

Abschlussbericht zum Vorhaben
„Sicherheit Hochleistungslaser“
(617.0 – FP331)

Laufzeit

01.03.2014 – 31.05.2017

Bericht vom 15.07.2017

Autor

Florian P. Lugauer

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung deutsch

Kurzfassung englisch

1. Problemstellung

2. Forschungszweck/-ziel

3. Methodik

4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

5. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

7. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

8. Anhang/Anhänge

9. Literatur

Kurzfassung deutsch

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, eine innovative Lasersicherheitslösung zu realisieren, die neben einer erhöhten Sicherheit auch einen Wirtschaftlichkeitsvorteil gegenüber konventionellen Systemen aufweist und eine sichere Bedienung erlaubt. Dazu wurde im Rahmen des Projekts das Funktionsmuster eines zentralen aktiven Lasersicherheitsystems erstellt. Dieses basiert auf einer optischen Überwachung der Prozesszone durch eine oder zwei Kameras und eine softwarebasierte Auswertung. Nach eingehenden Vorversuchen mit Hilfe eines Funktionsmusters wurde das System zunächst an eine industrielle Laseranlage mit Festoptik adaptiert. Im weiteren Projektverlauf erfolgte nach einer entsprechenden Anpassung der Einsatz mit einer Scanoptik. Mit allen drei Aufbauten wurden Untersuchungen bezüglich der Komponentenspezifikation, der Softwarefunktionalität und der nötigen Parametereinstellungen durchgeführt.

Basierend auf den daraus gewonnenen Erkenntnissen wurde eine Spezifikation formuliert, um von einem externen Unternehmen ein gleichwertiges System mit einer Funktionalen Sicherheit mit Performance Level c erstellen zu lassen. Diese Entwicklung wurde bis zur Umsetzung begleitet und final auf einer industriellen Laseranlage der Forschungsstelle implementiert und getestet. Damit steht aktuell ein zentrales aktives Lasersicherheitsystem mit einer sicherheitsgerechten Architektur zur Verfügung.

Kurzfassung englisch

The aim of this research project is to realize an innovative laser safety system, which provides improved safety, economic benefit and safe handling. Therefore a functional model of a central active laser safety unit was created. It is based on optical monitoring of the process area by the aid of one or two cameras. After a detailed test the system was adapted to an industrial laser system with fixed and deflection optics. With all three systems examinations concerning necessary components, software functionality and needful parameter settings were executed.

Based on the experiences gained from these investigations, a specification was formulated for the establishment of an equivalent system with a functional safety of performance level c by an external company. This development was accompanied until the system was realized. Subsequently, the safety unit was implemented into the industrial laser system and tested. Thus, a central active laser safety unit with an architecture, which meets the aspects of functional safety, is now available.

1. Problemstellung

Die wirtschaftliche Fertigung qualitativ hochwertiger Produkte erfordert leistungsfähige Bearbeitungstechnologien [1]. Laserstrahlanlagen zur Materialbearbeitung werden aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften, wie z. B. der hohen Prozessgeschwindigkeit und der präzisen Energieeinbringung, verstärkt in der industriellen Massenfertigung eingesetzt. Der technologische Fortschritt in der Laserfertigungstechnologie zeichnet sich sowohl durch stetig höhere Laserleistungen als auch durch verbesserte Strahlqualitäten aus [2; 3]. Diese Weiterentwicklungen ermöglichen große Arbeitsabstände und somit die Übertragung hoher Laserstrahlungsintensitäten über weite Entfernungen im Freistrahl. Arbeitsabstände im Bereich mehrerer Meter bei maximalen Laserleistungen von 30 kW und mehr bei gleichzeitiger Fokussierung der Laserstrahlung auf einige zehn bis wenige hundert Mikrometer im Durchmesser sind heute möglich. Ihren Einsatzort finden derartige Remote-Laserstrahl-Materialbearbeitungsanlagen zumeist in der Verarbeitung von Blechen. Die Spanne reicht von Dünnblechen für die Herstellung von Konsumgütern und Automobilen bis hin zu Dickblechen im Schiffbau und im Schienenfahrzeugbau. Ebenfalls hält der Laserstrahl als Bearbeitungswerkzeug stetig größeren Einzug in die Luftfahrzeugindustrie.

Bei der Konzeption und Entwicklung der dafür nötigen Laser-Materialbearbeitungsanlagen avanciert die Thematik der Lasersicherheit zu einer Kernproblematik. Die wesentliche Lasersicherheitsmaßnahme bei Lasersystemen in der Materialbearbeitung ist eine Umhausung, wie sie in der OstrV [4] und den Normen [5-8] für solche Klasse-4-Systeme vorgeschrieben ist. Sie soll den Anlagenbediener¹ und Dritte vor der Laserstrahlung der Anlage schützen.

In einem Fehlerfall, beispielsweise hervorgerufen durch einen Softwarefehler oder durch eine Fehlbedienung, kann aufgrund der möglichen großen Arbeitsabstände der Laserstrahl unvorhergesehen fokussiert auf die Laserschutzwand auftreffen. Die hohe Strahlungsintensität, welche ursprünglich zur Materialbearbeitung bestimmt ist, wird dann die Schutzwand beschädigen und möglicherweise auch durchdringen [9].

Die konventionellen Umhausungen sind vor allem wegen der heute möglichen großen Bearbeitungsabstände an der Grenze ihrer Leistungsfähigkeit. Sie halten bei fokussierter Bestrahlung gerade noch für wenige Sekunden stand [10; 11]. In dieser Zeitspanne muss der Anlagenbediener den Not-Aus der Anlage einleiten, ansonsten gelangt die Laserstrahlung nach außen. Durch die hohe Strahlungsintensität und die Wellenlänge im Nahinfrarot-Bereich wäre bis in Abstände von mehreren Kilometern eine akute Erblindungs- oder Verletzungsgefahr gegeben [12; 13]. Die geforderte Umhausung bietet für moderne Lasersysteme keinen adäquaten Schutz. In Bezug auf eine fokussierte Bestrahlung täuscht sie gar eine nicht vorhandene Sicherheit vor.

Der eingangs erwähnte Trend in der Laser-Materialbearbeitung, die stetig steigende Anzahl von Laserstrahlanlagen, führt auch zu einer größer werdenden Zahl an gefährdeten Personen. Diese gilt es durch präventive Sicherheitsmaßnahmen zu schützen.

Die durch die wachsenden Arbeitsabstände immer größer werdenden Arbeitsräume bedingen einen überproportionalen Flächenzuwachs der Umhausungen. Mit den wegen der hohen Laserstrahlintensitäten nötigen mächtigen Wandstärken ergibt sich ein hoher Materialverbrauch für die Schutzwände, was Unternehmen dazu bewegt, die Sicherheiten noch weiter zu reduzieren.

Ausgehend von diesen Problemstellungen ergibt sich ein großer Handlungsbedarf, wenn moderne Laserstrahl-Materialbearbeitungsanlagen mit brillanten Laserstrahlquellen und hohen Laserleistungen mit angepassten und sinnvollen Sicherheitskonzepten in der industriellen Fertigung eingesetzt werden sollen.

¹ Auf Grund der besseren Lesbarkeit wurde durchgehend das Genus masculinum, also das grammatikalisch männliche Geschlecht verwendet. Selbstverständlich sind Frauen stets gleichermaßen angesprochen.

2. Forschungszweck/-ziel

Die übergeordnete Zielsetzung des vorliegenden Forschungsvorhabens ist der Schutz vor schädigender Laserstrahlung in allen Branchen, in welchen moderne Laserstrahl-Materialbearbeitungsanlagen eingesetzt werden (z. B. Automobilbau, Schiffbau, Schienenfahrzeugbau, Konsumgüterindustrie usw.). Dies soll mit einer zukunftsorientierten Lasersicherheitslösung geschehen. Sie muss derart gestaltet sein, dass sich die Laserleistung und die Anlagen- und Umhausungsgröße bei vollkommener räumlicher Positionierungsfreiheit des Laserstrahls möglichst nicht auf die Sicherheitssystemkosten auswirken. Ein möglicher Ansatz ist hierbei die Verlagerung von einer dezentralen, wandbasierten Sensorik hin zu einer zentralen Sensorik (vgl. Abbildung 1, links). Sie soll mit Hilfe einer Logik eine länger andauernde direkte Bestrahlung der Schutzwand verhindern. Somit wird die Verwendung leichter passiver Schutzwände zur Abschirmung von Streustrahlung während des Prozesses und zur Überbrückung der Laserabschaltzeit im Notfall möglich. Bei den heutigen Lasersystemen ist diese Zeitspanne mit kleiner 10 ms anzunehmen. Die Information über einen möglichen Fehlerfall kann aus einer dreidimensionalen Ortskontrolle des Brennflecks gewonnen werden. Entspricht dessen Ist-Koordinate der Soll-Koordinate und befindet sich diese wiederum in einem zuvor definierten erlaubten Arbeitsraum (vgl. Abbildung 1, rechts), so liegt kein Fehlerfall vor. Anderenfalls wird der Not-Aus eingeleitet. Das geplante Sicherheitssystem kann, im Gegensatz zur Sicherheitslösung EVI der FFT EDAG Produktionssysteme GmbH & Co. KG, mit den Herausforderungen der korrekten Wahl des Sichtfelds und den Hinterschneidungen umgehen.

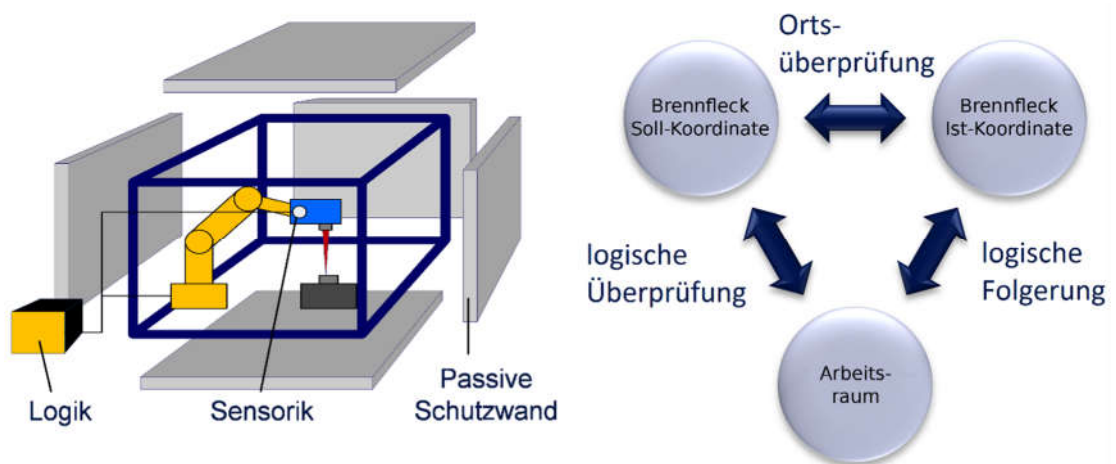


Abbildung 1: Neues Lasersicherheitskonzept: Zentrales aktives Lasersicherheitsystem

Das Auftreffen eines Laserstrahls auf Materie ist gekennzeichnet durch ein sehr helles Leuchten an der bestrahlten Stelle. Eine Detektion einer Leuchterscheinung im Raum kann deshalb mit lichtempfindlichen Sensoren durchgeführt werden. In Abbildung 2 sind zwei Realbilder eines Laserspots auf einem Bauteil aus Stahl bei unterschiedlicher Laserleistung dargestellt. Der Vergleich zwischen Abbildung a) und b) zeigt, dass die Steigerung der Laserleistung auf das Achtfache nur einen geringen Einfluss auf das Abbild des Brennflecks hat. Ein auf optischem Weg überwachendes zentrales aktives Sensorikkonzept ist somit für einen großen Laserleistungsbereich anwendbar. Die Lokalisierung kann beispielsweise durch eine Stereo-Rekonstruktion unter Zuhilfenahme von Matrix-Kameras mit Graufiltern erfolgen.

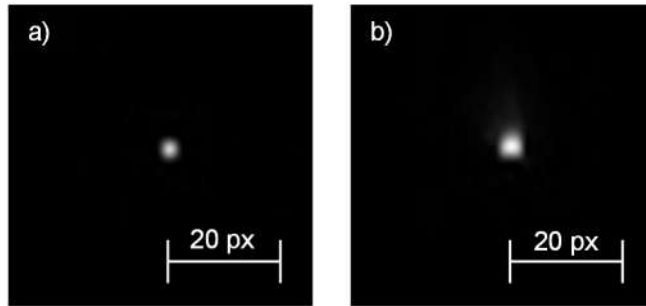


Abbildung 2: Leuchterscheinung des Laserspots; Dichte des Graufilters 4,8; CCD-Kamerachip; Auflösung 640 x 480 Pixel; Fokussdurchmesser $d_f = 600 \mu\text{m}$; a) Laserleistung $P_L = 1 \text{ kW}$; b) $P_L = 8 \text{ kW}$

Bei diesem Sicherheitskonzept werden Bilder des Brennflecks aus mindestens zwei unterschiedlichen Richtungen aufgenommen. Mit der Kenntnis der Orientierung der Kamerasysteme zueinander werden die Sehstrahlen der Abbilder des Brennflecks auf den Kamerachips durch die optischen Zentren der Kameraobjektive ermittelt. Ihre räumlichen Schnittpunktkoordinaten sind gleich den Koordinaten des Brennflecks (vgl. Abbildung 3).

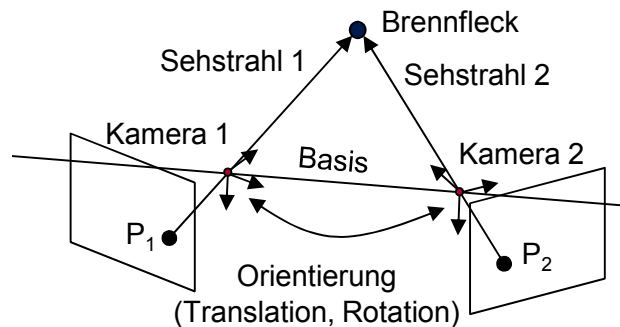


Abbildung 3: Schema der Stereo-Rekonstruktion

Das Auffinden des jeweiligen Brennfleckabbilds in dem Bild der jeweiligen Kamera erfordert eine rechen- und datenaufwändige Auswertung des gesamten Bildinhalts. Mit der Kenntnis der räumlichen Soll-Koordinate des Laserspots lässt sich auf die jeweiligen Pixelkoordinaten auf den Kamerachips zurückrechnen. Im Sinne einer reinen Kontrolle, ob die Brennfleckkoordinaten gleich den Soll-Koordinaten sind, muss somit sein Abbild auf mindestens zwei Kamerachips an den jeweils vorher berechneten Pixelkoordinaten zu finden sein.

Bei Verwendung von CMOS-Kameras können diese Operationen maschinell sehr schnell abgearbeitet werden. Hierzu wird auf der jeweiligen Kamera die entsprechende Region des Brennfleckabbilds mit einem Toleranzfenster vorgegeben. Dieser Bereich des Sensors (Region of Interest - ROI) wird als Liste von Grauwerten ausgelesen, im Speicher einer Auswerteinheit abgelegt und anschließend durch eine Aufsummierung von Pixeln, welche heller als ein Schwellwert sind, ausgewertet.

Die in Vorstudien verwendete Hardware waren herkömmliche Maschinenkameras und PC-Technik zur Auswertung der Signale. In nachgestellten Fehlersituationen konnte bereits mit diesen Komponenten gezeigt werden, dass ein solches Sicherheitskonzept prinzipiell tauglich ist. Es wurden Laserabschaltzeiten von unter 30 ms erreicht. Dieser Aufbau gilt allerdings unter steuerungstechnischen Sicherheitsaspekten als nicht sicher und somit als ungeeignet für diese Aufgabe. In diesem Forschungsprojekt soll das in der Vorstudie aufgezeigte Konzept unter Berücksichtigung der Vorgaben und Normen als Prototyp einer Lasersicherheitslösung umgesetzt werden.

Die Zielgruppe für diese Entwicklung sind einerseits die Anlagenbediener und Dritte, die es durch diese Technik zu schützen gilt. Andererseits können Hersteller von Lasersystemtechnik diese Technologie in ihr Produktportfolio aufnehmen oder direkt in ihre Produkte integrieren. Besonders für Hersteller von Laserstrahloptiken, Festoptiken oder auch Scannersystemen bietet sich diese Integration an.

3. Methodik

Das ursprünglich geplante Vorgehen gliederte sich in zehn Arbeitspakete, deren zeitliche Abfolge in Tabelle 1 dargestellt ist. Aus organisatorischen Gründen wurde die Projektlaufzeit in Abstimmung mit den beteiligten Parteien jedoch mehrmals umgestaltet. Zu den Ursachen hierfür zählt unter anderem, dass der ursprünglich geplante Unterauftragnehmer (Framos GmbH) nicht mehr zur Verfügung stand und sich eine Suche nach einem neuen Projektpartner mit ausreichender Qualifikation als langwierig und schwierig gestaltete. Das in der Folge als Unterauftragnehmer verpflichtete Ingenieurbüro Christian Wölz konnte den von ihm zugesagten Liefertermin aus personellen Gründen nicht einhalten. Dies führte zum einen zu einer kostenneutralen Verlängerung der ursprünglich geplanten Projektlaufzeit von 18 Monaten auf 39 Monate und zum anderen zu einer notwendigen Modifikation des ursprünglichen Arbeitsplans (siehe Tabelle 1), da die Anlage nicht wie geplant vor Ende der Projektzeit am *iwb* implementiert werden konnte. Der tatsächliche Arbeitsplan ist in Tabelle 2 gezeigt.

Tabelle 1: Ursprünglicher Arbeitsplan

| Forschungsjahr | | 1 | | | | 2 | |
|----------------|--|----|----|----|----|----|----|
| | | 1. | 2. | 3. | 4. | 1. | 2. |
| AP 1 | Abstimmung des Arbeitsprogramms mit der BG ETEM, dem BGIA und den Industriepartnern | ■ | | | | | |
| AP 2 | Literaturrecherche zur Lasersicherheit und Einordnung von Laserstrahlsystemen | ■ | | | | | |
| AP 3 | Festlegung von Anforderungen an das Sicherheitssystem (mit Vorversuchen) | ■ | | | | | |
| AP 4 | Definition von Tests zur Abnahme des Systems | | ■ | | | | |
| AP 5 | Iterative Konzeption und Spezifikation des Sicherheitssystems in Abstimmung mit der BG ETEM und dem BGIA | | ■ | | | | |
| AP 6 | Hardware- und Softwareentwicklung nach Spezifikation (wird vergeben, Angebot liegt bei), Begleitung und Dokumentation der Fremdentwicklung | | | ■ | | | |
| AP 7 | Inbetriebnahme des Systems in einer am <i>iwb</i> vorhandenen Remote-Laserstrahlanlage | | | | ■ | | |
| AP 8 | Test des Systems (vgl. AP 4) ggf. mehrere Iterationsschritte für Nachbesserungen | | | | | ■ | |
| AP 9 | Erarbeitung von Auslegungs- und Testrichtlinien aufgrund der Erfahrungen | | | | | | ■ |
| AP 10 | Übertragung des Systems auf andere Laserstrahlanlagen | | | | | | ■ |

Tabelle 2: Angepasster Arbeitsplan

| Forschungsjahr | 1 | | | | 2 | | | | 3 | | | | 4 |
|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Quartal | 1. | 2. | 3. | 4. | 1. | 2. | 3. | 4. | 1. | 2. | 3. | 4. | 1. |
| AP 1 Abstimmung des Arbeitsprogramms mit der BG ETEM, dem BGIA und den Industriepartnern | ■ | | | | | | | | | | | | |
| AP 2 Literaturrecherche zur Lasersicherheit und Einordnung von Laserstrahlsystemen | ■ | | | | | | | | | | | | |
| AP 3 Festlegung von Anforderungen an das Sicherheitssystem (mit Vorversuchen) | ■ | | | | | | | | | | | | |
| AP 4 Definition von Tests zur Abnahme des Systems | | ■ | | | | | | | | | | | |
| AP 5 Iterative Konzeption und Spezifikation des Sicherheitssystems in Abstimmung mit der BG ETEM und dem BGIA | | ■ | | | | | | | | | | | |
| AP 6 Hardware- und Softwareentwicklung nach Spezifikation (wird vergeben, Angebot liegt bei), Begleitung und Dokumentation der Fremdentwicklung | | | ■ | | | | | | | | | | |
| AP 7 Inbetriebnahme des Systems in einer am <i>iwb</i> vorhandenen Remote-Laserstrahlanlage | | | ■ | | | | | | | | | | |
| AP 8 Test des Systems (vgl. AP 4); ggf. mehrere Iterationsschritte für Nachbesserungen | | | | | | | | | | | | | ■ |
| AP 9 Erarbeitung von Auslegungs- und Testrichtlinien aufgrund der Erfahrungen | | | | | | | | | | | | | |
| AP 10 Übertragung des Systems auf andere Laserstrahlanlagen | | | | | | | | | | | | | ■ |

Zu Beginn des Projekts wurden im Rahmen eines Begleitkreistreffens, durch Literaturrecherchen und mit Hilfe von Expertengesprächen mit Herstellern und Anwendern das Arbeitsprogramm und die Anforderungen an das Sicherheitssystem festgelegt. Die wesentlichen Aspekte lauten:

- Das System sollte auf gängige Materialbearbeitungsprozesse anwendbar sein, nicht abzudecken sind Sonderfälle, wie z. B. Remote-Schweißen mit hoher Geschwindigkeit oder das Bearbeiten nichtmetallischer Materialien.
- Das System war als Diagnoseeinrichtung zu konzipieren und stellt nur eine sicherheitstechnische Komponente des Gesamtsicherheitssystems dar. Von daher ist zunächst eine Funktionale Sicherheit des Performance-Levels (PL) c anzustreben und zu realisieren und die nötigen Schritte zur Qualifizierung des Systems für die Anforderungen des PL e sind als Ausblick zu nennen, aber nicht umzusetzen.
- Auf Grund der vielfältigen Laseranlagenkonfigurationen im industriellen Einsatz war das System zunächst aus Praxisgründen auf eine Anlage des *iwb* (KUKA-Roboter und HighYAG- bzw. ScanLab-Optik) auszulegen und in der Folge sind allgemein die notwendigen Modifikationen zu beschreiben, um die Sicherheitseinrichtung auf eine andere Anlage übertragen zu können.

Das Ziel des Forschungsvorhabens war es, dass am Ende ein Funktionsmuster verfügbar ist, welches die oben genannten Anforderungen erfüllt.

In der Folge wurden die einschlägigen rechtlichen Rahmenbedingungen recherchiert. Dies sind im Wesentlichen die EG-Richtlinien 89/391/EWG, 2006/25/EG, 2006/95/EG, 2006/42/EG und deren nationale Umsetzungen in Form von OstrV, ProdSG (inkl. 1. Verordnung) sowie die Normen DIN EN 60825-1, DIN EN ISO 11553-1, DIN EN ISO 12100, DIN EN ISO 13849, DIN EN 62061 und DIN EN 61508.

Parallel zu diesen Aktivitäten wurde ein Funktionsmuster für Vorversuche aufgebaut, mit Hilfe dessen die generelle Machbarkeit gezeigt werden konnte. Auf Basis der daraus gewonnenen Erkenntnisse wurde in Absprache mit dem Begleitkreis folgende Testroutine zur Abnahme des Systems definiert: Schweißen von je vier Blindnähten auf Aluminium und Stahl und dabei Nachweis der folgenden Funktionen:

- Fehlerfreier Normalbetrieb
- Erkennen, wenn ein falsches Werkstück eingelegt wurde
- Erkennen eines Hindernisses im Prozess (z. B. eines im Arbeitsbereich vergessenen Werkzeugs)
- Erkennen, dass der Fokuspunkt den erlaubten Arbeitsraum verlässt

Das Funktionsmuster wurde auf der Fachmesse Laser World of Photonics 2015 präsentiert und intensiv mit den Besuchern aus Industrie, Forschung und Technik diskutiert. Die so gewonnenen Erkenntnisse flossen vor allem in die Weiterentwicklung der Software ein. Nachdem mit diesem Aufbau eine zuverlässige Funktion erreicht werden konnte, galt es, das System auf einer Materialbearbeitungsanlage umzusetzen. Dazu waren zunächst der Handlungsbedarf zu identifizieren sowie Lösungen für einzelne Aspekte zu entwickeln und auszuwählen.

Hierbei galt es, Hardware- bzw. Softwaredatenschnittstellen (z. B. Not-Aus-Anschluss, Kommunikationsprotokoll) sowie mechanische Schnittstellen (z.B. Kamerahalterung) durch physikalische-geometrische Änderungen bzw. Modifikationen von Datenformaten anzupassen und zum anderen das System zu qualifizieren, um bei intensivem Prozessleuchten Fehlerfälle zuverlässig zu identifizieren. Hierfür waren vor allem geeignete optische Filter für die Kamera auszuwählen und der softwareseitige Erkennungsalgorithmus anzupassen. Beispielhaft sei hierfür in Abbildung 4 der Einfluss der Belichtungszeit gezeigt.

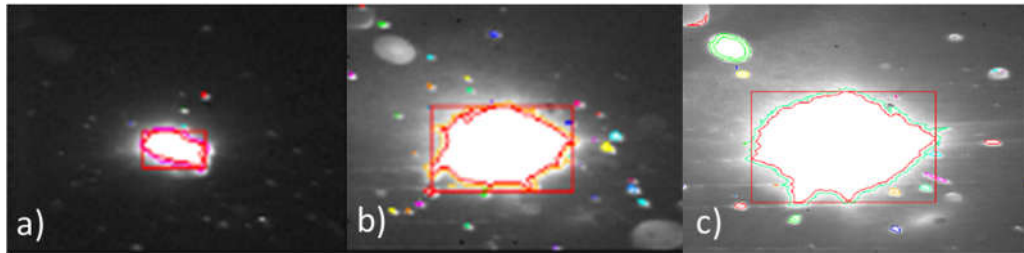


Abbildung 4: Aufnahmen der Prozesszone bei der Bearbeitung von Stahl S235 mit einer Photonfocus-Kamera (MV-D1024E-160-PC-12) bei einer Belichtungszeit von a) 0,011 ms, b) 0,145 ms und c) 0,441 ms

Im nächsten Schritt wurde das System für eine Anwendung mit Ablenkoptiken erweitert. Dazu war es zunächst notwendig, eine Möglichkeit zu schaffen, um einen direkten Zugriff auf die Scannersteuerung und die aktuellen Spiegelstellungen zu erlangen. Da dies durch die herstellerseitige Software für die zur Verfügung stehende Optik der Scanlab GmbH nicht ohne weiteres möglich war, wurden die softwareseitigen Schnittstellen recherchiert und ein eigenes Programm zur Ansteuerung der Spiegelachsen entwickelt. In der Folge galt es, eine Halterung zu konstruieren und zu fertigen, welche zwei Kameras in einer definierten Position zueinander und zum Bearbeitungsraum aufnehmen kann. Anschließend war die Software so zu modifizieren, dass sie auch die Daten der zweiten Kamera auslesen und diese mit den Informationen der ersten Kamera verrechnen konnte. Hierzu war ein Algorithmus zu entwerfen, welcher auf Basis der 2D-Informationen aus den beiden Kamerachips und deren Lage im Raum die Position der Prozesszone errechnet. Auch hier wurden Hard- und Softwareparameter so lange angepasst, bis eine zuverlässige Funktion gegeben war.

Nach der Funktionsimplementierung und dem Nachweis der spezifizierten Eigenschaften galt es, das System sicherheitstechnisch umzusetzen. Nachdem der ursprünglich geplante Auftragnehmer Framos GmbH nicht mehr zur Verfügung stand, war es zunächst notwendig, einen neuen Dienstleister mit dem entsprechenden Dienstleistungsportfolio zu recherchieren und für das Projekt zu gewinnen. Einzig das Ingenieurbüro Christian Wölz war von den angefragten Unternehmen in der Lage und bereit, sich im Projekt einzubringen. Diesem wurden nach der Auftragsvergabe alle bisher erarbeiteten Daten inklusive der Spezifikation übergeben.

Das Ingenieurbüro erhielt folgende Daten:

- Beschreibung des Aufbaus von Funktionsmuster, Umsetzung an der realen Anlage mit Festoptik und Ablenkoptik,
- die jeweils verwendete Software inklusive Dokumentation (z.B. Flussdiagramme, vgl. Abbildung 5) und
- die Spezifikation sämtlicher Schnittstellen und der gewünschten Eigenschaften des Systems (eine Kurzfassung findet sich im 8. Anhang).

In mehreren Abstimmungstreffen wurde die Umsetzung des Systems bis zur Fertigstellung begleitet. Die sicherheitstechnisch qualifizierte Ausführung wurde an einer *iwb*-eigenen Laseranlage in Betrieb genommen. Dabei konnten die eingangs spezifizierten Funktionen für eine Bearbeitung von Stahl und Aluminium nachgewiesen werden.

Eine Ableitung allgemeiner Auslegungsrichtlinien, wie in Arbeitspaket 9 geplant, konnte im Projekt auf Grund der Zeitverzögerung durch den externen Dienstleister nicht mehr stattfinden (siehe Kapitelanfang). Eine Übertragung auf andere Laserstrahlanlagen gemäß Arbeitspaket 10 ist jedoch durch eine Anpassung der Schnittstellen ohne Weiteres möglich.

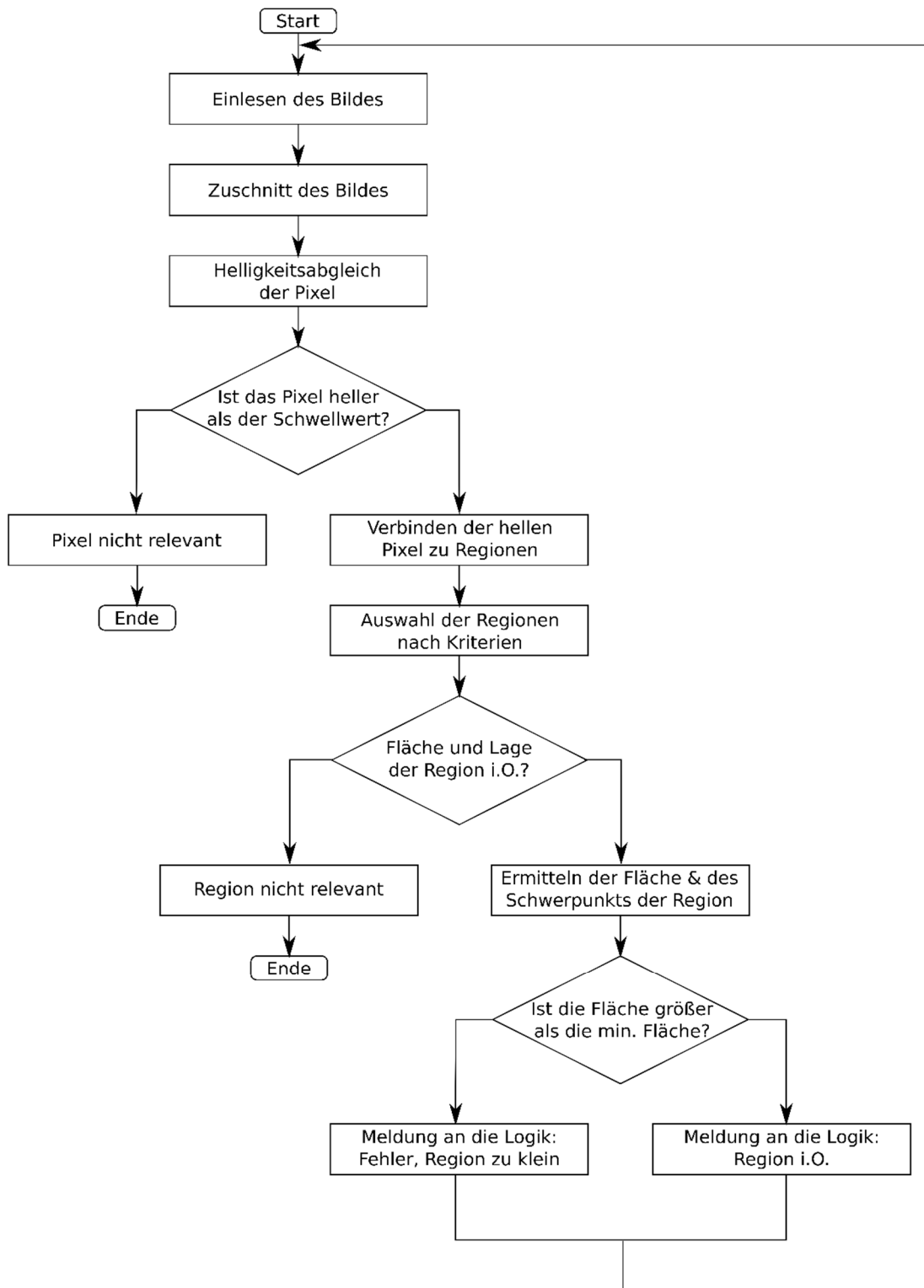


Abbildung 5: Flussdiagramm des Bildverarbeitungsvorgangs

4. Ergebnisse des Gesamtvorhabens

Im Rahmen der Arbeiten konnten das Arbeitsprogramm (AP 1), die grundlegenden Anforderungen an das System (AP 3) und die rechtlichen Rahmenbedingungen (AP 2) bestimmt werden. Des Weiteren konnte eine Testroutine definiert werden (AP 4). Zudem konnte das grundlegende Konzept eines zentralen aktiven Sicherheitssystems erstellt und in Form eines Funktionsmusters an einer Roboterschulungszelle umgesetzt werden (siehe Abbildung 6).

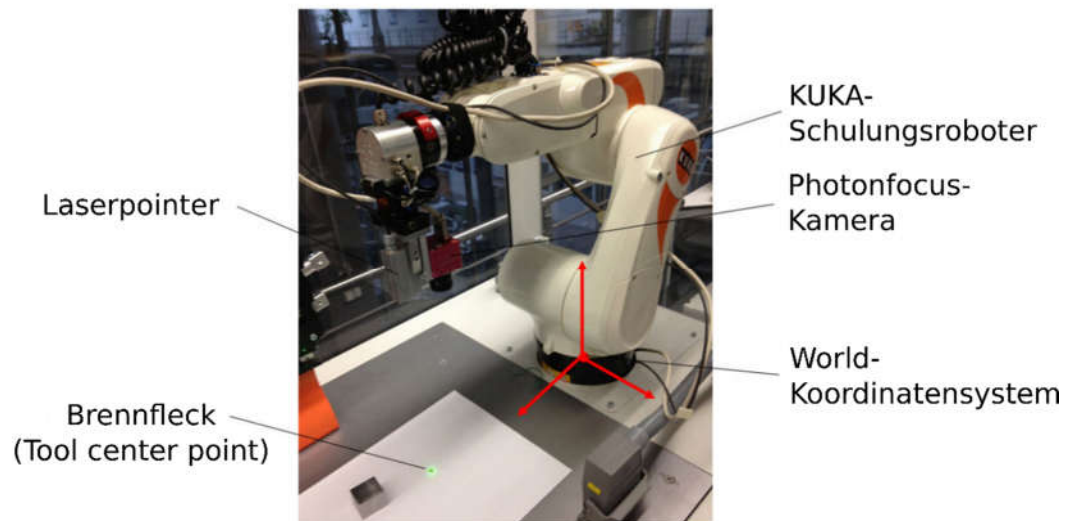


Abbildung 6: Aufbau des Funktionsprototyps zum Nachweis der prinzipiellen Machbarkeit und zum Durchführen von Vorversuchen

Das System durchlief mehrere Optimierungsschleifen und wurde in der Folge für den Einsatz am industriellen Prozess qualifiziert. Auch hier konnten zunächst die Erkennung des Fehlerfalls durch Bilderkennung sowie die prinzipielle Funktionstüchtigkeit des Systems gezeigt werden (siehe Abbildung 7). Anschließend wurde an der Verbesserung der Robustheit und der Flexibilität des Systems gearbeitet und die Bedienerfreundlichkeit erhöht (AP 5, 7 und 8). Dazu gehörte es zum Beispiel, einen anwenderinitiierten Kalibriervorgang zu implementieren, der eine Adaption der Überwachungsparameter an einen speziellen Prozess ermöglicht und somit den effizienten und sicheren Einsatz des Systems gewährleistet.

In der Folge konnte das Sicherheitssystem auch an einer Laseranlage mit Ablenkoptik implementiert werden und dessen Funktion gezeigt werden. Damit konnte AP 5 abgeschlossen werden. Im Rahmen der Auftragsvergabe wurde durch das Ingenieurbüro Christian Wölz unter Begleitung des *iwb* und auf Basis der geleisteten Vorarbeiten eine Umsetzung mit den Voraussetzungen zur Erfüllung des PL c erstellt. Der regelkonforme Nachweis ist in Absprache mit dem Begleitkreis unterblieben, da dies den finanziellen Rahmen des Vorhabens überschritten hätte.

Das Sicherheitssystem wurde an der Laseranlage des *iwb* implementiert (AP 7), getestet und mehrfach überarbeitet (AP 8). Aus den eingangs genannten Gründen konnte die schlussendliche Inbetriebnahme der Anlage erst zum Projektende erfolgen, weshalb eine Erarbeitung allgemeiner Auslegungs- und Testrichtlinien zur Projektlaufzeit nicht mehr erfolgen konnte (AP 9). Eine Übertragbarkeit der Sicherheitseinrichtung ist nach einer Anpassung der Schnittstellen allerdings möglich (AP 10). Der finale Aufbau ist in Abbildung 8 gezeigt.

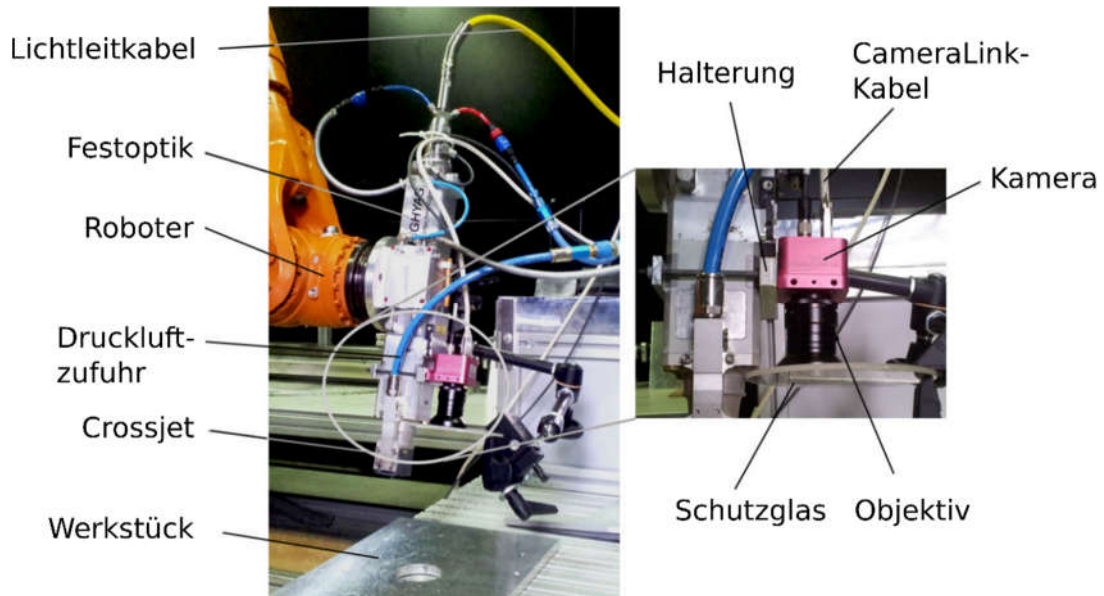


Abbildung 7: Umsetzung des Systems mit Festoptik zur Durchführung von Versuchen zum Test und zur Verbesserung des Sicherheitssystems

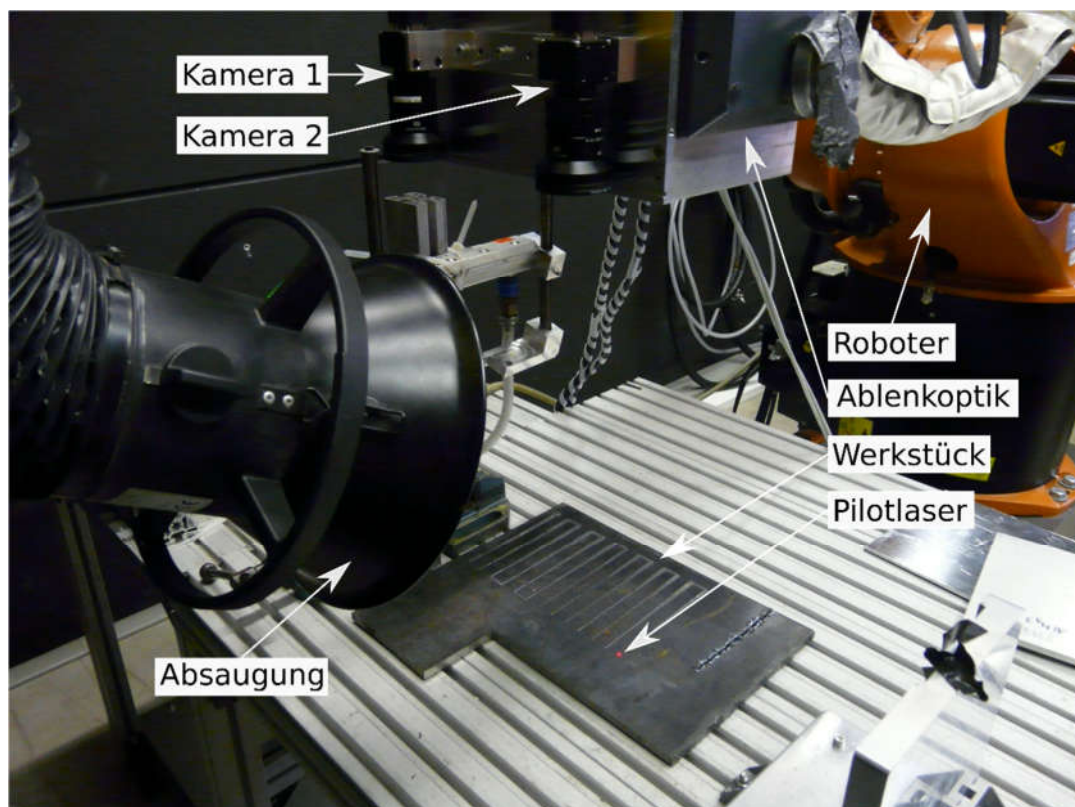


Abbildung 8: Finale Umsetzung des Systems mit Ablenkoptik

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass mit der Erstellung einer sicherheitstechnisch ausgelegten Überwachungseinrichtung für Laser-Materialbearbeitungsanlagen das Hauptziel des Vorhabens erreicht werden konnte. Die (Teil-) Ergebnisse des Projekts wurden bzw. werden im Rahmen der folgenden Veröffentlichungen einem breiten Publikum zugänglich gemacht:

- Lugauer, F. P.: Sicherheit bei Laser-Materialbearbeitungsanlagen. *iwb* Newsletter 23 (2015) 3, S.1 f.
- Kick, M.; Lugauer F. P.: Zentrale aktive Sicherheitseinrichtung für Laser-Materialbearbeitungsanlagen – eine kostengünstige und sichere Alternative zu massiven Laserzellen?!. *DVS-Berichte* o. Nr. (2015) Band 315, S. 584 – 589. Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren 2015.
- Lugauer, F. P.: Lasersicherheit als Aufgabe für die produktionstechnische Forschung. Bayerische Laserschutztage 2016. Nürnberg. Bayerisches Laserzentrum / bayern photonics e. V. 2016.
- Lugauer, F. P.: Lasersicherheit von der Forschung in die Praxis. Fachtagung Hochleistungslaser. BG ETEM 2017

Auf der Fachmesse Laser World of Photonics 2015 wurde außerdem auf dem Sonderschaustand ein Demonstrator gezeigt. Außerdem ist es geplant, die Ergebnisse des vorliegenden Projekts im Jahr 2018 im Rahmen einer Dissertation zu veröffentlichen.

Eine Anmeldung von Schutzrechten war auf Grund vorangegangener Veröffentlichungen leider nicht möglich.

5. Auflistung der für das Vorhaben relevanten Veröffentlichungen, Schutzrechtsanmeldungen und erteilten Schutzrechte von nicht am Vorhaben beteiligten Forschungsstellen

Während der Projektlaufzeit sind im Bereich der aktiven Lasersicherheit keine relevanten Publikationen oder Schutzrechtsanmeldungen bekannt geworden. Nach wie vor sind lediglich zwei aktive Systeme kommerziell verfügbar: Der LaserSpy-Safety-Sensor der KUKA Industries GmbH & Co. KG [14] und das Laser-Jailer-System der Lasermet Ltd., Bournemouth, UK [15]. Beide Produkte sind wandbasiert und es ist jeweils ein größerer Aufwand zu tätigen, um die Anlage nach einem Fehlerfall wieder in Betrieb zu nehmen. Im Fall des LaserSpys ist die Strahlungsdichtheit einer Hohlkammerwand wieder herzustellen. Beim Einsatz des Laser Jailers sind die von einer Bestrahlung betroffenen Paneele auszutauschen.

Weiterhin bietet die FFT EDAG Produktionssysteme GmbH & Co. KG auf ihrer Internetpräsenz ein zentrales optisches Sicherheitssystem an [16]. Auf telefonische Nachfrage wurde allerdings mitgeteilt, dass das System nicht verfügbar ist und seit mehreren Jahren keine Weiterentwicklung stattgefunden hat [17].

6. Bewertung der Ergebnisse hinsichtlich des Forschungszwecks/-ziels, Schlussfolgerungen

Wie in Abschnitt 5 beschrieben, existiert derzeit kein zentrales aktives Lasersicherheitssystem, obwohl die Ausgangsleistungen der Strahlquellen stetig steigen. Daher werden im Hochleistungsbereich vielfach aktive Schutzwände verbaut; mit den oben beschriebenen Konsequenzen. Etwas gemildert wird dieser Effekt dadurch, dass einige Kinematikhersteller eine sichere Steuerung anbieten, mit der auch die Emission der Strahlquelle gesteuert wird. Das bedeutet, dass durch den Erwerb einer derartigen Systemtechnik die Möglichkeit besteht, die Strahlrichtung und die Emissionsdauer auf sicherheitsgerechte Weise zu kontrollieren und zu überwachen.

Dieses Vorgehen ist allerdings stets an die Kinematik gebunden und deckt nur einen Teil der Fehler ab, welche vom hier vorliegenden System erkannt werden. So werden beispielsweise keine Hindernisse oder falschen Werkstücke erfasst. Das im Rahmen dieses Vorhabens erstellte System ist also derzeit einzigartig, was die Leistungsfähigkeit im Bereich der Sicherheitstechnik angeht.

Für die gesetzliche Unfallversicherung ergibt sich daraus der Vorteil, dass nun ein weiterer Schritt zur Marktfähigkeit eines Werkzeugs zum Schutz der Versicherungsnehmer erfolgt ist, welches einerseits durch die hohe Flexibilität sehr unternehmerfreundlich ist und andererseits durch die vielseitige Fehlererkennung schwere Unfälle zu verhindern hilft.

7. Aktueller Umsetzungs- und Verwertungsplan

Da das Projekt durch Verzögerungen bei der Suche und Anwerbung eines neuen Dienstleisters und der Bearbeitung durch diesen deutlich in Verzug geraten ist und das System erst zum Projektende fertiggestellt werden konnte, liegt derzeit noch kein konkreter Verwertungsplan vor. Allerdings sollten auf Grund der Einzigartigkeit des Systems zeitnah folgende Schritte durchgeführt werden:

- Durchführen intensiver Tests mit dem vorhandenen System im Hinblick auf mehrere Werkstoffe, verschiedene Verfahren und unterschiedliche Prozessregime
- Optimierung des Systems hinsichtlich der Robustheit der Fehlererkennung und –unterscheidung
- Richtlinienkonformer Nachweis der erreichten Funktionalen Sicherheit (Angebot des Ingenieurbüros Christian Wölz liegt bereits vor)
- Umsetzung in ein marktfähiges Produkt durch einen Systemhersteller (prädestiniert wären hier die Mitgliedsunternehmen des Begleitkreises)

8. Anhang

- Kurfassung der *iwb*-Spezifikation
- Dokumentation des Ingenieurbüros Christian Wölz

Zentrale aktive Lasersicherheitsüberwachung: Spezifikation der Hardware und Software

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Systemaufbau eines zentralen aktiven Lasersicherheitssystems mit allen interagierenden Komponenten; die jeweiligen Pfeile symbolisieren dabei die Datenflüsse der Komponenten.

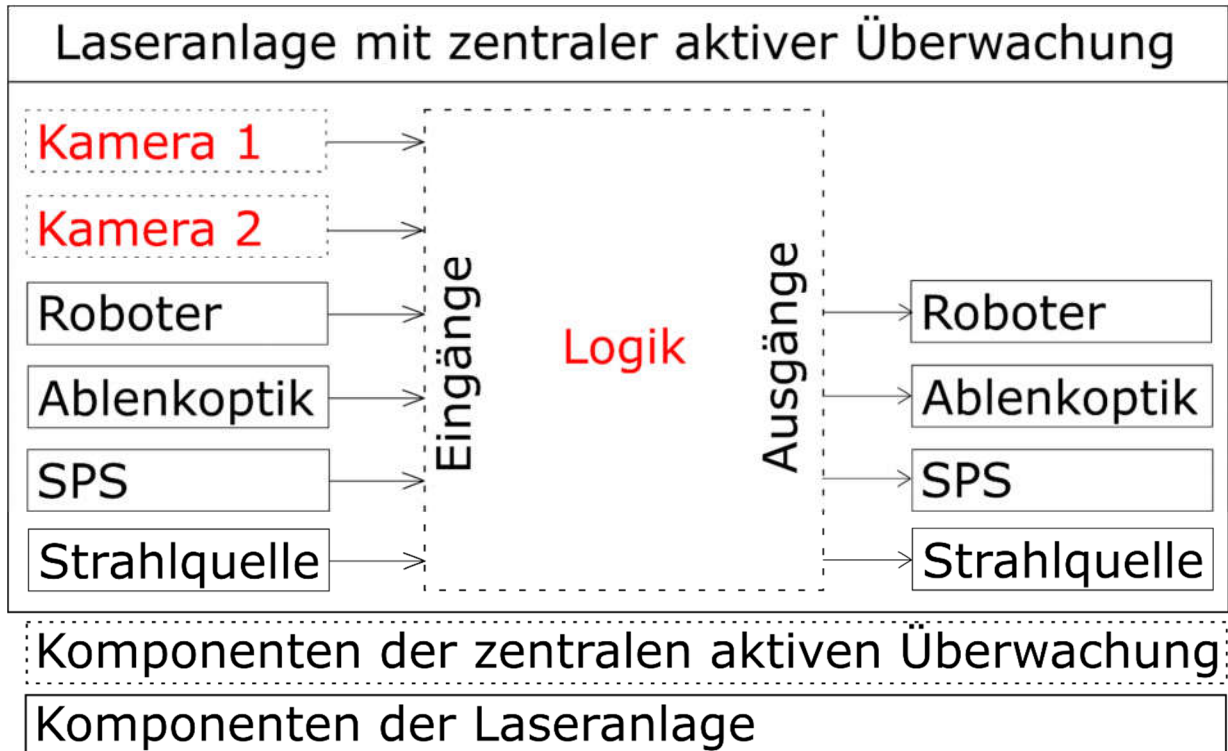


Abb. 1: Laserüberwachungssystem mit den jeweiligen Eingangs- und Ausgangskomponenten

Im Folgenden werden das Gesamtsystem und die Komponenten dieses Überwachungssystem hinsichtlich ihrer Anforderungen an die Hardware- und Software-Struktur spezifiziert.

Gesamtsystem (zugehörige Komponenten rot beschriftet):

Das Gesamtsystem besteht aus den Komponenten „Kamera 1“, „Kamera 2“ und „Logik“. Dieses Gesamtsystem muss die Anforderungen erfüllen, die einem Performance Level der Klasse c, im Folgenden als c-System bezeichnet, zugrunde liegen. Jedoch soll die Hardware- und Software-Struktur so beschaffen sein, dass durch eventuell erforderliche Ergänzungen eine Umstellung auf ein System mit einem Performance Level der Klasse e, im Folgenden e-System genannt, möglich ist. D.h. für den eventuellen Fall, dass Redundanzen hinsichtlich der Verdrahtung bei einem e-System erforderlich sind, sind diese bereits im c-System anzutragen. Gleiches gilt im Hinblick auf die Software-Architektur.

Kamerasystem:

Das Kamerasystem besteht aus den Komponenten „Kamera 1“ und „Kamera 2“; diese beiden Kameras sind in einer Stereogeometrie angeordnet, die als achsparallele Stereogeometrie ausgeführt ist. Der schematische Aufbau und die Positionierung an der Ablenkoptik sind in Abbildung 2 dargestellt.

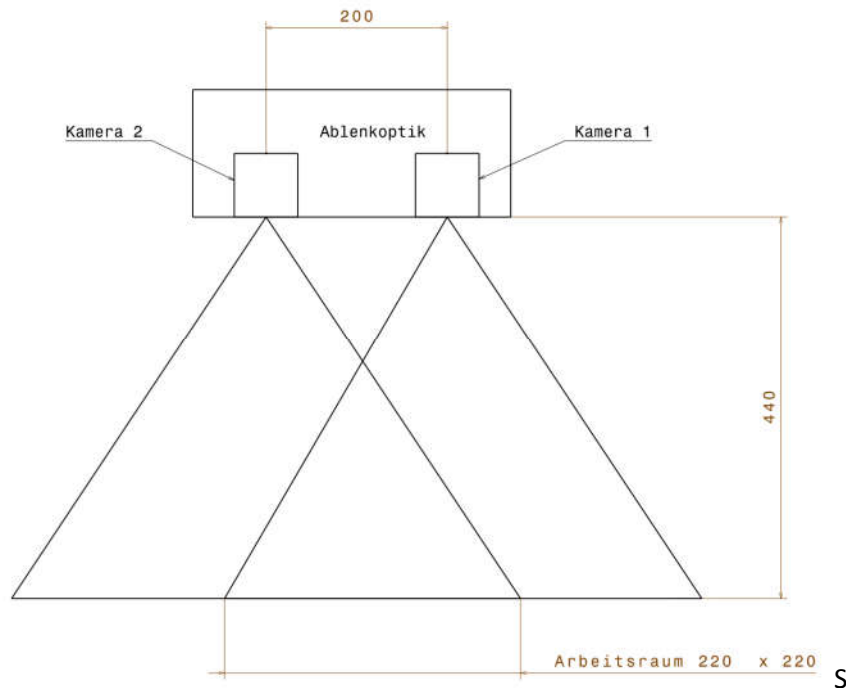


Abb. 2: Geometrische Anordnung der Kameras an der Ablenkoptik und einzuhaltende maßliche Anforderungen

Sollte es mit der Anforderung an das Gesamtsystem vereinbar sein, dass die Bedingungen für ein c- bzw. e-System erfüllt werden, sind die am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften *iwb* existierenden Kameras der Marke Toshiba Teli vom Typ BU406M mit einer USB3Vision-Schnittstelle in das System zu integrieren. Das zu den Kameras zugehörige Datenblatt befindet sich im Anhang. Ebenfalls sollten falls möglich die dazu vorhandenen Objektive der Fa. Myutron vom Typ HS0818V verwendet werden können.

Sollte dies aufgrund von Datenübertragungsraten, Kommunikationsprotokollen, Ausfallsicherheit der Schnittstelle oder ähnlichem nicht möglich sein, muss das Kamerasystem mit zugehörigem Objektiv so ausgestattet sein, dass der in Abbildung 2 dargestellte Arbeitsraum mit den beiden Kameras voll erfasst werden kann und außerdem auch die Bauraummaße eingehalten werden. Sollte dabei die achsparallele Epipolargeometrie nicht realisierbar sein, so kann auf eine Epipolargeometrie zurückgegriffen werden, bei der die Kameras in einem Winkel zueinander angeordnet sind. Jedoch ist für eine schräge Anordnung der Kameras zueinander die Berechnung der Position mit Hilfe der Epipolargeometrie und den zugehörigen affinen Bildtransformationen inklusive Code und Dokumentation bereitzustellen (siehe auch Logik). Hinsichtlich der Auflösung des Systems in der Arbeitsebene muss diese Konfiguration eine Linienauflösung von mindestens 3,3 Pixel/mm besitzen. Ferner ist für die Detektion ein Filtersystem am Objektiv mit einer Neutraldichte von $ND = 3$ und $ND = 1,8$ oder eine andere Kombination der Neutraldichten, die das Prozessleuchten um den Faktor 63000 abschwächt vorzusehen. Die verwendete Kamera muss außerdem einstellbare Belichtungszeiten im Bereich von $30 \mu\text{s}$ bis 10 ms haben.

Logik:

Die Logik übernimmt die Berechnung der Kameraoperationen, sowie den Soll-Ist-Wert-Vergleich der Brennflecküberwachung und der Arbeitsraumüberwachung. Mit Hilfe der Zustandsdaten aus Roboter, SPS und Ablenkoptik (Laseremission ist an bzw. aus) schaltet die Logik bei eingeschalteter Laseremission bei Überschreiten des Sollwertes um einen Toleranzbetrag die Emission der Strahlquelle und gegebenenfalls die Roboterbewegung ab. D.h. es werden Signale an die Komponenten Strahlquelle, Roboter, SPS und Ablenkoptik ausgegeben. Die beiden Softwarebausteine Arbeitsraumüberwachung und Brennflecküberwachung arbeiten unabhängig voneinander; jeder Baustein für sich kann im Fehlerfall eine Abschaltung des Systems auslösen.

Die Brennflecküberwachung ist ein Softwarebaustein innerhalb der Logik; diese führt den Soll-Ist-Wert-Vergleich für den Brennfleck durch. Der Soll-Wert wird dabei anhand der Eingangsdaten aus der Ablenkoptik berechnet. Der Ist-Wert wird über die Stereogeometrie des Kamerasystems mit Hilfe der Epipolargeometrie und Methoden der computerbasierten Bildverarbeitung bestimmt. Für die Programmierung dieser Bildverarbeitungsoperationen sollte nach Möglichkeit die kommerzielle Software Halcon der Firma MvTec verwendet werden. Da die Auswertung des Ist-Wertes Toleranzen unterworfen ist, ist für einen robusten Soll-Ist-Wert-Vergleich eine Toleranz hinsichtlich des Soll-Wertes vorzusehen. Die Kommunikationsschnittstelle der Ablenkoptik wird im Punkt Ablenkoptik näher beschrieben.

Die Arbeitsraumüberwachung ist ein Softwarebaustein innerhalb der Logik; diese führt den Soll-Ist-Wert-Vergleich für den Arbeitsraum durch. Der Soll-Wert wird dabei anhand der Eingangsdaten aus der Robotersteuerung berechnet. Der Ist-Wert wird über die Stereogeometrie des Kamerasystems mit Hilfe der Epipolargeometrie bestimmt. Da die Auswertung des Ist-Wertes, wie auch bei der Brennflecküberwachung, Toleranzen unterworfen ist, ist für einen robusten Soll-Ist-Wert-Vergleich eine Toleranz hinsichtlich des Soll-Wertes vorzusehen. Die Kommunikationsschnittstelle des Roboters wird im Punkt Roboter näher beschrieben.

Für die oben genannten Funktionen muss das System Eingänge für die Komponenten Kamera 1, Kamera 2, Roboter, SPS und Ablenkoptik mit den jeweiligen Bus-Kommunikationsschnittstellen bzw. analogen oder digitalen Eingängen besitzen. Außerdem werden für die Abschaltung Ausgänge für die Komponenten Strahlquelle, SPS, Roboter und Ablenkoptik mit den jeweiligen Bus-Kommunikationsschnittstellen bzw. analogen oder digitalen Ausgängen benötigt. Ferner muss das System wie eingangs beschrieben auf ein e-System adaptierbar sein.

Beschreibung der funktionalen Sicherheit für eine Laserüberwachung

Kunde: Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften
 Ansprechpartner: Herr Florian Lugauer
 +49 (89) 289 15554
Florian.Lugauer@iwb.tum.de

A) Aufgabenstellung

Zentrale aktive Lasersicherheitsüberwachung: Spezifikation der Hardware und Software

Abbildung 1 zeigt den prinzipiellen Systemaufbau eines zentralen aktiven Lasersicherheitsystems mit allen interagierenden Komponenten; die jeweiligen Pfeile symbolisieren dabei die Datenflüsse der Komponenten.

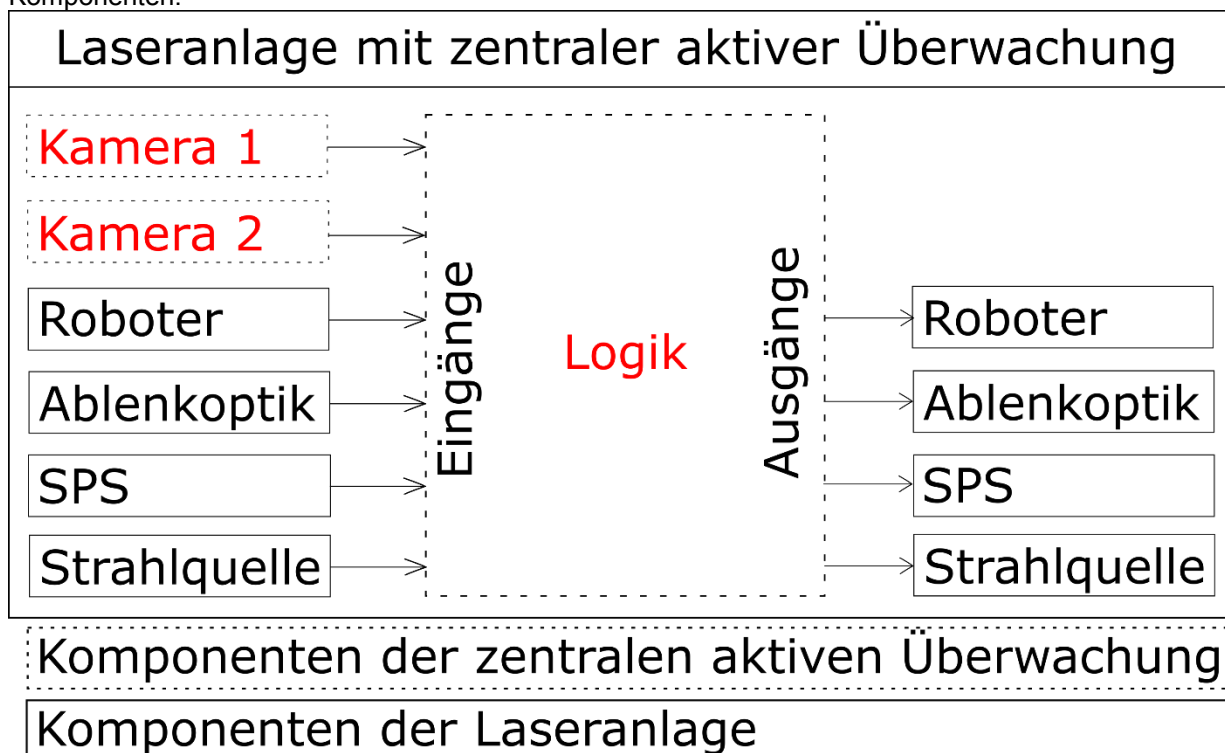


Abb. 1: Laserüberwachungssystem mit den jeweiligen Eingangs- und Ausgangskomponenten
 Im Folgenden werden das Gesamtsystem und die Komponenten dieses Überwachungssystems hinsichtlich ihrer Anforderungen an Hardware- und Software-Struktur spezifiziert.

Gesamtsystem (zugehörige Komponenten rot beschriftet):

Das Gesamtsystem besteht aus den Komponenten „Kamera 1“, „Kamera 2“ und „Logik“. Dieses Gesamtsystem muss die Anforderungen erfüllen, die einem Performance Level (PL) der Klasse c gemäß DIN EN ISO 13849, im Folgenden als c-System bezeichnet, zugrunde liegen. Jedoch soll die Hardware- und Software-Struktur so beschaffen sein, dass durch Ergänzungen eine Umstellung auf ein System mit einem Performance Level der Klasse e, im Folgenden e-System genannt, möglich ist. D.h. die für den Fall einer Erweiterung auf PL e nötigen Kanal-Redundanzen sind bereits im c-System vorzusehen. Gleiches gilt im Hinblick auf die Software-Architektur.

Kamerasystem:

Das Kamerasystem besteht aus den Komponenten „Kamera 1“ und „Kamera 2“; diese beiden Kameras sind in einer Stereogeometrie angeordnet. Diese ist achsparallel ausgeführt. Der schematische Aufbau und die Positionierung an der Ablenkoptik sind in Abbildung 2 dargestellt.

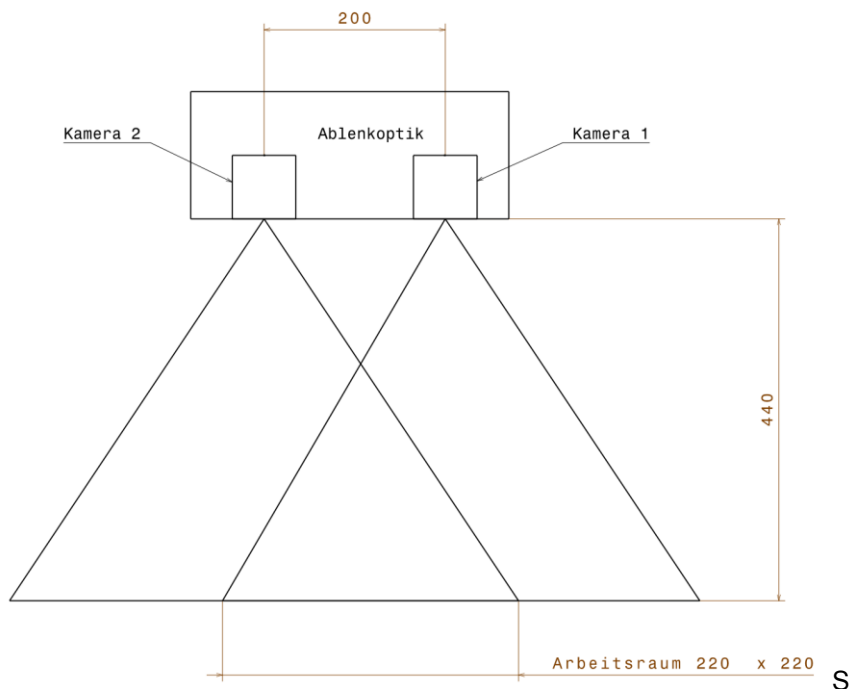


Abb. 2: Geometrische Anordnung der Kameras an der Ablenkoptik und einzuhaltende maßliche Anforderungen

Sollte es mit der Anforderung an das Gesamtsystem vereinbar sein, dass die Bedingungen für ein c- bzw. e-System erfüllt werden, sind die am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften *iwb* existierenden Kameras der Marke Toshiba Teli vom Typ BU406M mit einer USB3Vision-Schnittstelle in das System zu integrieren. Das zu den Kameras zugehörige Datenblatt befindet sich im Anhang. Ebenfalls sollten falls möglich die dazu vorhandenen Objektive der Fa. Myutron vom Typ HS0818V verwendet werden können.

Sollte dies aufgrund von Datenübertragungsraten, Kommunikationsprotokollen, Ausfallsicherheit der Schnittstelle oder ähnlichem nicht möglich sein, muss das Kamerasystem mit zugehörigem Objektiv so ausgestattet sein, dass der in Abbildung 2 dargestellte Arbeitsraum mit den beiden Kameras voll erfasst werden kann und außerdem auch die Bauraummaße eingehalten werden. Sollte dabei die achsparallele Epipolargeometrie nicht realisierbar sein, so kann auf eine Epipolargeometrie zurückgegriffen werden, bei der die Kameras in einem Winkel zueinander angeordnet sind. Jedoch ist für eine schräge Anordnung der Kameras zueinander die Berechnung der Position mit Hilfe der Epipolargeometrie und den zugehörigen affinen Bildtransformationen inklusive Code und Dokumentation bereitzustellen (siehe auch Logik). Hinsichtlich der Auflösung des Systems in der Arbeitsebene muss diese Konfiguration eine Linienauflösung von mindestens 3,3 Pixel/mm besitzen. Ferner ist für die Detektion ein Filtersystem am Objektiv mit einer Neutradichte von $ND = 3$ und $ND = 1,8$ vorzusehen oder eine andere Kombination der Neutradichten, die das Prozessleuchten um den Faktor 63000 abschwächt. Die verwendete Kamera muss außerdem einstellbare Belichtungszeiten im Bereich von 30 μ s bis 10 ms haben.

Logik:

Die Logik übernimmt die Berechnung der Kameraoperationen, den Soll-Ist-Wert-Vergleich der Brennflecküberwachung und der Arbeitsraumüberwachung. Mit Hilfe der Zustandsdaten aus Roboter, SPS und Ablenkoptik (Laseremission ist an bzw. aus) schaltet die Logik bei eingeschalteter Laseremission bei Überschreiten des Sollwertes um einen Toleranzbetrag die Emission der Strahlquelle und gegebenenfalls die Roboterbewegung ab. D.h. es werden Signale an die Komponenten Strahlquelle, Roboter, SPS und Ablenkoptik ausgegeben. Die beiden Softwarebausteine Arbeitsraumüberwachung und Brennflecküberwachung arbeiten unabhängig voneinander; jeder Baustein für sich kann im Fehlerfall eine Abschaltung des Systems auslösen.

Die Brennflecküberwachung ist ein Softwarebaustein innerhalb der Logik; diese führt den Soll-Ist-Wert-Vergleich für den Brennfleck durch. Der Soll-Wert wird dabei anhand der Eingangsdaten aus der Ablenkoptik berechnet. Der Ist-Wert wird über die Stereogeometrie des Kamerasystems mit Hilfe der Epipolargeometrie und Methoden der computerbasierten Bildverarbeitung bestimmt. Für die Programmierung dieser Bildverarbeitungsoperationen kann z.B. die kommerzielle Software Halcon, der Firma MvTec verwendet werden. Da die Auswertung des Ist-Werts Toleranzen unterworfen ist, ist für

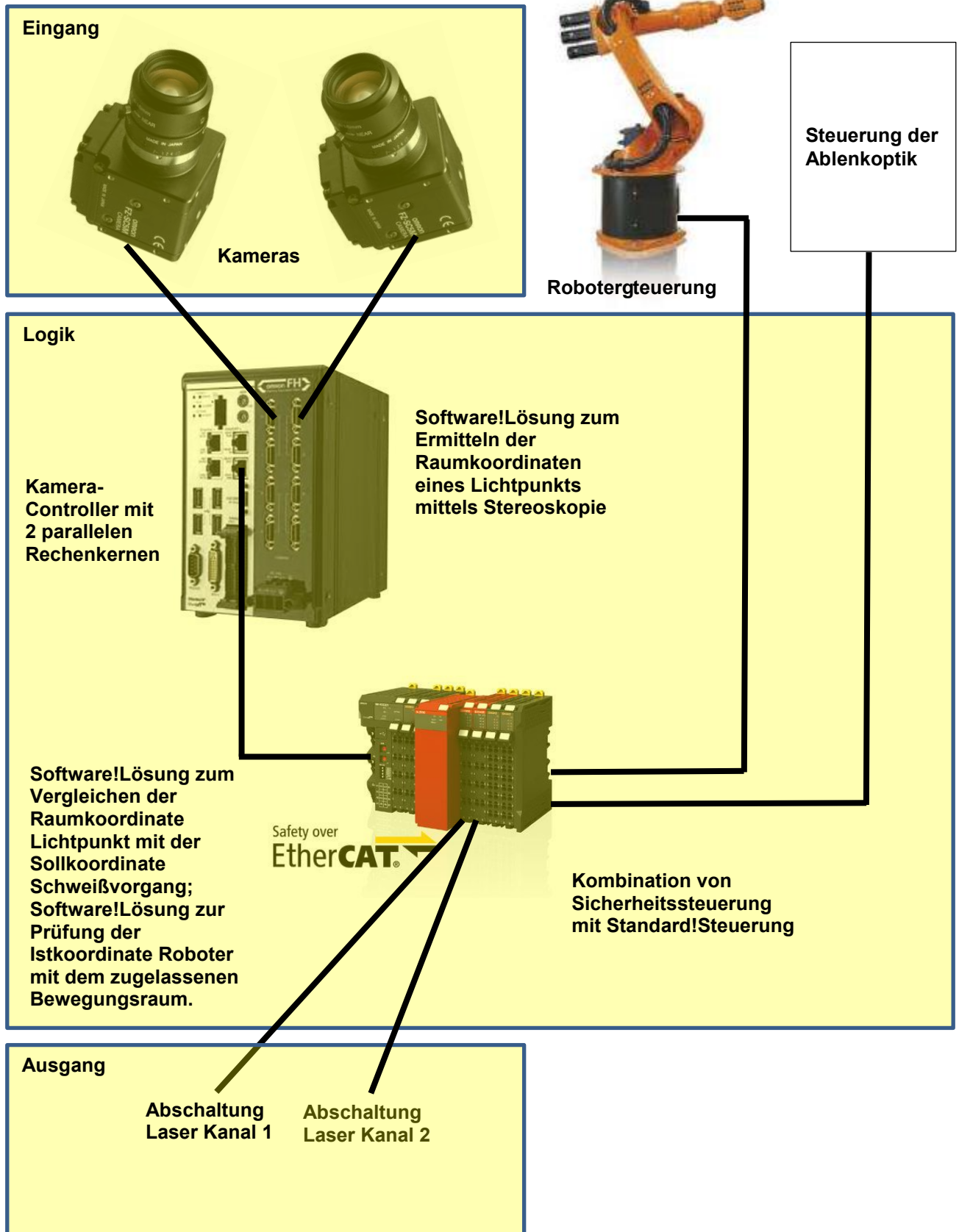
einen robusten Soll-Ist-Wert-Vergleich eine Toleranz hinsichtlich des Soll-Wertes vorzusehen. Die Kommunikationsschnittstelle der Ablenkoptik wird im Punkt Ablenkoptik näher beschrieben.

Die Arbeitsraumüberwachung ist ein Softwarebaustein innerhalb der Logik; diese führt den Soll-Ist-Wert-Vergleich für den Arbeitsraum durch. Der Soll-Wert wird dabei anhand der Eingangsdaten aus der Robotersteuerung berechnet. Der Ist-Wert wird über die Stereogeometrie des Kamerasystems mit Hilfe der Epipolargeometrie bestimmt. Da die Auswertung des Ist-Werts, wie auch bei der Brennflecküberwachung, Toleranzen unterworfen ist, ist für einen robusten Soll-Ist-Wert-Vergleich eine Toleranz hinsichtlich des Soll-Wertes vorzusehen. Die Kommunikationsschnittstelle des Roboters wird im Punkt Roboter näher beschrieben.

Für die oben genannten Funktionen muss das System Eingänge für die Komponenten Kamera 1, Kamera 2, Roboter, SPS und Ablenkoptik mit den jeweiligen Bus-Kommunikationsschnittstellen bzw. analogen oder digitalen Eingängen besitzen. Außerdem werden für Abschaltung Ausgänge für die Komponenten Strahlquelle, SPS, Roboter und Ablenkoptik mit den jeweiligen Bus-Kommunikationsschnittstellen bzw. analogen oder digitalen Ausgängen benötigt. Ferner muss das System wie eingangs beschrieben auf ein e-System adaptierbar sein.

B) Systemaufbau funktionale Sicherheit

Laser-Koordinate im Raum überwachen



Architektur entspricht Kategorie 3 oder 4.

Vorgesehene Architekturen (Kategorie 3)

- Die Anforderungen für Kat. B sind erfüllt
- Bewährte Sicherheitsprinzipien
- Fehlertoleranz = 1
- Einige aber nicht alle Fehler werden erkannt
- Anhäufung von unerkannten Fehlern kann zum Ausfall der SF führen
- Hauptsächlich charakterisiert durch die Struktur

| | | | |
|---------------------|---|---|---|
| MTTF _d : | N | M | H |
| DC: | N | M | |
| CCF: | + | | |

- Vorgesehene Architekturen - Kategorien
Funktionale Sicherheit an Maschinen

386 TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

Vorgesehene Architekturen (Kategorie 4)

- Die Anforderungen für Kat. B sind erfüllt
- Bewährte Sicherheitsprinzipien
- Fehlertoleranz = 2
- Alle Fehler werden erkannt oder
- Fehleranhäufung führt nicht zum Verlust der SF
- Hauptsächlich charakterisiert durch die Struktur

| | | |
|---------------------|---|---|
| MTTF _d : | | H |
| DC: | | H |
| CCF: | + | |

- Vorgesehene Architekturen - Kategorien
Funktionale Sicherheit an Maschinen

387 TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

(Quelle: TÜV Rheinland)


Die Einordnung ist wegen der Komplexität der Lösung schwer.

■ **Merkmale der Kategorien (EN ISO 13849-1)**

| | |
|----------|---|
| B | normenkonform, Beachtung grundlegender Sicherheitsprinzipien, Funktion unter den spezifizierten Bedingungen, (keine Fehlersicherheit) |
| 1 | wie B und Verwendung bewährter Bauteile und Sicherheitsprinzipien, keine Fehlersicherheit |
| 2 | wie B und Verwendung bewährter Sicherheitsprinzipien, Test nach dem Einschalten und in geeigneten Zeitabständen |
| 3 | wie B und Verwendung bewährter Sicherheitsprinzipien, Einfehlersicherheit, Fehlererkennung (!?) |
| 4 | wie B und Verwendung bewährter Sicherheitsprinzipien, Zweifehlersicherheit |

388

- Vorgesehene Architekturen - Kategorien
Funktionale Sicherheit an Maschinen

 TÜVRheinland®
Genau. Richtig.

(Quelle: TÜV Rheinland)

Die funktionale Sicherheit hat deshalb Tests wie für Kategorie 2 gefordert. Es ist die Einfehlersicherheit realisiert und diese kann bei Einbindung der externen Steuerungen (Roboter, Ablenkoptik, Laser) auch auf eine Zweifehlersicherheit erweitert werden.

C) Mögliche Fehler des Systems

| Fehler | Bedingung für Verlust der SF | Wahrscheinlichkeit für Verlust der SF | Erkennung Fehler | Möglicher Grund den Fehler nicht zu erkennen | Bemerkungen |
|--|--|--|--|--|--|
| Positionen der Kameras sind mechanisch verstellt, Optik ist verstellt oder beschädigt. | Koordinaten der Ablenkoptik bzw. des Roboters müssen den Fehler kompensieren | Sehr unwahrscheinlich | Test vor jedem Start der Maschine bzw. in zyklischen Abständen. | Spätestens bei einem Test mit einer optischen Testbox wird der Fehler erkannt. | Der Test nutzt eine Testbox, in der mit den Kameras auf einen Lichtfleck geschaut wird. Die Koordinate des Lichtflecks ist bekannt. Stimmt die Bestimmung der Koordinate durch die Kameras nicht mehr, dann kommt es zur mechanischen Verstellung. |
| Ausfall Kamera oder defektes Kamerakabel | Fehler wird nicht erkannt | Unmöglich. Zeit bis zur Erkennung des Fehlers muss noch gemessen werden. | 1) System erkennt Fehler/Ausfall Kamera automatisch. Kamera Controller geht in den Fehlerzustand. Dieser wird von der Sicherheits-SPS überwacht. 2) Bei der Berechnung der Raumkoordinate kommt es wegen fehlendem 2. Bild auch zu einem Zustand, der zu sofortiger Abschaltung des Lasers führt. | Keiner vorstellbar. | Die Zeit vom Auftreten des Fehlers bis zur Abschaltung Laser muss noch durch Tests ermittelt werden. |

| Fehler | Bedingung für Verlust der SF | Wahrscheinlichkeit für Verlust der SF | Erkennung Fehler | Möglicher Grund den Fehler nicht zu erkennen | Bemerkungen |
|---|---|---------------------------------------|---|---|--|
| Keine Aktualisierung eines Kamerabildes. Fehlfunktion der Kamera, die nicht zum Bildausfall führt. Dies gilt auch, wenn beide Kamerabilder nicht mehr aktualisiert würden. | Dieser Fehler würde die Berechnung der Raumkoordinate fehlerhaft beeinflussen. Nur wenn zeitgleich die Koordinaten-Daten vom Roboter / Ablenkoptik gleich falsch sind, wird dieser Fehler nicht erkannt. | Sehr unwahrscheinlich | Testung vor jedem Start der Maschine bzw. in zyklischen Abständen. | Spätestens bei einer Testung mit der optischen Testbox wird der Fehler erkannt. | Der Kamera-Controller erkennt von sich aus, dass ein Fehler zwischen Kamera und Controller vorliegt und geht auf Störung. Dies wird von der Sicherheits-SPS überwacht. |
| Ausfall des Kamera-Controllers; Es findet keine Aktualisierung der Laser-Koordinaten mehr statt. Fehler wird vom Controller selbst nicht mehr erkannt, so dass der Fehlerausgang nicht gesetzt wird. Auch Defekt des Kommunikationskabels zwischen Kamera-Controller und SPS ist eine ähnliches Szenario. | Es findet keine Aktualisierung der Koordinaten mehr statt. Wenn dies von der SPS nicht registriert würde und gleichzeitig die Koordinaten als korrekt interpretiert würden, dann würde der Fehler nicht erkannt werden. | Sehr unwahrscheinlich | 1) Überwachung der Aktualisierung der eingehenden Koordinatendaten. Bei fehlender Aktualisierung erfolgt Abschaltung des Lasers. 2) Überwachung auf Kommunikation an der EtherCat-Schnittstelle. 3) Live-Bit-Synchronisation zwischen Kamera-Controller und Sicherheits-SPS erkennt den Ausfall der Datenkommunikation. | Keiner vorstellbar. | Zeit vom Auftreten des Fehlers bis zur Abschaltung Laser muss noch gemessen werden. |

| Fehler | Bedingung für Verlust der SF | Wahrscheinlichkeit für Verlust der SF | Erkennung Fehler | Möglicher Grund den Fehler nicht zu erkennen | Bemerkungen |
|---|--|---------------------------------------|---|---|--|
| Falsche Koordinaten werden vom Roboter oder der Ablenkoptik gemeldet. | Nur wenn die Kameradaten diesen Fehler auch noch bestätigen, dann würde er nicht auffallen. | Sehr unwahrscheinlich. | Parallel zur reinen Koordinaten-Überwachung wird der Abstand vom Schweißpunkt zur Kamera und der Bereich, in dem sich der Roboter befindet, mit fest vorgegebenen Werten verglichen. Werden diese Grenzen nicht eingehalten, so kommt es zur sofortigen Abschaltung des Lasers. | Roboter- oder Ablenkoptik-Koordinaten sind falsch, aber nicht so falsch, dass es auffallen würde. Zum Beispiel der Roboter steht in einer Achse um 90° verdreht. Der Abstand zum festen Objekt ist für den Laser zufällig identisch. Dieser Fall würde dann nicht erkannt werden, wenn nicht noch zusätzliche Maßnahmen ergriffen werden. | Über eine externe Überwachung der Roboter-Achsen (z.B. Drehgeber) oder eine andere Form der Lagebestimmung der Laseroptik im Raum kann dieser theoretisch vorstellbare Fehler auch noch sicher erkannt werden. |
| Fehlerhafte Überprüfung der Koordinaten durch die SPS oder Ausfall der SPS. | Steuerung bleibt stehen mit einer IO-Bedingung und erkennt eingehende neue Daten nicht mehr und berechnet diese auch nicht weiter. | Sehr unwahrscheinlich. | Watchdog Task wird in der Steuerung programmiert. Diese Überwachungssoftware erkennt, wenn die Steuerungssoftware nicht mehr funktioniert und stoppt sofort den Laser. | Nur wenn der Watchdog auch versagen würde. | Der Watchdog wird von der Sicherheits-SPS auch kontrolliert. Sollte er sich nicht zyklisch melden, dann kommt es ebenfalls zur Abschaltung des Lasers. |
| Ausfall der Sicherheitssteuerung | | | Stopp aller Ausgänge der Sicherheitssteuerung | Sicherheitssteuerung zugelassen bis PL e | |

D) Software-Teile der funktionalen Sicherheit

Die Software ist in 2 Teilen als SRESW anzusehen (EN ISO 13849-1 Kapitel 4.6.2) und in einen Teil (Sicherheits-SPS) als SRASW (EN ISO 13849-1 Kapitel 6.4.3).

Umgesetzte SRESW-Basismaßnahmen:

- Entwicklung sowie Verifikation und Validierung entsprechend dem V-Modell
- Dokumentation der Software-Spezifikation und des Software-Designs
- Strukturierte und modulare Programmierung / Codegenerierung
- Überprüfung der Beherrschung von systematischen Ausfällen (siehe Liste im vorstehenden Kapitel)
- Verifikation der Diagnose und Fehlererkennungsfunktionen
- Funktionsprüfung
- Verwendung geeigneter Programmiersprachen und Werkzeuge mit Betriebsbewährung
- Modulare und strukturierte Programmierung

Notwendige Maßnahmen zur Erreichung eines höheren PL bei gleichzeitiger Serienherstellung:

- Einbindung eines Projektmanagement- und Qualitätsmanagementsystems
- Dokumentation über die Dauer des SW-Lebenszyklus
- Walk-Through-Review
- Grey-Box- und Leistungstests
- Änderungsmanagement

Die beiden SRESW-Teile sind:

- SW im Kamera-Controller zur Berechnen des Koordinate des Schweißpunkts
- SW zur Kontrolle der Koordinaten-Berechnung (Watchdog) im Kamera-Controller
- SW in der Steuerung zur Ermittlung der Sollkoordinaten und zum Vergleich der Soll- und Istkoordinaten
- SW in der Steuerung zur Kontrolle des Koordinatenvergleichs (Watchdog)

Der SRASW-Teil ist das Programm in der Sicherheits-Steuerung.

Dieser Teil deckt auch den Not-Halt und die Türverriegelungen der Schweißkabine mit PL e ab.

E) Zukünftige Erweiterung

Die Überwachungsfunktionen können noch verfeinert und erweitert werden. Durch die externe Abfrage von realen Koordinaten können auch fehlerhafte Meldungen externer Steuerungen erkannt werden.

Durch Einbinden von Freigabe- und Statusmeldungen in die externen Steuerungen kann auch PL e erreicht werden, wenn diese dann auch im 2-Fehler-Fall von sich aus stehen bleiben.

Erstellt durch:

Christian Wölz

Tel.: +49 821 / 24 29 28 - 11

Fax: +49 821 / 24 29 28 - 99

eMail: christian.woelz@icw-news.de

ICW [*industrie - elektronik*]

Ing.-Büro Christian Wölz

Dipl-Ing.(FH) Christian Wölz

Inhaber

Engelschalkstr. 32

86316 Friedberg

9. Literatur

- [1] Brecher, C.; Rosen, C. J.; Wenzel, C.; Bausch, S.: Fräsen von Hochleistungskeramik. wt Werkstattstechnik online 99 (2009) 3, S. 177-185.
- [2] Kessler, B.: Sicherheit bei Hochleistungsfaserlasern. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef. 23.-24.09.2009: BGIA 2009, S. 29-57.
- [3] Thieme, J.: Strahlqualität - der Schlüssel zu neuen Anwendungen in der Lasermaterialbearbeitung. In: Hoffmann, H., et al. (Hrsg.): Münchener Kolloquium. Garching b. München. 09.10.2008. München: Utz 2008, S. 301-311.
- [4] Bundesrepublik Deutschland: Verordnung zum Schutz der Beschäftigten vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung (Arbeitsschutzverordnung zu künstlicher optischer Strahlung - OStrV). 2010.
- [5] DIN EN 60825-1: Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 1: Klassifizierung von Anlagen und Anforderungen (IEC 60825-1:2014). Berlin: Beuth 2015.
- [6] DIN EN 60825-2: Sicherheit von Laser-Einrichtungen - Teil 2: Sicherheit von Lichtwellenleiter-Kommunikationssystemen (LWLKS) (IEC 60825-2:2004 + A1:2007+A2:2010). Berlin: Beuth 2011.
- [7] DIN EN 60825-4: Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 4: Laserschutzwände (IEC 60825-4:2006+A1:2008+A2:2011). Berlin: Beuth 2011.
- [8] DIN EN 60825-12: Sicherheit von Lasereinrichtungen - Teil 12: Sicherheit von optischen Freiraum-Kommunikationssystemen für die Informationsübertragung (IEC 60825-12:2004). Berlin: Beuth 2004.
- [9] Zaeh, M. F.; Braunreuther, S.; Krug, S.: Systematic development of safe high performance laser applications. In: Ostendorf, A., et al. (Hrsg.): LIM 2009. München. 15.-18.06.2009. Stuttgart: AT-Fachverlag 2009, S. 305-311.
- [10] Zaeh, M. F.; Braunreuther, S.; Huber, S.; Oefele, F.; Trautmann, A.: Systematic Development of Safe High Performance Laser Applications - Knowing the Limits of Conventional Systems. In: LIA (Hrsg.): ICALEO 2009. Orlando. 2.-5.09.2009. Orlando 2009, #905.
- [11] Braunreuther, S.: Anlagensicherheitskonzepte für Hochleistungslaser der neuesten Generation. In: BGIA (Hrsg.): Sicherheit bei der Materialbearbeitung mit Laserstrahlung. Hennef. 23.-24.09.2009: BGIA 2009, S. 181-186.
- [12] Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 2006/25/EG zum Schutz der Arbeitnehmer vor Gefährdungen durch künstliche optische Strahlung und zur Änderung von Arbeitsschutzverordnungen. In: Bundesrepublik Deutschland (Hrsg.): Bundesgesetzblatt: Bundesanzeiger, S. 960-967.
- [13] Europäisches Parlament: Richtlinie über Mindestvorschriften zum Schutz von Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer vor der Gefährdung durch physikalische Einwirkungen. 2006.
- [14] KUKA Industries GMBH & CO. KG - Geschäftsbereich Lasertec: LaserSpy© Safety Sensor. <http://www.reislasertec.de/de/produkte/lasersicherheitstechnik/laserspy--safety-sensor>. Letzter Aufruf: 11.07.2017.
- [15] Lasermet Ltd.: laser jailer active laser guarding system. <http://www.lasermet.com/active-laser-guarding-system.php>. Letzter Aufruf: 11.07.2017.

[16] FFT EDAG Produktionssysteme GmbH & Co. KG: Laserschutzkabinen. <http://www.fft.de/produkte/fft-lasertechnik-produkte/fft-laserschutzkabinen.html>. Letzter Aufruf: 11.07.2017.

[17] Kraft, M.: Telefongespräch mit dem Kundenteamleiter der FFT EDAG Produktionssysteme GmbH & Co. KG . Geführt am: 11.07.2017.