

# BEDEUTUNG DER RISIKOANALYSE BEI DER KLASSIFIZIERUNG VON LASERN UND LASEREINRICHTUNGEN

## SIGNIFICANCE OF RISK ANALYSIS FOR THE CLASSIFICATION OF LASERS AND LASER SYSTEMS

K. Dickmann

Laserzentrum FH Münster (LFM), Deutschland

**Zusammenfassung:** Die Vorgehensweise bei der Klassifizierung von Lasern und Lasereinrichtungen ist in der DIN EN 60825-1 detailliert beschrieben. Dazu müssen auch Risikobetrachtungen durchgeführt werden. Diese haben in der aktuellen Version der DIN EN 60825-1 (Juli 2015) gegenüber der vorherigen Ausgabe weiter an Bedeutung gewonnen. Konkrete Verfahren zur Durchführung einer Risikobetrachtung sind jedoch nicht vorgeschrieben. So bleibt es dem Anwender überlassen, auf welche Weise er die Betrachtung durchführt. Vor allem die Abwägung, welches Risiko akzeptabel ist und welches nicht, stellt den Anwender oft vor Probleme. Hinzu kommen Begriffe wie "Einfehlersicherheit", "Redundanz" oder "Ausfallsicherheit", die bei der Anwendung in der Praxis nicht selten zu Fehlinterpretationen führen. In diesem Beitrag werden Erfahrungen aus der Praxis präsentiert und Hinweise zur Durchführung von Risikobetrachtungen gegeben.

**Summary:** The procedure for classification of lasers and laser systems is described in detail in the standard DIN EN 60825-1. For that purpose it is also necessary to undertake risk assessments. This has become increasingly important with the current edition of DIN EN 60825-1 (July 2015) in contrast to the previous edition. However, specific methods of risk assessment are not required in this standard. Thus it is up to the user how to accomplish the assessment. Often it is not quite clear for the user what is the limit of an acceptable risk. Furthermore, often the user is faced with terminologies as "single fault condition", "redundancy" or "fail-safe operation". This often leads to misinterpretations. In this paper practical experience is presented and advice concerning risk assessment in laser safety is given.

**Schlüsselwörter:** Risikoanalyse, Laserklassifizierung, FMEA, Einfehlersicherheit

**Keywords:** risk analysis, laser classification, FMEA, single fault condition

### 1. Grundlegendes zur Problemstellung

Die Durchführung einer Risikobeurteilung/-analyse zur Bewertung der Lasersicherheit ist seit langem fester Bestandteil in Richtlinien (bspw. MaschRL) und Normen (z.B. DIN EN ISO 11553-1 "Laserbearbeitungsmaschinen"). In der DIN EN ISO 12100 ("Sicherheit von Maschinen") finden sich konkrete Schritte für die Vorgehensweise (Abb. 1). Jedoch stellt sich dies für die "grundlegende Lasernorm" DIN EN 60825-1 anders dar. In der vorherigen Ausgabe dieser Norm (Ed.2, 2008/05) ist für die Klassifizierung die Berücksichtigung der

"Einfehlerbedingung"<sup>1</sup> gefordert. Lediglich in einer Anmerkung wird dazu erwähnt, dass Wahrscheinlichkeitsbetrachtungen als Hilfe verwendet werden können, um "vernünftigerweise vorhersehbaren Einfehlerbedingung" zu bestimmen. Erst in der neuesten Ausgabe der DIN EN 60825-1 (Ed.3, 07/2015) ist im Kap. 5.1 zur Ermittlung von "vernünftigerweise vorhersehbaren Einfehlerbedingungen" konkret gefordert, eine Kombination aus Fehlerwahrscheinlichkeit (Häufigkeit) und dem Verletzungsrisiko (Wahrscheinlichkeit einer Exposition, Schwere der Verletzung) zu berücksichtigen. Auf welche Weise dies durchgeführt wird, bleibt dem Hersteller überlassen. Als geeignete Verfahren zur Risikoanalyse werden jedoch die FMEA-Methode sowie IEC 61508 aufgeführt.

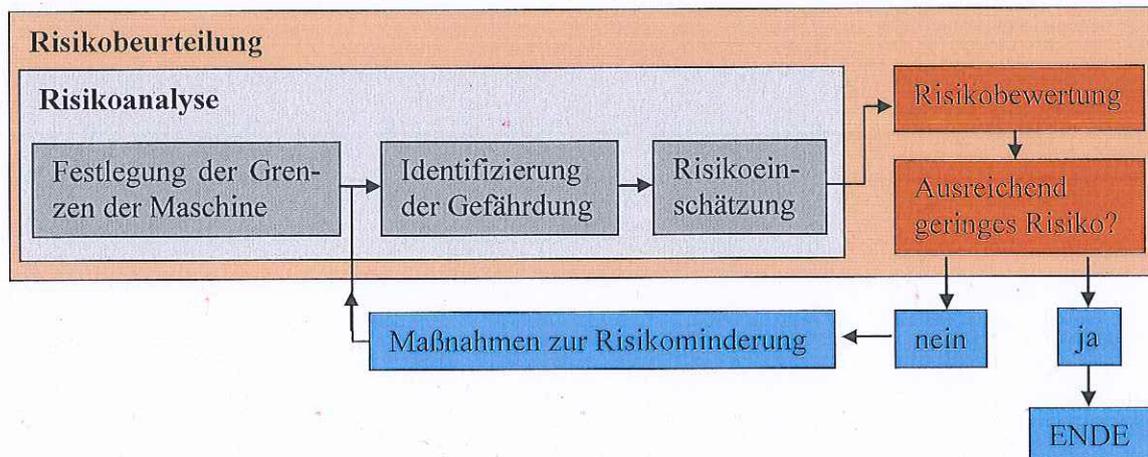


Abb. 1: Iterativer Ablauf der Risikobeurteilung gemäß DIN EN ISO 12100. Dieses Verfahren bezieht sich auf (Laser-)Maschinen, lässt sich jedoch im Wesentlichen auch auf die Klassifizierung von Lasern und Lasereinrichtungen übertragen

Die Risikobetrachtungen beziehen sich in diesem Beitrag ausschließlich auf die Klassifizierung und nicht allgemein auf die Maschinensicherheit<sup>2</sup> von bspw. Laseranlagen gem. MaschRL oder DIN EN ISO 11553-1. Dementsprechend bezieht sich im Folgenden der Begriff "Risikoanalyse" (abweichend von Abb. 1) ausschließlich auf die Identifizierung einer Gefährdung und der Einschätzung des Risikos. Weitere Hinweise zu diesem Thema mit besonderem Hinblick auf die Risikoanalyse von Lasern bis zur Klasse 3B finden sich in [1].

## 2. Repräsentative Fehlerfälle in Lasern und Lasereinrichtungen und mögliche Fehlinterpretationen bei der "Einfehlerbedingung"

Für den fehlerfreien Normalbetrieb von Lasern/Lasereinrichtungen gestaltet sich die Bewertung der Lasersicherheit i.A. weniger kritisch. Zur Klassifizierung müssen jedoch auch mögliche Fehlerfälle betrachtet und analysiert werden, die während des Normalbetriebs sowie ggf. bei der Wartung auftreten können. Die Einfehlerbedingung spielt hierbei eine entscheidende Rolle. Als Fazit der Risikoanalyse ergibt sich eine Wahrscheinlichkeit für den Fehlereintritt. Liegt diese oberhalb von akzeptablen Grenzwerten, so müssen für die Klassifizierung entsprechende Schutzmaßnahmen getroffen werden oder ggf. die Einstufung in eine dann zutreffende Laserklasse angepasst werden.

<sup>1</sup> Zitat aus DIN EN 60825-1 / 3.81 zur Einfehlerbedingung: "..... jeder einzelne Fehler, der in einer Einrichtung auftreten könnte, und die direkten Auswirkungen dieses Fehlers"

<sup>2</sup> Die Klassifizierung von Lasern und Lasereinrichtungen ist ausschließlich in der Lasernorm DIN EN 60825-1 geregelt. In der MaschRL sowie DIN EN ISO 11553-1 wird die Laserklasse 1 nicht explizit gefordert!

Im Folgenden werden repräsentative Fallbeispiele verschiedener Fehlermöglichkeiten aus den Bereichen Low-Power-Laser sowie Hochleistungslaser vorgestellt. Fehlermöglichkeiten beziehen sich auch auf die Sicherheitsverriegelung sowie Not-Halt und ggf. elektronische Überwachung der emittierten Leistung sowie Funktion der Strahlableitung mittels Scanner ("Funktionale Sicherheit").

## 2.1 Low-Power-Laser/-einrichtungen

Hierzu zählen bspw. Laserpointer, Messeinrichtungen (z.B. Entfernungsmesser, Doppleranemometer, Triangulationssensor), Patternprojektoren, Miniatur-Showlaser-Projektoren etc. im Leistungsbereich<sup>3</sup> < 500 mW. In diesen Einrichtungen werden als Strahlquellen typischerweise Diodenlaser eingesetzt, bei denen Defekte in der Ansteuerelektronik (Abb. 2) zu einer erhöhten Ausgangsleistung führen können.

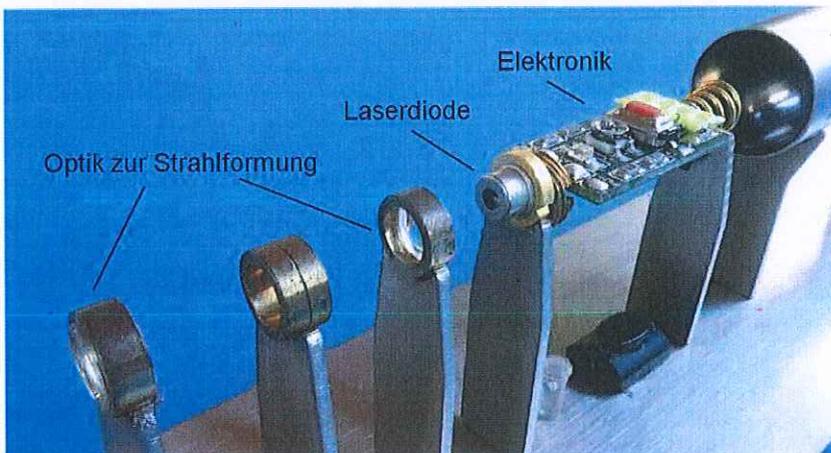


Abb. 2: Elektrische und optische Komponenten für den Betrieb eines Lasersystems mit Diodenlaser (hier: am Beispiel "Laserpointer"). Diese müssen ggf. bei der Risikoanalyse in die Einfehlerbetrachtung einbezogen werden

Ebenfalls können Fehler in der Elektronik zu einer veränderten Betriebsart vom pw- in den cw-Betrieb führen. Eine damit verbundene mögliche Auswirkung auf die Klassifizierung ist offensichtlich. Fehler in Form von dejustierten oder defekten optischen Komponenten (z.B. IR-Filter bei frequenzverdoppelter Strahlung, Linse, DOE, s. Abb. 2) aufgrund mech. äußerer Einwirkungen während des Laserbetriebs verändern die Strahleigenschaften und haben möglicherweise ebenfalls einen Einfluss auf die Laserklasse. Beispielsweise kann sich dadurch sogar die Ausdehnung der scheinbaren Quelle ("Winkel alpha") und damit der C6-Faktor ändern [2]. In Miniatur-Lasereffekt-Projektoren oder Messeinrichtungen mit Scannern können Defekte in der Elektromechanik des Scannerantriebs zum Stillstand der Strahlableitung führen. In allen aufgeführten Beispielen handelt es sich um Einfehlerereignisse, die eine veränderte Strahlungsemission zur Folge haben. Dies kann dazu führen, dass die Emission dann oberhalb des Grenzwertes zugänglicher Strahlung (GZS) liegt und die ursprünglich zugewiesene Laserklasse nicht mehr zutrifft. Aus der Erfahrung des Autors zeigt Abb. 3 einen Teil der Hochspannungselektronik eines HeNe-Lasers für den Einsatz in einem Längeninterferometer. Der erkennbare Defekt durch thermische Überlastung eines elektronischen Bauteils hat hier zu einer veränderten Laserklasse geführt.

<sup>3</sup> Eine allgemeingültige Definition für den "Low-Power-Bereich" existiert nicht. Eine Begrenzung auf < 500 mW erfolgte vom Autor ausschließlich für diesen Beitrag

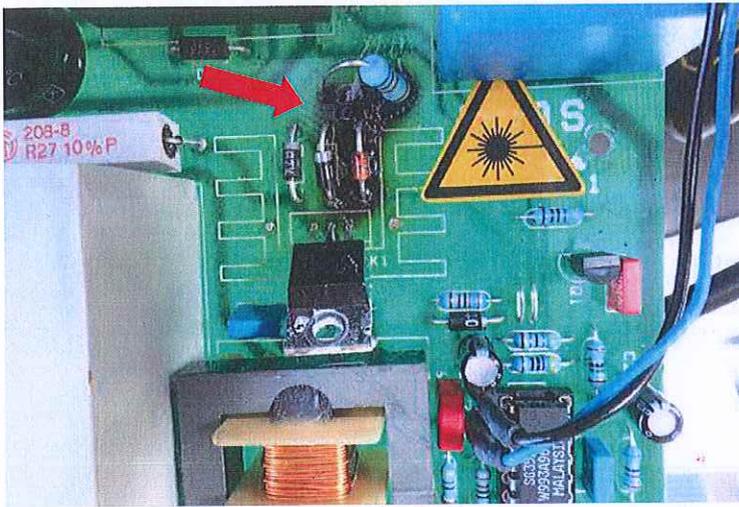


Abb. 3: Defekt im Hochspannungsteil (roter Pfeil) eines HeNe-Lasers für Längeninterferometer hat zu einer veränderten Laserklasse geführt

## 2.2 Hochleistungslaser/-einrichtungen

Klasse4 -Laser zur Materialbearbeitung sind i.A. vollständig eingehaust, oder verfügen über eine lokale Abschirmung, wie bspw. bei handgeführten Lasersystemen. Es sind auch „offene Systeme“ in Kombination mit verriegelten trennenden Schutzeinrichtungen<sup>4</sup> im Einsatz (bspw. Schutzzaun mit Zugangstür), bei denen ein Personenaufenthalt im Kl.4-Laserbereich technisch verhindert wird.

In den aufgeführten Kombinationen stellen diese Einrichtungen in ihrer Gesamtheit häufig ein Klasse1-Lasersystem dar und sind dementsprechend „inhärent eigensicher“. Typische Einfehlerbedingungen beziehen sich hierbei auf die Schutzwand und ggf. darin enthaltene Schutzfenster: Fehlprogrammierungen in der Anlagensteuerung oder Fehlpositionierung von Bauteilen unter dem Laserstrahl können zur Strahlumlenkung an gekrümmten oder geneigten Bauteilflächen in Richtung Schutzwand/-fenster führen. Möglicherweise kommt es zusätzlich nicht zur Strahlungseinkopplung am Bauteil (z.B. defokussierter Strahl) und die gesamte Leistung gelangt auf Wand/Fenster. Je nach Abstand zwischen Fokussieroptik und Wand/Fenster sowie der Strahl-Divergenz kann es dort zur Bestrahlung mit hohen Intensitäten kommen. Im worst-case kann der Fokus sogar auf der Wand/Fenster liegen (z.B. bei Remote-Laserbearbeitung mit großer Brennweite). Diese Ereignisse können dazu führen, dass es zur lokalen Zerstörung („Durchschuss“) von Wand/Fenster und in der Folge zum Austritt der Strahlung mit voller Leistung in den Außenbereich kommt. Eine Zerstörung von Wand/Fenster kann sich auch erst nach längerer Zeit einstellen, wenn es bspw. im Automatikbetrieb zur wiederholten Bestrahlung der gleichen Position auf Wand/Fenster kommt. Bei offenen Lasereinrichtungen kann dies zu einer Vergrößerung des Laserbereichs führen, der dann über den eingrenzenden Bereich durch trennende Schutzeinrichtungen hinausgeht. Neben den aufgeführten Fehlerfällen in der Laserperipherie müssen auch im Laser selbst mögliche Defekte bei der Risikoanalyse berücksichtigt werden. Dazu gehört bspw. die sichere Strahldeaktivierung mittels Shutter.

<sup>4</sup> Hierzu zählen auch „sensitive Schutzeinrichtungen“ bspw. in Form von Lichtschranken, Schalmatten, Sicherheits-Laserscanner etc., die einen Personenaufenthalt im offenen Laserbereich verhindern

### 2.3 Sicherheitsverriegelung und Automatische Emissionsreduzierung ("Funktionale Sicherheit")

Die Berücksichtigung von "vernünftigerweise vorhersehbaren Einfehlerbedingungen" bei der Klassifizierung bezieht sich auch auf die Funktionale Sicherheit (Kap. 6.3.1 / DIN EN 60825-1); siehe auch [3]. Dazu zählen bei eingehausten Lasereinrichtungen mit internem Laser > Kl. 3R typischerweise elektr. Sicherheitsverriegelungen von Zugangsklappen und -türen im Schutzgehäusen (ebenso Not-Halt!). Einzelne Fehler wie bspw. Querschlüsse, Defekte im Sicherheitsschalter etc. dürfen nicht zum Ausfall der Sicherheitsfunktion führen. Gleiches gilt auch für eine "automatische Emissionsreduzierung" (z.B. Leistungsüberwachung beim Diodenlaser, Shutter im Hochleistungslaser), deren Funktionsfähigkeit auch bei einem einzelnen Fehler gewährleistet sein muss. Ein einzelner Fehler in der Überwachung der elektromechanischen Strahlableitung ("Scanner") darf nicht zum Stillstand und evtl. damit verbundener Überschreitung des GZS-Wertes der ursprünglichen Klassifizierung führen. Einfehlersicherheit muss auch die Sensorik in aktiven Laserschutzwänden aufweisen [4], die nach dem Durchdringen von (Hochleistungs-)Laserstrahlung durch den ersten Teil einer doppelwandigen Einhausung für eine Laserdeaktivierung sorgt. Die Funktionale Sicherheit bezieht sich immer auf die vollständige Sicherheitskette, ausgehend vom Schalter bis hin zur Deaktivierung der Laseremission.

In der Praxis der Lasersicherheit besteht häufig ein Missverständnis dahingehend, dass einer der unter 2.1 / 2.2 beispielhaft aufgeführten Fehler und ein zusätzlicher weiterer Fehler in der elektr. Sicherheitssteuerung einer Zweifehlersituation entsprechen und daher nicht berücksichtigt werden müssen. Das ist jedoch i.A. nicht korrekt.

### 3. Verfahren zur Risikoanalyse und -bewertung

Für die Entscheidung, ob und ggf. in welchem Umfang Laser-Schutzmaßnahmen für eine angestrebte Klassifizierung erforderlich sind, muss eine Risikoanalyse sowie -bewertung zur Lasersicherheit durchgeführt werden. Das Vorgehen dafür unterscheidet sich in Abhängigkeit davon, ob es sich um konstruktive Schutzmaßnahmen oder um steuerungstechnische Sicherheitsmaßnahmen ("Funktionale Sicherheit") handelt.

Verfahren zur Risikoanalyse/-bewertung die speziell für die Klassifizierung von Lasern und Lasereinrichtungen konzipiert wurden sind nicht bekannt, außer für handgeführte Laserbearbeitungsgeräte [5, 6]. Somit müssen bekannte Verfahren aus anderen industriellen Anwendungen mit vergleichbarem Gefährdungspotential verwendet und ggf. adaptiert werden.

#### 3.1 Konstruktive, nicht-steuerungstechnische Sicherheitsmaßnahmen

Innerhalb der Risikobeurteilung zur Lasersicherheit eines Lasers oder einer Lasereinrichtung kann die Risikoeinschätzung und -bewertung mit unterschiedlichen quantitativen oder qualitativen Verfahren oder auch einer Kombination aus beiden erfolgen, die in der DIN EN 60825-1 nicht explizit vorgeschrieben sind. Die Beurteilung muss nicht zwingend nach einem festen Schema erfolgen, sondern kann sogar auch als Fließtext frei formuliert werden. Im Rahmen von Laser-Sicherheitsabnahmen erfolgt ggf. eine Restrisikobeurteilung.

Die quantitativen Verfahren sind im Gegensatz zu qualitativen Verfahren deutlich aufwändiger; letztere basieren z.B. auf Risikographen, -matrizes (2- bis 3-dimensional) oder Risikozahlen und werden zur Beurteilung der Lasersicherheit üblicherweise verwendet. Hierzu

werden je nach Verfahren 2 bis 5 Risikoparameter der Risikoeinschätzung verwendet, die je nach vorliegender Gefährdungsproblematik zahlenmäßig gewichtet werden. Als Ergebnis daraus erfolgt zur Bewertung des resultierenden Risikos ein Vergleich mit einer Akzeptanzgrenze innerhalb einer Risikomatrix oder es ergibt sich aus einer Verknüpfung der Risikoparameter (je nach Verfahren multiplikativ oder additiv) eine Risikozahl "RZ". Diese muss abschließend mit einer akzeptablen Risikozahl verglichen werden. Folgende Verfahren zur Risikobewertung haben sich in der Praxis der Lasersicherheit bewährt.

Häufig wird die FMEA-Methode<sup>5</sup> verwendet, bei der es sich um ein qualitatives Verfahren handelt. Die FMEA-Methode wurde ursprünglich für die Qualitätssicherung in der Luft- und Raumfahrttechnik entwickelt und fand später zunehmend weitere Anwendungen, wie bspw. in der Automobil-, Kraftwerks- und Medizintechnik. Hierbei handelt es sich um ein Verfahren, das stark subjektiven Einflüssen des Anwenders unterliegt und daher grundsätzlich in einem Team bestehend aus mehreren fachkundigen Personen durchgeführt werden soll. Die Parameter zur Risikoeinschätzung sind die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten "A" eines Fehlers, die Bedeutung/Ausmaß "B" des Fehlers und die Entdeckungswahrscheinlichkeit "E" der Fehlerfolge. Jedes der Kriterien A, B, E wird mit Bewertungszahlen von 1 bis 10 belegt: A: 1 = sehr gering/unwahrscheinlich, 10 = sehr hoch/häufig; B: 1 = sehr gering/unwesentlich, 10 = sehr hoch/katastrophal; E: 1 = sehr hoch/sicher erkennbar, 10 = sehr gering/unwahrscheinlich. Es ist offensichtlich, dass ein permanenter Augenschaden "B" durch Laserstrahlung eher "in Richtung 10" zu bewerten ist als eine Laser-Hautverbrennung. Für UV/IR-Strahlung ist der Wert für "E" sicherlich höher einzuordnen als für VIS-Strahlung. Hier wird die Subjektivität des FMEA-Verfahrens deutlich, da eine definierte Zuordnung von Bewertungszahlen zu den Größen "A", "B" und "E" für unterschiedliche Laserstrahlarten sowie angestrebte Laser-Klassifizierung nicht existiert. Diese hängt von der individuellen Gefahrensituation ab und kann nur empirisch erfolgen.

Für die FMEA-Risikobewertung erhält man schließlich für jeden möglichen Fehler eine "Risikoprioritätszahl" (RPZ). Diese ergibt sich zu  $RPZ = A \times B \times E$  und repräsentiert die Risikohöhe und kann entsprechend der obigen Definition Werte zwischen 1 und 1.000 annehmen (1: kein Risiko, 1.000: höchstes Risiko). Iterativ wird das FMEA-Verfahren innerhalb der Entwicklungsphase eines Lasers/Lasereinrichtung ggf. nach verbesserten oder zusätzlichen Schutzmaßnahmen solange fortgesetzt, bis das erreichte (Rest-)Risiko unterhalb eines "akzeptablen RPZ-Wertes" für die vorgesehene Klassifizierung liegt. In diesem Fall kann dann entsprechend DIN EN 60825-1 von „nicht vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlern“ ausgegangen werden. Es gibt jedoch für die FMEA keine allgemein gültigen Angaben für akzeptable RPZ-Werte bzgl. der Gefährdungen durch Laserstrahlung. Dies wird dem Anwender (-team) überlassen und richtet sich im Wesentlichen nach der individuellen Situation zur Lasersicherheit.

Bei der FMEA handelt es sich um ein universelles Verfahren, das weit verbreitet im Qualitäts- und Sicherheitsmanagement und der Produktentwicklung zur frühzeitigen Aufdeckung von Fehlern eingesetzt wird. Wie oben gezeigt, kann es auch für die Lasersicherheit verwendet werden. Die folgenden Verfahren konzentrieren sich jedoch konkreter auf Gefährdungsrisiken, die von technischen Einrichtungen ausgehen können und sind aus Sicht des Autors sehr gut zur Risikobeurteilung von Lasern und Lasereinrichtung geeignet.

<sup>5</sup> FMEA: Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (Failure Mode and Effect Analysis)

Die Hazard-Rating-Number-Methode "HRN" [7] verwendet über die Risikoparameter "A" und "B" der FMEA-Methode hinaus zusätzlich auch die Häufigkeit der Gefährdungsexposition "F" und die Anzahl der Personen "N", die der Gefährdung ausgesetzt sind ("E" wird nicht berücksichtigt). Die Beurteilung der einzelnen Risikoparameter erfolgt nicht mehr mit starren Bewertungszahlen 1 - 10, sondern deutlich feinteiliger abgestuft als bei der FMEA. Die Risikohöhe ergibt sich wieder aus der Multiplikation der Parameterwerte. In der Literatur [7] finden sich Angaben über akzeptable Risikohöhen. Eine Weiterentwicklung stellt die "HARMONY-Methode" dar (Hazard Rating for Machinery and prOcess iNdustrY), bei der als fünfter Risikoparameter die Entdeckungswahrscheinlichkeit "E" hinzu genommen wird [8]. Die Risikohöhe ergibt sich wiederum aus der Multiplikation. Akzeptable Werte der Risikohöhe und erstmals auch deren Verknüpfung mit PL- und SIL-Werten der funktionalen Sicherheit (s. Kap. 3.2) finden sich bspw. in [9].

### 3.2 Steuerungstechnische Sicherheitsmaßnahmen (Funktionale Sicherheit)

In der DIN EN 60825-1 findet sich unter 6.3.1 der Hinweis darauf, dass Sicherheitsverriegelungen den Anforderungen der anzuwendenden IEC-Produktsicherheitsnorm entsprechen müssen. Aber auch andere Sicherheitsfunktionen zur "automatische Emissionsreduzierung" (z.B. Shutter, fail-safe-scanner, o.g. SPY-Sensor etc.), die sicherstellen, dass ein Laser bzw. Lasereinrichtung auch im Fehlerfall in seiner Klasse verbleibt, müssen spezifische Anforderungen erfüllen (s. 5.1 in der o.g. Norm). Dies kann je nach Gefährdungspotential dazu führen, dass die Einfehlersicherheit alleine nicht mehr ausreichend ist<sup>6</sup>.

Die "Funktionale Sicherheit" bezieht sich auf elektrische, elektronische sowie programmierbare sicherheitsbezogene Systeme und hat die Aufgabe, Risiken beim Betrieb einer Einrichtung zu vermeiden oder zu reduzieren. Für Laser/Lasereinrichtungen bedeutet dies, dass Sicherheitssysteme gefahrbringende Zustände mit unzulässiger Strahlungsemission (z.B. Defekt oder Fehlfunktion von Anlagenkomponenten, Fehlbedienung) erkennen und diesem Zustand bis auf ein akzeptables Risiko entgegen wirken. Die Anforderungen an die Funktionale Sicherheit leiten sich aus einer Risikoanalyse ab. Hierzu wird in DIN EN 60825-1 explizit auf die IEC 61508 / "Safety Integrity Level (SIL)" verwiesen. Die Risikoanalyse kann jedoch auch basierend auf DIN EN ISO 13849-1 / "Performance-Level (PL)" durchgeführt werden<sup>7</sup>. Die Applikationsbereiche beider Normen haben eine große gemeinsame Schnittmenge, wobei sich in der Praxis der Lasersicherheit von beiden Normen die "PL-Norm" in Deutschland deutlich stärker durchgesetzt hat.

Entsprechend DIN EN ISO 13849-1 wird in Anhängigkeit des vorliegenden Risikos ein erforderlicher Performance-Level  $PL_r$  ("r": required) aus einem "Risikographen" ermittelt<sup>8</sup> (Abb. 4 links). Dieser muss seitens der Sicherheitssteuerung für die gesamte Kette ausgehend vom Sensor (z.B. Sicherheitsschalter einer Schutzabdeckung/-tür) bis hin zum Aktor der Laserabschaltung bzw. Strahldeaktivierung (z.B. Shutter) erfüllt werden [3]. Entsprechend dem Risikographen ergibt sich bspw. für Lasereinrichtungen zur Materialbearbeitung häufig ein PL "d", der eine "durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls der Sicherheitssteuerung pro Stunde" ( $PFH_D$ ) im Bereich  $10^{-7} h^{-1}$  bis  $10^{-6} h^{-1}$  repräsentiert (Abb. 4 rechts). In Extremfällen kann auch PL "e" mit  $PFH_D$  bis zu  $10^{-8} h^{-1}$  gefordert werden. Im Falle

<sup>6</sup> Die 2-kanalige Ausführung von Sicherheitskreisen würde die Einfehlersicherheit zwar erfüllen, jedoch könnte es nach einem unentdeckten Fehler in einem Kanal beim späteren Auftreten eines weiteren Fehlers im zweiten Kanal zu einem Totalausfall der Sicherheitsfunktion führen.

<sup>7</sup> PL- und SIL-Werte lassen sich ineinander konvertieren

<sup>8</sup> Der Performance-Level ist entsprechend des Risikos gestaffelt in "a", "b", "c", "d", "e" (Abb. 4)

von Low-Power-Lasern kann der  $PFH_D$ -Wert je nach Leistung und Wellenlänge auch deutlich unter den o.g. Werten liegen. Ein geforderter  $PL_r$ -Wert lässt sich schaltungstechnisch auf verschiedenen Wegen realisieren [z.B. 10, 11]; hierfür ist das alleinige Kriterium "Einfehler-sicherheit" nicht immer zwingend ausreichend.

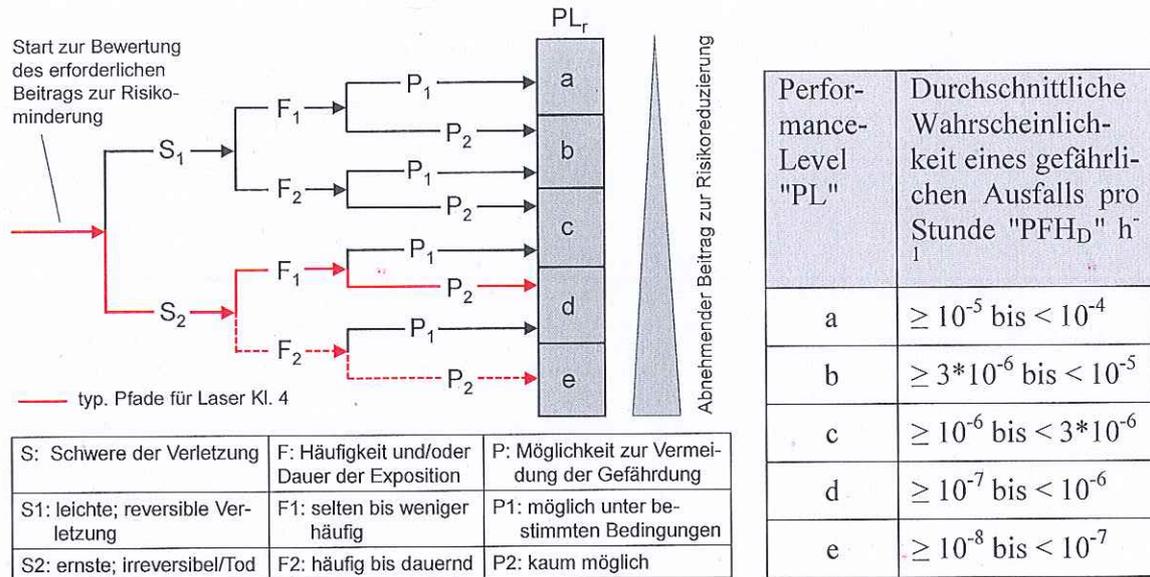


Abb. 4: Risikograph entsprechend DIN EN ISO 13849-1 zur Bestimmung des erforderlichen Performance-Levels "PL<sub>r</sub>" (links). Für Lasereinrichtungen zur Materialbearbeitung ergibt sich häufig PL "d" entsprechend dem Pfad S2, F1, P2 ("rot"); in Extremfällen ist auch PL "e" möglich ("rot gestrichelt"). Verknüpfung des PL's mit der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls pro Stunde "PFH<sub>D</sub>" der Sicherheitssteuerung (rechts).

Mit bekannten Daten aller elektronischen / elektromechanischen Komponenten der Sicherheitssteuerung ( $MTTF_D$ ,  $B_{10D}$ ), Angaben zur Nutzung (Betriebsstunden / Schaltzyklen) und der Architektur der Schaltung (Kategorie) ergibt sich mit weiteren Werten der funktionalen Sicherheit (DC, CCF)<sup>9</sup> der erreichte Gesamt- $PFH_D$ -Wert [z.B. 10, 11]. Hieraus erfolgt rechnerisch eine Zuordnung in einen erzielten PL-Wert und eine abschließende Überprüfung, ob  $PL_{erzielt} \geq PL_r$  erfüllt ist. In Abb. 4 (rechts) findet sich eine vereinfachte Zuordnung von  $PFH_D$ - und PL-Werten (ausführlich siehe DIN EN ISO 13849-1 / Anhang K).

Zur Bestimmung des erreichten Performance-Levels ("Validierung") werden verschiedene Berechnungstools auf dem Markt angeboten [z.B. 12]. Deutlich einfacher stellt sich die Validierung dar, wenn für den Sicherheitskreis Standardkomponenten (z.B. Sicherheits-schalter, Logik-Modul) als Sub-Module verwendet werden, deren PL-Werte bekannt sind und aus Datenbanken abgerufen werden können. Für den Anwender stellt sich häufig das Problem dar, dass für die Strahldeaktivierung im Laseraggregat PL-Angaben bzw.  $MTTF_D$  oder  $B_{10D}$  nicht vorliegen (typ. für OEM-Laser). In diesem Fall müssen seitens des Anwenders eigene Maßnahmen zur sicheren Abschaltung des Lasers bzw. Deaktivierung der Strahlungsemission realisiert werden. Die 2-kanalige Abschaltung der Laser-Stromversorgung mittels redundanten Schützen inkl. Signalführung der zwangsgeführten Kontakte in die Sicherheitslogik ist nicht immer sinnvoll, bspw. wenn dies bei der Lasermaterialbearbeitung mit hohen

<sup>9</sup> DC = Diagnosedeckungsgrad, CCF = Ausfälle aufgrund gemeinsamer Ursache

Produktionsraten im Takte der Öffnung/Schließung von Zugangsklappen in der Einhausung erfolgen muss. Eine Nachrüstung von OEM-Lasern im Hochleistungsbereich mit einer Strahldeaktivierung via Shutter ist mit der Anforderung nach 2-Kanaligkeit und PL "d" nicht trivial.

#### **4. Maßnahmen zur Risikominderung**

Je nach Ergebnis der ermittelten Risikobewertung (Abb. 1) müssen im Zusammenhang mit der angestrebten Laserklasse ggf. Maßnahmen zur Risikominderung getroffen werden. Diese sind grundsätzlich in der Reihenfolge (a) inhärent sichere Konstruktion, (b) technische Maßnahmen und (c) Benutzerinformationen durchzuführen.

(a) **Inhärent:** ein Fehlerauftritt muss konstruktiv ausgeschlossen sein. Beispielsweise kann dies für Laserpointer, Baulaser etc. bedeuten, dass optische Komponenten (s. Kap. 2.1) so fixiert sein müssen, dass ein Defekt durch äußere Einwirkungen mit leistungssteigernder Auswirkung "ausreichend wenig wahrscheinlich" ist. Auch lassen sich elektronische Schaltkreise zur Ansteuerung von Lasern bis zur Klasse 3B ggf. so auslegen, dass ein Bauteildefekt nicht zwingend zu einer erhöhten Strahlleistung führt. Bei eingehausten Hochleistungslasern für die Materialbearbeitung können bspw. ausreichend strahlungsbeständige Schutzwände (Material, Dicke, Wärmeleitung) oder ausreichender Abstand zwischen Ort der Bearbeitung und Schutzwand inhärenten Schutz vor "Laser-Durchschuss" bieten. Laser-Schutzfenster müssen evtl. durch massive Schutzwände ersetzt werden. Bei robotergeführter Bewegung von Hochleistungslaserstrahlung in geschlossenen Kabinen können mechanische oder softwaretechnische Begrenzungen [13] des Bewegungsraums ebenfalls inhärenten Schutz vor einem "Laser-Durchschuss" bieten.

(b) **Technisch:** ein aufgetretener Fehler wird erkannt und dem Fehlerereignis wird mit technischen Maßnahmen entgegen gewirkt. Im Low-Power-Bereich ist dies bspw. durch optoelektronische Überwachung der Ausgangsleistung und Abschaltung im Fehlerfall möglich [z.B. 14]. Im Laser-Hochleistungsbereich zählen dazu bspw. trennende Schutzeinrichtung (d.h. Schutzgehäuse, Einhausung) mit Zugangstüren/-klappen und Sicherheitschaltern. Es sind auch nicht-trennende Schutzeinrichtungen möglich, die in Form von Lichtgittern, Trittmatten oder Scannern die Personenanwesenheit im Laserbereich detektieren. Weiterhin zählen zu technischen Schutzmaßnahmen auch eine automatische Begrenzung der Laser-Ein-Zeit sowie doppelwandige Schutzwände mit integrierter Überwachung [4]. Alle hier aufgeführten technischen Maßnahmen müssen eine ausreichende Einfehlersicherheit aufweisen. Dies bedeutet üblicherweise, dass die o.g. Anforderungen an die Funktionale Sicherheit (PL) erfüllt sein müssen und bei Aktivierung eine sichere Deaktivierung der Laseremission erfolgt.

(c) **Benutzerinformationen:** diese sind erforderlich, wenn inhärente und/oder technische Maßnahmen zur Risikominderung nicht ausreichend sind, technisch nicht möglich sind oder wenn sie ergänzende Sicherheitshinweise liefern. Die Informationen müssen durch Laserwarn- und Hinweisschilder vermittelt werden und ggf. in der Betriebsanleitung ergänzt werden.

#### **5. Fazit**

Die Durchführung einer Risikoanalyse bei der Klassifizierung von Lasern und Lasereinrichtungen hat nicht zuletzt durch die aktuelle Ausgabe der DIN EN 60825-1 (Ed.3, 07/2015) an

Bedeutung gewonnen. Auf welche Weise diese durchgeführt wird, bleibt dem Anwender überlassen. Ein konkretes Verfahren ist in dieser Norm nicht bindend vorgeschrieben. In diesem Beitrag wurde an Fallbeispielen aufgezeigt, welche Sicherheitsaspekte bei der Risikoanalyse von Lasern/Lasereinrichtungen berücksichtigt werden müssen. Es wurden konkrete Verfahren zur Analyse vorgestellt, die in anderen technischen Bereichen entwickelt wurden, aber auch für die Anwendung bei der Laser-Klassifizierung geeignet sind.

## 6. Literaturverzeichnis

- [1] Schulmeister, K.: Risk analysis relevant for laser products under IEC 60825, Proceedings of the International Laser Safety Conference (ILSC), March 18-21 2013, Orlando/Florida, p. 163 - 172
- [2] Dickmann, K.: Berücksichtigung des C6-Faktors ("scheinbare Quelle") bei der Laser-Klassifizierung, Laser Magazin 1(2018), p. 20 - 21
- [3] Dickmann, K.: Elektrische Sicherheitssysteme für Lasieranlagen, Photonik 1(2014), p. 44 - 47
- [4] LASER-SPY - Aktive Sensorik für die Lasersicherheit, Handbuch und Betriebsanleitung/Version 2.5, Reis Lasertec GmbH,  
Internet: <http://www.reislasertec.de/de/produkte/lasersicherheitstechnik/laserspy--safety-sensor> , zuletzt aufgerufen am 02.05.2018
- [5] Sicherheit von Maschinen - Laserbearbeitungsmaschinen - Teil 2: Sicherheitsanforderungen an handgeführte Laserbearbeitungsgeräte, DIN EN ISO 11553-2 :2009-03
- [6] Sicherheit bei der Laserstrahl-Handbearbeitung, Workshop 29./30.11.2006 SLV Halle, Monographie Nr. M 13 (1-15-11-06-5), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin (BAuA Dortmund)
- [7] Salzmann, G.: Hazard Rating Number (HRN) zur Bewertung von Gefährdungen an Maschinen, SAPA Extrusion Nenzing GmbH,  
Internet: [http://www.ivss-chemie.de/download/achema\\_2015/09\\_gerhard-salzmann.pdf](http://www.ivss-chemie.de/download/achema_2015/09_gerhard-salzmann.pdf)  
zuletzt aufgerufen am 02.05.2018
- [8] Risikobeurteilung mit HARMONY; Sicherheitsingenieur 09(2016),  
Internet: <https://www.sifa-sibe.de/fachbeitraege/risikobeurteilung-mit-harmony/>  
zuletzt aufgerufen am 02.05.2018
- [9] Risiko-Beurteilung in HARMONY ("White Paper", Leuze electronic GmbH + Co. KG),  
Internet: [http://www.leuze.com/media/assets/whitepaper/WP\\_Risikobeurteilung\\_de.pdf](http://www.leuze.com/media/assets/whitepaper/WP_Risikobeurteilung_de.pdf)  
zuletzt aufgerufen am 02.05.2018
- [10] Einführung in die Bestimmung des Performance Level nach EN ISO 13849-1:2015, Prüfstellen-Info 926, DGUV Test, Bi/Gh,20.05.2016
- [11] Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen - Anwendungen der DIN EN ISO 13849 - DGUV, IFA Report 2/2017

- [12] SISTEMA - Softwareassistent zur Bewertung von sicherheitsbezogenen Maschinensteuerungen, IFA Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV), Internet-Download:  
<http://www.dguv.de/ifa/praxishilfen/praxishilfen-maschinenschutz/software-sistema/index.jsp> , zuletzt aufgerufen am 09.05.2018
- [13] SafeMove2 - Bediener schützen und Robotersicherheit verbessern, Datenblatt ABB Automation GmbH, ROBOSM2\_R2Juni2017
- [14] Fail-Safe Laser Diode Driver for CW and Pulse Operation up to 155 MHz, Typ iC-NZ, Datenblatt iC-Haus GmbH, Rev B2, p. 1 - 20



## Fachverband für Strahlenschutz e. V.

Mitgliedsgesellschaft der  
International Radiation  
Protection Association  
(IRPA)  
für Deutschland  
und die Schweiz

Publikationsreihe  
FORTSCHRITTE  
IM STRAHLENSCHUTZ

Publication Series  
PROGRESS IN RADIATION

# NIR 2018

## NIR 2018: WELLEN – STRAHLUNG – FELDER

**50. Jahrestagung des  
Fachverbandes für Strahlenschutz e. V.  
für Deutschland und die Schweiz  
gemeinsam mit der  
BG ETEM Berufsgenossenschaft  
Energie Textil Elektro  
Medienerzeugnisse**

**3. bis 6. September 2018  
Dresden**



Bandherausgeber:  
Hans-Dieter Reidenbach  
Martin Brose  
Stephan Joosten