiten können das Handhabungssystem steuern, falls das HLG mit einer motorischen Vorschubunterstützung ausgerüstet ist, oder überwachen die Versorgung des HLG mit weiteren Medien, z.B. mit Prozessgas.

Qualifikation ausgewählter sicherheitsbezogener Bauteile

Für die Untersuchung der sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen wurde ein „HLG-Funktionsträger“ erstellt. In den Funktionsträger können alle zu untersuchenden Sensoren und Befehlstaster integriert werden. Der Funktionsträger verfügt über Abmaße typischer HLG. Er ist in Abbildung 4 dargestellt.



Abbildung 4: Funktionsträger zur Qualifikation von Sensoren



Abbildung 5: Prüfanordnung; HLG-Funktionsträger montiert auf einer Drehachse

Um das Signalverhalten bzw. die Signalantworten der Sensoren zu untersuchen, wurden verschiedene Prüfanordnungen erstellt.

Die in Abbildung 5 dargestellte Prüfanordnung erlaubt durch definierte Bewegungen des HLG die Untersuchung der Signalantworten der Aufsatz- sowie der Lage- und Beschleunigungssensoren. Der Bewegungsbeginn wird mittels einer Lichtschranke mit bekannter Signalverzögerung detektiert und dient zur Triggerung eines Oszilloskops (Tektronix, Typ TDS 744 A), mit dem die Signalantworten der Sensoren aufgezeichnet werden. Den Sensoren nachgeordnete Grenzwertschalter werden auf entsprechend „zulässige“ Werte (z.B. für die zul. Winkellage des HLG) einjustiert. Die Signalverzögerung bzw. die Systemreaktionszeit der Steuerung werden an verschiedenen Positionen gemessen. (Sensor, Ausgang PLC, sowie Ausgabe-Relais).

Mit Hilfe einer zweiten Prüfanordnung werden die Sensoren auf ihre Eignung bei einer simulierten Handhabung untersucht. Hierdurch lassen sich Fragen zum Verhalten der Sensoren bezüglich unterschiedlicher Werkstoffe, Oberflächen und Umweltbedingungen (feuchte Oberfläche) sowie Fehlerbedingungen wie Verkippen, Abrutschen und Kippen über eine Bauteilkante beantworten. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 6 (links) dargestellt.

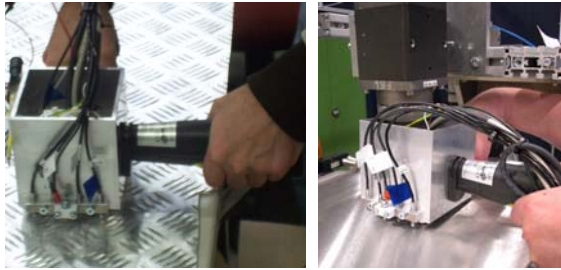


Abbildung 6: Prüfanordnungen zur Überprüfung der Eignung verschiedener Sensoren

In einem weiteren Schritt werden die Sensoren bezüglich ihrer Eignung bei der Lasermaterialbearbeitung qualifiziert. Hierzu wird der Funktionsträger an verschiedene Laser (cw und gepulst) bzw. Bearbeitungsköpfe adaptiert (Abbildung 6; rechts). Die Untersuchungen geben Aufschluss über Querempfindlichkeiten der Sensoren z.B. auf die Laserstrahlung, oder Medien (Prozessgas und Rauche) in der Prozesszone.

Für die Qualifizierung von Temperatursensoren zur Überwachung der Strahlführung wurde eine spezielle Prüfanordnung konfiguriert, die einen Abschnitt der Strahlführung im HLG nachstellt. Untersucht werden die Signalantworten verschiedener Sensoren, um Aufschluss über Anzahl und Position der Sensoren und über die Definition von Grenzwerten zu erlangen.

Ergebnisse der Untersuchungen

Die Ergebnisse werden je nach Sensor und Kriterium dargelegt. Zusätzlich sind sie in so genannten „Qualifizierungs-Tabellen“ zusammengefasst und aufbereitet, um einen schnellen Überblick über die Eignung eines bestimmten Sensors für HLG zu erlangen.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen anhand ausgewählter Beispiele dargestellt.

Sicherheitskleinststeuerung

Für die Untersuchungen werden zwei verschiedene Sicherheitskleinststeuerungen eingesetzt:

- Sicherheitskleinststeuerung von ELAN, Typ Protect-PSC-CPU-MON, sowie
- kompakte Sicherheitssteuerung von PILZ, Typ° PSS 3057-3.

Die Sicherheitssteuerungen entscheiden sich in ihren Basisversionen im Wesentlichen in der Anzahl ihrer Ein- und Ausgänge. Darüber hinaus bietet die Sicherheitssteuerung von Pilz neben digitalen Eingängen auch 6 analoge Eingänge. Beide Steuerungen sind modular erweiterbar.

Im Folgenden werden am Beispiel der ELAN Sicherheitskleinststeuerung die zu realisierenden Signallaufzeiten bewertet. Die ELAN Protect verfügt im benutzten Mode über nominelle Systemreaktionszeiten von 22 ms für Halbleiterausgänge sowie 37 ms für Relais Ausgänge. Die gemessenen Signallaufzeiten an den Sensorausgängen, an den Ausgängen der Sicherheitskleinststeuerung und an den Ausgängen von nachgeschalteten Sicherheitsrelais verdeutlichen, dass die Systemreaktionszeit der Steuerung im Wesentlichen die Gesamtsignallaufzeit bestimmt; nachgeschaltete Aktuatoren (hier: Sicherheitsrelais) erhöhen die Gesamtsignallaufzeit typischerweise um 10 ms-20 ms.

Mit Hinblick auf die in der Risikobeurteilung ermittelten maximal zulässigen Nachlaufzeiten t_{zN} bedeutet dieses, dass mit handelsüblichen Produkten die erforderlichen Größenordnungen prinzipiell erreicht werden können; die tatsächlichen Gesamtsignallaufzeiten sollten jedoch für ein spezielles HLG im Einzelfall gesondert verifiziert werden.

Mechanischer Miniaturschalter /Stößelgebunden für die Auflagekontrolle

Die Miniaturschalter wandeln die Positionsänderung der federbelasteten Stößel in ein elektrisches Signal um. In Kombination mit induktiven Sensoren, die ebenfalls die Positionsänderung des Stößels detektieren, können vollständig parallele Steuerungskanäle aufgebaut werden, die die Anforderungen nach diversitärer Redundanz und somit die erforderlichen Performance Level erfüllen. Die digitalen Signale der bewährten Bauteile müssen durch die Sicherheitskleinststeuerung verarbeitet werden (z.B. Prüfung auf Gleichzeitigkeit und Plausibilität). Die Signalantwort der mechanischen und induktiven Sensoren liegt in Zeitbereichen deutlich unterhalb 1 ms. Beim Abheben des HLG muss allerdings der Einfluss der Federkennlinie des federbelasteten Stößels auf die Signalantwort berücksichtigt werden. Der Stößel gleitet je nach Federkennlinie nur zeitverzögert nach unten. Die Signalantwort ähnelt einer e-Funktion. Dieses unterstreicht, dass die Auslegung und das Betriebsverhalten der mechanischen Komponenten bei einer Auflagekontrolle mit Stößel für die Signalantwort mit bestimmend sind. Mechanische Auflagekontrollen können kostengünstig realisiert werden. Es konnten keine Querempfindlichkeiten bei der Lasermaterialbearbeitung festgestellt werden; jedoch können feinste Rauch oder Pulverpartikel die Betriebssicherheit der Auflagekontrolle beeinträchtigen, wenn die Auflage und Stößelemente nicht entsprechend abgedichtet werden und dieses zu einem Verhaken führt.

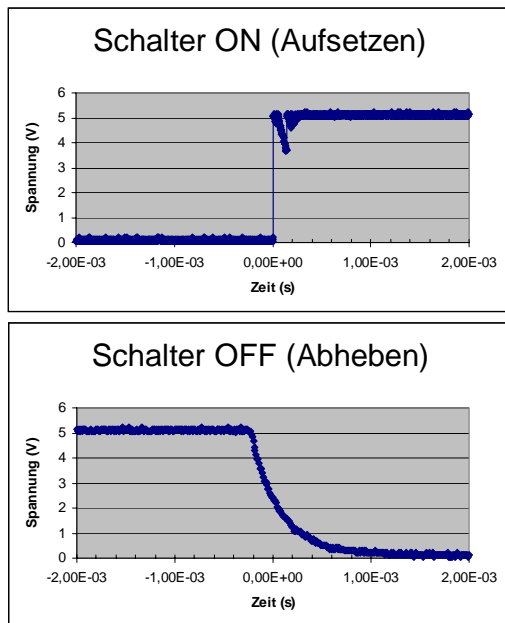


Abbildung 7: Signalantworten untersuchter mechanischer, Schalter

Berührungslos wirkende induktive Sensoren

Berührungslos wirkende induktive Sensoren können nur angewendet werden, wenn ein metallisches Werkstück bearbeitet wird. Es wurden Sensoren mit Reduktionsfaktoren $F_R \neq 1$ und mit $F_R = 1$ sowie mit unterschiedlichen gesicherten Schaltabständen in Bezug auf ihre Eignung bei ebenen und strukturierten Oberflächen (Warzenblech zur Simulation von Verschmutzungen, Metallanhaftungen, Überlappungen) untersucht. Festgestellt werden kann, dass die Signalantworten der Sensoren im μs -Bereich liegen. Bei der Verwendung für Nichteisenmetalle ist ein Reduktionsfaktor von $F_R = 1$ zu empfehlen, da sich andernfalls der Schaltabstand verkürzt, und der Sensor „intolerant“ für raue Oberflächen wird, d.h. wiederholte Schaltwechsel ausführt. Für Oberflächen mit Verschmutzungen/Anhaftungen/Strukturen (hier: Warzenblech) sind Sensoren mit größerem Schaltabstand (4,8 mm) am geeignetsten. Die verwendeten induktiven Sensoren sind kostengünstig und robust. Da die Sensoren bewährte Bauteile sind (gem. DIN EN ISO 13849-1), müssen sie in eine entsprechende Steuerungsarchitektur eingebunden werden, damit die erforderlichen Performance Level an die Sicherheitsfunktion bzw. die Sicherheitssteuerung erfüllt werden.

Berührungslos wirkende kapazitive Sensoren

Vorteil der kapazitiven Sensoren ist, dass Nichteisenmetalle und metallische Objekte detektiert werden können. Die Schaltabstände der untersuchten miniaturisierten Sensoren liegen ebenfalls im Bereich

weniger mm oder z.T. darunter. Sie erfüllen die Anforderungen an bewährte Bauteile (<Kat. 3 gem. DIN EN ISO 13849-1). Typischerweise müssen die Signale verstärkt werden; wobei aus ergonomischen Gründen die Verstärker nicht im HLG-Handteil platziert werden sollten. Die Untersuchungen verdeutlichen, dass kapazitive Sensoren für den Einsatz in HLG geeignet sind. Die einzige Einschränkung ist Ihr Verhalten bei Feuchtigkeit oder mit Wasser benutzten Werkstücken, hier erfolgte keine gesicherte Objekterkennung mehr. Anhaftungen durch Prozessrückstände (Pulverpartikel, Schmelzspritzer) müssen vermieden werden. Aus diesen Gründen sollten kapazitive Sensoren mit anderen Sensoren unterschiedlichen Wirkprinzips kombiniert werden, um Steuerungsarchitekturen nach dem Prinzip der diversitären Redundanz aufzubauen.

Ultraschallsensoren

In den letzten Jahren sind am Markt miniaturisierte Ultraschallsensoren verfügbar, derzeit liegt ihr Preis bei Größenordnungen von 100-200 €. Die Objekterkennung von Ultraschallsensoren ist Werkstückunabhängig. Der Schaltpunkt (mm bis cm) kann problemlos eingestellt (Hard-/Software) werden. Der untersuchte Ultraschallsensor verfügt über einen integrierten Grenzwertschalter sowie einen PNP-Ausgang. Entscheidend für die Signallaufzeiten ist, dass der Schaltpunkt/-abstand entsprechend eingestellt ist, da ein zu groß eingestellter Schaltabstand zu verlängerten Signallaufzeiten im Bereich von 50 ms und darüber führen kann. Die praktischen Untersuchungen zur Lasermaterialbearbeitung belegen allerdings, dass der Ultraschallsensor bei einer Messposition nahe der Bearbeitungszone durch die Prozessgase in seiner Funktion vollständig gestört werden kann. Im Einzelfall muss die Verwendung von Ultraschallsensoren daher immer verifiziert werden.

Die Signalantworten der untersuchten induktiven und kapazitiven Sensoren sowie des Ultraschallsensors sind in Abbildung 8 dargestellt.

Neigungssensoren / Beschleunigungssensoren

Die Weiterentwicklung von Neigungs- und Beschleunigungssensoren auf Basis von MEMS (Mikro-Elektro-Mechanische Systeme) hat dazu geführt, dass miniaturisierte und kostengünstige Sensoren (einachsige/mehrachsige/Gyro) am Markt verfügbar sind. MEMS Sensoren können vorteilhaft insbesondere für frei-geführte HLG eingesetzt werden, um vorhersehbare Fehlerbedingungen (Abrutschen, Kippen von Beuteilkante) zu detektieren und durch Isolation der Laserstrahlung gefährliche Bestrahlungen zu minimieren.

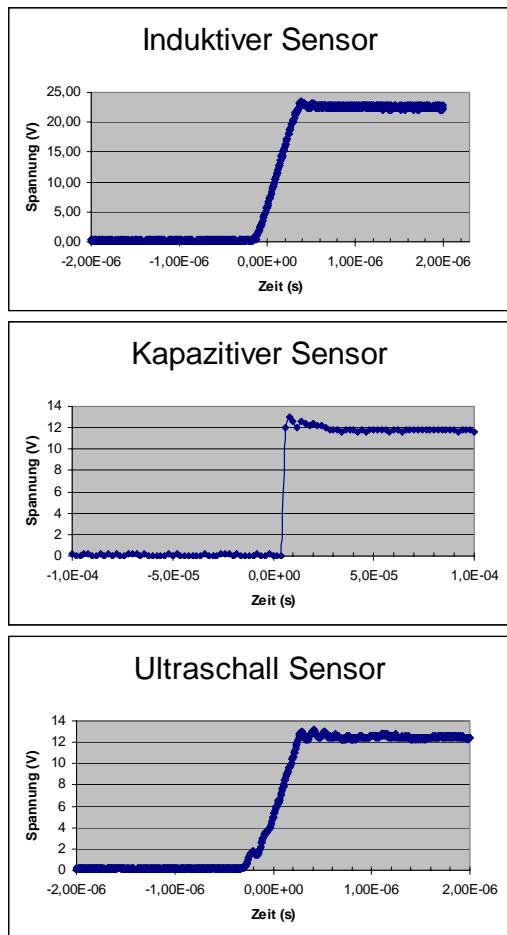


Abbildung 8: Signalantworten untersuchter induktiver und kapazitiver Sensoren sowie des Ultraschallsensors

Neigungs- und Beschleunigungssensoren liefern ein analoges Signal, d.h. geben ein dem Verkippungswinkel entsprechendes Spannungssignal aus (Abb. 9). Für eine Verknüpfung mit den digitalen Eingängen einer Sicherheitssteuerung muss das analoge Signal durch nachgeschaltete Fensterdiskriminatoren oder Grenzwertschalter verarbeitet werden. Die gemessenen Signallaufzeiten (bei vorheriger Einstellung einer zul. Winkellage) liegen im Bereich der Zykluszeit der Steuerung (10-50 ms).

Entscheidend für die Einsetzbarkeit der Sensoren ist die entsprechende Einstellung der Grenzwertschalter. Bei Neigungssensoren (Inklinometer) kann dieses anhand zuvor definierter Neigungen/Lagen des HLG für den bestimmungsgemäßen Betrieb und zulässige Abweichungen erfolgen. Komplexer gestaltet sich die Definition von Grenzwerten bei Beschleunigungssensoren. Diesbezüglich wurden Versuche mit dem HLG-Versuchsträger mit einem 3-achsigen Beschleunigungssensor, der einen Messbereich bis 2g aufweist, an verschiedenen Oberflächen durchgeführt. Während man bei der Bearbeitung von glatten ebenen Oberflächen ein ausreichendes Signalverhältnis zwischen bestimmungsgemäßen Betrieb und Fehlerbedingung (Abrutschen) beobachtet, ist dieses bei der Bearbeitung von Werkstücken mit möglichen Oberflächenanhaftungen nicht mehr gegeben (Abb. 10). Dieses bedeutet, dass je nach Applikation des HLG das Signalverhältnis untersucht werden muss.

ningungssensor, der einen Messbereich bis 2g aufweist, an verschiedenen Oberflächen durchgeführt. Während man bei der Bearbeitung von glatten ebenen Oberflächen ein ausreichendes Signalverhältnis zwischen bestimmungsgemäßen Betrieb und Fehlerbedingung (Abrutschen) beobachtet, ist dieses bei der Bearbeitung von Werkstücken mit möglichen Oberflächenanhaftungen nicht mehr gegeben (Abb. 10). Dieses bedeutet, dass je nach Applikation des HLG das Signalverhältnis untersucht werden muss.

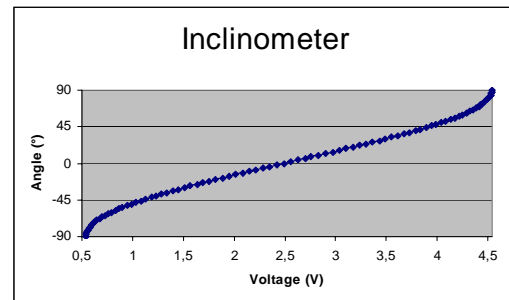


Abbildung 9: Signalantwort des Lagesensors (Inklinometer)

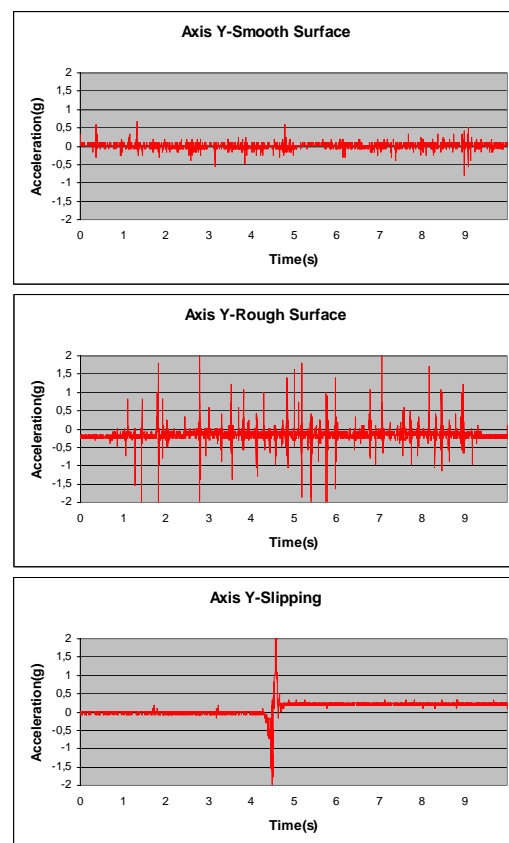


Abbildung 10: Signalantworten von Beschleunigungssensoren

Temperatursensoren / Thermoelement

Zur Überwachung der Strahlführung innerhalb des HLG, bzw. der Detektion von Fehlern in der Strahl-lage werden bei HLG oftmals Temperatur- oder Streulicht-Sensoren eingesetzt.

Temperatursensoren messen den Temperaturanstieg des Abschirmwerkstoffes, der auf Grund der Absorption des streifenden Laserstrahls in vorhersehba-ren Fehlerbedingungen entsteht.

Im Rahmen der Untersuchungen werden folgende Temperatursensoren mit unterschiedlichen Wirk-prinzipien auf ihre Eignung für HLG bewertet:

- Temperatursensor (PT100), Platin-Chip
- Thermoelement, Type K (NiCr-Ni)

Die PT 100 Widerstandsthermometer ändern in Abhängigkeit der Temperatur ihren Widerstand; diese Änderung wird mit Hilfe einer Brückenschaltung gemessen. Das Ausgangssignal der Brücken-schaltung ist ein analoges Spannungssignal, das typi-scherweise verstärkt und mit einem Grenzwertschal-ter verarbeitet werden muss, um es an den digitalen Eingang einer Sicherheitssteuerung weiterzuleiten. Die Systemreaktionszeit wird maßgeblich von der absorbierten Laserstrahlung, der Position des Sensors und des Wärmeleitkoeffizienten vom Ab-schirmwerkstoff bestimmt; die Signalantwortzeiten des PT 100 Sensors selbst sind im Vergleich vernachlässigbar.

Das Ausgangssignal des Thermoelement Sensors ist ein analoges Spannungssignal im mV-Bereich. Das Signal muss ebenfalls verstärkt und mit einem Grenzwertschalter verarbeitet werden. Die Signal-antwortzeit des Thermoelements ist in etwa vergleichbar mit der eines PT 100 Sensors.

Um Steuerungskategorien Kat. 3 oder höher bzw. korrespondierende PL_r von „c“ bis „e“ zu erreichen, müssen vollständig parallele Kanäle mit beiden „bewährten“ Sensorarten (diversitäre Redundanz) aufgebaut werden, deren Signale von der Sicherheits-steuerung überwacht werden.

Die im Rahmen der Untersuchungen ermittelten Er-gebnisse verdeutlichen, dass ein Abschirmwerkstoff wie Aluminium mit einer besseren Wärmeleitung und einer höheren thermischen Beständigkeit vorteilhaft gegenüber Abschirmungen auf Polymerbasis einge-setzt werden kann. Die gemessenen Temperaturan-stiege betragen nach 10 s für Aluminium je nach Laserleistung, Verkippungswinkel des Strahls und Sensorposition zwischen 2°C bis 30°C (bei 2000W). Dieses hat zur Folge, dass

- zwingend mehrere Sensoren am Umfang der Abschirmung vorgesehen werden müssen,
- der worst-case Sensor die früheste Abschaltung einleitet

- eine Temperaturkompensation der Umgebungs-temperatur empfohlen ist, da das Signalverhält-nis von bestimmungsgemäßem Betrieb und Fehlerbedingung z.T. nur Differenzen von weni-gen °C beträgt.

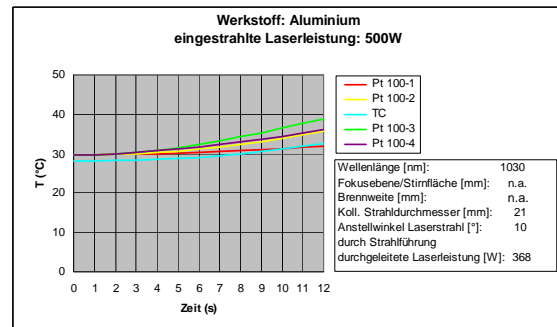


Abbildung 11: Signalantwort von Temperatursen-soren

Zusammenfassung Kriterien für die Gestaltung einer Sicher- heitssteuerung

Die Untersuchungen geben Aufschluss über die im Umgang mit HLG -insbesondere in vorhersehbaren Fehlerbedingungen- entstehenden Risiken durch Laserstrahlung und zeigen konstruktive Möglich-keiten unter Verwendung sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen zur Minderung der Risiken auf.

Anhand von Gefährdungsanalysen und Risikobeur-teilungen werden sogenannte “erforderliche Perfor-mance Level” (PL_r) gemäß DIN EN ISO 13849-1 für jede auszuführende Sicherheitsfunktion bestimmt und Anforderungen an die Architektur der Sicherheits-steuerung sowie an die sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen erarbeitet.

In Bezug auf handgeführte Lasergeräte zur Material-bearbeitung (HLG) sollten folgende Kriterien für die Gestaltung einer Sicherheitssteuerung Berücksichti-gung finden:

- Aus ergonomischen Aspekten (u.a. Größe, Ge-wicht) bieten sich für den Einsatz in HLG vor-zugsweise miniaturisierte Sensoren an. Weitere Bauteile der Sicherheitssteuerung (u.a. Grenzwertschalter, Sicherheitskleinstuerung, Netzteil) sollten in einer separaten stationären oder mobi-len Steuerbox platziert werden.
- Vielfach verfügen miniaturisierte Sensoren nicht über Steuerungskategorien Kat. 3 oder höher, bzw. die damit korrespondierenden Performance Level. Um eine Sicherheitssteuerung aufzu-bauen, die die erforderlichen Performance Level (PL_r) dennoch erreicht, müssen besondere An-

forderungen an die Architektur der Steuerung und die Signalverarbeitung gestellt werden.

- Die Architektur muss vollständig parallele Kanäle aufweisen, die nach dem Prinzip der Redundanz (homogen/diversitär) aufgebaut sind. Vorteilhaft ist die Verwendung von Sensoren unterschiedlichen Wirkprinzips, um eine diversitäre Redundanz zu erreichen.
- Die Signalantworten der Sensoren und Taster (hier: Zustimmtaster) müssen periodisch durch die Sicherheitskleinsteuerung verarbeitet und geprüft werden (z.B. auf Gleichzeitigkeit, Plausibilität).
- Die sicheren Ausgänge der Sicherheitssteuerung müssen mit sicheren Bauteilen zur sicheren Isolierung/Deaktivierung des Laserstrahls verknüpft werden (z.B. dem Sicherheitsstrahlverschluss oder der Sicherheitssteuerung des externen Lasergerätes).

Generell kann festgestellt werden dass der Einsatz eines Sensors von der Bauart des HLG (Aufsatzgerät, frei geführtes Gerät) und der Anwendung bzw. den Bedingungen in der Bearbeitungszone (zu bearbeitender Werkstoff, Streustrahlung, Gasdrücke) abhängt.

Mechanische Schalter, sowie mit Einschränkungen induktive und kapazitive Sensoren, können für die Aufsatzkontrolle sinnvoll eingesetzt werden. Für freigeführte Systeme (z.B. zum Reinigen) eignen sich Ultraschallsensoren oder auch optische Sensoren, um den Abstand zum Werkstück zu überwachen. Um die Risiken durch Laserstrahlung bei unbeabsichtigten Bewegungen des HLG (wie Abrutschen, Kippen über Kante) zu mindern, können kostengünstige Lage/Neigungs-Sensoren auf Basis Mikro-Elektro-Mechanischer Systeme (MEMS) in das HLG integriert werden. Bei Verwendung von Beschleunigungssensoren ist die genaue Kenntnis der Signalverhältnisse von bestimmungsgemäßen Betrieb und vorhersehbaren Fehlerfällen erforderlich.

Mit den Ergebnissen dieser Untersuchungen stehen nunmehr Informationen und Empfehlungen über konstruktive technische Sicherheitsmaßnahmen, insbesondere im Bereich sicherheitsbezogener Teile von Steuerungen zur Minderung des Risikos durch Laserstrahlung zur Verfügung. Die Ergebnisse sollen in Form von Handlungsempfehlungen sowohl für HLG-Konstrukteure als auch Anwender verfügbar gemacht werden. Darüber hinaus ist es das Ziel bestehende Normen zur Sicherheit von HLG um informative Anhänge zu ergänzen.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der BAuA für die Bereitstellung der Mittel für die Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes F 2158.

Literatur

[1] Hennigs, C.; Meier, O.; Ostendorf, A.; Haferkamp, H. (2006) Multifunctional hand-held laser processing device, in Congress Proceedings ICALEO 06, Scottsdale, AZ, USA, p 248-254

[2] Cooper, M.; Sportum, S. (2007) The application of laser cleaning in the conservation of twelve limestone relief panels on St. George's hall. LACONA VI, 2005, in Congress Proceedings LACONA VI, publ. Springer, Berlin, Heidelberg

[3] Koss, A.; Marczak, J.; Strzelec, M. (2007) Experimental investigations and removal of encrustations from interior stone decorations of King Sigismund's Chapel at Wawel Castle in Cracow, in Congress Proceedings LACONA VI, publ. Springer, Berlin, Heidelberg

[4] Brüninghoff, H. (2002) Schicht für Schicht – Laserstrahlreinigen von Hochspannungsmasten, in Tagungsband Aachener Kolloquium für Lasertechnik, 18.-20. September 2002, Augsburg, Ed. Grütter, 2002, and in EuroLaser, No.4, 38pp.

[5] Baeger, H., Mergenthaler, D. (2006) Der Weg zur mobilen Laserbeschriftung, in Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006, Halle, Ed. SLV Halle

[6] Schmid, C., Haferkamp, H.; Goede, M., Drygalla, M., Lotz, K.U. (2000) Manually operated laser welding and cutting device, MM Industrial Magazine Western Europe, p 27-29

[7] Jasnau, U.; Schmid, C.; Lotz, K.-U.; et.al. (2006) Mobile cutting and welding with high-power fiber lasers – tractor systems with special working heads-, in Tagungsband Kolloquium Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006, Halle, Ed. SLV Halle

[8] Exner, H.; Kloetzer, S.; et.al. (2001) Hand- und maschinenführbares Laserwerkzeug zur Bearbeitung von Werkstücken, Patent DE 100 05 592 C1

[9] Barkhausen, W.; Buechter, E.; et.al. (1997) Verfahren und Vorrichtung zum handgeführten Bearbeiten von Werkstücken mittels Bestrahlung, insb. mit Laserstrahlung, patent DE 196 15 633 C1

[10] Baker, M.C.; Winchester, G. et al. (2003) Hand-held powder-fed laser fusion welding torch, patent CA 2475402 A1

[11] Rasmussen, C., Jasnau, U. (2006) Safety in the Project DockLaser, in Tagungsband Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, 2006, Halle, Ed. BGFE, Köln

[12] Puester, T.; Berend, O.; Drygalla, M.; et al. (2005) Safety requirements for hand-held laser processing devices, -current status of ISO 11553-2-, in Proceeding of the International Laser Safety Conference ILSC 2005, Marina del Rey, CA, USA, p 260-268.

[13] Puester, T.; Meier, O.; Ostendorf, A.; Beier, H.; Wenzel, D. (2007) Qualification of personal protective equipment for the use of hand-held laser processing devices, in Proceeding of the International Laser Safety Conference ILSC 2007, San Francisco, CA, USA, p 91-100.

[14] Stier, Fr. (1959) Über die Geschwindigkeit von Armbewegungen unter der besonderen Berücksichtigung der Einlegearbeit an Pressen, Dissertation TH Hannover

[15] Hauke, M.; Schaefer, M.; Apfeld, R.; Boemer, T. et.al. (2008) Functional safety of machine controls -Application of DIN EN ISO 13849-, in BGIA-Report 2/2008, Ed. DGUV, Sankt Augustin, Germany

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