

Elektrische Sicherheitssysteme für Laseranlagen

Klaus Dickmann, Laserzentrum FH Münster, Steinfurt

Für vielfältige Anwendungen in Forschung, Medizin und Materialbearbeitung wird leistungsstarke Laserstrahlung der Klasse 4 eingesetzt. Diese Klasse bedeutet höchste Gefahrenstufe und wird bei Lasern mit Wellenlängen >315 nm bereits ab 0,5 W erreicht. Zum Schutz der Anwender (Auge und Haut) sowie der Umgebung (Sachschäden und Brandgefahr) ist ein sicherer Laserbetrieb nur gewährleistet, wenn geeignete Schutzmaßnahmen getroffen werden. Organisatorische Maßnahmen und persönlicher Schutz sind nicht Bestandteil dieses Beitrags. Im Folgenden geht es um technische Schutzmaßnahmen mit dem Schwerpunkt der elektrischen Überwachung der Lasersicherheit.



Von Lasereinrichtungen der Klasse 1 geht „unter vernünftiger Weise vorhersehbaren Bedingungen“ keine Gefährdung aus. Durch geeignete technische Schutzmaßnahmen lässt sich jeder Hochleistungslaser in die sichere Klasse 1 einstufen und ist dann „inhärent eigensicher“. Dies sollte in der Praxis so weit wie möglich angestrebt werden, auch wenn dies z.B. in der „Arbeitsschutzverordnung zu optischer Strahlung (OStrV)“ und „Maschinenrichtlinie 2006/42/EG“ nicht explizit gefordert wird.

Für Hochleistungslaser in der Fertigungstechnik ist eine vollständige Einhausung der Laseranlage zum Strahlenschutz üblich (**Bild 1**). Zu den weiteren technischen Schutzmaßnahmen zählen vor allem auch eine Not-Halt-Sicherheitssteuerung¹ „NH-SIS“ (Aktivierung durch Not-Halt-Taster) sowie eine weitere autarke Sicherheitssteuerung für die Verriegelungen „V-SIS“. Eine Aktivierung der V-SIS erfolgt typisch durch Sicherheitsschalter (Interlocks) von Zugangsklappen/-Türen in der Einhausung; es können aber auch wei-

tere Signale von Lichtschranke/-zaun und evtl. Kontaktmatten zur Personendetektion bei begehbaren Großanlagen sowie Sensorsignale von aktiven Laser-Schutzfenstern und -wänden oder sogar Fehlersignale beim Lampendefekt in der Warnleuchte eingespeist werden. Es ist Aufgabe der SIS's, den Anlagenzustand zu überwachen und bei Bedienungsfehlern, technischen Störungen oder im Notfall die Strahlungsemission sicher zu unterbrechen.

Die Anforderungen an Sicherheitsverriegelungen werden in DIN EN 60825-1 [1] mit „ausfallsicher / redundant“ beschrieben (auch „Einfehlersicherheit“). Hiermit ist gemeint, dass beim Auftreten eines Fehlers in der elektrischen Sicherheitssteuerung (z.B. Verschmelzen von Relais- oder Schalterkontakten, Klemmen eines Interlocks, Querschuss, Defekt in einem Elektronikbauteil etc.) gewährleistet sein muss, dass die Sicherheitsfunktion insgesamt nicht versagt. Bei seriengefertigten Laseranlagen mit CE-Konformität muss sich der Anwender i.A. mit dieser Thematik nicht auseinandersetzen, da die Sicherheitssteuerungen hohe Ansprüche erfüllen und in Kombination mit weiteren Schutzmaßnahmen häufig die sichere Klasse 1 der Gesamtanlage erreicht wird.

In der Praxis ist es jedoch weit verbreitet, dass Laserquellen als OEM-Komponenten für den Eigenbau von Laseranlagen oder die Integration in Fertigungslinien verwendet werden. In Kombination mit o.g. Schutzmaßnahmen und elektrischer Sicherheitssteuerung erfolgt dann in vielen Fällen eine Einstufung der Einrichtung



Laserzentrum FH Münster

Bild 1: Vollständige Einhausung eines Hochleistungslasers der Klasse 4 kann in Kombination mit weiteren technischen Schutzmaßnahmen zur Laserklasse 1 der gesamten Lasereinrichtung führen

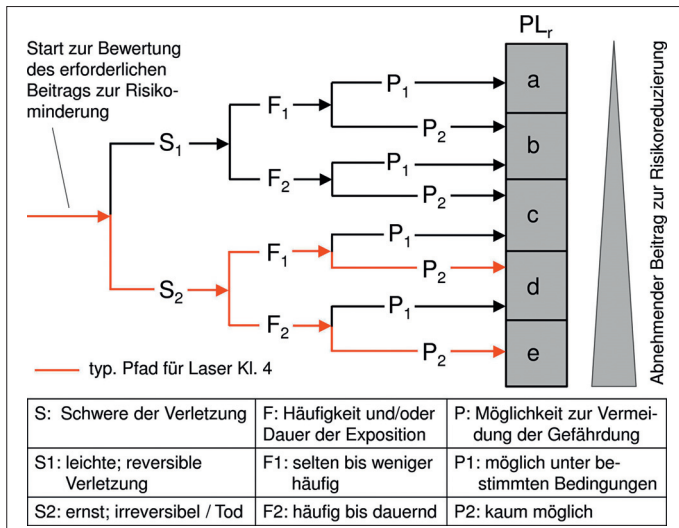


Bild 2: Risikograph nach [3]. Der erforderliche Performance-Level PL_r resultiert aus der Schwere möglicher Verletzungen, Häufigkeit und / oder Dauer der Exposition sowie Möglichkeiten zur Vermeidung der Gefährdung. In der Praxis hängt dies im Wesentlichen von der Laserleistung und -wellenlänge sowie der Anwendung ab. Für Hochleistungslaser treffen i.A. die rot dargestellten Pfade zu

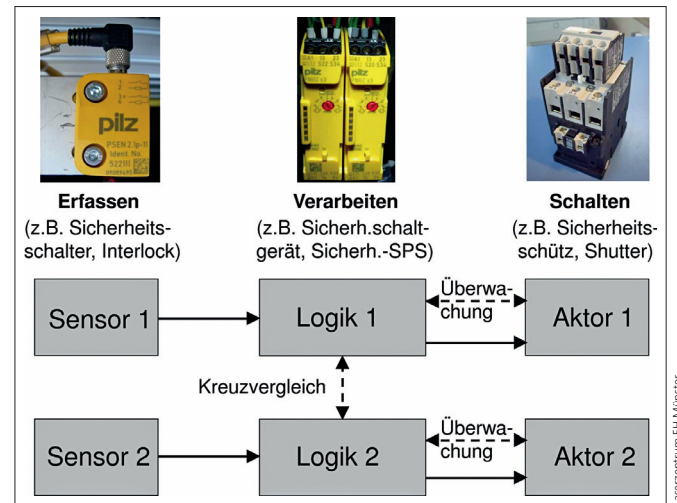


Bild 3: Architektur für Sicherheitssteuerungen [3]: gestrichelte Linien bedeuten bei Steuerungskategorie 3 „wenn in angemessener Weise technisch durchführbar“ und bei Steuerungskategorie 4 „muss in jedem Fall durchgeführt werden“. (Steuerungskategorien B, 1, 2 gemäß [3] sind für Laseranlagen i.A. nicht relevant und daher nicht dargestellt)

in Klasse 1. Nicht in allen Fällen werden jedoch tatsächlich die hohen Anforderungen an die Sicherheitssteuerung und deren Komponenten bis hin zur sicheren Lasersperre erfüllt und die Laseranlage verbleibt somit – häufig unwissentlich – in der gefährlichen Laserklasse 4.

Anforderungen an elektrische Sicherheitssteuerungen

Die Anforderungen an die Leistungsfähigkeit einer Sicherheitssteuerung ergeben sich aus den Gefährdungen, die von einer Einrichtung ausgehen. Dazu ist es in einem ersten Schritt erforderlich, die möglichen Gefahren im Rahmen einer Risikoanalyse (DIN EN ISO 12100 [2]) zu ermitteln und zu bewerten. In diesem Beitrag geht es dabei vor allem um optische Strahlung, die von Lasern der Klasse 4 ausgeht und eine potentielle Gefahr für Auge und Haut bedeutet (>5 kW auch Lebensgefahr).

In einem nächsten Schritt wird die Anforderung an die Ausfallsicherheit der SIS basierend auf den qualitativen Ergebnissen der Risikoanalyse durch eine quantitative Größe ausgedrückt. Je nach verwendeter Norm handelt es sich dabei um den "Performance-Level PL" gemäß DIN EN ISO 13849-1 [3] oder „Sicherheits-Integritäts-Level SIL“ nach DIN EN 62061 [4]. Beide Regelwerke sind zur Anwendung auf Lasereinrichtungen geeignet. In der Praxis der Lasersicherheit wird überwiegend die DIN

EN ISO 13849-1 angewendet, die auch Grundlage dieses Beitrags ist. Risiken für eine mögliche Verletzung sind gekennzeichnet durch

- S: Schwere einer möglichen Verletzung (z.B. Augenschaden, Hautverbrennung)
- F: Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition (z.B. Aufenthalt im Laserbereich)
- P: Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens (z.B. natürliche Abwendungsreaktion)

Je nach Risiko ergibt sich aus einem Risikographen (Bild 2) als Maß für das Risiko (und somit Anforderung an die Sicherheitssteuerung) ein „geforderter Performance-Level PL_r “ auf einer Skala von „a“ bis „e“. Dabei bedeutet „a“ ein sehr geringes und „e“ sehr hohes Risiko. Risikoanalysen für Lasereinrichtungen, die Hochleistungslaser der Klasse 4 verwenden, führen je nach Wellenlänge, Strahlleistung und Anwendung i.A. zu hohen PL_r -Werten von „d“ oder „e“ (siehe roter Pfad in Bild 2).

Realisierung von Sicherheitssteuerungen und erreichter Performance-Level

Der geforderte Performance-Level PL_r muss seitens der Sicherheitssteuerung mit mindestens gleichem PL-Wert erfüllt werden, d.h. $PL \geq PL_r$. Zur Realisierung gibt es dabei mehrere Möglichkeiten, sowohl was die Systemarchitektur

(„Steuerungskategorie B, 1, 2, 3, 4“) der Sicherheitssteuerung als auch die Zuverlässigkeit der verwendeten Komponenten angeht.

Eine Sicherheitssteuerung besteht im einfachsten Fall aus einem Sensor (z.B. Interlock-Schalter), Logik (z.B. Signalverarbeitung) und Aktor (z.B. Schütz, Shutter). Für höchste Sicherheitsanforderungen, d.h. PL_r „d“ oder „e“, werden die Steuerungen jedoch 2-kanalig, d.h. redundant ausgelegt (Bild 3). Dadurch ist gewährleistet, dass ein einzelner Fehler in der Sicherheitskette nicht gleichzeitig zum vollständigen Verlust der Sicherheitsfunktion führt.

Je nach Sicherheitsanforderung kann auch eine Signalführung von der letzten Komponente der Steuerungskette in die Logikeinheit sowie eine permanente Querüberwachung („Kreuzvergleich“) zwischen den redundanten Kanälen notwendig sein. Dadurch wird ein möglicher Fehler in der Sicherheitssteuerung erkannt und eine Akkumulation von Fehlern mit der Folge eines Totalausfalls der Sicherheitssteuerung kann vermieden werden. Tabelle 1 gibt für den erzielten Performance-Level a, b, c, d, e einer Sicherheitssteuerung die entsprechende „Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls pro Stunde“ an.

Der tatsächlich erreichte PL-Wert einer Sicherheitssteuerung – d.h. der vollständigen Kette vom Sensor bis zum Aktor – lässt sich ermitteln, wenn bekannt ist

Performance Level (PL)	Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde
a	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ bis $< 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$

Lasertechnik FH Münster

Tabelle 1: Zusammenhang zwischen Performance-Leveln „a“ bis „e“ einer Sicherheitssteuerung und den „Durchschnittlichen Wahrscheinlichkeiten eines gefährlichen Ausfalls je Stunde“; nach [3]

- die verwendete Architektur der Steuerung (d.h. Steuerungskategorie; typ. Kat. 3 oder 4 für Einrichtungen mit Lasern Kl. 4)
- Ausfallrate („Lebensdauer“) der verwendeten Komponenten (z.B. MTTF_d, B_{10d})
- Diagnose-Deckungsgrad DC (0–99%)
- Ausfall infolge gemeinsamer Ursache CCF (0–100 Punkte)
- Vorgesehene Einsatzdauer TM

Ausführliche Erläuterungen hierzu finden sich in DIN EN ISO 13849-1 [3] und DIN EN ISO 13849-2 [5] sowie z.B. in [6].

Das Verfahren zur Ermittlung der o.g. Parameter und die daraus resultierende Bestimmung des PL-Wertes für eine Sicherheitssteuerung ist detailliert in [3,5,6] beschrieben. Unterstützung bietet auch ein kostenloses Software-Tool SISTEMA, das in der Praxis weite Verbreitung gefunden hat [7].

Die Bestimmung eines PL-Wertes für einen Sicherheitskreis mit o.g. Parametern kann sich in der Praxis beliebig komplex gestalten. Dies ist vor allem dann der Fall, wenn Sicherheitsdaten einzelner Komponenten nicht oder nur teilweise vorliegen. Bei Verwendung bewährter marktüblicher Sicherheitskomponenten mit zertifizierten technischen Daten lassen sich jedoch Sicherheitskreise für Laseranlagen in einfachen Fällen auch mit hohem PL-Wert unproblematisch realisieren. Für Standardanwendungen gibt es auch vereinfachte Verfahren zur PL-Bestimmung, wie z.B. einen „Performance Level Calculator“ [8].

Auslegung von Sicherheitssteuerungen für Lasereinrichtungen

Die o.g. Erläuterungen sind weitestgehend allgemein gültig und gehören heute zum Stand der Sicherheitstechnik im Anlagen- und Maschinenbau. Hinsichtlich Laseranlagen ergeben sich jedoch eini-

ge Besonderheiten, die sich vor allem auf die Abschaltung des Lasers oder die Deaktivierung der Laserstrahlung durch den Aktor in der Sicherheitssteuerung beziehen. Dieser Aspekt hängt wesentlich vom verwendeten Lasertyp und dessen Leistungsklasse ab und muss individuell berücksichtigt werden. Dabei werden für Not-Halt-Sicherheitssteuerungen (NH-SIS) und Verriegelungs-Sicherheitssteuerungen (V-SIS) bei Laseranlagen unterschiedliche Konzepte angewendet.

Not-Halt-Sicherheitssteuerung

Eine NH-SIS hat die Aufgabe, eine „gefahrbringende Situation“ zu beseitigen. Bei einer Laseranlage handelt es sich dabei vor allem um optische Strahlung, die innerhalb typisch <100 ms deaktiviert oder isoliert werden muss. Je nach Ergebnis einer Gefährdungsanalyse können ggf. auch andere Gefahren dazu kommen (z.B. Quetschgefahren durch Stellteile oder Roboter, elektrische Hochspannung, toxische Excimer-Gase etc.).

Die Not-Halt-Aktivierung erfolgt bei Laseranlagen gemäß Stopp-Kategorie „1“ (nicht zu verwechseln mit den o.g. Kategorien; näheres s. IEC 60204-1 [9]). Dies bedeutet, dass nicht unmittelbar die gesamte Energiezufuhr abgeschaltet wird, sondern ein „gesteuertes Stillsetzen“ gefahrbringender Komponenten erfolgt. Für Laserbearbeitungsanlagen bedeutet dies nach DIN EN ISO 11553-1 [10] konkret:

- Laserstrahlerzeugung (z.B. Anregungsquelle) deaktivieren; Strahlfänger automatisch in den Strahlengang positionieren und
- Stromversorgung von Stellteilen abschalten (z.B. Verfahrtsch oder Roboter) und
- Laserstromversorgung abschalten; gespeicherte Energie entladen

Bei Hochleistungslasern wird die Kühlung in der Regel von diesem Abschaltvorgang ausgenommen. Je nach Gefährdungspotential kann die Abschaltung weiterer Aggregate hinzukommen (z.B. Gasventil für Excimer-Gase).

Verriegelungs-Sicherheitssteuerung

Eine V-SIS hat die Aufgabe, „Zugang zu gefährlicher Laserstrahlung (d.h. Klasse 3B, 4) zu verhindern, wenn Teile des Schutzhäuses entfernt oder geöffnet werden“ [3]. Entsprechend dieser Definition besteht ein großer Freiraum bei der technischen Umsetzung in der Praxis, der sinnvoll für unterschiedliche Lasertypen sowie Leistungsklassen genutzt werden kann:

- (1) Üblicherweise befindet sich am Ende der V-SIS ein Aktor, der den Laserstrahl

mechanisch isoliert. Dies geschieht je nach Strahlleistung durch direkte Unterbrechung des Strahlwegs mittels Strahlverschluss oder Absorption in einem ortsfesten Strahlfänger², in den die Strahlung mittels eingeschwenktem Spiegel umgelenkt wird.

- (2) Eine elektrische Abschaltung der Anregungsquelle als Alternative zur Strahlisolierung durch den Shutter stellt eine Ausnahme dar³. Dies gilt für den Fall, wenn prinzipbedingt die Integration eines Shutters in den Strahlengang technisch nicht möglich ist und die Abschaltdauer <100 ms gewährleistet ist. Dies ist z.B. bei Faserlasern der Fall, bei denen die Strahlung vom Ort der Erzeugung bis zur Bearbeitungsoptik vollständig in einer Faser geführt wird; dies trifft z.T. auch auf Hochleistungs-Diodenlaser mit gespleißter Faseran-kopplung zu. Anstelle des mechanischen Shutters tritt dann ein „elektronischer Shutter“.
- (3) Kombination aus (1) und (2)

Aktoren zur Deaktivierung der Laseremission

In allen Fällen der elektrischen Abschaltung mittels Schütz oder der Strahlisolierung durch Shutter muss der dafür zuständige Aktor die in Abschnitt 2 und 3 erläuterten Anforderungen an die Sicherheitssteuerung erfüllen:

- die optische Abschaltung erfolgt über elektro-mechanisch oder motorisch betätigte Shutter. Hierbei muss es sich um Sicherheitsshutter handeln, die sich von üblichen CNC-gesteuerten Prozessshuttern durch eine höhere Ausfallsicherheit und höhere Schließgeschwindigkeit unterscheiden. Stellen diese Komponenten ein Ausgangssignal zur Anzeige der aktuellen Shutterposition im Strahlengang zur Verfügung, so lässt sich dieses zur Erhöhung der Ausfallsicherheit in die Logikeinheit zurückführen. In Kombination mit einer redundanten Ausführung von Shuttern können so Sicherheitssteuerungen mit hohem Performance-Level

² Im Folgenden werden Strahlverschluss und -fänger zusammengefasst als „Shutter“ bezeichnet; die elektro-mechanische Einheit zur Aktivierung des Verschlusses oder Umlenkspiegels unterscheidet sich für Sicherheitsbetrachtungen nicht wesentlich.

³ Abschaltung der Stromversorgung führt nicht bei allen Lasern zwingend zur sofortigen Deaktivierung der Emission. So ist ein „Nachlaufen“ der Strahlung aufgrund von Restladung in Kondensatoren der Anregungselektronik oder im Netzteil möglich und kann bis zu mehreren Sekunden betragen, z.B. beim CO₂-Laser. Hinzu kommt, dass diese Form der Abschaltung mit zunehmender Laserleistung technisch kritisch sein kann.

aufgebaut werden⁴. Zur quantitativen Bestimmung des Performance-Levels für die gesamte SIS sind MTTF- oder B_{10d} -Werte des Sicherheitsschutters erforderlich. Nur wenige Hersteller geben diese Werte jedoch in Form minimaler Schaltzyklen an (typisch 10^5 bis 10^8). In wenigen Fällen wird ein konkreter Hinweis auf erreichbare PL-Werte gegeben (bis zu „e“ oder bis SIL 3). Häufig wird der Shutter nur qualitativ als „ausfallsicher“ bezeichnet.

- die elektrische Abschaltung erfolgt typischerweise über redundante Sicherheitsschütze, die über zwangsgeführte Kontakte verfügen. Werden diese zur Rückführung in die Logikeinheit der Sicherheitssteuerung verwendet, so kann eine Sicherheitskette mit einem hohen PL-Wert realisiert werden. Die Angabe dafür erforderlicher B_{10d} -Werte (Schaltzyklen/Lebensdauer) ist in technischen Spezifikationen für Sicherheitsschütze üblich.
- eine kombinierte elektrische + optische Abschaltung stellt eine Alternative zur seltener verwendeten redundanten Anordnung von Shuttern dar. Die Kombination aus elektrischer Abschaltung der Anregungsquelle mit gleichzeitiger mechanischer Strahlisolierung mittels Shutter wird häufiger verwendet, da sie deutlich weniger aufwendig ist. Somit ist Einfehler-Sicherheit gegeben, und die Aufteilung der Zweikanaligkeit auf zwei verschiedene Wirkprinzipien zur Strahldeaktivierung im V-SIS führt zusätzlich zu erhöhter Ausfallsicherheit.

Zusammen mit einer Signallückführung von beiden Schaltkomponenten in die Logikeinheit der Sicherheitssteuerung können so Performance-Level bis zum höchsten Wert „e“ erreicht werden.

In Sonderfällen ist es sogar (noch) möglich, eine Bewertung von Sicherheitssteuerungen für Lasereinrichtungen ohne Kenntnisse über den PL-Wert durchzuführen. Hierzu gibt es in DIN EN ISO 13849-1 (Kap. 6.2.2) [3] und DIN EN ISO 11553-1 (Kap. 5.3.3) [10] einen deutlichen Hinweis darauf, dass dies auch über die ausschließliche Angabe der Steuerungskategorie erfolgen kann (s. Abschnitt 2). Für Laserbearbeitungsanlagen resultiert dies „üblicherweise in Sicherheitskategorie 3“ [10].

Dies ist nur formal eine Alternative und sollte in der Praxis nicht realisiert werden. Diese Möglichkeit stammt noch aus der Vorgängernorm, und es ist fraglich, ob sie bei Neuauflagen Bestand haben wird.

Fazit

Elektrische Sicherheitssteuerungen stellen in vielen Lasereinrichtungen eine bedeutende technische Schutzmaßnahme dar, die sich auch maßgeblich auf die Klassifizierung auswirkt. Dies gilt z.B. für die Einhausung von Lasern der Klasse 3B und 4 mit dem Ziel, eine Laserklasse 1 für die vollständige Lasereinrichtung zu erreichen. Zugangsklappen oder -türen in der Einhausung aber auch die Not-Halt-Funktion werden von Sicherheitssteuerungen überwacht, deren Auslegung in Normen festgelegt ist. Erst wenn die darin enthaltenen Anforderungen erfüllt werden, lässt sich – ggf. in Kombination mit weiteren Schutzmaßnahmen – tatsächlich die Klasse 1 erreichen. Diese Bedeutung von Sicherheitssteuerungen wird in der Praxis häufig unterschätzt. Durch neue und aktualisierte Normen und Verordnungen zur Lasersicherheit sowie zum Arbeitsschutz hat dieser Aspekt an Bedeutung gewonnen.

Literaturhinweise:

- [1] DIN EN 60825-1 (2008-05) Sicherheit von Lasereinrichtungen – Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen
- [2] DIN EN ISO 12100 (2011-03) Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsgrundsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung
- [3] DIN EN ISO 13849-1 (2008-12) Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze
- [4] DIN EN 62061 (2013-09) Sicherheit von Maschinen – Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme
- [5] DIN EN ISO 13849-2 (2013-02) Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung
- [6] Michael Hauke et al., Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen, BGIA-Report 2/2008
- [7] Michael Huelke et al., Software-Assistent SISTEMA, Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)
- [8] Performance Level Calculator – PLC, Eine praktische Rechenscheibe zur Bestimmung des Performance-Levels gemäß EN ISO 13849, Institut für Arbeitsschutz (IFA) der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), www.dguv.de/ifa/13849, Januar 2010
- [9] IEC 60204-1 (2007-06) Sicherheit von Maschinen – Elektrische Ausrüstung von Maschinen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen
- [10] DIN EN ISO 11553-1 (2009-03) Sicherheit von Maschinen – Laserbearbeitungsmaschinen – Teil 1: Allgemeine Sicherheitsanforderungen

Ansprechpartner:

Prof. Klaus Dickmann
Laserzentrum
FH Münster (LFM)
Stegerwaldstr. 39,
D-48565 Steinfurt
Tel. 02551/962324
Fax 02551/962490
eMail:
dickmann@fh-muenster.de,
Internet:
www.lfm-online.de



Anmerkung: der Autor ist von der IHK Münster öffentlich bestellt und vereidigt als „Sachverständiger für Lasertechnik und Lasersicherheit“.

www.photonik.de ▶ Webcode 1006

⁴ Es ist prinzipiell möglich, anstelle redundanter Shutter auch nur einen einzelnen am Ende der Sicherheitskette zu verwenden, wenn dieser „ausreichend ausfallsicher“ ist. Dazu muss er im Fehlerfall (z.B. Unterbrechung der Spannungsversorgung, Defekt in der Elektromechanik) den Laserstrahl selbsttätig sicher isolieren, z.B. durch Feder- oder Gravitationskraft betätigt. Dies allein ist jedoch nicht ausreichend: weitere Bedingungen enthält ein Katalog von Konstruktionskriterien [5], die ebenfalls erfüllt sein müssen. Man kann dann für diese Komponente einen „Fehlerausschluss“ annehmen, und die Bestimmung des Gesamt-PL gestaltet sich deutlich einfacher.