Anlagensicherheitskonzepte für Hochleistungslaser der neuesten Generation

Zwischenstand des Forschungsprojektes zum November 2009

Die Thematik der Lasersicherheit ist bei Lasermaterialbearbeitungszentren brisant. Vor allem im Hinblick auf die rasante Entwicklung neuer und immer stärkerer Laserstrahlquellen stößt die aktuelle Sicherheitstechnologie an ihre Grenzen. In einem vom Deutschen Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V. (DVS) geförderten Forschungsvorhaben werden am *iwb* neue Konzepte und Lösungswege für die Anlagensicherheit von Lasermaterialbearbeitungszentren entwickelt.

Motivation

Neue Laserstrahlquellen, wie Faser- und Scheibenlaser, ermöglichen innovative Laserstrahlfertigungsverfahren für die wirtschaftliche Großserienfertigung. Sie emittieren im Vergleich zu den konventionellen Laserstrahlquellen sehr brillante, kaum divergente sowie noch in großen Entfernungen fokussierbare Laserstrahlung [1]. Gleichzeitig weisen sie sehr hohe Strahlleistungen im Bereich zwischen 10 kW für Grundmode Laserstrahlung und bis zu 100 kW für Multimode Strahlung auf [2]. Die Laserstrahlung wird dabei mit Hilfe von flexiblen Lichtwellenleitern von der Laserstrahlquelle zur Laseroptik geleitet. In vielen Fällen wird die Laseroptik mit Hilfe von Robotern bewegt. Hierbei wird eine räumlich freie Orientierung dieser Optik ermöglicht. Im Vergleich zu konventionellen Systemen sind die erreichbaren Arbeitsabstände sehr groß. Durch sie können mit kleinen Winkeländerungen der Optik große Strecken überstrichen werden und somit hohe Fertigungsgeschwindigkeiten erzielt werden [3].

Diese Neuerungen bringen neben vielen Vorteilen, wie hohe Flexibilität in der räumlichen Bearbeitung und hohe Fertigungsgeschwindigkeiten, auch Risiken mit sich. Vor allem im Hinblick auf die flexible Bearbeitung mit Robotersystemen kann die Gefahr einer Fehlpositionierung des Laserstrahls auf die Schutzwand nicht ausgeschlossen werden. Konventionell werden Laserschutzwände passiv ausgeführt. Sie bestehen aus einem Opfermaterial, welches bei Laserstrahleinwirkung die eingebrachte Energie absorbiert und dabei abgebaut wird. Solche Schutzwände bestehen typischerweise aus steinartigen Baustoffen oder doppelwandigen Metallelementen. Die Laserstrahlungseinwirkung auf die Schutzwand ist bei kleinen Laserstrahlspotdurchmessern und hohen Leistungen kritisch, da der Laserstrahl das Material aufschmilzt und durchbohrt.

Vor allem die Gefährdungen durch Fehlpositionierung des Lasers, Gefährdung durch starke Streustrahlung und die Gefährdung des Laserstrahlaustritts wegen Schutzwanddurchbruch überfordern die bestehende Sicherheitstechnologie, weshalb neuartige Sicherheitskonzepte und Technologien dringend untersucht und weiterentwickelt werden müssen.

Sicherheitskonzepte

Nach [4], bieten Anlagen optimalen Schutz vor Laserstrahlung, bei der auch die Nutzstrahlung allseitig und lückenlos von einem Schutzgehäuse umschlossen wird, also eine Lasereinrichtung der Klasse 1. Diese Einhausung kann aktiv oder passiv ausgeführt sein. Aktive Systeme können im Notfall selbst über den Not-Aus-Kreis die Anlage stillsetzen, wohingegen passive Systeme den Laserstrahl über eine möglichst lange Zeit hindern, die Einhausung zu verlassen. Um eine Anlage wirtschaftlich auszulegen sind die Fähigkeiten und Grenzen passiver Schutzwände von Bedeutung. Es muss abgeschätzt werden, ob für eine

Anlage passive oder aktive Lasersicherheitsmaßnahmen wirtschaftlich sind. Derzeitig können mit passiven Systemen, sofern sie die Lasersicherheit gewährleisten, wahrscheinlich preisgünstigere Lösungen erzielt werden.

Im Folgenden werden Forschungsarbeiten zu beiden Sicherheitssystemen vorgestellt.

Passive Schutzeigenschaften verschiedener Materialien gegen Laserstrahlung

Es wurden verschiedene Materialien mit einem Faserlaser im Fokus und fokusnahen Bereich bestrahlt. Der Test entsprach der Belastung bei einer Havarie einer modernen Laserschweißanlage. Die verschiedenen Proben können in die Kategorien Keramiken, steinartige Stoffgemische und Metalle aufgeteilt werden.

Industriell gefertigte Keramiken erreichen sehr hohe Schmelztemperaturen. Beim Laserstrahlbeschuss hielten Sie dem Strahl jedoch kaum Stand. Der geringe Wärmetransport im Material sorgt für eine schlagartige Erhitzung des bestrahlten Bereichs und somit zu einem sehr großen Temperaturgradienten. Dies lässt die spröde Werkstoffart bereits bei geringen Laserleistungen nach wenigen Sekunden an der bestrahlten Stelle degradieren oder ganz zerspringen (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Technische Keramik nach Beschussversuch; Material: Crystar® 2000 (RSiC); Dicke: 1 cm; üblicher Einsatzort: Brennöfen; Einsatz freigegeben bis 1600° C; Laserleistung: 1 kW; Bestrahlung im Fokus; d_F = 600 µm; Standzeit: zersprungen nach 13 s;

Steinartige Stoffgemische wie Beton-, Schamotte- oder Kalksandstein halten dem Laserstrahl bei moderaten Laserleistungen relativ lange stand (vgl. Abbildung 2). Der Laserstrahl schmilzt den Stein auf. Die zähflüssige Schmelze fließt aus dem Einschussloch und behindert den Strahl am durchdringen. Bei höheren Laserleistungen fällt die Standzeit rapide ab. Das abgetragene Material tritt dampfförmig und sehr schnell aus. Hier bieten die steinartigen Stoffgemische, je nach Art und Dicke, nur noch im Sekundenbereich Schutz.

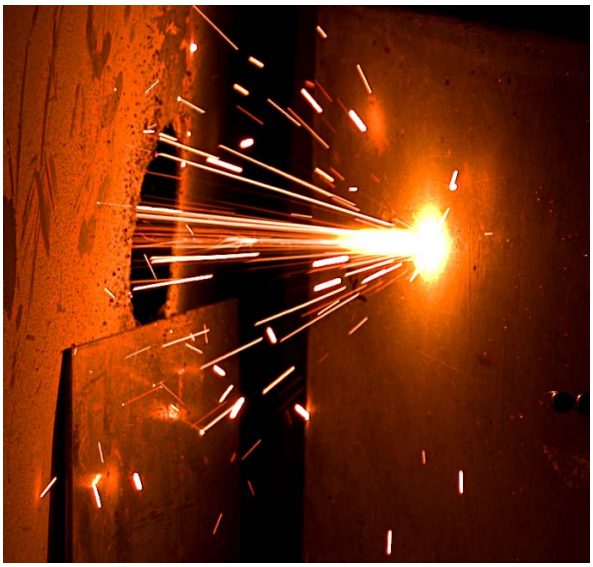

Abbildung 2: Betonstein während Beschussversuch; Material: C45/55XC1; Dicke: 16 cm; Bestrahlung im Fokus; Standzeiten bei bis zu 2 kW über 100 s, bei bis zu 4 kW über 90 s;

Bei den Schutzwänden aus Metall wurden verschiede Varianten aus Aluminium (vgl. Abbildung 3) und Stahl in verschiedenen Hohlkammerbauarten untersucht. Im Allgemeinen steigt die Standzeit mit der Materialdicke und dem Abstand der Metallplatten. Die Schutzwände aus Stahl zeigten nur für sehr geringe Laserleistungen Schutzwirkung. Aluminiumschutzwände zeigten in den Versuchen

eine sehr starke Streuung der Standzeiten. Üblicherweise wird bei Sicherheitsbauteilen eine Zuverlässigkeit von 99,9 % gefordert. Nimmt man eine Gaußverteilung der Standzeiten an, so liegt die Standzeit mit der Zuverlässigkeit 99,9 % bei dem Standzeitmittelwert minus der dreifachen Standardabweichung. Betrachtet man die Aluminiumschutzwände mit dieser statistischen Methode, so sind sie ebenfalls nur für sehr geringe Laserleistungen zulässig.

Abbildung 3: Durchbruch des Laserstrahls durch eine Aluminiumhohlkammerwand; Wandstärken 2 mm; Abstand 20 mm; Laserleistung 2 kW; d_F = 600 µm; erreichte Standzeiten im Mittelwert 85 s; Standzeitabweichung ±18 s;

Nach den Erkenntnissen der Beschussversuche, bedingen folgende Eigenschaften des Schutzwandmaterials positive Laserschutzeigenschaften:

- **Hohe Schmelz- und Siedetemperatur:** Je heißer die bestrahlte Stelle wird, umso mehr Energie kann sie durch Strahlung wieder abgeben. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz ist die abgestrahlte Leistung direkt proportional zur vierten Potenz der Temperatur [5].
- **Hohe Wärmeleitung:** Ein schneller Abtransport von Wärme in das Material verhindert einen Wärmestau am bestrahlten Punkt und dessen Überhitzung.
- **Zähflüssige Schmelze:** Die Schmelze sollte möglichst lange in der durch den Laserstrahl angegriffenen Zone verbleiben und ihm somit weiterhin Widerstand bieten. Dünnflüssige Schmelze fließt leichter weg und führt zur schnellen Lochbildung.
- **Zähigkeit:** Bei der sehr schnellen Aufheizung des Materials durch den Laserstrahl treten Spannungen durch Wärmeausdehnung auf. Bei spröden, also nicht zähen Materialien, führen diese zu Rissen oder zum Bersten des Materials (vgl. Abbildung 1).

Stand der Technik aktiver Lasersicherheitsmaßnahmen

Lasersicherheitsmaßnahmen können in wandbasierte und nicht wandbasierte Systeme eingeteilt werden [6].

Der Laser-Spy von Reis Robotics wird als wandbasiertes System in Hohlkammerwände eingebaut. Durchdringt ein Laserstrahl die ihm zugewandte Seite der Hohlkammerwand, so reagiert der Lasersicherheitssensor auf die Laserstrahlung in der Kammer [7].

Ein weiteres wandbasiertes System wurde vom Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik aus Dresden vorgestellt. Hier bildet die Schutzwand einen großflächigen Heißleiterwiderstand. Durch den Wärmeintrag beim Laserstrahlbeschuss auf die Wand tritt eine Änderung des elektrischen Widerstands auf [8].

Der EDAG Vision Inspector (EVI) ist ein nicht wandbasiertes System. Es beobachtet das Werkstück mit Kameras an der Bearbeitungsstelle. Wird das Werkstück bestrahlt, so muss der Laserprozess im Sichtfeld der Kameras erkennbar sein. Ist dies bei Laseremission nicht der Fall, wertet eine Logik dies als Fehlerfall [9].

Alle Sicherheitssysteme aktivieren im Fehlerfall den Not-Aus oder unterbrechen den Sicherheitskreis. Die Laseremission wird gestoppt.

Aktive Laserspotüberwachung

Der Laserstrahl ist nur dort gefährlich, wo er auftrifft. Wo im Raum sich der Laserspot befindet, kann mit einer Sensorik über eine Logik ausgewertet werden. Sollte sich der Laserspot nicht im erlaubten Bereich befinden, ist das System im Fehlerzustand [6].

Systemüberblick

An der Laseroptik werden zwei Kameras befestigt (siehe Abbildung 4). Sie beobachten den Laserauftreffpunkt unter einem geringen Winkel, sodass ihr Blickfeld möglichst nicht durch Hinterschneidungen eingeschränkt wird. Die Positionsgeber des Roboters liefern die dreidimensionale Position des Stereokamerasystems im Raum. Diese Informationen fließen in die Logikeinheit des Sicherheitssystems. Sie wertet die Daten aus und löst im Notfall den Not-Aus an der Laserstrahlquelle und am Roboter aus.

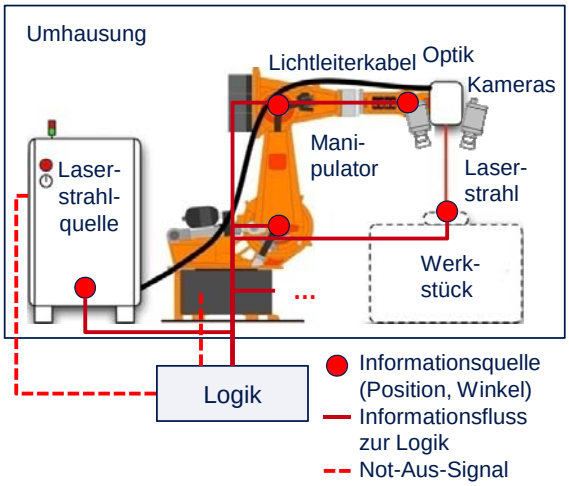

Abbildung 4: Systemüberblick des Sicherheitssystems

Stereosehen

Mit einem Stereokamerasystem ist es möglich, 3D-Informationen von Objekten zu erhalten. Die wichtigsten Anforderungen an die Stereobilder sind, dass sie zur gleichen Zeit und von verschiedenen Positionen aufgenommen werden [10]. Idealisiert ist das aufgenommene Objekt ein Punkt in der Umgebung (P_w) (Abbildung 5). Die Sehstrahlen von diesem Punkt durch das jeweilige Objektiv bilden P_w auf den beiden Bildpunkten P_1 und P_2 ab. In umgekehrter Abfolge lässt sich dieser geometrische Zusammenhang, die Triangulation, zur Bestimmung des Punktes im Weltkoordinatensystem verwenden.

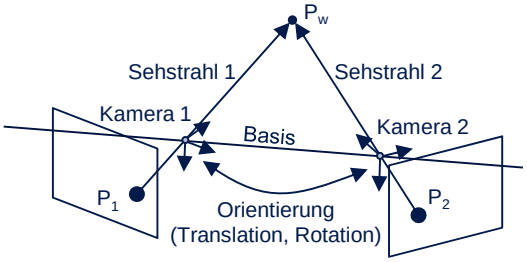

Abbildung 5: Theorie der Triangulation mit Maschinenkameras

Im Fall der Laserspotüberwachung müssen die Bilder der beiden Kameras ausgewertet werden und die jeweiligen Abbilder des Laserspots in Pixelkoordinaten berechnet werden. Hierzu wird aus jedem Bild der Laserspot mit einer Differenzbildmethode und einer anschließenden Schwellwertoperation gesucht. Der Flächenschwerpunkt der somit segmentierten Region bildet die jeweiligen Pixelkoordinaten ab. Sie werden für die Triangulation verwendet.

Systemkalibrierung

Für genaue Messungen mit Kamerasystemen, muss der Aufbau kalibriert werden. In diesem Fall sind drei Kalibrierungen auszuführen. Sie korrigieren Fehler in den Objektiven der Kameras und legen die Rotation und die Translation der Kameras zueinander und in Bezug auf den Roboterflansch fest. Alle Kalibrierungsarten erfolgen automatisiert mit Standardalgorithmen der industriellen Bildverarbeitung.

Berechnung der Laserspotkoordinate und Fehlerabfrage

Mit Hilfe einer geschlossenen Vektorkette (Abbildung 6) kann die Position des Laserspots (V_1) bezüglich eines Basiskoordinatensystems berechnet werden. Die einzelnen Vektoren sind:

- Basis zu Roboterhand (V_2): Wird bei jeder Roboterbewegung verändert.
- Roboterflansch zu Kamerakoordinatensystem (V_3): Dieser Vektor wird bei der Systemkalibrierung errechnet und ist während des Betriebs konstant.
- Kamerakoordinatensystem zu Laserspot (V_4): Wird über den Bildverarbeitungsalgorithmus bestimmt.

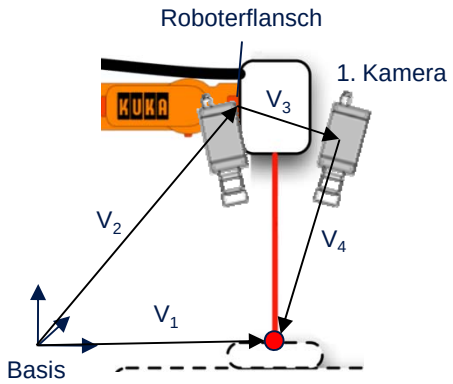

Abbildung 6: Berechnung der Laserspot Koordinate mit geschlossener Vektorkette

Die errechnete Laserspotkoordinate wird mit einem Sollkoordinatenbereich abgeglichen. Liegt der Punkt innerhalb, so ist es eine erlaubte Position, liegt er außerhalb, so wird die Anlage in Not-Aus versetzt.

Ausblick – aktive Laserspotüberwachung für Scanneranwendungen

Moderne Laserschweißanlagen arbeiten beispielsweise mit an Robotern angebauten Scannern [11]. Die Strahlleistungen liegen im Multikilowatt-Bereich, wobei die Brennweiten bis zu mehrere Meter lang sind. Diese scannergestützten Remote-Laseranlagen können den Laserspot sehr schnell durch Strahlablenkung bewegen.

Die kamerabasierte Laserspotüberwachung soll für Lasersysteme mit Scannern aufgebaut werden. Hier liegen die Herausforderungen besonders in der schnellen und sicheren Erkennung des Laserspots. Ein möglicher Ansatz ist hier die Änderung der logischen Sicherheitsabfrage zu: „Ist die Soll-Schweißposition im erlaubten Raum und kann der Laserspot in diesem Volumenelement erkannt werden?“ Durch geometrische Beziehungen kann der Suchbereich wesentlich verkleinert werden, was die Performanz deutlich erhöht.

Für die Einrichtung und Kalibrierung des Systems können ebenfalls bereits bestehende Algorithmen der industriellen Bildverarbeitung benützt werden. Die sicherheitskritischen Systemfunktionen sollen auf Mikrocontrollern ausgeführt werden. Ihre Funktion muss deterministisch erfolgen, um die Sicherheit zu garantieren.

Stefan Braunreuther

Literaturverzeichnis

[1] Zäh, M. F.; Braunreuther, S.; Oefele, F.; Trautmann, A.: Sicurezza laser: un problema o un'opportunità? 22 11/12 2008, S. 50-53.

[2] Thieme, J.: Strahlqualität - der Schlüssel zu neuen Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung. Münchener Kolloquium 2008, S. 301–311.

[3] Oefele, F.; Munzert, U.; Zaeh, M. F.: Robot based Remote-Laser-Welding without Scanner Optics. LIM 2007.

[4] BGV B2 - Unfallverhütungsvorschrift Laserstrahlung. Köln,: Berufsgenossenschaft der Feinmechanik und Elektrotechnik 2007.

[5] Franek, J.; Heberer, E. M.: Lasersicherheit durch Wärmeleitung.

[6] Zaeh, M. F.; Braunreuther, S.; Krug, S.: Systematic development of safe high performance laser applications. LIM 2009.

[7] Kroth, E.: Robot Supported Laser System Technology - Laser Safety. Laser Technik Journal 3/2008, S. 35.

[8] Kuehn, S.; Hannweber, J.; Brenner, Berndt; Beyer, E.: A Novel Active Laser Safety Shield. ICALEO 2008.

[9] Heberer, E. M.: Laser on Time as Safety or Only a Part of Safety? ILSC 2009.

[10] MVTec GmbH: Solution Guide II-F. 2007.

[11] COMAU ROBOTICS: Smart Laser. Turin: Graf Art 2008.