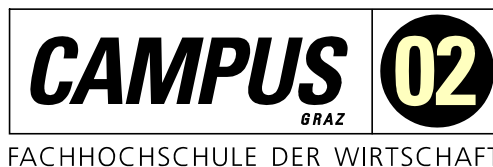


Masterarbeit

**AUTOMATISIERTE, KAMERAGESTÜTZTE
QUALITÄTSKONTROLLE MIT KOLLABORIERENDEM
MEHRACHSROBOTER**

ausgeführt am



Fachhochschul-Masterstudiengang
Automatisierungstechnik-Wirtschaft

von

Holger Philippsen, BSc

1510322023

betreut und begutachtet von

Dipl.-Ing. Dieter Lutzmayr

Graz, im Mai 2017

.....
Unterschrift

EHRENWÖRTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre ehrenwörtlich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und ohne fremde Hilfe verfasst, andere als die angegebenen Quellen nicht benützt und die benutzten Quellen wörtlich zitiert sowie inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

.....
Unterschrift

DANKSAGUNG

Den nachstehend angeführten Personen gilt mein besonderer Dank, da sie mir erstens stets mit Rat und Tat zur Seite gestanden sind und mir immer starken Rückhalt und entsprechend Motivation gegeben haben.

Dipl.-Ing. Dieter Lutzmayr (Betreuer)

Dr. Herbert Kroneis

Ebenso ist es mir ein großes Bedürfnis, meiner lieben Lebensgefährtin, Birgit Schirmetz, ganz besonders herzlich zu danken, die in dieser Zeit viel Geduld und Ausdauer mit mir bewiesen hat und mir stets moralischen Bestand leistete.

KURZFASSUNG

Die Fachhochschule CAMPUS 02 hat für Forschungs- und Projektaufgaben sowie für Demonstrations- bzw. Vorführungszwecke für die Studierenden der Fachrichtung Automatisierungstechnik einen Sechs-Achs-Knickarmroboter des Typs UR5 der Firma Universal Robots angekauft. Dabei handelt es sich um einen kollaborierenden Roboter (eng. COBOT), in dessen Arbeitsbereich Mensch und Roboter interagieren können. Die Sicherheitsfunktionen sind so ausgelegt, dass es selbst bei Kollision zwischen Maschine und Mensch zu keiner Gefährdung der Person kommt.

Ziel dieser Arbeit war es, einen mobilen Arbeitsplatz für diesen kollaborierenden Roboter zu gestalten, welcher es ermöglicht, diese Sicherheitsstandards einzuhalten. Des Weiteren galt es zu untersuchen, welcher passende Endeffektor (z.B. Greifer für Manipulationszwecke) in Zukunft verwendet werden kann und ob sich ein Kamerasystem für z.B. das Lesen von Strich- oder Barcodes implementieren lässt.

Um einen allen anwendbaren Normen und Richtlinien entsprechenden Arbeitsbereich gestalten zu können, wurden Methoden wie Risikoanalyse, Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) und Nutzwertanalyse (NWA) herangezogen.

Das Ergebnis dieser Analysen und Tests zeigte, dass trotz Einhaltung der Richtlinien und Normen je nach Anwendungsfall, eine Verletzungsfreiheit der interagierenden Person nicht zu hundert Prozent gewährleistet werden kann.

Es wird daher empfohlen diese Risiken separat zu bewerten und diese vor der Inbetriebnahme des Systems durch zusätzliche Maßnahme zu eliminieren. Denkbar wären beispielsweise der Einbau von Schutzblechen, die Konfiguration von Schutzebenen oder die Implementierung einer Schutzfeldüberwachung. Das Kamerasystem lässt sich optimal in die Arbeitsplatzumgebung einbinden und entsprechend adaptieren. Greifer bzw. allgemein Endeffektoren müssen immer für jeden Verwendungszweck passend ausgewählt werden. Dabei sollten sowohl wirtschaftliche als auch sicherheitsspezifische Gesichtspunkte als Entscheidungskriterien herangezogen werden.

ABSTRACT

The University of Applied Sciences CAMPUS 02, degree course Automation Technology, has purchased a six-axis articulated arm robot, type UR5, from the company Universal Robots for research and project tasks as well as for demonstration purposes for students. In the working area of this so called collaborative robot (COBOT), human and robot work can be done at the same time. The safety functions are designed in such a way that even in the event of a collision between the machine and the human being there is no danger to the person.

The aim of this thesis was to design a mobile workstation for this collaborative robot in compliance with all applicable safety standards. Furthermore, it was necessary to investigate which suitable end effector (for example a gripper for manipulation purposes) could be used in the future and whether a camera system for e.g. reading bar codes would be applicable.

Designing a working area which corresponds with all applicable standards and guidelines, methods such as risk analysis, failure mode and effects analysis (FMEA) and cost value analysis were used.

The results of these analyses and tests have shown that despite compliance with the directives and standards, depending on the application, the person interacting within the collaborative space cannot be completely safeguarded from an injury.

Therefore it is recommended that these risks have to be evaluated separately and have to be eliminated e.g. by design, by implementation of protective levels or protective fields before the system is put into operation. A camera system can be integrated perfectly into the workplace environment and adapted accordingly. Grippers or general end effectors must always be selected specifically for each application. Both the economic as well as the insecurity related aspects should be the main criteria of decision.

INHALTSVERZEICHNIS

Ehrenwörtliche Erklärung	i
Danksagung	i
Kurzfassung	ii
AbstRact.....	ii
Inhaltsverzeichnis.....	i
1 Einleitung	1
2 Zielsetzung.....	2
3 Kollaborierende Robotik.....	3
3.1 Mensch-Roboter-Kollaboration	3
3.2 Kollaborationsraum.....	4
3.3 Kollaborierende Roboter.....	4
3.4 Normen und Sicherheitsfunktionen.....	5
3.4.1 Sicherheitsbewerteter, überwachter Halt.....	6
3.4.2 Handführung	6
3.4.3 Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	7
3.4.4 Leistungs- und Kraftbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder durch die Steuerung ...	8
3.4.5 Grenzwertvalidierung.....	8
4 Risiken und Risikovermeidung.....	10
4.1 Risikoanalyse	10
4.2 Gefährdungsarten.....	11
4.2.1 Mechanische Gefährdung.....	13
4.2.2 Elektrische Gefährdung	16
4.2.3 Weitere Gefährdungen	16
4.3 Risikobewertung	16
4.4 Risikominimierung	17
4.5 Methoden zur Risikominderung.....	19
4.5.1 Methodenüberblick	19
4.5.2 Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse (FMEA).....	20
4.6 Wirtschaftsrisiken - Nutzwertanalyse.....	24
4.6.1 Grundlagen	24
4.6.2 Aufbau einer NWA.....	24
4.6.3 Vor- und Nachteile der NWA	26
5 Bildverarbeitung zur Teileerkennung	27
5.1 Hardware	27
5.1.1 Sensoren	27
5.1.2 Objektive.....	28
5.1.3 Beleuchtung.....	29
5.2 Software-Datenstruktur.....	29
5.2.1 Histogrammebnung	29

5.2.2	Binarisieren.....	29
5.2.3	Filteroperationen.....	30
5.2.4	Weitere Operatoren	30
6	Aufbau des Evaluierungssystems	31
6.1	Aufgaben im Vorfeld	31
6.1.1	Auswahl des Robotertyps	31
6.1.2	Lieferantenauswahl.....	31
6.1.3	Untersuchungsziele und Aufgaben.....	32
6.2	Beschreibung der Systemkomponenten.....	32
6.2.1	Roboter UR5.....	32
6.2.2	Konstruktiver Unterbau	34
6.2.3	Sick S300 Laserscanner.....	35
6.2.4	Kamerasystem Cognex 7400C.....	37
6.2.5	Endeffektor	38
6.3	Montage und Aufbau des kollaborativen Arbeitsplatzes.....	41
6.3.1	Montage Roboter- und Robotersteuerung	41
6.3.2	Montage Sicherheitslaserscanner und Not-Halt-Taster	43
6.3.3	Montage des Kamerasystems	44
6.3.4	Werkzeugwechselsystem	44
6.4	Elektrische Schnittstellen und Integration.....	45
6.4.1	Controller-E/A	45
6.4.2	Werkzeug-E/A	47
6.4.3	Netzanschluss, Roboteranschluss.....	47
6.4.4	USB Anschlüsse	47
7	Inbetriebnahme und Evaluierung	48
7.1	Sicherheitsaspekte	48
7.2	S300-Implementierung	49
7.3	Roboterbedienung und Roboterprogrammierung	50
7.4	Arbeitsüberwachung MRK.....	52
7.5	Teileerkennung mittels Kamerasystem.....	52
7.6	Erkenntnisse aus der Inbetriebnahme / Evaluierung	53
8	Zusammenfassung und Ausblick	54
8.1	Ergebnisse.....	54
8.2	Ausblick	55
8.3	Empfehlung(en) an das Unternehmen.....	55
	Literaturverzeichnis	56
	Abbildungsverzeichnis	58
	Tabellenverzeichnis	61
	Abkürzungsverzeichnis	62
Anhang 1	Systembeschreibung KDMG-KOLROBOT	63
Anhang 2	Liste signifikanter Gefährdungen	64
Anhang 3	Bewertungsschema Risikoprioritätszahl	68

Inhaltsverzeichnis

Anhang 4	Nutzwertanalyse Lieferantenauswahl	69
Anhang 5	Technische Spezifikationen UR5 / CB3	70
Anhang 6	Technische Spezifikationen S300 Expert	71
Anhang 7	Technische Spezifikationen Cognex 7400C	72
Anhang 8	FMEA Stufe 1	73
Anhang 9	FMEA Stufe 2	74

1 EINLEITUNG

Die Industrie ist aktuell durch die stetig wachsende Flexibilität und die immer notwendiger Individualität hinsichtlich Produktionsumgebung stark gefordert. Unternehmen, die Roboterfertigungszellen einsetzen, müssen sich aus diesem Grund ständig weiterentwickeln, was zwangsläufig sowohl ein Umdenken hinsichtlich Arbeitsplatzanforderungen, insbesondere deren Sicherheitsanforderungen, nach sich zieht als auch die Umgestaltung und/oder Neugestaltung der Arbeitsplätze selbst hervorruft.

Dabei steht die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) im Fokus. Dem Trend zu Folge werden immer mehr dieser kollaborierenden Roboter eingesetzt werden, die am Arbeitsplatz mehr Flexibilität und vor allem auch höhere Produktivität schaffen sollen.

Der wesentliche Unterschied zur „normalen“ Roboterzelle ist die Tatsache, dass sich der Mensch im Arbeitsraum des Roboters befindet und darin agiert. Dabei kann es unweigerlich zum Zusammenstoß zwischen Mensch und Maschine kommen, der keinesfalls Verletzungen nach sich ziehen darf. Daraus resultieren neue Aspekte und Sicherheitsanforderungen hinsichtlich Kollisionsvermeidung und/oder Geschwindigkeitsbegrenzung im Arbeitsbereich des Roboters. Diese Anforderungen sind mittlerweile zumindest teilweise konkretisiert und in Normen, technischen Spezifikationen und/oder Richtlinien implementiert.

Diese Normen stellen die inhaltliche Basis für die vorliegende Masterarbeit dar und sind im Speziellen bei den Sicherheitsaspekten zwingend einzuhalten. Eine Risikobetrachtung bzw. eine Risikoanalyse inklusive einer Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse (FMEA) werden zur Umsetzung herangezogen.

An der Studieneinrichtung Automatisierungstechnik der Fachhochschule CAMPUS 02 wird in Zukunft ein kollaborierender Sechs-Achs-Knickarmroboter des Typs UR5 der Firma Universal Robots eingesetzt. Der Roboter dient als mobiler Demonstrator und soll mittels passenden Endeffektors (Greifer und/oder Kamerasystem) entsprechende Arbeiten ausführen können.

In weiterer Folge soll das Robotersystem auch für verschiedene Projekte im Zuge der Automatisierungstechnikausbildung für die Studierenden der Fachhochschule CAMPUS 02 zur Verfügung stehen, wodurch die in der Theorie erlernten Inhalte zukünftig auch durch praxisnahe Aufgaben ergänzt werden können.

2 ZIELSETZUNG

Das Untersuchungsinteresse dieser Arbeit liegt in der grundlegenden Gestaltung eines kollaborativen Arbeitsplatzes für diesen Roboter. Dies schließt neben der Auswahl eines passenden Greifersystems, das für unterschiedliche Manipulationszwecke eingesetzt werden kann, auch die Implementierung und Testung eines vorhandenen Kamerasystems zum Zweck einer optischen Fehleranalyse mit ein.

Ziel der Arbeit ist die Umsetzung der beschriebenen Szenarien und der Aufbau des Roboters als Demonstrator unter Einhaltung der MRK-Vorschriften. Diesbezüglich werden auch Risikountersuchungen angestellt, da trotz Ausführung des Roboters als kollaborierender Roboter die Kollisionsgefahr zwischen Mensch und Maschine nicht zur Gänze ausgeschlossen werden kann. Es bestehen Restrisiken eines Zusammenstoßes, beispielsweise zwischen einem Bediener am Arbeitsplatz und einem bewegten Teil des Roboters. Diese Restrisiken werden bewertet und daraus entsprechende Maßnahmen abgeleitet.

Die Kapitel 3 „Kollaborierende Robotik“ und 4 „Risiken und Risikovermeidung“ behandeln neben der Beschreibung der Roboterkollaboration auch die allgemeinen und spezifischen Anforderungen, wie zum Beispiel Anforderungen an die Qualität bzw. an die Funktionssicherheit: DIN EN ISO 10218-1 (2012), DIN EN ISO 10218-2 (2012), DIN EN ISO 13855 (2010), ISO/TS 15066 (2016).

Ebenso sind die Anforderungen der Aufgabenstellung, einen kollaborierenden Roboter für die zuvor genannten Aufgaben einsetzen zu können, inklusive deren Umsetzung zu beschreiben.

Ab Kapitel 7 wird die Umsetzung in einen Demonstrator bzw. die Umsetzung des Roboteraufbaues behandelt, d.h. es soll ein voll funktionsfähiges System aufgebaut werden, das alle Anforderungen in Bezug auf Sicherheit bei der Kollaboration erfüllt, einschließlich der notwendigen Einstellungen in der Steuerung.

Damit sollen folgende Fragen beantwortet werden:

- Wie exakt ist die Berührungserkennung (Kollision) Mensch/Roboter?
- Muss/kann die Anwesenheit von Personen sicher erkannt werden?
- Muss/kann die Maximalgeschwindigkeit beschränkt werden?
- Welche Arbeitsgenauigkeit kann in Abhängigkeit von der Auslenkung und anderen Parametern erreicht werden?
- Wie kann die Werkzeugschnittstelle für weitere Werkzeuge genutzt werden?
- Wie kann ein sicherer Werkzeugwechsel erfolgen?
- Welche (Rest)-Risiken sind vorhanden und wie werden sie bewertet?

Um diese Untersuchungsziele zu realisieren, werden in den nachstehenden Kapiteln die wesentlichen Anforderungen erörtert und die einzusetzenden Methoden beschrieben.

3 KOLLABORIERENDE ROBOTIK

Die ständig wachsende Flexibilität im Zeitalter der „Industrie 4.0“, meist hervorgerufen durch individuelle Konsumentenwünsche, setzt hohe Anforderungen und somit auch neue Maßstäbe an die produzierenden Unternehmen. Viele Hersteller sind dadurch in der Situation, ihre meist auf ein spezielles Produkt ausgelegten Fertigungsstraßen so anzupassen, dass auf diese Veränderungen rasch und vor allem flexibel reagiert werden kann.

Die Roboterhersteller reagieren auf diese Entwicklung und bauen vermehrt sogenannte kollaborierende Roboter, die in sämtlichen produzierenden Branchen Anwendung finden. Ihr Hauptmerkmal ist die Fähigkeit, sicher mit Menschen zusammenarbeiten zu können.

3.1 Mensch-Roboter-Kollaboration

Industrieroboter bzw. im Allgemeinen Fertigungsroboter waren bisher immer relativ große und robuste Geräte und der Mensch wird aus Sicherheitsgründen strikt aus dem Arbeitsbereich eines derartigen Roboters verbannt. Das Risiko, während des Roboterbetriebes von dessen Arm oder eines Teiles davon verletzt oder sogar getötet zu werden, ist viel zu hoch. Erreicht wird das, indem man zum Beispiel den gesamten Arbeitsbereich eines Roboters mittels trennender Schutzeinrichtung einhaust und diese Arbeits- oder Roboterzelle dementsprechend gegen Eindringen schützt (Sicherheitsschalter, Bewegungsmelder, Safety Eye usw.). Ein Umbau, z.B. hervorgerufen durch eine Produktumstellung innerhalb der Fertigung, oder einfach nur ein Werkzeugwechsel hat hier jedoch zur Folge, dass die gesamte Anlage für diese Arbeit zu stoppen ist und die Produktion dadurch zum Stillstand kommt.

Der „neue“ Arbeitsraum, in dem der Mensch nun direkt mit dem Roboter interagiert (MRK), erschließt neue und weitaus flexiblere Produktionsumgebungen. Erstmals ist man in der Lage ohne Produktionsabbruch z.B. einen Werkstücktausch (siehe Abb. 1), einen Werkzeugwechsel oder einfach nur eine Sichtkontrolle im produktiven Bereich durchzuführen.

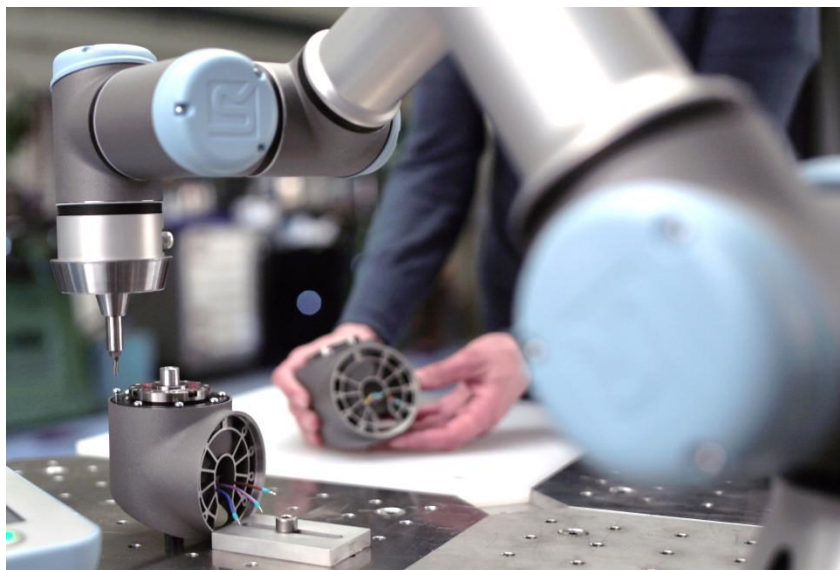


Abb. 1: Werkstücktausch im Arbeitsraum eines kollaborativen Roboters, Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017] (leicht modifiziert).

3.2 Kollaborationsraum

Die Definition des Kollaborationsraumes ist in der DIN EN ISO 10218-2 (2012) festgehalten und folgenderweise beschrieben:

„Arbeitsraum innerhalb des geschützten Bereichs, in dem der Roboter und der Mensch während des Produktionsbetriebs gleichzeitig Aufgaben ausführen können“¹

Den kollaborativen Arbeitsraum kann man sich somit als die Schnittmenge des produktiven Arbeitsraumes des Roboters und des produktiven Arbeitsraumes des Bedienpersonals vorstellen. Zur Veranschaulichung dient die nachstehende, schematische Abbildung (Abb. 2) aus der Technischen Spezifikation ISO/TS 15066 (2016):

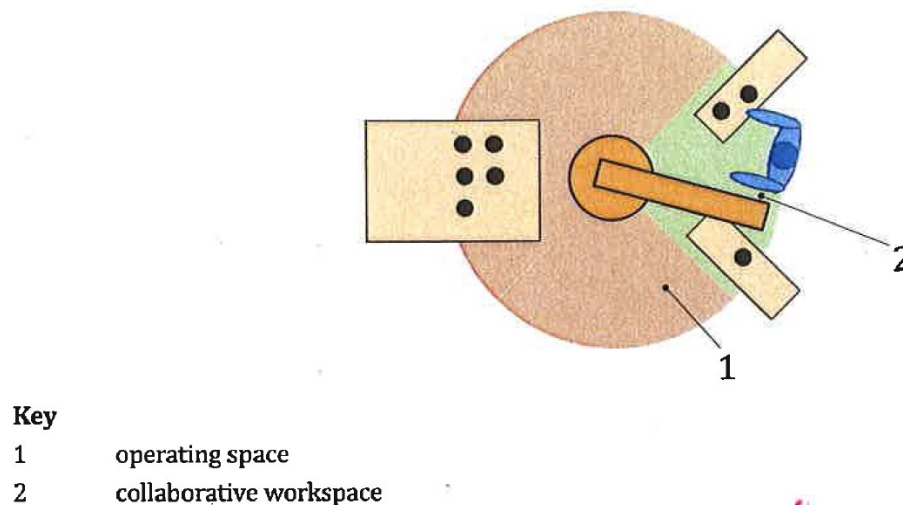


Abb. 2: Kollaborativer Arbeitsraum, Quelle: ISO/TS 15066 (2016), S. 3.

Dabei reicht es nicht aus, einen gegebenen Arbeitsraum per se als kollaborativen Arbeitsraum zu deklarieren. Der Roboter muss eigens für kollaborative Tätigkeiten spezifiziert sein, denn erst diese Grundvoraussetzung ermöglicht es, den für das Bedienpersonal notwendigen Sicherheitsraum zu gestalten.

Bei diesen Robotertypen, wie auch bei dem in dieser Masterarbeit zu untersuchenden Roboterarm UR5, handelt es sich um speziell für den Einsatz im Kollaborationsraum entwickelte Maschinen, die sämtlichen aktuell gültigen Normen, Richtlinien und Anforderungen entsprechen.

Den wichtigsten Voraussetzungen zum Betrieb eines derartigen Roboters und dessen Beschreibung widmet sich das folgende Unterkapitel 3.3.

3.3 Kollaborierende Roboter

Bei dieser speziellen Art von Robotersystemen handelt es sich meistens um leichte Roboter, die in Form und Größe dem menschlichen Arm sehr ähneln. Das Design, wie es auch Abb. 3 zeigt, weist außerdem

¹ Vgl. DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 9 Unterkapitel 3.3.

gegenüber jenem der größeren, stärkeren Pendants eher abgerundete Formen auf, insbesondere an den einzelnen Gelenken und gleicht somit anatomisch der menschlichen Schulter.



Abb. 3: Leichtbauroboter der Firma Kuka, Typ: LBR iiwa,
Quelle: KUKA AG (2017), Online-Quelle [06.05.2017] (leicht modifiziert).

Liest man in den einschlägigen Grundlagen nach, findet man laut DIN EN ISO 10218-2 (2012) folgende Definition eines kollaborierenden Roboters:

„Roboter, der für das direkte Zusammenwirken mit dem Menschen innerhalb eines festgelegten Kollaborationsraums (3.3) konstruiert ist“²

Diese Definition ist sehr grob formuliert und beinhaltet sehr viel mehr Know-How auf Basis wesentlich komplexerer Bedingungen und Richtlinien. Damit diese Maschinen innerhalb des definierten Kollaborationsraumes parallel mit Personen einsetzbar sind und sich eine sichere MRK gestalten lässt, sind vier wesentliche Sicherheitsfunktionen³ ausschlaggebend, die detailliert in den Normengruppen DIN EN ISO 10218 Teil1 und Teil 2 beschrieben und im nächsten Unterkapitel zusammengefasst sind.

3.4 Normen und Sicherheitsfunktionen

Da sowohl die Begrifflichkeit als auch die Anwendungen im Zusammenhang mit der kollaborativen Robotik relativ neu sind, wurden einige Normen und Richtlinien adaptiert und in den jeweilig neuen Fassungen aufgelegt. Im Speziellen handelt es sich um folgende Normen:

- DIN EN ISO 10218-1 (2012) - Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter
- DIN EN ISO 10218-2 (2012) - Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration
- DIN EN ISO 13855 (2010) - Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen

² Vgl. DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 9 Unterkapitel 3.2.

³ Vgl. DIN EN ISO 10218-1 (2012), S. 21 ff. und DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 46 ff.

- ISO/TS 15066 (2016) - Technical Specification - Robots and robotic devices - Collaborative Robots

Aus diesen drei Normen und der Technischen Spezifikation, die im Speziellen auf die kollaborierende Robotik abzielt, ergeben sich eine Vielzahl an Anforderungen von denen die nachstehenden vier Sicherheitsanforderungen am wesentlichsten sind.

3.4.1 Sicherheitsbewerteter, überwachter Halt

Grundsätzlich wird zwischen den beiden Halt-Funktionen „Not-Halt“ und „Sicherheitshalt“ unterschieden. Befindet sich im Kollaborationsraum eine Person, so muss der Roboter verlässlich anhalten nach Verlassen des Kollaborationsraumes kann der Roboter wieder in den Automatikbetrieb wechseln. Hier spricht man vom sogenannten Sicherheitshalt.

Der Not-Halt des Systems wird rein manuell ausgelöst und erfordert zur Rückstellung ebenfalls wieder eine manuelle Interaktion. Die Steuerung muss dabei so ausgelegt sein, dass die Not-Halt-Funktion stets unabhängig von der Sicherheitshalt-Funktion ausgeführt ist. Nachstehende Tabelle veranschaulicht den Unterschied der beiden Funktionen.

Parameter	Not-Halt	Sicherheitshalt
Position der Auslösevorrichtung	Der Bediener hat schnellen, ungehinderten Zugang/Zugriff	Für nicht trennende Schutzeinrichtungen, wird die Position anhand der Formeln für den (sicheren) Mindestabstand, wie in ISO 13855 beschrieben, bestimmt.
Auslösung	Manuell	Manuell, automatisch oder kann automatisch durch sicherheitsbezogene Funktion ausgelöst werden
Sicherheitsbezogene Leistungsfähigkeit des Steuerungssystems	Muss Leistungsanforderung nach 5.4 erfüllen	Muss Leistungsanforderung nach 5.4 erfüllen
Rückstellung	Nur manuell	Manuell oder automatisch
Häufigkeit der Nutzung	Selten	Veränderlich; von zyklisch bis selten
Zweck	Notfall	Technische Schutzmaßnahmen oder andere Risikominimierung
Wirkung	Wegnahme der gefährbringenden Energie	Gesteuerte Beseitigung des gefährbringenden Zustands

Tab. 1: Vergleich der Halt-Funktionen, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 10218-1 (2012), S. 15.

3.4.2 Handführung

Ist beim Robotersystem eine Handführung vorgesehen, muss auf dem Bedienpanel sowohl ein Not-Halt als auch eine Zustimmungseinrichtung vorhanden sein. Wird der Roboterarm händisch im Arbeitsraum bewegt (aktive Handführung), so muss der Roboter mit der sicherheitsbewerteten, überwachten Geschwindigkeit betrieben werden, wobei der Höhe der maximalen Geschwindigkeit bereits im Vorfeld eine Risikobeurteilung zu Grunde liegt. Die folgende Abb. 4 veranschaulicht das händische Programmieren von Roboterpositionen (engl. Teaching) durch den Bediener. Das Teachpanel ist sowohl mit einem Not-Halt als auch mit der Zustimmungseinrichtung ausgestattet.



Abb. 4: Teaching eines Roboterarmes am Kuka LBR iiwa,
Quelle: KUKA AG (2017), Online-Quelle [06.05.2017] (leicht modifiziert).

3.4.3 Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Durch diese beiden Sicherheitsfunktionen wird erreicht, dass eine festgelegte Bewegungsgeschwindigkeit des Roboters immer in Abhängigkeit zu einem festgelegten Abstand des Bedienpersonals eingehalten wird. Bei Über- oder Unterschreitung einer der beiden Parameter Geschwindigkeit oder Abstand muss ein sofortiger Sicherheitshalt ausgelöst werden. Dabei ist es unumgänglich, gegebenenfalls auch andere, sich im Kollaborationsraum befindliche Personen zu detektieren. Die Realisierung erfolgt meist mit Hilfe von integrierten Kamera- oder Radarsystemen oder auch mittels externer Laserscanner, deren Ausgangssignale direkt in die Sicherheitseingänge der Robotersteuerung integriert werden.

In Abb. 5 wird ein kollaborativer Arbeitsplatz dargestellt, der durch entsprechende Warn- und Schutzfelder (gelb und rot) abgesichert ist.

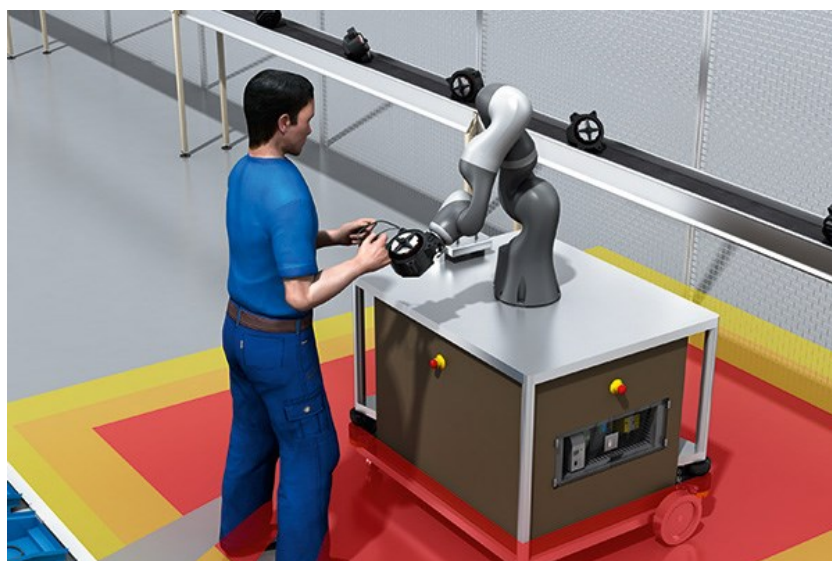


Abb. 5: Schematische Darstellung einer Schutzfeldüberwachung,
Quelle: SICK AG (2017), Online-Quelle [06.05.2017].

Durch Auslösung des Warnfeldes (gelb), beispielsweise durch Betreten der gelben/orangen Zone, wird über die Steuerung die Roboterbewegungsgeschwindigkeit gedrosselt; bei Auslösung des Schutzfeldes (rot) wird z.B. der Roboter ganz gestoppt (Sicherheitshalt).

Mit dieser Umsetzung wird der Roboter zwar Teil des kollaborierenden Robotersystems, kann aber nach wie vor nicht für die unmittelbare Zusammenarbeit mit Menschen eingesetzt werden. Das Gesamtsystem ist zu dynamisch und die erreichten Geschwindigkeiten könnten zu hoch sein. Bereits im Zuge des Aufbaues und der Auslegung eines derartigen Anwendungssystems müssen durch die verpflichtende Risikobeurteilung die entsprechenden Geschwindigkeitswerte und Abstände zwischen Bediener und Roboter definiert und bewertet werden. Daraus resultierend ergibt sich ein für den Betrieb sicherer Mindestabstand. Die Anforderungen sind in der Norm DIN EN ISO 13855 (2010) enthalten.

3.4.4 Leistungs- und Kraftbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder durch die Steuerung

Diese Kollaborationsform ermöglicht es, dass autonome, kollaborierende Roboter innerhalb des definierten Kollaborationsraums zusammen mit dem Menschen eingesetzt werden können. Dazu ist der Roboter selbst mit einer Vielzahl an Sensoren ausgestattet, die durch permanente Messung der äußeren Kräfte Daten an die Robotersteuerung weiterleiten. Kommt es zu einer Überschreitung, beispielsweise durch eine Kollision, wird der Roboter sofort gestoppt.

Zusätzlich zur Kraftbegrenzung wird durch Überstrommessung auch eine Leistungsbegrenzung realisiert, die bei Übertretung eines entsprechenden Grenzwertes (hersteller- und systemabhängig) ebenso einen sofortigen Stopp des Roboters zur Folge hat.

Aus den zuvor beschriebenen Methoden geht hervor, dass die Roboteranforderungen und die Anforderungen an den Kollaborationsraum miteinander verschmelzen und immer als eine Einheit betrachtet werden müssen. Das ist auch der Grund warum für jeden Anwendungsfall separat alle Gefährdungsmöglichkeiten innerhalb des Robotersystems identifiziert und die Risiken separat bewertet werden müssen. Dabei ist insbesondere darauf zu achten, dass ausnahmslos alle am Robotersystem integrierten Teile und Module, wie beispielsweise der Endeffektor, zusätzliche Vorrichtungen oder das zu manipulierende Werkstück selbst mit einbezogen werden.

3.4.5 Grenzwertvalidierung

Der steigende Bedarf nach MRK-Systemen und die daraus resultierenden Anpassungen der Normgebung bewirken ein Umdenken bei den Roboterherstellern. Die MRK-Systeme erfüllen mittlerweile, nach Jahren der Forschung und Entwicklung, die Normen, Richtlinien und technischen Spezifikationen.

Für die Roboterhersteller selbst stellt sich mit dem Bau und mit der Integration von kollaborierenden Robotern eine entscheidende Frage: „Wie bewerkstelligt man, dass die vorgegebenen Grenzwerte auch eingehalten werden?“

Nach aktuellem Stand der Technik müssen alle als kritisch eingestuften Kollisionsmöglichkeiten innerhalb eines Kollaborationsraumes am Arbeitsplatz geprüft und validiert werden. Dabei gilt es die sogenannten

biomechanisch-physikalischen Eigenschaften wie Körpersteifigkeit, Körperteilbewegung und Körpermassenträgheit zu untersuchen.⁴

Verständlicherweise können für diese Validierung keine Testpersonen herangezogen werden und es wird auf ein dem Menschen nachgebildetes System zurückgegriffen. Dieses biofidele System eignet sich zur Simulation und Messung der notwendigen Parameter und wurde vom Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) entwickelt. Der Begriff „biofidel“ kann mit „naturgetreu“ übersetzt werden und beschreibt den mechanischen Ähnlichkeitsgrad eines Modells zum realen biologischen System. Die nachstehende Abbildung gibt Aufschluss über das in diesem System eingesetzte Messprinzip.

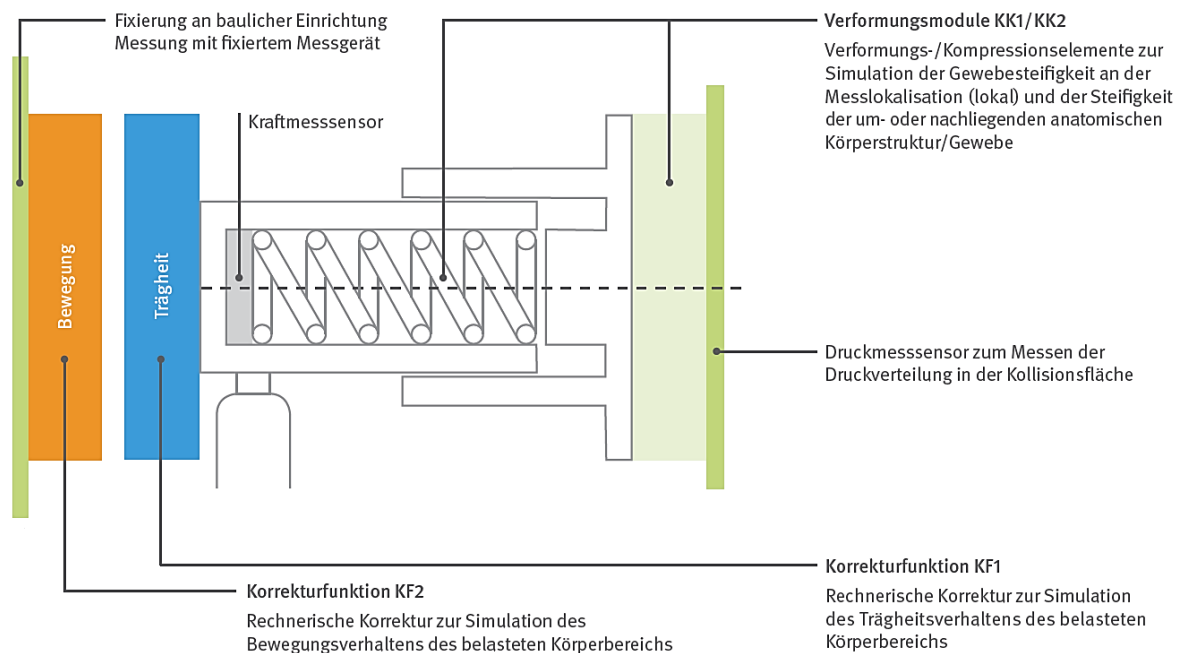


Abb. 6: Physikalisches Messprinzip nach IFA, Quelle: Heulke (2015), S. 12.

Die Firma GTE Industrieelektronik GmbH hat in Zusammenarbeit mit dem IFA ein Kraft-Druck-Messsystem für kollaborierende Roboter entwickelt (siehe Anhang 1), das bereits seit einigen Jahren von den Roboterherstellern zur Validierung kollaborativer Robotersysteme eingesetzt wird. Die Ergebnisse der Prüf- und Zertifizierungsstellen verdeutlichen, dass die Roboterhersteller die Kraft- und Druckgrenzwerte einhalten und die am Markt erhältlichen Systeme den geforderten Regelwerken entsprechen. Das hat insbesondere für den Betreiber eines kollaborativen Robotersystems den entscheidenden Vorteil, dass die integrierten Überwachungsfunktionen des Systems nicht erneut aufwendig validiert werden müssen.

Diese Tatsache entbindet den Integrator jedoch nicht von seiner Pflicht, für jeden einzelnen Anwendungsfall des eingesetzten Robotersystems potentielle Gefährdungen bzw. Risiken zu identifizieren, zu bewerten, gegebenenfalls zu eliminieren oder zumindest soweit zu reduzieren, dass keine (Personen-) Schäden mehr auftreten können. Das nächste Kapitel geht näher auf die Identifizierung, die Bewertung und die Beseitigung von potentiellen Gefahren ein.

⁴ Vgl. Heulke (2015), S. 10 ff..

4 RISIKEN UND RISIKOVERMEIDUNG

Zu den Themen Risiko, Risikominimierung, Risikobeherrschung gibt es mittlerweile eine fast unüberschaubare Menge an Literatur. Nahezu jede Branche hat für ihre eigene Umgebung anwendbare Normen, Richtlinien oder Anforderungen publiziert und diese meist auch im Risikomanagementprozess implementiert. Folgende Abbildung zeigt beispielsweise den Risikomanagementprozess, wie er auch bei der Herstellung von Medizinprodukten Anwendung findet.

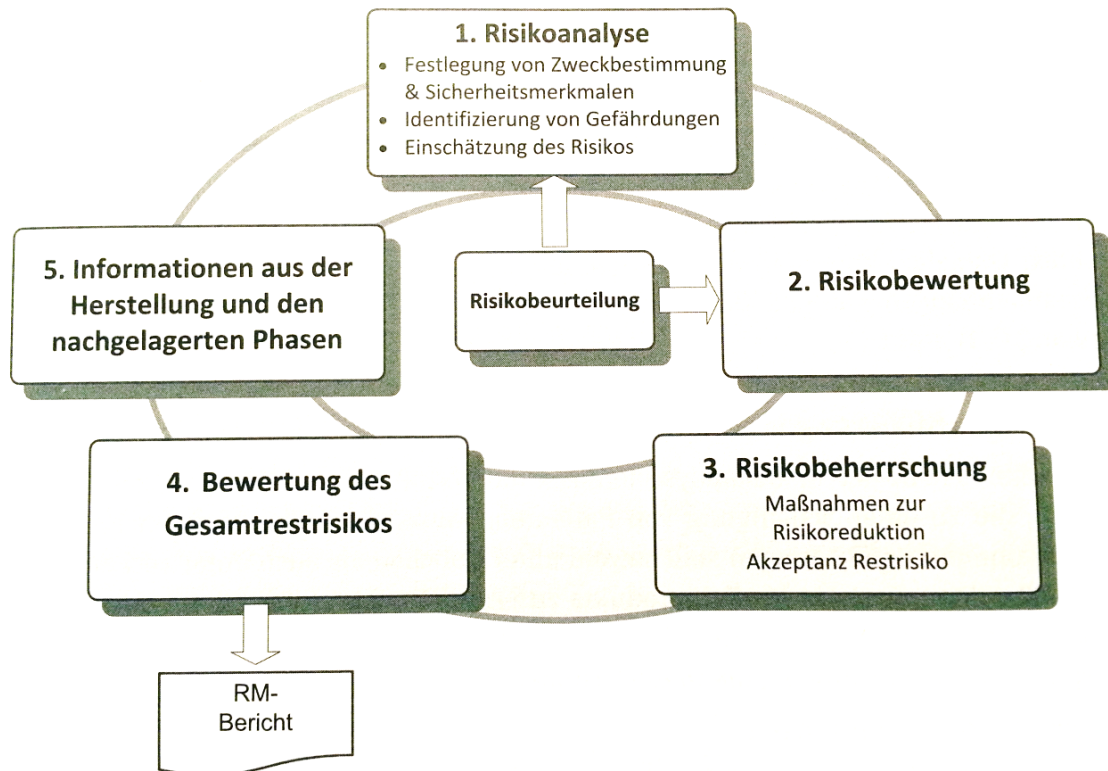


Abb. 7: Risikomanagementprozess nach ISO 14971, Quelle: Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 19.

Dabei ist die Durchführung oder Implementierung eines Risikomanagementprozesses nicht nur auf Produkte begrenzt, sondern wird im Speziellen auch bei der Risikobetrachtung von Prozess- oder Produktionsabläufen zum Einsatz gebracht. Im Fokus steht immer die Sicherheit des Menschen, der direkt oder auch indirekt in den Ablauf integriert ist; mit dem Ziel, Risiken so zu minimieren oder zu eliminieren, dass es auch im Fall eines Restrisikos zu keinem Schaden der Person(en) kommt.

4.1 Risikoanalyse

Die Risikoanalyse ist ein systematisches Verfahren und bedient sich verschiedener Instrumente zur Ermittlung von Gefährdungen. Um ein Risiko oder eine Gefährdung überhaupt minimieren geschweige denn eliminieren zu können, muss die Gefahr als erstes identifiziert werden. Das heißt, ein entscheidender Teilprozess ist die Erkennung und Einschätzung dieser Gefahrenpotenziale am System oder im Prozess.

Laut DIN ISO/TR 14121-2 (2012) eignen sich die Top-down- oder die Bottom-up-Ansätze als effektives Werkzeug zur Identifizierung von Gefährdungen, wie es schematisch in nachstehender Abb. 8 dargestellt wird.

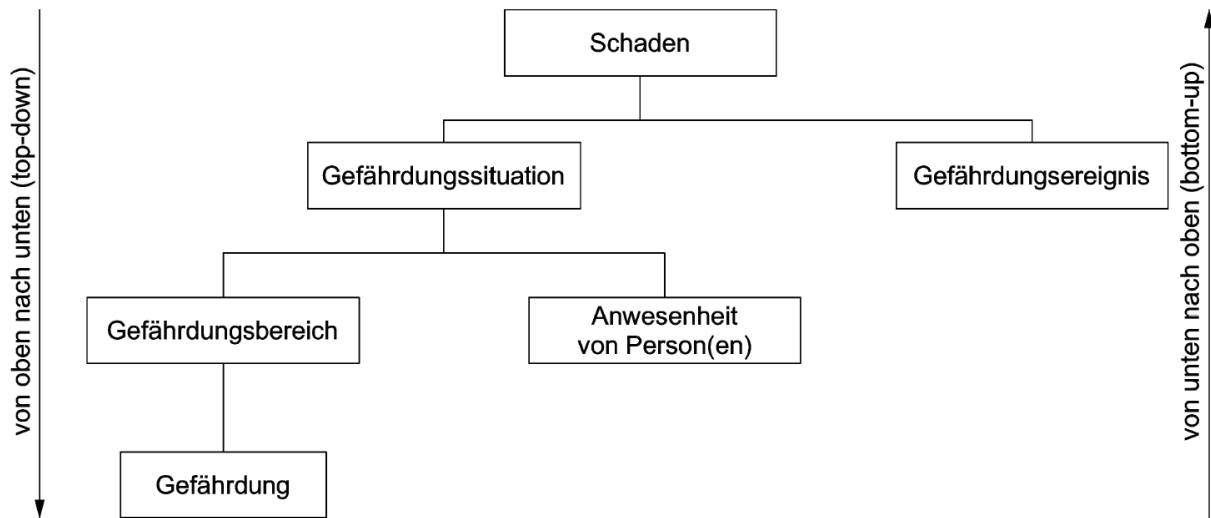


Abb. 8: Top-down und Bottom-up Ansätze, Quelle: DIN ISO/TR 14121-2 (2012), S. 10.

Beim Top-down-Ansatz wird ausgehend vom möglichen Folgeschaden, beispielsweise Schneiden oder Quetschen, ein Rückschluss auf die Gefährdung selbst getroffen. Als Hilfestellung dient zum Beispiel eine Checkliste verschiedener Schadensformen, die, abhängig von jeder vorkommenden Nutzungsphase oder Funktion und für jedes Teil der Maschine, abgearbeitet wird. Sinnvollerweise kann und soll diese Checkliste auch mit potentiellen Gefährdungen, die sich gegebenenfalls im Zuge der Risikoanalyse neu ergeben, ergänzt werden.

Dem umgekehrten Fall, dem Bottom-up-Ansatz, liegt zu Beginn die Gefährdung selbst zu Grunde, wobei neben dem Gefährdungseignis auch die Gefährdungssituation, beispielsweise das Versagen eines Bauteiles, menschliches Versagen, eine Funktionsstörung etc. berücksichtigt wird.

Die Bottom-Up-Methode ist ein relativ zeitaufwendiges Verfahren, das jedoch umfassendere und detailliertere Ergebnisse liefert als der Top-Down-Ansatz.

4.2 Gefährdungsarten

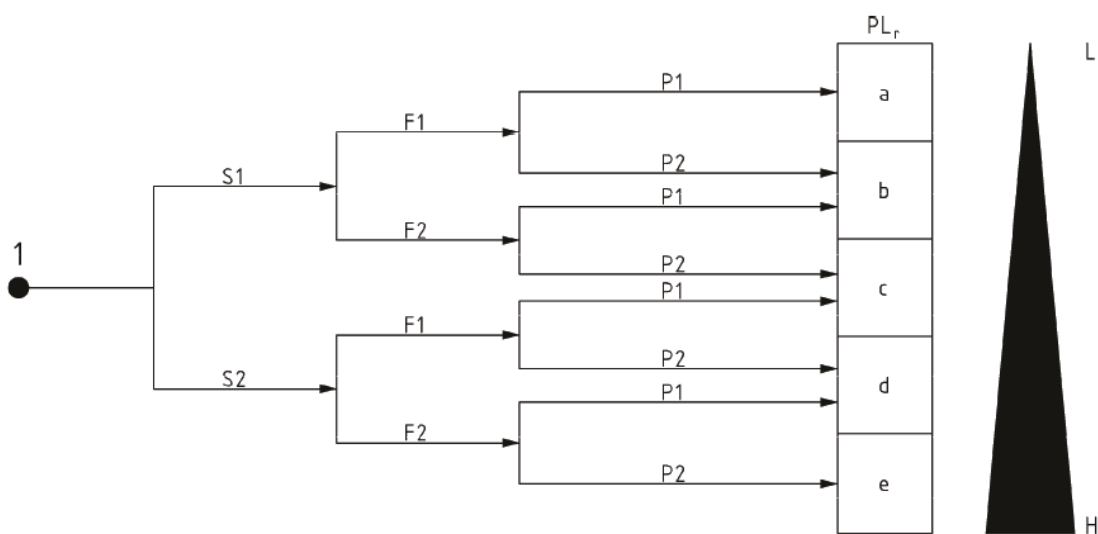
Im Rahmen einer Untersuchung auf potentielle Gefährdungen wird man unweigerlich auf die Begriffe Sicherheits-Integritätslevel (SIL) und Performance Level (PL) stoßen. Beide sind Maße für die Zuverlässigkeit von Sicherheitsfunktionen bei Maschinen und Anlagen und in den Normen DIN EN 61508 / EN 62061 (SIL) und EN ISO 13849-1 (PL) festgehalten.

Der Unterschied zwischen diesen beiden Klassifizierungen ist, dass sich der SIL auf die Elektronik, die Elektrotechnik und auf Steuerungen bezieht wohingegen der PL auch Mechanik, Pneumatik und Hydraulik mit einbezieht. Für die Berechnung des Levels eines Gesamtsystems müssen immer alle an der Kette beteiligten, sicherheitsrelevanten Komponenten betrachtet und berechnet werden. Der Berechnungsvorgang für die Kombination aus quantitativen und qualitativen Gesichtspunkten ist ein äußerst aufwendiges Verfahren, das detailliert in den einzelnen Normen beschrieben ist.

1. Performance Level

Der Performance Level (PL) ist eine Kenngröße für die Fähigkeit von sicherheitsbezogenen Teilen, eine Sicherheitsfunktion ausführen. Die Einteilung erfolgt in die Stufen „a“ (niedrigster Level) bis „e“ (höchster Level). Gleichzeitig wird durch die Höhe des Levels auch das Performance Niveau (PLr) bestimmt, das Einfluss auf die erforderliche Risikominimierung für jede Sicherheitsfunktion hat. Das Performance Niveau sicherheitsrelevanter Bauteile eines Systems muss somit gleich oder höher sein als der erforderliche Performance Level des Gesamtsystems.

Aus Abb. 9 kann man die Vorgehensweise zur Ermittlung des Performancelevels nachvollziehen. Dies geschieht in drei Schritten ausgehend von der Höhe des Verletzungsgrades im Worst Case (S1/S2), über die Häufigkeit des Schadenseintrittes (F1/F2) und zuletzt über die Möglichkeit die Gefährdung zu vermeiden (P1/P2).



Legende

- 1 Startpunkt zur Bewertung des Beitrags der Risikominderung
- L niedriger Beitrag zur Risikoreduzierung
- H hoher Beitrag zur Risikominderung
- PL_r erforderlicher Performance Level

Risikoparameter:

- S Schwere der Verletzung
- S1 leichte (üblicherweise reversible Verletzung)
- S2 ernste (üblicherweise irreversible Verletzung einschließlich Tod)
- F Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexpositon
- F1 selten bis weniger häufig und/oder die Zeit der Gefährdungsexpositon ist kurz
- F2 häufig bis dauernd und/oder die Zeit der Gefährdungsexpositon ist lang
- P Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens
- P1 möglich unter bestimmten Bedingungen
- P2 kaum möglich

Abb. 9: Risikograf zur Bestimmung des Performance Levels, DIN EN ISO 13849-1 (2008), S. 55.

2. Sicherheits-Integritätslevel

Zur Bestimmung des SIL ist eine sehr aufwendige Kombination aus Berechnungen notwendig, die bereits im Entwicklungsprozess berücksichtigt werden müssen. Die Berechnung des Gesamtsystems ergibt einen Wert, der der Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalles eines Bauteiles entspricht.

Daraus abgeleitet wird der Sicherheits-Integritätslevel in vier Stufen eingeteilt, wobei SIL 4 das zuverlässigste System beschreibt und SIL 1 das am wenigsten zuverlässige System. Ein SIL-Wert < 1 ist laut IEC 61508-1 nicht definiert; - daher wird der Performance Level „a“ keinem SIL-Wert zugeordnet.

In weiterer Folge stellt der SIL auch ein Maß hinsichtlich Risikoeinschätzung und Risikovermeidung dar.

Zwischen den Werten der jeweiligen Stufen von PL und SIL gibt es eine Korrelation, wodurch ein Umrechnen auf die jeweilige, äquivalente Stufe möglich ist. Tab. 2 veranschaulicht diesen Zusammenhang.

PL	SIL (IEC 61508-1, zur Information) hohe/kontinuierliche Betriebsart
a	keine Entsprechung
b	1
c	1
d	2
e	3

Tab. 2: Äquivalenztabelle für Bewertungskategorien zwischen PL und SIL, Quelle: DIN EN ISO 13849-1 (2008), S. 23.

4.2.1 Mechanische Gefährdung

Wie bereits erwähnt ist es unumgänglich, das gesamte System und den gesamten Kollaborationsprozess in die Gefährdungsidentifizierung und weiterführend in die Risikominimierung einzubeziehen. Bei derartigen Robotersystemen werden die Gefahrenpotentiale in erster Linie von mechanischen Gefährdungen ausgehen, deren Auswirkungen Quetschen, Scheren, Klemmen oder einen Stoß hervorrufen.

Die Norm DIN EN ISO 10218-2 (2012) beinhaltet eine Übersicht von signifikanten Gefährdungen, die im Zuge der Arbeitsplatzgestaltung und der Integration eines Roboters als gute Basis zur Gefährdungsidentifikation herangezogen werden kann. Tab. 3 beinhaltet die mechanischen Gefährdungen dieser Auflistung; die gesamte Tabelle kann dem Anhang 2 entnommen werden.

Gefährdungsbeispiele (mechanische Gefährdungen)	
Ursprung	Mögliche Auswirkungen
<ul style="list-style-type: none"> • Bewegungen jedes Teils des Roboterarms (einschließlich zurück), des Endeffektors oder beweglichen Teilen der Roboterzelle • Bewegungen der externen Achse (einschließlich Endeffektorwerkzeug in der Wartungsposition) • Bewegung oder Rotation eines scharfen Werkzeugs am Endeffektor oder an externen Achsen • Bewegung eines zu handhabenden Teils • Bewegung von zugehöriger Ausrüstung • Rotationsbewegung aller Roboterachsen • Herabfallende oder herausgeschleuderte Materialien oder Produkte • Ausfall des Endeffektors (Verlust) • Lose Kleidung, lange Haare <ul style="list-style-type: none"> - Zwischen Roboterarm und jedem festen Gegenstand - Zwischen Endeffektor und jedem festen Gegenstand (Zaun, Balken, usw.) - Zwischen Befestigungen (Hineinfallen); zwischen Shuttles, Versorgungseinrichtungen • Nicht vorhandene Möglichkeit, die Roboterzelle zu verlassen (durch Zellentor) für einen eingeschlossenen Bediener in der Betriebsart Automatik • Unerwartete Bewegung der Spannvorrichtungen oder des Greifers • Unerwartete Werkzeugfreigabe • Unerwartete Bewegung von Maschinen oder Teilen der Roboterzelle während Handhabungsvorgängen • Unbeabsichtigte Bewegung oder Betätigung eines Endeffektors oder zugehöriger Ausrüstung (einschließlich robotergesteuerter externer Achsen, prozessspezifisch für Schleifscheiben, usw.) • Unerwartetes Freisetzen potentieller Energie aus Speicherquellen 	<ul style="list-style-type: none"> • Quetschen • Scheren • Schneiden oder Abtrennen • Erfassen • Einziehen oder Fangen • Stoß • Durchstich oder Einstich • Reibung, Abrieb • Einspritzen oder Herausspritzen von Flüssigkeiten / Gas unter hohem Druck

Tab. 3: Ursprung und Auswirkung mechanischer Gefährdungen, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 57-60. (stark modifiziert).

Da der Bewegungsablauf eines Roboters oder eines Roboterarmes mit nicht unerheblicher Energie erfolgt, kommt es im Falle einer Kollision zu hohen, dynamischen Kräften und Drücken im Kontaktpunkt bzw. auf der Kontaktfläche. Die Technische Spezifikation ISO/TS 15066 (2016) beinhaltet entsprechende

Richt- und Grenzwerte, die aus den Ergebnissen jahrelanger Forschung gewonnen werden konnten. Namentlich waren dies Projekte des Instituts für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Universitätsmedizin der Johannes Gutenberg-Universität Mainz, des Fraunhofer-Instituts für Fabrikbetrieb und -automatisierung (IFF) Magdeburg und des Fraunhofer IFF und der Otto-von-Guericke-Universitätsklinik.⁵

Falls eine Roboterbewegung dazu führen kann, dass Körperteile, wie z.B. Finger, Hände, und dergleichen zwischen einem Teil des Roboters und einem anderen Gegenstand im Arbeitsraum eingeklemmt werden, ist die Roboterbewegungsgeschwindigkeit so zu begrenzen, dass das Robotersystem in der Lage ist, die biomechanischen und insbesondere die ergonomischen Schutzgrenzen einzuhalten. Die Abb. 10 veranschaulicht diese Zusammenhänge.

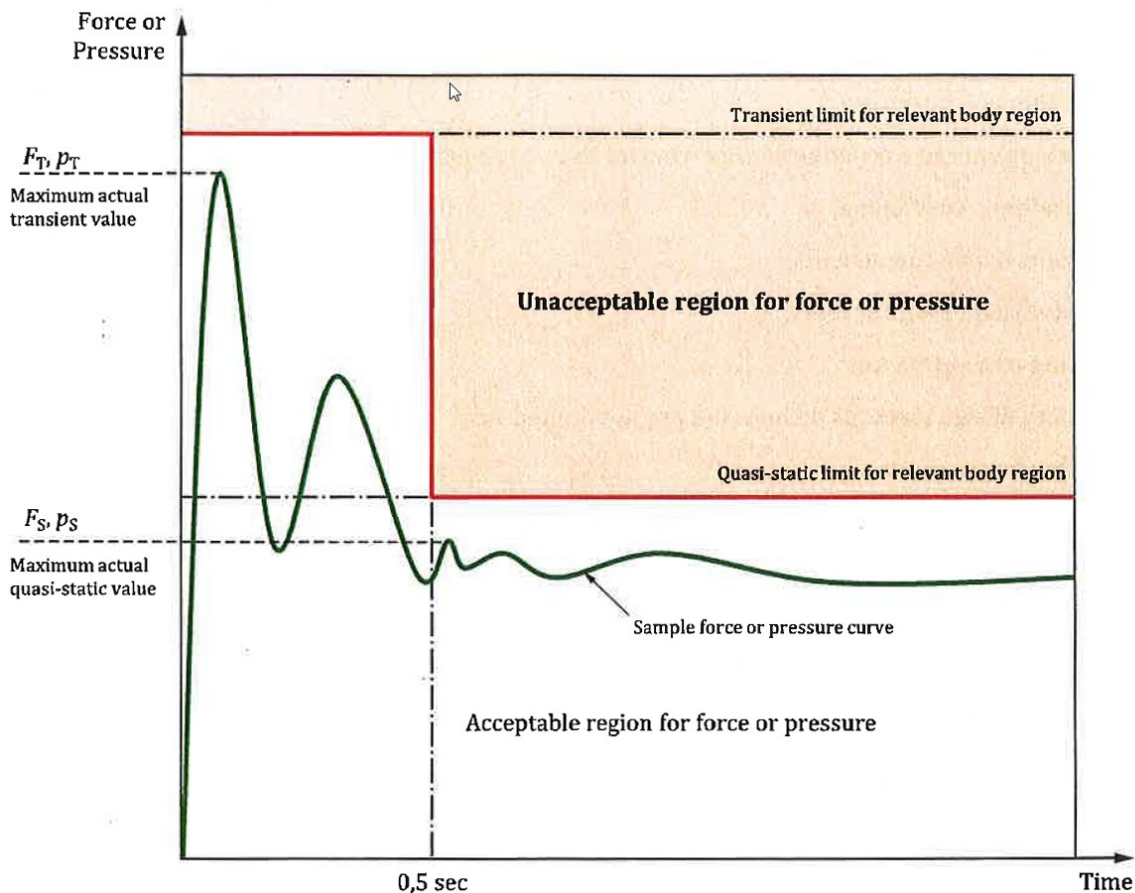


Abb. 10: Akzeptanzbereiche bei Kraft- bzw. Druckeinwirkung, Quelle: ISO/TS 15066 (2016), S. 18.

Um das Risiko bei vorübergehenden Kontakten im inakzeptablen Bereich zu reduzieren, muss das Robotersystem die Geschwindigkeit der bewegten Roboterteile beschränken. Die Begrenzung der Geschwindigkeit hängt von der Trägheitsmasse und von der Größe der Kontaktfläche zwischen Roboterteil und Körperteil ab. Details und entsprechende Werte können dem Normanhang der ISO/TS 15066 (2016) entnommen werden.

⁵ Vgl. Heulke (2015), S. 10-13.

4.2.2 Elektrische Gefährdung

Neben den für diese Masterarbeit relevanten mechanischen Gefährdungen sind noch die elektrischen Gefährdungen von Relevanz. Vor allem betrifft das die Sicherheitssteuerung des Robotersystems UR5, die zur Gänze den Normen DIN EN ISO 13849-1 (2008) und DIN EN ISO 13489-2 (2008) entspricht und als Performance Level d (PLd) ausgeführt ist. Diese beiden Normen beinhalten die Vorgaben für die Sicherheit von Maschinen aus Sicht des Herstellers.

Im Fall der vorliegenden Robotersteuerung des UR5 heißt das, dass ausnahmslos alle Änderungen, Neuerungen oder auch Implementierungen neuer Funktionen, wie zum Beispiel das Montieren und Anschließen eines zusätzlichen Not-Halts, mindestens dem Performancelevel PLd entsprechen müssen, um den gegenwärtigen Standard des Gesamtsystems aufrecht zu erhalten.

Diese Maßnahme ist während des ganzen Projektablaufs, insbesondere hinsichtlich der Gestaltung des Roboterarbeitsplatzes, zwingend einzuhalten.

4.2.3 Weitere Gefährdungen

Allgemein gilt es, alle vorhandenen und möglichen Gefährdungen an der Maschine oder hinsichtlich der Funktion zu erfassen und zu bewerten. Die vorigen Abschnitte 4.2.1 und 4.2.2 behandeln die beiden wesentlichsten Gefährdungsarten (mechanisch, elektrisch). Weitere Gefährdungen können anhand der im Anhang 2 befindlichen Tabelle aus der DIN EN ISO 10218-2 (2012) abgeleitet werden.

Es kann auch sein, dass mehrere Gefährdungen eine Funktion betreffen oder, dass es Kombinationen davon gibt. Diesbezüglich gelten die gleichen Bedingungen zur Gefährdungsermittlung wie in den jeweiligen Einzelfällen.

Die nächsten Unterkapitel beschäftigen sich mit der Bewertung eines Risikos oder einer Gefährdung, wobei sich durch gezielte Maßnahmen im Zuge einer Risiko- und/oder Fehlerverminderung, z.B. mittels FMEA, die Auswirkungen auf ein Minimum reduzieren oder gegebenenfalls sogar ganz eliminieren lassen.

4.3 Risikobewertung

In der Arbeitswelt, beispielsweise bei manuellen Tätigkeiten im Zuge eines Produktionsschrittes, findet man sehr oft Situationen vor, die ein oder sogar mehrere Gefahrenpotenziale in sich bergen. Die daraus resultierenden, möglichen Gefahren werden gesondert betrachtet und in weiterer Folge werden die Risiken einer Bewertung unterzogen. Je komplexer jedoch die Themen oder Aufgaben werden, desto schwieriger wird es, diese auch zu erfassen respektive einschätzen zu können.

Die Risikobewertung hat als oberstes Ziel, die erfassten, potentiellen Gefahren hinsichtlich ihres Risikos quantitativ zu beziffern; es wird somit die Akzeptanz des jeweiligen Risikos ermittelt. Da Risiken immer eine Kombination von Schadensausmaß und Auftretswahrscheinlichkeit sind, bietet sich eine Schadensausmaß-Auftretswahrscheinlichkeits-Matrix entsprechend Abb. 11 an.

Aus dieser Matrix geht hervor, dass die Gewichtung des Schadensausmaßes höher ist als die Gewichtung der Wahrscheinlichkeit. Das Resultat aus einer Kombination mit höchstem Schadensausmaß

und niedrigster Wahrscheinlichkeit ergibt ein mittleres Risiko, wohingegen die vertauschte Situation ein geringes Risiko widerspiegelt.

Risiken, die dem gelben Bereich zuzuordnen sind, bedürfen einer nochmaligen detaillierteren Untersuchung, da es hier durchaus zu schwerwiegenderen Schäden kommen kann. Für diese Fälle müssen Maßnahmen gesetzt werden, die das verbleibende Restrisiko so weit herabsetzen, dass es in den akzeptablen Bereich verschoben wird. Dabei spielt natürlich auch der Kosten-Nutzenfaktor bzw. das Aufwands-Ergebnisverhältnis eine wesentliche Rolle.

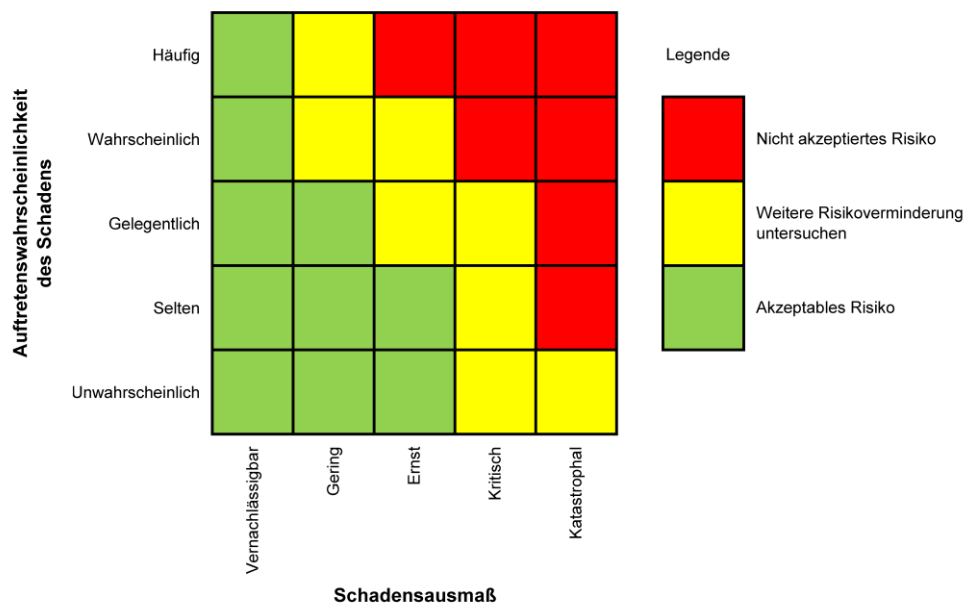


Abb. 11: Risikobewertungsmatrix, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 25.

Mit der erfolgten Bewertung des Risikos kann der nächste Schritt in Angriff genommen werden, die Risikominimierung oder als übergeordnete Begrifflichkeit die Risikobeherrschung.

4.4 Risikominimierung

Damit das Restrisiko eines risikobehafteten Prozesses oder eines risikobehafteten Produkts auf ein vertretbares Maß herabgestuft werden kann, müssen Maßnahmen festgelegt und angewendet werden. Dabei ist auf eine strikte Maßnahmenhierarchie zu achten:⁶

1. Konstruktive Maßnahmen (Designanpassung)
2. Schutzmaßnahmen, Schutzvorrichtungen (Produkt, Prozess)
3. Sicherheitsinformationen (Arbeits-, Bedienungsanleitungen)

Zur Beherrschung von Risiken wird diese Abfolge verpflichtend vorausgesetzt, da jede einzelne Maßnahme die Matrix unterschiedlich beeinflusst.

⁶ Vgl. Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 26 f.

Eine konstruktive Maßnahme am Design, wie etwa die abgerundeten Gelenke der Roboterachsen, bewirkt eine Minimierung des Schadensausmaßes. Bei Kollision zwischen Mensch und Roboter sind die Folgeschäden reduziert oder auch eliminiert.

Sind die Maßnahmen auf diesem Level bereits ausgeschöpft oder schlichtweg nicht realisierbar, muss die Minimierung über Schutzmaßnahmen wie beispielsweise Sensoren, Lichtschranken usw. bewerkstelligt werden.

Grundlegend kann man davon ausgehen, dass konstruktive Maßnahmen entweder eine Gefährdungs beseitigung bewirken, die Auftrittswahrscheinlichkeit des Schadens minimieren oder das Schadensausmaß selbst senken. Schutzmaßnahmen oder Sicherheitsinformationen hingegen bewirken lediglich eine Minimierung der Schadensauftrittswahrscheinlichkeit.

Zur Veranschaulichung ist in Abb. 12 der Risikominimierungsprozess in Form eines Ablaufplanes dargestellt:

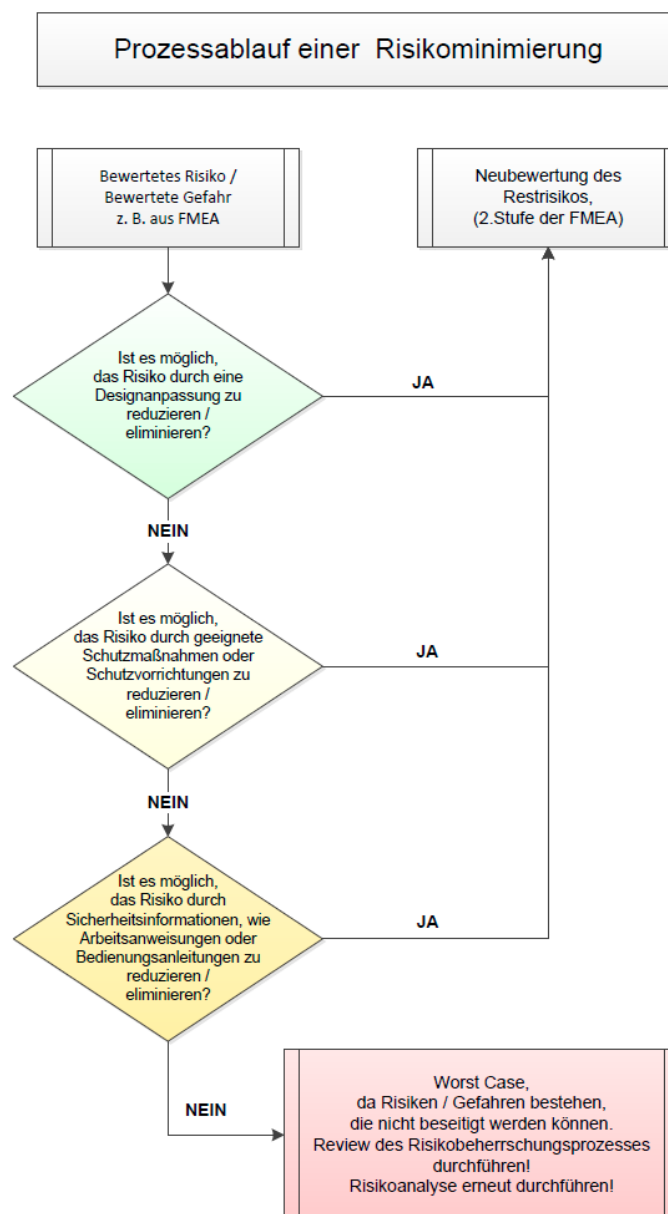


Abb. 12: Prozessablauf einer Risikominimierung, Quelle: Eigene Darstellung

4.5 Methoden zur Risikominderung

4.5.1 Methodenüberblick

Risikomanagementprozesse sind meist äußerst komplex und beinhalten nicht selten eine Vielzahl an Aktivitäten. Insbesondere der Prozess der Fehler- oder Gefährdungsfindung und der daraus abgeleiteten Maßnahmen zur Beseitigung können sehr umfangreich werden.

Die Literatur bietet eine Vielzahl an Risikomanagementmethoden, die abhängig vom Einsatzgebiet oder vom jeweiligen Anwendungsfall eingesetzt werden können. Nachstehende Tabelle zeigt einige Beispiele, wie sie in der Medizintechnik Anwendung finden. Dabei erfolgt deren Einteilung einerseits in grafische Methoden und andererseits in tabellarische Methoden:

Einteilung und Arten von Risikomanagementmethoden				
Grafische Methoden	Ursache-Wirkungs-Diagramm / Ishikawa-Diagramm		Cause and Effect diagram / Ishikawa-Diagramm	
	Fehlerbaumanalyse	FTA	Fault Tree Analysis	FTA
Tabellarische Methoden	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse	FMEA	Failure Mode and Effects Analysis	FMEA
	Gefahrenanalyse kritischer Lenkungspunkte		Hazard Analysis and Critical Control Points	HACCP
	Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen	PAAG	Hazard and Operability Study	HAZOP
DE			EN	

Tab. 4: Einteilung und Arten der Risikomanagementmethoden,
Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 35.

Grafische Methoden werden hauptsächlich für Prozessanalysen eingesetzt oder werden auch zur nachträglichen Fehleranalyse herangezogen; beispielsweise zur schnellen Auffindung von Fehlerursachen. Das Fehlen von Risikobewertung und Risikobeherrschung dieser Methoden wird durch entsprechende Anwendung und Kombination mit anderen Methoden innerhalb des Risikomanagementprozesses kompensiert.

Tabellarische Methoden sind wesentlich umfangreicher und beinhalten im Großen und Ganzen neben der Analyse und der Identifizierung von Risiken auch deren Bewertung und in weiterer Folge auch eine geeignete Form von Kontrollmaßnahmen. Dadurch eignen sich diese Methoden sehr gut, kontinuierlich erweitert bzw. angepasst zu werden, beispielsweise aufgrund einer Prozessänderung oder aufgrund von Systemänderungen. Sie sind oftmals fixer Bestandteil der Systembegleit- bzw. Prozessbegleitdokumentation und stellen ein umfassendes Tool zur Risikobeherrschung innerhalb des gesamten Lebenszyklus dar.

Nachstehend eine Kurzzusammenfassung der genannten Verfahren:

Anwendung von Risikomanagementmethoden		
Grafische Methoden	Ishikawa	Systematische Vorgehensweise zur Ursachenermittlung eines Problems bzw. eines Fehlers.
	FTA	Top-Down-Methode mit systematischer Vorgehensweise, um alle Ursachen eines Fehlers innerhalb eines komplexen Systems zu erfassen und darzustellen.
Tabellarische Methoden	FMEA	Strukturelles Verfahren zur Ermittlung von Fehlern, deren Ursachenfindung und in weiterer Folge zur Fehlervermeidung innerhalb eines Systems, eines Prozesses oder eines Bereiches.
	HACCP	Strukturierte Methode zur Ermittlung von Präventivmaßnahmen in Bezug auf Gefahrenvermeidung. Dabei werden mögliche Auswirkungen auf den Konsumenten, wie beispielsweise Erkrankung oder Verletzung untersucht. Einsatz in erster Linie in der Lebensmittelindustrie
	PAAG / HAZOP	Prognose, Auffinden der Ursache, Abschätzen der Auswirkungen, Gegenmaßnahmen Verfahren zur Analyse von Systemen bzw. Anlagen hinsichtlich Sicherheit; es dient insbesondere zur Untersuchung der Auswirkung eines Fehlverhaltens des Systems oder auch einer Software

Tab. 5: Anwendungsmöglichkeiten von Risikomanagementmethoden, Quelle: Eigene Darstellung

In Bezug auf diese Masterarbeit stellt die Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse die adäquateste Methode dar und wird im nächsten Abschnitt genauer beschrieben.

4.5.2 Fehlermöglichkeits- und einflussanalyse (FMEA)

Mithilfe einer FMEA ist man in der Lage, mögliche Fehler und/oder Gefährdungen im Speziellen aber auch deren Einflüsse für einzelne Systeme, verschiedene Module oder auch für Prozesse zu erfassen, diese anschließend zu bewerten und davon ableitend nicht nur gezielte Maßnahmen zur Risikominderung festzulegen, sondern die Ergebnisse der definierten, umgesetzten Maßnahmen auch zu dokumentieren. Aufgrund des iterativen Prozesses der gesamten FMEA werden diese Maßnahmen systematisch einer neuen Gefährdungsprüfung unterzogen, was die Integration der präventiven Risikominderung erheblich erleichtert und überschaubar macht. Der geeignete Einsatz einer FMEA erlaubt somit, Fehler und deren Einflüsse gezielt zu filtern, zu eliminieren und in weiterer Folge die Grundvoraussetzungen für einen sicheren Betrieb zu gewährleisten.

4.5.2.1 Vorgehensweise

Zur Veranschaulichung des FMEA-Ablaufes ist der Prozess in der Abb. 13 dargestellt. Dies umfasst im Wesentlichen folgende Punkte:

- Die Risikobestimmung
- Die Risikobeurteilung
- Die Risikobewertung
- Die Risikoreduzierung

Für die Umsetzung eignen sich Tabellentools sehr gut, die auch die bereits angesprochene Versionierung erleichtern. Im Zuge dieser Arbeit wird die FMEA unter Zuhilfenahme eines EXCEL-Tools, das dem Buch „Harer, Johann; Gübitz, Brigitte; Klinger, Udo (2014): Anforderungen an Medizinprodukte -

Praxisleitfaden für Hersteller und Zulieferer, 2. Auflage, Carl Hanser Verlag, München“ beiliegt, durchgeführt. Die Details sind im Kapitel 6 „Aufbau des Evaluierungssystems“ dokumentiert.

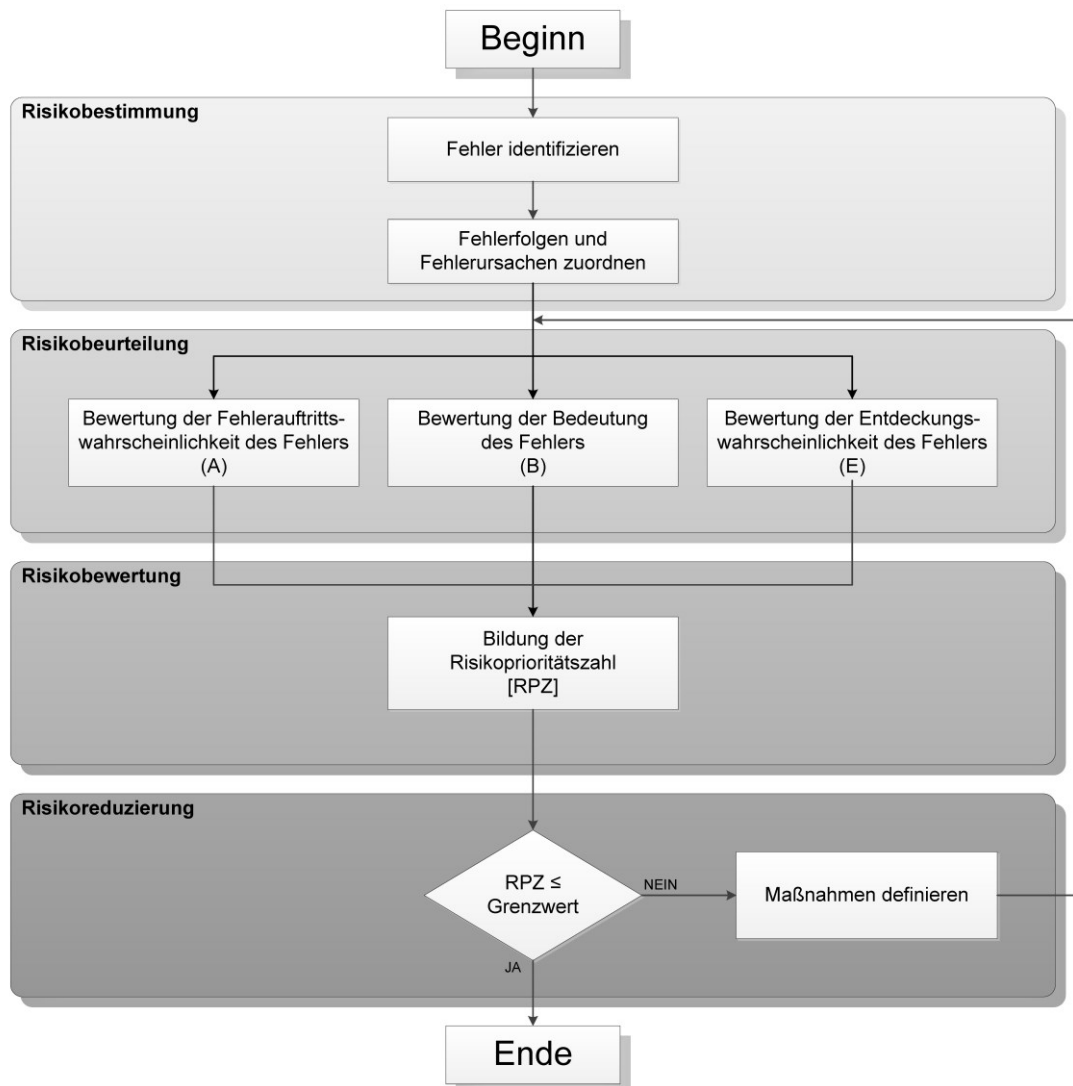


Abb. 13: Prozess einer FMEA, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 37.

4.5.2.2 Beurteilung und Berechnung

Bei der Umsetzung einer FMEA stellt die zu ermittelnde Risikoprioritätszahl (RPZ) die eigentliche Bewertung der einzelnen Risikopunkte dar und errechnet sich aus dem Produkt dreier Komponenten:

- Der Bedeutung des Fehlers (B)
- Der Auftretenswahrscheinlichkeit des Fehlers (A)
- Der Entdeckungswahrscheinlichkeit des Fehlers (E)

Die RPZ ist dimensionslos, spiegelt aber in ihrer Höhe die Risikobeherrschung wider.

$$RPZ = B * A * E \quad (4.1)$$

B	Bedeutung - Schadensausmaß
A	(Fehler)-Auftrittswahrscheinlichkeit
E	(Fehler)-Erkennbarkeit

Der wichtigste Schritt im Zuge der FMEA ist die Festlegung eines RPZ-Grenzwertes, dessen Höhe unternehmens-, produkt- oder prozessspezifisch definiert wird. Dieser Wert ist ausschlaggebend dafür, ob ein Risiko akzeptiert wird, oder ob Maßnahmen zur Risikominimierung erfolgen müssen.

Als Basis zur Grenzwertdefinition kann auch die Wertezuordnung der einzelnen Faktoren (B, A, E) herangezogen werden. Die Zuordnung dieser Werte obliegt dem Betreiber der Anlage oder dem Hersteller eines Produktes und kann sich, wie aus Tab. 6 ersichtlich, folgendermaßen einstufen lassen (die gesamte Tabelle inklusive Beschreibung ist in der Tab. 10 dem Anhang 3 beigelegt):

B	Bedeutung – Schadensausmaß (= Qualitatives Maß für die möglichen Konsequenzen einer Gefährdung)	A	Auftretenswahrscheinlichkeit eines möglichen Fehlers	E	Erkennbarkeit, Entdeckbarkeit (=Möglichkeit der Erkennung eines Fehlers, bevor er einen Schaden hervorruft)
1	Vernachlässigbar	1	Unvorstellbar, theoretisch	1	Sofort, eindeutig, sicher erkennbar
3	Unwesentlich	3	Unwahrscheinlich, entfernt vorstellbar	3	Sehr wahrscheinlich
5	Gering	5	Vorstellbar, niedrig, selten	5	Wahrscheinlich
7	Schwerwiegend	7	Gelegentlich	7	Unsicher oder spät
9	Kritisch	9	Wahrscheinlich, hoch	9	Wahrscheinlich nicht
10	Katastrophal	10	Sehr hoch	10	Unentdeckbar

Tab. 6: Wertezuordnung der Berechnungsfaktoren einer FMEA, Quelle: Eigene Darstellung

Mit dieser Wertezuordnung entspräche eine RPZ von 1 dem geringsten und eine RPZ von 1000 dem höchsten Risiko, wobei üblicherweise bei einer RPZ von 125 der Eingriffsgrenzwert festgelegt wird. In der Medizintechnik beispielsweise liegt diese Grenze oftmals bei einem Wert von 105.

Würde die RPZ eines vorhandenen Risikos (möglicher Personenschaden) anhand dieser Zuordnung den Wert von 105 erreichen, müsste eine geeignete Maßnahme erfolgen.

Zur Erleichterung soll folgendes Beispiel dienen:

Der Antrieb eines Laufbandes in einer Produktionshalle erfolgt ausgehend vom Motor über ein Kettenrad und weiter über die Kette zur Umlenkwalze des Bandes. Dabei liegt der gesamte Antrieb frei und stellt ein hohes Risiko für Personen dar, die sich in der Nähe des Antriebes befinden.

Risiko: Personen könnten mit der Hand oder mit losen Teilen der Kleidung in den Antrieb gelangen und sich stark verletzen.

Bewertung: B = 9, A = 9, E = 3 woraus eine RPZ von 243 resultiert

Der zuvor definierte Grenzwert von 105 würde überschritten und geeignete Maßnahmen, beispielsweise die Konstruktion und Montage eines Schutzbleches, müssten eingeleitet werden.

Hier wird ein weiterer vorteilhafter Aspekt einer FMEA ersichtlich. Sie kann mehrstufig ausgeführt werden und beinhaltet somit auch die Wirksamkeitsprüfung einer definierten Maßnahme. Nach Umsetzung oder Implementierung der definierten Maßnahme wird die RPZ nochmals berechnet und mit der ursprünglich bewerteten RPZ verglichen.

Angewandt auf das vorige Beispiel würde das bedeuten:

Maßnahme: Konstruktion und Montage eines Kettenschutzbleches

Risiko: Verletzungsgefahr weitgehend eliminiert

Bewertung (neu): B = 9, A = 3, E = 3 woraus eine RPZ von 81 resultiert

Die umgesetzte Maßnahme zeigt eindeutig, dass das personengefährdende Risiko aus der ersten Stufe soweit reduziert werden konnte, dass das „neue“ Restrisiko akzeptiert werden kann.

Achtung!

Bei der Neuberechnung der RPZ nach der Maßnahme bleibt der aus der ersten Stufe festgelegte Wert des Schadensausmaßes (B) identisch! Die Konsequenz der Gefahr, in den laufenden Antriebsmechanismus zu geraten, ändert sich nicht!

4.5.2.3 Interpretationsspielraum

Die während der Durchführung einer FMEA gesammelten Daten, Informationen und Resultate müssen zu jeder Zeit gewissenhaft, insbesondere logisch und nachvollziehbar dokumentiert werden.

Die numerische Zuordnung bzw. die äquivalente Darstellung eines Risikos zu einem Zahlenwert hat den Nachteil, dass Informationen teilweise verloren gehen. Beispielsweise könnten zwei verschiedenen Risiken, die denselben RPZ-Wert haben, unterschiedliche Auswirkungen haben:

Risiko 1: B = 7, A = 5, E = 3; RPZ = 105

Risiko 2: B = 3, A = 5, E = 7; RPZ = 105

Im ersten Fall wird der Bedeutung, also dem Schadensausmaß, eine sehr hohe Auswirkung zu Grunde gelegt wohingegen im zweiten Fall das Schadensausmaß als unwesentlich eingestuft wird.

Hier liegt es im Sinne der Betreiber und/oder der Verantwortlichen, die vorhandenen Risiken einzustufen und zu entscheiden, ob das vorhandene Risiko akzeptiert werden kann. Die Sinnhaftigkeit, vor allem im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit der Umsetzung einer Maßnahme aufgrund eines vorhandenen Risikos, sollte dabei nicht aus den Augen verloren werden.

Ähnlich wie beim Brainstormingprozess, erweist es sich hinsichtlich Unbefangenheit als sehr vorteilhaft, das FMEA-Projektteam aus verschiedenen Fachexperten zusammenzusetzen. Dadurch wird zusätzlich eine durchgängige Integrität gewährleistet, da Risiken von verschiedenen Blickwinkeln aus betrachtet, analysiert und bewertet werden können.

4.6 Wirtschaftsrisiken - Nutzwertanalyse

Wie aus den vorigen Kapiteln hervorgeht, ist es äußerst wichtig, Unsicherheiten, die einen negativen Effekt hervorrufen (könnten), in den Griff zu bekommen. Dazu wurden einige Werkzeuge hinsichtlich Risikoeinschätzung und Risikominimierung bereits beschrieben. Bei den bisher behandelten Risiken handelt es sich aber in erster Linie um Gefahren oder Gefährdungen, deren Auswirkung einen physischen Defekt, wie Funktionsschaden oder Personenschaden, nach sich ziehen.

Im Zuge des Projektmanagements können Risiken auch nach folgenden Gesichtspunkten kategorisiert werden:⁷

- Risiken aus dem sachlich-inhaltlichen Projektumfeld
- Risiken aus dem sozialen Projektumfeld
- Risiken projektintern

Innerhalb dieser drei Kategorien gibt es unterschiedliche Punkte, die teilweise eine gemeinsame Schnittmenge haben. Dabei stechen im Speziellen die Berührungspunkte Wirtschaftsrisiken bzw. finanzbedingte Risiken heraus.

Eine Projektrealisierung geht, sofern nicht alle Ressourcen bereits vorhanden sind, immer mit Investitionen einher. Sei es hinsichtlich Personalressourcen, örtlicher Ressourcen, Kapazitätsressourcen oder eben auch finanzieller Ressourcen.

Der Planung und Realisierung von Projekten sollte immer eine, aus wirtschaftlicher Sicht betrachtete, ressourcenschonende und vor allem im Hinblick auf die Kosten-Nutzen-Rechnung adäquate Entscheidungsqualität zu Grunde liegen, was neben der zur Projektrealisierung notwendigen Budgetplanung im Speziellen auch bei nicht geplanten Investitionen zum Tragen kommt. Diese Investitionen dann in einem vertretbaren Rahmen zu halten entpuppt sich oftmals als relativ komplexe und zunehmend unüberschaubare Aufgabe.

An dieser Stelle wird ein Tool vorgestellt, das als Hilfestellung für finanzpolitische Entscheidungen dient und dabei die Kosten-Nutzen Relation im Fokus behält: die sogenannte Nutzwertanalyse (NWA)

4.6.1 Grundlagen

Bei der Nutzwertanalyse, im Englischen als Use Value Analysis (UVA) bezeichnet, handelt es sich um eine effiziente Methode zur Entscheidungsfindung einer Lösung aus verschiedenen, meist sehr komplexen Möglichkeiten. Mittels unterschiedlicher Bewertungskriterien wird eine Auswahl beziffert und man erhält in weiterer Folge ein Ergebnis in Form eines gewichteten Zahlenwertes.

4.6.2 Aufbau einer NWA

Aus Gründen der Übersicht und auch wegen ihrer Effizienz eignen sich Tabellenkalkulations-Tools zur Durchführung einer NWA hervorragend. Die einzelnen Zuordnungen, wie Gewichtung und Punkteaufteilung, lassen sich relativ leicht aufgliedern und die notwendigen Berechnungen werden

⁷ Vgl. Patzak/Rattay (2008), S. 56, 57, 58.

automatisch durchgeführt. Die generelle Durchführung einer Nutzwertanalyse erfolgt anhand eines strukturierten Aufbaus, der allgemein in folgende Einzelschritte unterteilt werden kann:

1. Formulierung einer eindeutigen Frage inklusive Anforderungskriterien an das Produkt oder an das gesuchte Resultat. Liste von Alternativen und/oder anderen Lösungsvorschlägen.
Anforderungskriterien müssen messbar und unabhängig voneinander sein; dürfen andere Kriterien nicht überschneiden
2. Tabelle mit den Anforderungskriterien und den Alternativen erstellen
3. Gewichtung der Anforderungen festlegen
Jedes Einzelkriterium wird in Abhängigkeit von der Bedeutung von 1 bis 10 bewertet
Die Summe der Einzelbewertungen wird auf 100% des Gesamtresultates verteilt
4. Bewertung der einzelnen Alternativen in Bezug auf die Anforderungskriterien mithilfe von Zahlenwerten:
10 = sehr gut / 8 = gut / 6 = befriedigend / 4 = schlecht / 2 = sehr schlecht / 0 = nicht anwendbar
5. Die vergebenen Punkte werden mit der entsprechend festgelegten Gewichtung für jede Alternative multipliziert.
6. Die errechneten Punkte werden addiert und ergeben den jeweiligen Nutzwert der Alternativen.
Diejenige Alternative mit der höchsten Punkteanzahl erfüllt die geforderten Kriterien am Ehesten.

Zum einfacheren Verständnis werden die Vorgangsweise, der Aufbau und die Berechnung anhand eines einfachen Beispiels durchexerziert und das Ergebnis in Tab. 7 abgebildet:

Beispiel.

Ein Unternehmen muss aufgrund steigender Nachfragen seine Produktionskapazitäten erweitern und plant eine zusätzliche Fertigungshalle. Es stehen drei Möglichkeiten zur Auswahl:

- Zubau: Erweiterung der bestehenden Halle
- Neubau 1: Separate Halle neben der bestehenden Halle
- Neubau 2: Komplett neue Halle (alte Halle wird Lager)

Frage: Welche Lösung ist für das Unternehmen (Kosten-Nutzen) die beste Wahl?

Musskriterien: Gesamtkosten maximal € 200.000,- und Fertigstellung innerhalb der nächsten 8 Monate

Beispiel NWA							
Anforderungskriterien		Alternativen					
Musskriterien		Zubau		Neubau 1		Neubau 2	
Maximale Kosten (€ 200.000,00)		€ 100.000,00		€ 150.000,00		€ 200.000,00	
Fertigstellung <= 8 Monate		3 Monate		5 Monate		8 Monate	
Sollkriterien	Gewichtung	Bewertung	Berechnung	Bewertung	Berechnung	Bewertung	Berechnung
Eff. Kosten	5	8	40	6	30	4	20
Kosten Produktionsausfall	3	4	12	10	30	10	30
Anbindung Logistik	2	6	12	8	16	10	20
Punkte gesamt	10		64		76		70
Rang			3		1		2

Bewertung: 10 = Sehr gut / 8 = Gut / 6 = Befriedigend / 4 = Schlecht / 2 = Sehr schlecht / 0 = Nicht anwendbar

Tab. 7: Beispiel einer NWA für einen Zu- bzw. Neubau, Quelle: Eigene Darstellung

Das Ergebnis fällt hier relativ eindeutig aus und die Variante 2 des Neubaus sollte gegenüber den zwei anderen Alternativen bevorzugt werden.

4.6.3 Vor- und Nachteile der NWA

Bei der Durchführung einer NWA ist es wichtig, den errechneten Teilnutzen über die Teilbewertung „ordinal“ aufzuschlüsseln, d.h. verschiedenen Zuständen, wie beispielsweise gut, neutral, mittel werden entsprechende Werte zugeordnet; gut = 2, neutral = 1 und schlecht = 0. Durch eine falsche oder unangemessene Zuordnung können sich erhebliche Unterschiede im Ergebnis, respektive in der Entscheidung ergeben.

Im Zuge der Erhebung einer NWA kann es aufgrund vieler Teilnehmer zu subjektiven Unstimmigkeiten kommen, die im Worst Case ein Scheitern der Untersuchungen nach sich ziehen. Deshalb ist bei der Erstellung der Bewertungskriterien auf äußerste Objektivität zu achten.

Zu den eingangs erwähnten Vorteilen reiht sich noch die Tatsache, dass die Nutzwertanalyse oftmals das einzige Mittel zum Zweck darstellt, eine Entscheidung auf Basis vielfältiger und meist komplexer Möglichkeiten zu erhalten.

Auf jeden Fall sollte die Interpretation des Ergebnisses aus einer Nutzwertanalyse, wie auch jene aus den Ergebnissen anderer Bewertungstools, immer auf Integrität geprüft werden, um zu gewährleisten, dass die Auswahl der Bewertungskriterien den Anforderungen entspricht und die Beurteilung auch aus verschiedenen fachlichen Blickwinkeln akzeptiert wird.

5 BILDVERARBEITUNG ZUR TEILEERKENNUNG

Abseits der kollaborativen Sicherheitsrichtlinien wird auch die Möglichkeit geprüft, eine optische Qualitätskontrolle bzw. eine optische Teileerkennung mittels eines Kamerasystems durchzuführen. Aufgrund der Unmenge an Szenarien, die je nach Anwendung unterschiedliche Systeme umfassen, wird dieses Kapitel nur die wichtigsten Informationen beinhalten und stellt eine Art Überblick der in der Bildgewinnung und Bildverarbeitung eingesetzten Hardware und deren Begrifflichkeiten dar.

Aus der Fülle an verschiedenen Systemen lassen sich zwei grundlegende Abläufe ableiten:

- Bildgewinnung (Hardware)
- Bildverarbeitung / Bildauswertung (Software)

Bei der Bildgewinnung wird — allgemein betrachtet — ein 3D-Objekt über die Hardware (Objektiv - Linse - Sensor) in ein 2D Bild umgewandelt, um das Bild anschließend zu verarbeiten bzw. eine Aussage anhand definierter Merkmale zu treffen.

Bildverarbeitungsverfahren werden verschiedenartig eingesetzt. Das sind vor allem:

- Prüfung auf Merkmale, auf Vollständigkeits, Prüfung der Orientierung eines Werkstückes
- Vermessungsaufgaben an Werkstücken
- Oberflächenprüfungen (Risse, Oberflächenfehler, usw.)

Die Auswertung mittels Bildverarbeitung geht in den meisten Fällen direkt mit dem Prozess einher. Beispielsweise wird ein fehlerhaft detektiertes Teil aussortiert und dem Ausschuss zugeführt.

Als Merkmal in Bezug auf die Produktidentifikation werden beispielsweise 1D-Codes (Barcodes) und 2D-Codes (Matrixcodes) eingesetzt. Kamerasysteme eignen sich unter anderem auch für eine Klartexterkennung.

Einen sehr wichtigen Bereich innerhalb der Wertschöpfungskette eines Produktes stellt auch die Rückverfolgbarkeit, also die Aufzeichnung von produktspezifischen Fertigungsdaten dar. Dabei kommt es darauf an, eine Zuordnung zwischen Identifikationsnummer und Fertigungscharge des Produktes herzustellen.

5.1 Hardware

Einen wichtigen Bestandteil in der Bildverarbeitung stellt die verwendete Hardware dar. Die wichtigsten Elemente und deren Eigenschaften werden in den nachstehenden Abschnitten erläutert.

5.1.1 Sensoren

Um ein analoges Abbild in sein digitales Pendant überführen zu können sind einige Prozessschritte notwendig. In einem Prozessschritt wird das Signal auf den sogenannten Bildsensor treffen, der für die Weiterverarbeitung der Bilddaten entscheidend ist. Die Größe dieser Bildsensoren wird meist in Zoll angegeben, beispielsweise 1/8 Zoll.

Grob betrachtet kann man im digitalen Bereich von den zwei nachstehenden Bildsensoren sprechen, die die Hersteller in den Kameras verbauen:

5.1.1.1 CCD-Sensor

CCD-Bildsensoren bestehen aus Fotodioden, die das einfallende Licht (Photonen) in freiwerdende Elektronen umwandeln. Diese Elektronen werden in Kondensatoren gespeichert, ausgelesen und die Werte in ein Register übertragen (Analog-Digital-Wandler). Dabei ergibt ein hellerer Lichteinfall einen höheren Wert im Register. Bei CCD-Kameras wird das Bild üblicherweise zeilenweise, also sequentiell und nicht pixelweise ausgelesen.

5.1.1.2 CMOS-Sensor

Bei den Complementary–metal–oxide–semiconductor (CMOS) Kameras wird die Bildaufnahme im Array gespeichert, wobei jedem Pixel auch ein CMOS-Verstärker zugeordnet ist. Daraus resultiert, dass die Umwandlung der Ladung in Spannung lokal erfolgt.

Die Vorteile gegenüber den CCD-Sensoren sind Schnelligkeit, die Pixel sind einzeln auslesbar und sie sind günstiger zu produzieren. Nachteilig wirkt sich aus, dass ein Teil des Sensors nicht für die Bildaufnahme zur Verfügung steht und somit Platz am Sensor verschwendet wird (Datenumwandlung am Sensor).

Die für den Roboterarbeitsplatz verwendete Kamera Cognex 7400C ist mit einem CMOS-Farbbildsensor ausgestattet.

5.1.2 Objektive

Eine sehr wichtige Komponente in der Bildverarbeitung stellen die Objektive dar, die je nach Anwendungsfall ausgewählt werden müssen. Dazu müssen je nach Aufgabe einige Punkte abgearbeitet werden, die nachstehend grob aufgelistet sind:

- Bestimmung der Größe des aufzunehmenden Objekts
- Sensorgröße, Arbeitsabstand, Format bestimmen
- Brennweite berechnen

Je nach Einsatzgebiet werden Objektive unterschiedlich groß, schwer, kurz, schmal usw. hergestellt.

Eine sehr wichtige Eigenschaft wird durch das sogenannte telezentrische Objektiv erreicht. Es bietet den Vorteil, dass die Lichtstrahlen parallel auf den dahinterliegenden Sensor auftreffen und es somit zu keiner Objektabbildungsverschiebung kommt, die wiederum nachträglich korrigiert werden müsste.



Abb. 14: Telezentrisches Objektiv der Firma Sill Optics, Quelle: Eigene Darstellung

5.1.3 Beleuchtung

Die mit Abstand wichtigste Funktion stellt die Beleuchtung in der Bildverarbeitung dar, da sie mit dem gesamten System eine harmonische Kombination bildet. Für die Beleuchtung gilt wie bei der Wahl des richtigen Objektivs, dass sie immer anwendungs- und aufgabenspezifisch ausgewählt wird. Nachstehende Punkte sind wiederum ausschlaggebend:

- Größe des Objekts
- Oberfläche des Objekts (matt, glänzend, farbig, schwarz/weiß)
- Fläche, die ausgeleuchtet werden muss
- Wie schnell muss die Anwendung arbeiten (Serienbetrieb)
- Umweltbedingungen (staubig, sauber, ...)

Daraus kann man ableiten, welche Art der Beleuchtung für den Anwendungsfall in Frage kommt. Als Beispiele sind folgende Beleuchtungsarten zu erwähnen:

- Hellfeld-, Dunkelfeld-, Durchlicht-, Auflichtbeleuchtung
- LED-Beleuchtung (andere Lichtquellen spielen nur mehr eine untergeordnete Rolle)
- Farbe
- Ringlicht, Dombelichtung, Flächenlicht, Linienlicht
- Spannungsversorgung (in der Regel über PWM-Steller)

Je nach Anwendungsfall ergeben sich wiederum auch andere Anforderungen an die Art der Beleuchtung.

5.2 Software-Datenstruktur

Eine Bilderzeugung weist grundsätzlich einen Informationsverlust auf, weil unter anderem ein standardmäßiges 3D-Objekt als 2D-Fläche abgebildet wird. Man spricht dabei von der Quantisierung der Lichtintensität auf ein konstantes, quadratisches X-Y-Raster mithilfe von Signaltheorie. Für jeden Bildpunkt wird ein entsprechender Wert gespeichert; Grauwert(x,y) = $f(x,y)$.

Um auch die Farbe zu speichern sind eventuell mehrere Farbkanäle gleichzeitig notwendig (RGB).

Mittels Algorithmen bzw. Pixel- oder Punktoperationen wird eine unzählige Vielfalt an Bildkorrekturen möglich. Die wichtigsten Bildverbesserungen sind in den nachstehenden Abschnitten angeführt:

5.2.1 Histogrammebnung

Durch die Histogrammebnung wird eine optimale Skalierung (Gleichverteilung der Grauwerte) über das gesamte Bild erreicht, wodurch das Bild homogener wird.

5.2.2 Binarisieren

Dabei wird durch Anwendung verschiedener (Schwellwert-)Methoden ein Binärbild erzeugt. Zum Beispiel aus TRUE...Objekt und FALSE...Hintergrund. Als Ergebnis erhält man beispielsweise ein Schwarz-Weiß-Bild.

5.2.3 Filteroperationen

Eine weitere Bildverbesserungsmöglichkeit stellen die sogenannten Filter dar, von denen die wichtigsten nachstehend angeführt sind.

- Lokale Filter
- Lineare Filter (Tiefpassfilter → Rauschen vermindern, Hochpassfilter → Kanten extrahieren)
- Adaptive Filter (z.B. Bilateral Filter)
- FFT oder Cosinus-Filter "JPEG" (Bilddatenkompression)

Eine Kombination diverser Filter wird beim Canny (Kantenfilter) eingesetzt. Dazu wird ein Hochpassfilter angewandt, anschließend werden mittels Hysterese-Schwellwert Bildbereiche, die Kanten beinhalten, extrahiert und in diesen Bereichen die lokalen Maxima ermittelt (1 Pixel Kantenbreite).

5.2.4 Weitere Operatoren

Einen sehr wichtigen Operator im Zusammenhang mit der Bildgewinnung stellen die „Blobs“ dar. Mittels „Blobs“ wird ein Binärbild erzeugt. Dabei werden zusammenhängende Bereiche gesucht und markiert (Blobs). Zentrale Momente und davon abgeleitete Kenngrößen, wie beispielsweise Schwerpunkt, Fläche, Fitting, Rectangle (Winkel, max. Länge, etc.) werden berechnet. Das Ergebnis ist ein Binärbild mit starkem Kontrast.

Weitere Operatoren sind beispielsweise Bildvergleich, Farbbildverarbeitung, Geraden und Kreis-Fit auf Kanten, usw. auf die jedoch nicht näher eingegangen wird.

6 AUFBAU DES EVALUIERUNGSSYSTEMS

Dieses Kapitel wendet sich der praktischen Umsetzung zu und beschreibt den sukzessiven Aufbau des mobilen, kollaborativen Arbeitsplatzes unter Einhaltung der in den vorhergehenden Kapiteln dokumentierten Anforderungen, Bedingungen und Richtlinien.

6.1 Aufgaben im Vorfeld

6.1.1 Auswahl des Robotertyps

Wie eingangs erläutert wurde für Forschungs- und Projektaufgaben sowie für Demonstrations- bzw. Vorführungszwecke der Knickarmroboter UR5 der Firma Universal Robots angeschafft. Zur Auswahl standen mehrere Typen, unter anderem der UR5 von Universal Robots und der LBR iiwa von der Firma KUKA.

Ein direkter Vergleich der physikalischen Eigenschaften bescheinigte dem KUKA-Roboter zwar, dass er auch in robusterer Umgebung einsetzbar ist, ein zweiter Blick ergab jedoch, dass dieser gegenüber dem UR5 aus preispolitischen Gründen weniger attraktiv abschnitt.

Die Entscheidung fiel unter anderem auch wegen der Vielfältigkeit auf den UR5, da bereits zwei Roboter der Firma KUKA im Roboterlabor im Einsatz sind und man zusätzlich einen anderen Hersteller mit im Boot haben will. Tab. 8 beinhaltet die Gegenüberstellung der beiden Robotertypen:

Hersteller	KUKA	Universal Robots
Type	LBR iiwa	UR5
Max. Traglast / kg	7	5
Max. Arbeitsbereich / mm	800	850
Achsen	7	6
Eigengewicht / kg	22	18
COBOT	JA	JA
Listenpreis / €	50000	20000

Tab. 8: Auflistung der Roboterwahl, Quelle: Eigene Darstellung

6.1.2 Lieferantenauswahl

Als Entscheidungshilfe für die Auswahl des passenden Lieferanten, vier Anbieter standen für den UR5 zur Auswahl. wurde eine Nutzwertanalyse erstellt, die in Tab. 11 abgebildet ist und aus Gründen der Übersichtlichkeit als Anhang 4 beigelegt.

Daraus ging die Firma FJM als optimaler Partner hervor, die unter anderem eine im Preis bereits inkludierte, ganztägige Schulung im Zuge der Anlieferung des Roboters angeboten hat. Zusätzlich ist die Firma FJM auch Distributor verschiedener Endeffektoren und bietet von Universal Robots zertifizierte Greifersysteme an.

6.1.3 Untersuchungsziele und Aufgaben

Der Grundstein für die Projektarbeit war somit gelegt und die weiteren Untersuchungsziele und Aufgaben wurden wie folgt vereinbart.

- Roboterübernahme und Einschulung am System
- Konstruktive Gestaltung eines mobilen Aufbaues für den Roboterarm bzw. das System
- Aufbau und Inbetriebnahme des Systems am fahrbaren Untersatz
- Identifizierung von potentiellen Gefährdungen (FMEA)
- Implementierung und Inbetriebnahme einer Schutzfeldüberwachung
- Implementierung und Inbetriebnahme eines Kamerasystems
- Wahl eines geeigneten Endeffektors
- Funktionstests

6.2 Beschreibung der Systemkomponenten

Nachstehende Abschnitte beschreiben die für den praktischen Aufbau zur Verfügung stehenden Komponenten inklusive deren Beschreibung.

6.2.1 Roboter UR5

Beim Sechs-Achs-Knickarmroboter UR5 der Firma Universal Robots (Abb. 15) handelt es sich um einen kollaborativen Roboter, der für Manipulationszwecke, zum Beispiel für die Werkzeugmanipulation, eingesetzt bzw. programmiert werden kann. Darüber hinaus ist man mittels der Robotersteuerung in der Lage mit anderen Maschinen im Verbund zu kommunizieren.

Durch die Ausführung in Leichtbauweise, die maximale Traglast von 5 kg und die Reichweite von 850 mm eignet er sich besonders für automatisierte, sich wiederholende Aufgaben, wie beispielsweise Pick&Place-Aufgaben und/oder zur Qualitätskontrolle.



Abb. 15: Roboter UR5 der Firma Universal Robots,
Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017]

Der UR5 wird relativ einfach über das sogenannte Teach-Pendant mit integriertem Touchscreen programmiert. Dabei wird die von Universal Robots patentierte Programmieroberfläche PolyScope eingesetzt. Alternativ kann man auch die Möglichkeit nutzen, die Roboterabläufe oder Wegpunkte durch Teaching einzulernen, was den Arbeitsaufwand erheblich verkürzt. Abb. 16 zeigt das Teach-Pendant mit dem integrierten Touchscreen:

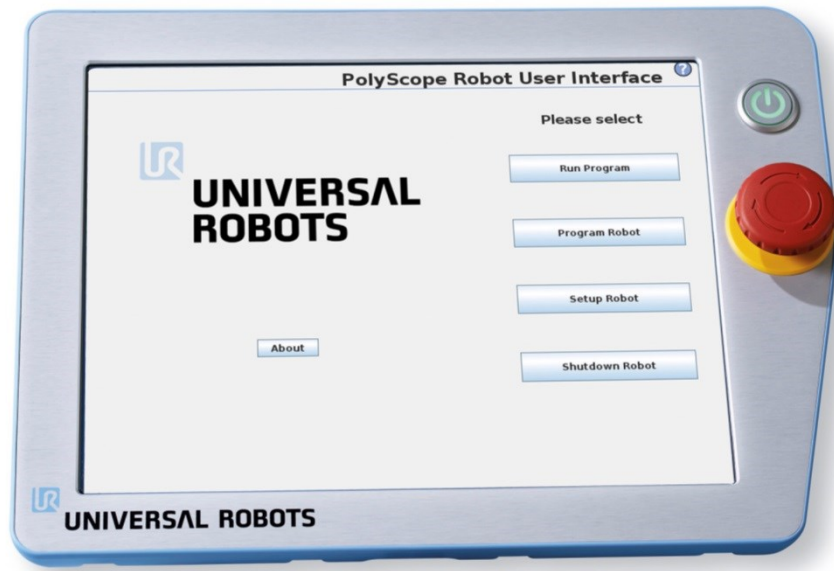


Abb. 16: Teach-Pendant für Programmier- und Bedienungsaufgaben,
Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017]

Das Teach-Pendant ist über ein ca. 6 m langes Anschlusskabel mit dem in Abb. 17 gezeigten, separaten Schaltschrank der Robotersteuerung CB3 verbunden. Das bietet den Vorteil, dass die Steuerung in einem anderen Bereich als der Roboter untergebracht werden kann, beispielsweise durch bauliche Trennung des Arbeitsbereiches und der Bedienposition.

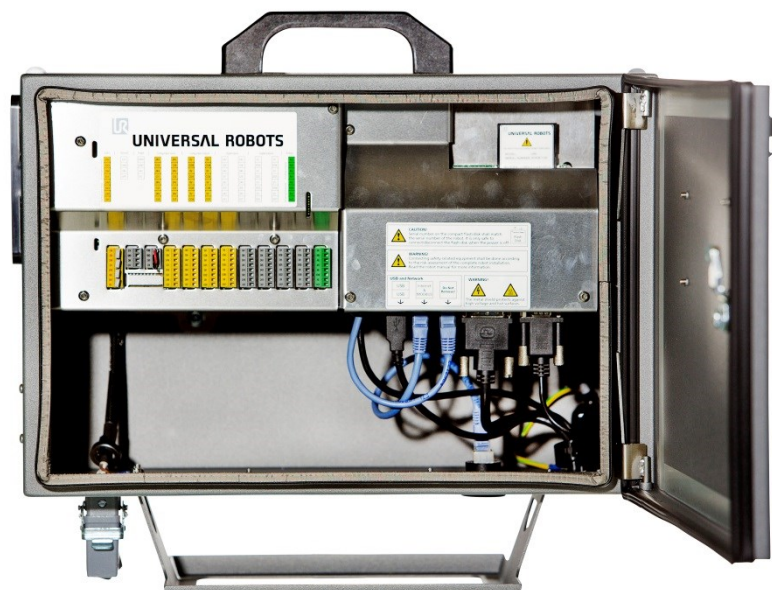


Abb. 17: Geöffnete Robotersteuerung, Typ CB3,
Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017]

Eine Gesamtübersicht der technischen Spezifikationen des Robotersystems ist in der Tab. 12 im Anhang 5 beigelegt.

Parallel zur Anlieferung des Roboters wurde seitens Firma FJ-Mayer eine eintägige Schulung des Roboters durchgeführt. Dabei wurden folgende Inhalte geschult:

- Roboter Installation inklusive Roboter Initialisierung
- Erstellung eines Roboterprogrammes inklusive Laden, Speichern, Aufrufen
- Konfiguration der Sicherheitseinstellungen
- Visualisierung der Eingangs-Ausgangs-Signale
- Ausrichtung des Tool-Center-Points (TCP)
- Erweiterte Programmierung (Schleifen, Variablen, Bewegungsarten)
- Relative / Absolute Bewegung des Roboters
- Verwendung von Variablen (Palettieren)
- Verwendung der Sicherheitsein- und -ausgänge
- Programmierung von Schleifen und Abfragen

Die Benutzerfreundlichkeit und die intuitive Benutzerführung der PolyScope-Software ermöglichen, die notwendigen Arbeitsschritte zur Programmierung relativ leicht zu erlernen und ergeben ein leistungsfähiges Gesamtsystem.

Des Weiteren sind Servicearbeiten, wie Firmware Updates oder die Implementierung eines von Universal Robots qualifizierten Werkzeuges (zu Schulungszwecken wurde ein Greifersystem der Firma Robotiq installiert) per USB Schnittstelle konfigurierbar.

Der nächste Abschnitt behandelt den konstruktiven Unterbau, der die Basis des mobilen Roboterarbeitsplatzes darstellt.

6.2.2 Konstruktiver Unterbau

Hinsichtlich des Unterbaus gab es mehrere Überlegungen, die in Frage gekommen wären. Im Zuge der Einschulung durch die Firma FJM vor Ort wurde zum Beispiel ein ausklappbares Dreibein verwendet, das durch seine kompakte Bauweise äußerst flexibel ist. Es erwies sich jedoch hinsichtlich Vibrationsarmut und Schwingungsverhalten als eher weniger geeignet.

Obwohl der Roboter mit seinem Eigengewicht von 18 kg verhältnismäßig leicht ist, sind die Bewegungsabläufe des Roboterarmes sehr dynamisch und verlangen eine solide, schwingungsarme Konstruktion.

Die Wahl fiel im Endeffekt auf ein bereits vorhandenes, aus Vierkantformrohren der Stärke 40 mm aufgebautes Metallgestell, das sich für diesen Zweck vor allem wegen seiner Geometrie und seiner Steifigkeit bestens eignet. Die Enden der vier Standbeine sind mit Platten inklusive M12 Gewinden versehen, wodurch es möglich war, an diesen Beinen vier gummierte Schwerlastrollen mit Fixierfunktion anzubringen. Das garantiert einerseits die notwendige Mobilität und andererseits auch die Möglichkeit das System zu fixieren und für einen Dauerbetrieb einzusetzen.

Ein weiterer Vorteil ist der aufgesetzte Teilaufbau an der Hinterseite, der genug Platz für die Robotersteuerung CB3 gewährleistet.



Abb. 18: Unterbaukonstruktion aus Formrohren, Quelle: Eigene Darstellung

6.2.3 Sick S300 Laserscanner

Als besondere, optimale Schutzmaßnahme wird ein Sicherheits-Laserscanner Typ S300-Expert der Firma Sick eingesetzt (siehe Abb. 19), der gleichermaßen dem Personen- wie auch dem Anlagenschutz dient.

Die Ausführung des Scanners gemäß IEC 61496C1 und IEC 61496-3 gestattet, das Gerät in Systemen der Kategorie PL d gemäß EN ISO 13849C1 bzw. SIL2 gemäß IEC 61508 einzusetzen.



Abb. 19: Sicherheitslaserscanner Typ S300-Expert der Firma Sick inklusive Montagebügel, Quelle: Eigene Darstellung

Der S300 ist für folgende Einsatzbereiche geeignet:

- Gefahrbereichsabsicherung
- Gefahrstellenabsicherung
- Zugangsabsicherung
- Fahrzeugabsicherung (Flurförderzeuge mit Elektroantrieb)

Im vorliegenden Fall dient der Laserscanner zur Absicherung eines vorher definierten Gefahrenbereiches. Dazu wird vom Scanner ein innerhalb der Systemgrenzen des Lasers frei definierbares Schutzfeld oder Warnfeld erzeugt. Wird diese für den Menschen unsichtbare Wand mit einem Gegenstand durchdrungen, z.B. mit der Hand des Bedienpersonals, wird am Ausgang der Schaltung ein Signal erzeugt, das zur weiteren Signalverarbeitung, beispielsweise zur Abschaltung des Systems, herangezogen werden kann.

Eine der wesentlichsten Eigenschaften des S300-Expert ist die Möglichkeit bis zu 48 Schutzfelder gleichzeitig aufzubauen und zu überwachen. Darüber hinaus ist man in der Lage, jedes einzelne Feld individuell zu gestalten.

Abb. 20 zeigt einen an einem Hubstapler angebrachten Laserscanner, der ein Schutzfeld (rot) und zwei Warnfelder (orange, gelb) aufbaut. Die Schutzvorrichtung könnte beispielsweise so realisiert sein, dass durch ein Hindernis (Person) bei Auslösen des Warnfeldes 1 (gelb) der Stapler ein Warnsignal auslöst, bei Auslösen des Warnfeldes 2 (orange) die Geschwindigkeit reduziert und bei Auslösen des Schutzfeldes (rot) der Stapler einen Not-Stop einleitet.

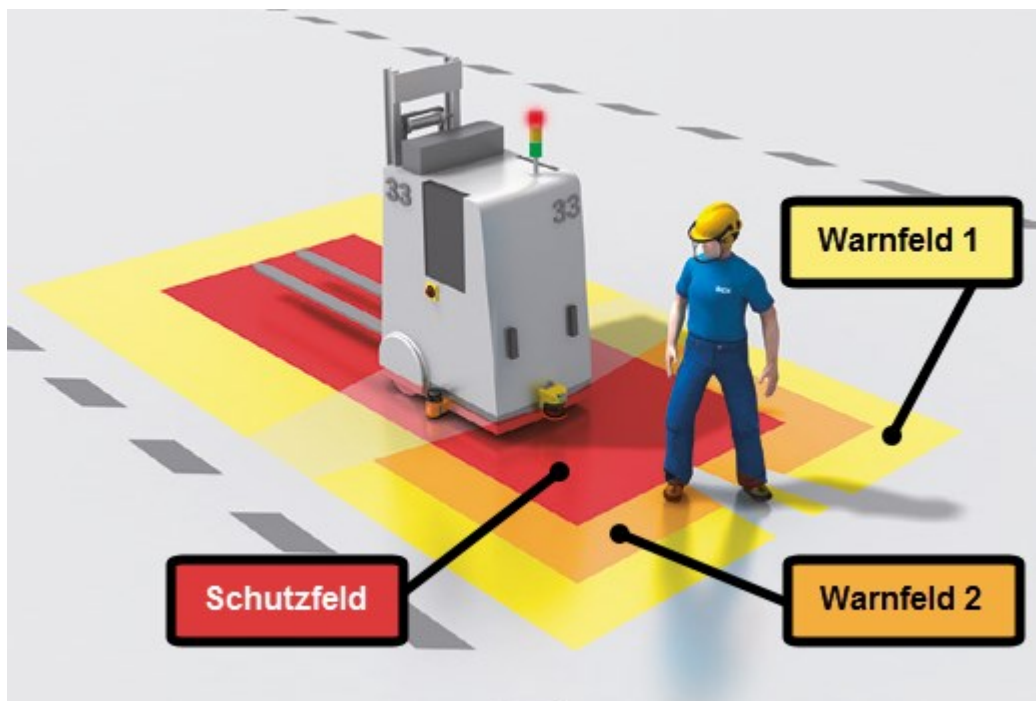


Abb. 20: Gestaltungsmöglichkeit der Schutz- und Warnfelder mittels Sicherheitslaserscanners, Quelle: SICK AG (2016), Online-Quelle [28.02.2017], S. 5 (leicht modifiziert).

Die Implementierung des S300 wird detailliert ab dem Kapitel 7, „Inbetriebnahme und Evaluierung“ dokumentiert.

6.2.4 Kamerasystem Cognex 7400C

Bei dem in Abb. 21 abgebildeten Kamerasystem der Firma Cognex, Typ 7400 C, handelt es sich um eine CMOS-Farbkamera mit 24 bit Farbinformation und einer maximalen Auflösung von 800*600 Bildpunkten. Mit bis zu 50 Bildern pro Sekunde lässt sie sich auch für sehr leistungsfähige Anwendungen einsetzen. Zusätzlich entspricht das Gehäuse dem IP67 Standard und ist dementsprechend robust ausgeführt.



Abb. 21: Cognex 7400 C Kamera, Quelle: Cognex Corporation (2017), Online-Quelle [06.05.2017]

Zum Betreiben der Kamera werden 24 V DC mit maximal 2 A benötigt, wobei die Ausgänge der Kamera bei Verwendung geeigneter Anschlusskabel zum Betreiben externer Lichtquellen wie beispielsweise einem Ringlicht verwendet werden können.

In Verbindung mit entsprechender Software (z.B. Insight Explorer der Fa. Cognex AG) ist das Kamerasystem in der Lage, sowohl 1-D-Barcodes, 2-D Barcodes und Text zu lesen als auch zu verifizieren (OCR, OCV).

Bei der Installation und im Betrieb ist darauf zu achten, dass sich das zu lesende Objekt im richtigen Abstand zum Kameraobjektiv befindet. Das im Zuge dieser Masterarbeit bereitgestellte Modell hat den C-Mount Linsentyp und ist nicht mit einem Autofokus ausgestattet. Daraus ergibt sich zwangsläufig die Abhängigkeit zwischen Sichtfeld der Kamera und dem Arbeitsabstand des zu untersuchenden Objekts. Nachstehende Abbildung gibt Aufschluss über den Zusammenhang zwischen Sichtfeld, Arbeitsabstand und Brennweite bei einer Auflösung von 800*600 Pixel:

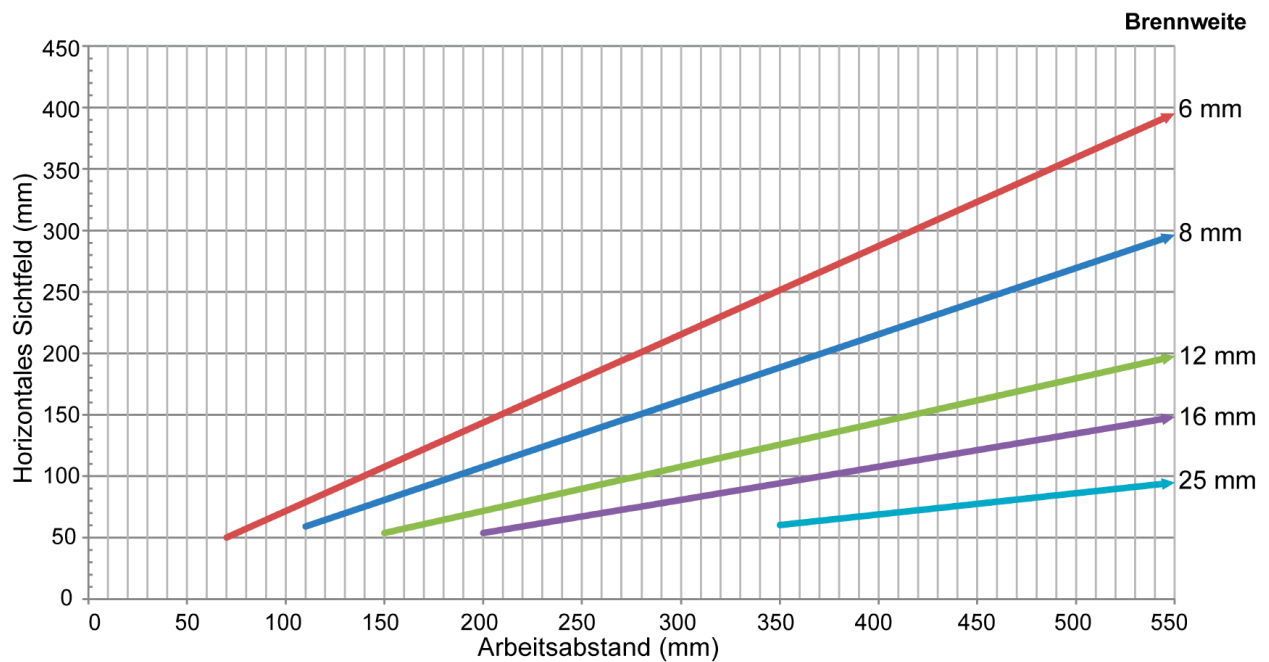


Abb. 22: Schaubild zur Ermittlung des korrekten Arbeitsabstandes, Quelle: Cognex (2013), S. 11.

6.2.5 Endeffektor

Damit ein Roboter oder ein Robotersystem Objekte auch bewegen und/oder manipulieren kann, muss er mit einem sogenannten Endeffektor ausgerüstet werden. Dabei handelt es sich streng genommen um ein Wirkorgan am Ende der kinematischen Kette.⁸ Im Falle eines Knickarmroboters ist das der vorderste Teil des letzten Roboterarmes.

Ist ein Roboter mit einem Endeffektor, beispielsweise einem Greifer, einem Prüfmittel oder einem anderen Werkzeug, ausgestattet, so bildet dieses Werkzeug zusammen mit dem Roboter eine Einheit und ist Bestandteil der Arbeitsumgebung. Dabei ist zu beachten, dass sich auch der Arbeitsraum mit dem Einsatz eines Endeffektors erweitert - also die maximale Reichweite des Roboters erhöht wird. Diese Tatsache ist in jedem Fall zu berücksichtigen und muss innerhalb des Robotersystems definiert sein (TCP, CoG, Werkzeugwechsel etc.).

Des Weiteren ist die angegebene maximale Nutzlast des UR5 Roboters von 5 kg immer inklusive dem Eigengewicht des montierten Werkzeugs zu verstehen. Es ist somit unerlässlich, die Nettotraglast des Roboters für jeden verwendeten Endeffektor separat zu eruiieren und im besten Fall die Parameter zum zugehörigen Werkzeug gleich direkt im Robotersystem zu speichern. Das ermöglicht, dass nach einem Werkzeugwechsel sämtliche Geometrie- und Lastdaten nicht nochmals bestimmt und eingegeben werden müssen.

In diesem Zusammenhang sind zwei Begrifflichkeiten von Bedeutung, die nachstehend erklärt werden:

⁸ Vgl. Almansa/Ambrosch/Graf/Hesse/Hieger/Komenda/Malisa/Wagner (2016), S. 119 ff.

Tool Center Point (TCP)

Als Tool Center Point bezeichnet man den Werkzeugmittelpunkt, der auch den Ursprung des Werkzeugkoordinatensystems bildet. In diesem Punkt sind alle Roboterpositionierungen definiert und sämtliche Bewegungen sind auf diesen Punkt referenziert.

Beim UR5, ohne Werkzeug, ist der TCP direkt im Mittelpunkt des Werkzeugflansches, wie in Abb. 23 veranschaulicht.

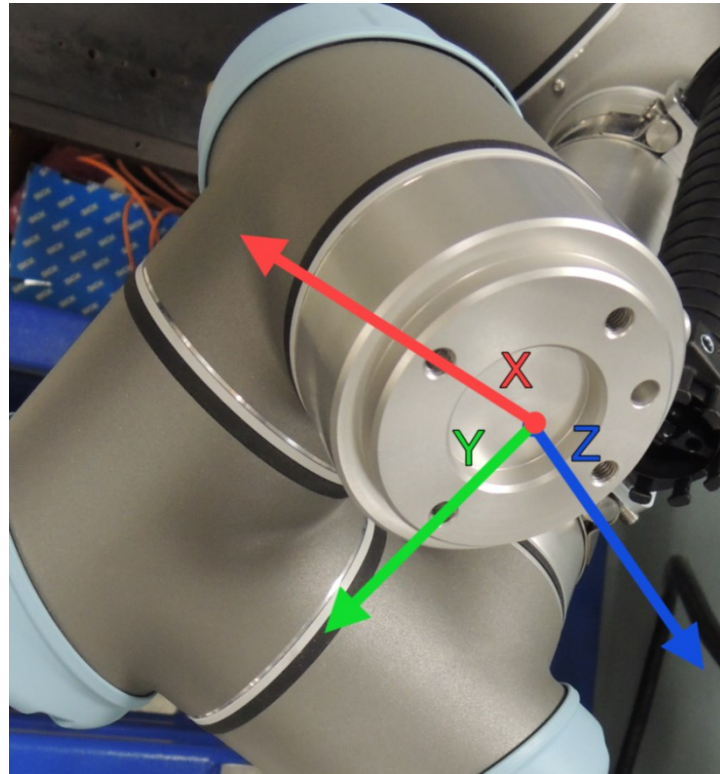


Abb. 23: TCP im Ursprung des Werkzeugflansches (Ohne Werkzeug), Quelle: Eigene Darstellung

In den meisten Fällen ist der Werkzeugmittelpunkt aber außerhalb dieses Ursprungs, entsprechend dem verwendeten Endeffektor. Die Verschiebung wird im Robotersystem programmiert und die Konfiguration abgespeichert. Je nach montiertem Endeffektor wird auch automatisch die entsprechende Konfiguration mit geladen. Dadurch ist es unter anderem möglich, mehrere TCP-Definitionen zu verarbeiten und ein multifunktionales Robotersystem zu erhalten.

Center of Gravity (CoG)

Als Center of Gravity wird der (Massen-)Schwerpunkt bezeichnet, der im Falle des UR5 ohne Werkzeug deckungsgleich mit dem TCP ist. Je nach Höhe des Gewichts des adaptierten Endeffektors und des zu manipulierenden Objekts verschiebt sich aber auch der Schwerpunkt. Dieses Verhalten ist relevant für die Bewegungsabläufe und muss ebenfalls für jedes Werkzeug und für jede Arbeitsaufgabe separat berücksichtigt werden. Im günstigsten Fall überlagern sich der CoG und der TCP und es sind keine weiteren Konfigurationen notwendig. Der Zusammenhang zwischen TCP und CoG ist in der Abb. 24 dargestellt.

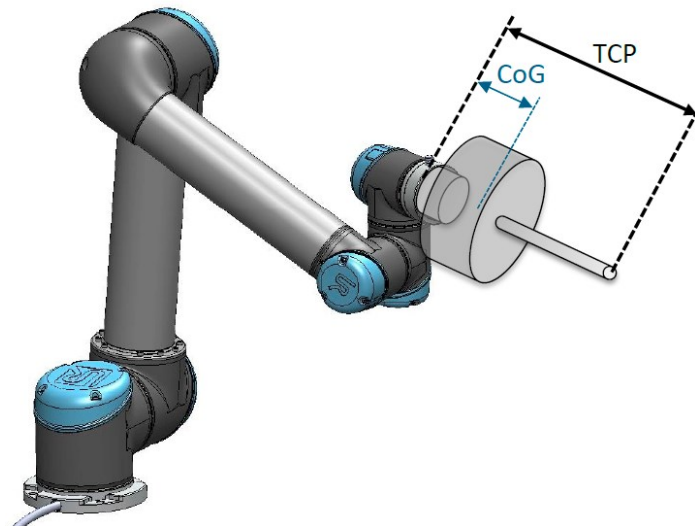


Abb. 24: CoG versus TCP am Beispiel eines Endeffektors, Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017]

Wie bereits erwähnt, müssen für sämtliche Werkzeuge die Verschiebungsdaten gespeichert und in der Roboterprogrammierung hinterlegt sein. Um die Schwerpunktverschiebung für die jeweiligen Werkzeuge nicht mühsam berechnen zu müssen, werden von den Roboterherstellern meistens Diagramme zur Verfügung gestellt, woraus sich dann die maximale mögliche Nutzlast in Abhängigkeit zur Schwerpunktverschiebung ablesen lässt. Das Diagramm in Abb. 25 ist dem Universal Robots Benutzerhandbuch entnommen und wurde für folgendes Beispiel modifiziert:

Ein Endeffektor, beispielsweise ein Greifer, bewirkt aufgrund seiner Geometrie und seines Eigengewichts eine Schwerpunktverschiebung von 460 mm. Übertragen ins Diagramm ergibt sich dadurch nur mehr eine maximale Nutzlast des Roboters von 4 kg anstelle der üblichen 5 kg.

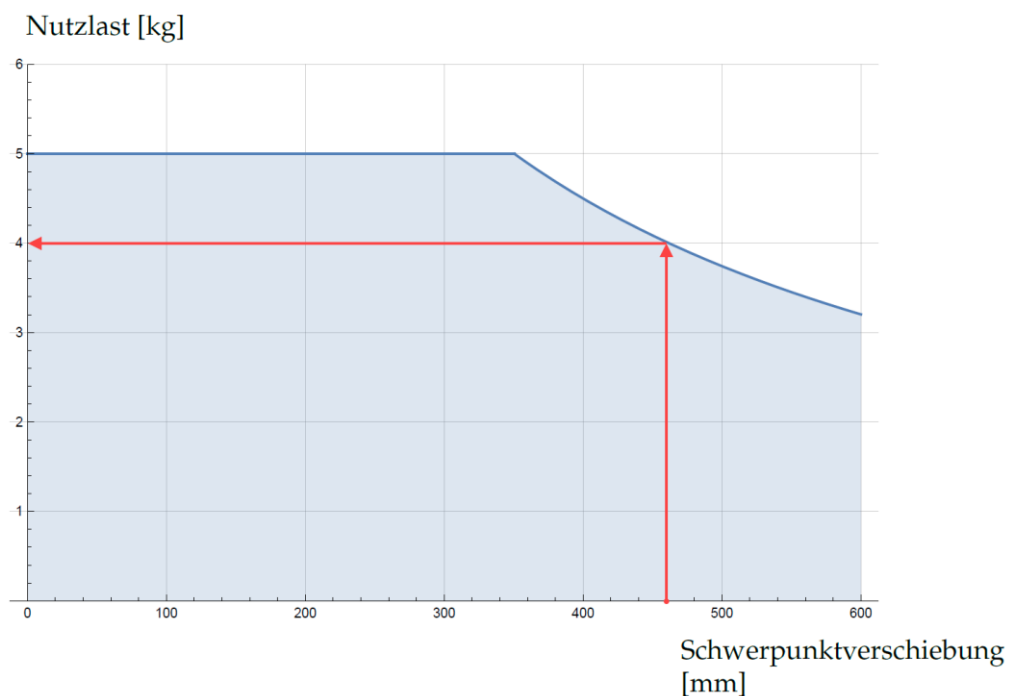


Abb. 25: Beziehungsdigramm zwischen maximal zulässiger Nutzlast und Schwerpunktverschiebung, Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-28 (leicht modifiziert).

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Masterarbeit war noch nicht klar, mit welchem Werkzeugsystem der Roboter in Zukunft ausgestattet werden soll. Die Hersteller von Endeffektoren reagieren jedoch sehr rasch auf die Entwicklungen hinsichtlich kollaborativer Robotik und bieten dementsprechende Werkzeuge wie Drei- oder Zweifingergreifer speziell für die einzelnen Robotertypen wie den UR5 an.

Aus der Überlegung heraus, das Robotersystem so flexibel wie möglich zu gestalten, wurden vier unterschiedliche Zweifingergreifer diverser Hersteller verglichen und in einer Nutzwertanalyse festgehalten. Die Ergebnisse sind der nachstehenden Tab. 9 zu entnehmen.

NWA - Endeffektorvergleich									
Anforderungskriterien		Alternativen							
Musskriterien		WSG 25-CR		2-Finger Gripper (85 mm)		2-Finger Gripper (140 mm)		RG2-Gripper	
Maximale Kosten (€ 5.000,00)	Listenpreise	€	3.000,00	€	5.000,00	€	5.000,00	€	3.000,00
Universal Robots zertifiziert		Nein		Ja		Ja		Ja	
Sollkriterien	Gewichtung [%]	Bewertung	Berechnung	Bewertung	Berechnung	Bewertung	Berechnung	Bewertung	Berechnung
Eigengewicht (< besser)	15	10	150	6	90	6	90	8	120
Hub (>besser)	15	4	60	8	120	10	150	10	150
Innen / Aussen	5	2	10	10	50	10	50	10	50
Kraft (min 50 N)	5	4	20	10	50	8	40	4	20
Payload (min 1 kg)	15	2	30	10	150	8	120	8	120
Wiederholgenauigkeit (<besser)	5	10	50	10	50	8	40	6	30
			0		0		0		0
UR Zertifiziert	5	2	10	10	50	10	50	10	50
URCap plugin	15	2	30	10	150	10	150	10	150
Preis	20	8	160	2	40	2	40	8	160
Punkte gesamt	100		520		750		730		850
Rang			4		2		3		1

Bewertung: 10 = Sehr gut / 8 = Gut / 6 = Befriedigend / 4 = Schlecht / 2 = Sehr schlecht / 0 = Nicht anwendbar
 Ja / Nein: 10 = Ja / 2 = Nein

Tab. 9: Ergebnisse der Nutzwertanalyse verschiedener Greifer, Quelle: Eigene Darstellung

Das Ergebnis zeigt, dass sich grundsätzlich alle untersuchten Greifer sehr gut eignen. Legt man jedoch den Fokus auf die Flexibilität, dann sind die ersten drei gereihten Endeffektoren zu bevorzugen. Im Speziellen positiv hervorzuheben ist die vorhandene Zertifizierung seitens Universal Robots bei diesen Greifern. Das macht sich insofern bemerkbar, als die Systeme Plug&Play fähig sind und mittels URCap-Plugin und USB-Stick rasch ins System integriert werden können. Das schließt auch die TCP- und CoG-Verschiebungen mit ein, die ansonsten aufwendig per Hand eingegeben werden müssen.

Eine Entscheidung ist hier noch zu diskutieren und wird im Kapitel 8, „Zusammenfassung und Ausblick“ nochmals behandelt.

6.3 Montage und Aufbau des kollaborativen Arbeitsplatzes

Der Aufbau und die Gestaltung des Arbeitsplatzes verlief chronologisch zu den in den Abschnitten 6.2.1 bis 6.2.5 beschriebenen Systemkomponenten. Die Realisierung wird in den nächsten Abschnitten beschrieben.

6.3.1 Montage Roboter- und Robotersteuerung

Damit der Roboter bzw. der Roboterfuß auf der Metallgrundplatte fixiert werden konnte, mussten als erster Arbeitsschritt die M8-Gewinde in die Grundplatte geschnitten werden. Die Abmessungen für die Lochabstände sind im Benutzerhandbuch des Roboterherstellers entnommen.

Aufbau des Evaluierungssystems

Nach Befestigung des Roboters, wie in Abb. 26 gezeigt, wurden an der Hinterseite des Teilaufbaues direkt in die Querverstrebung zwei M6-Gewinde für die Halterung der Robotersteuerung gebohrt und die gesamte Robotersteuerung daran befestigt (siehe Abb. 27).

Die 40 mm x 40 mm Rohre des Metallgestells bieten mit einer Wandstärke von ca. 4 mm ausreichend Material zum direkten Verschrauben verschiedener Teile bzw. Befestigungsvorrichtungen.

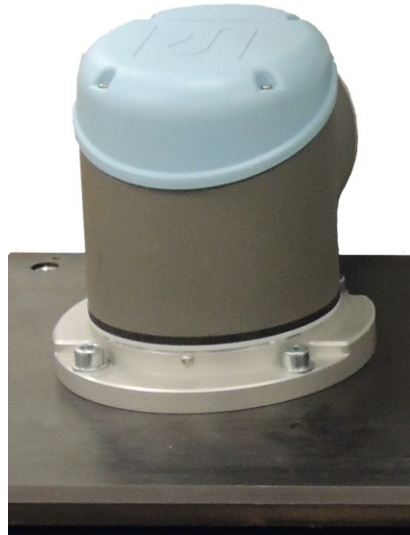


Abb. 26: Verschraubung Grundplatte – Roboterfuß, Quelle: Eigene Darstellung



Abb. 27: Befestigung der Robotersteuerung am Aufbau, Quelle: Eigene Darstellung

Der nächste Abschnitt befasst sich mit der Installation des Sicherheitslaserscanners und eines Not-Halt-Tasters.

6.3.2 Montage Sicherheitslaserscanner und Not-Halt-Taster

Um den geforderten Sicherheitsstandards genüge zu tragen, muss jeder Roboter über eine Sicherheitshalt-Funktion und eine unabhängige Not-Halt Funktion verfügen.⁹ Die Unterschiede dieser Funktionen sind im Abschnitt 3.4.1 in Tab. 1 veranschaulicht.

Zusätzlich wurde für den Zweck der Safe-Speed-Funktion ein Sicherheitslaserscanner der Firma SICK im vorderen Bereich mittels spezieller Halterung direkt an das Metallgestell montiert. Dieser Befestigungsbügel bietet durch seine geometrische Beschaffenheit zusätzlich Schutz im Falle von Kollisionen, wie in Abb. 19 auf Seite 35 zu sehen ist. Der Safe-Speed wird aktiviert, sobald sich eine Person im definierten Gefahrenbereich befindet, wo es trotz Sicherheitshalt-Funktion des Roboters nach einer Kollision dennoch zu Personenschaden kommen kann (siehe auch Unterkapitel 7.1).

Der Not-Halt-Taster wurde ebenso im vorderen Bereich oben rechts montiert, wodurch die notwendige Anforderung der schnellen und leichten Zugänglichkeit erfüllt wird.

Bei der manuellen Notabschaltung handelt es sich um eine Sicherheitsmaßnahme, die folgende Kriterien erfüllen muss:

- Die Betätigung muss zum sofortigen Stopp aller Roboterbewegungen führen
- Die Not-Halt-Taster müssen den Anforderungen der IEC 60947-5-5-Norm entsprechen

Die Anforderungen an die Verkabelung und die Integration in die Robotersteuerung selbst werden detailliert im Unterkapitel 6.4 behandelt.

Nachstehende Abb. 28 zeigt die Positionen der beiden Sicherheitsmaßnahmen.

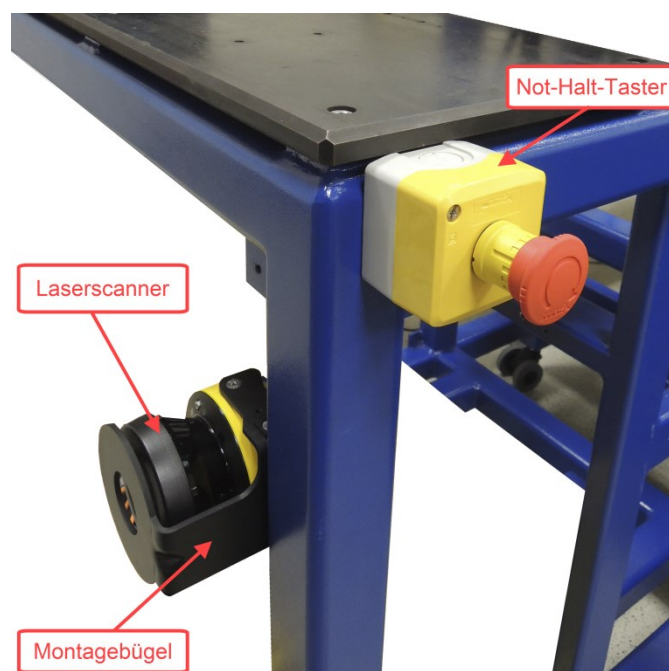


Abb. 28: Sicherheitslaserscanner und Not-Halt-Taster im vorderen Zugangsbereich montiert, Quelle: Eigene Darstellung

⁹ Vgl. DIN EN ISO 10218-1 (2012), S. 15 ff.

6.3.3 Montage des Kamerasystems

Das Kamerasystem Cognex 7400C zum künftigen Einsatz für optische Fehleranalysen wurde bereits im gleichnamigen Abschnitt 6.2.4 detailliert behandelt. Zur Durchführung einer optischen Fehlerkontrolle mithilfe eines Knickarmroboters gibt es grob betrachtet zwei Ansätze:

- Kamerasystem am Roboter – Untersuchtes Objekt statisch
- Kamerasystem stationär im Arbeitsbereich – Untersuchungsobjekt wird geführt

Aus Gründen der Flexibilität, erstere Methode würde den Roboter für weitere Anwendungsmöglichkeiten ausschließen, wurde die Kamera stationär am Arbeitsplatz montiert.

Dazu ist am oberen Teilaufbau der Stahlkonstruktion ein rechteckiger Rahmen aus Aluminiumprofilen angebracht, der nicht nur für das optische System, sondern auch für das Teach-Pendant Verwendung findet. Durch die flexible Formrohrgeometrie der Halterung ist man unter anderem auch in der Lage, andere Module bzw. zusätzliche Anbauteile zu befestigen.

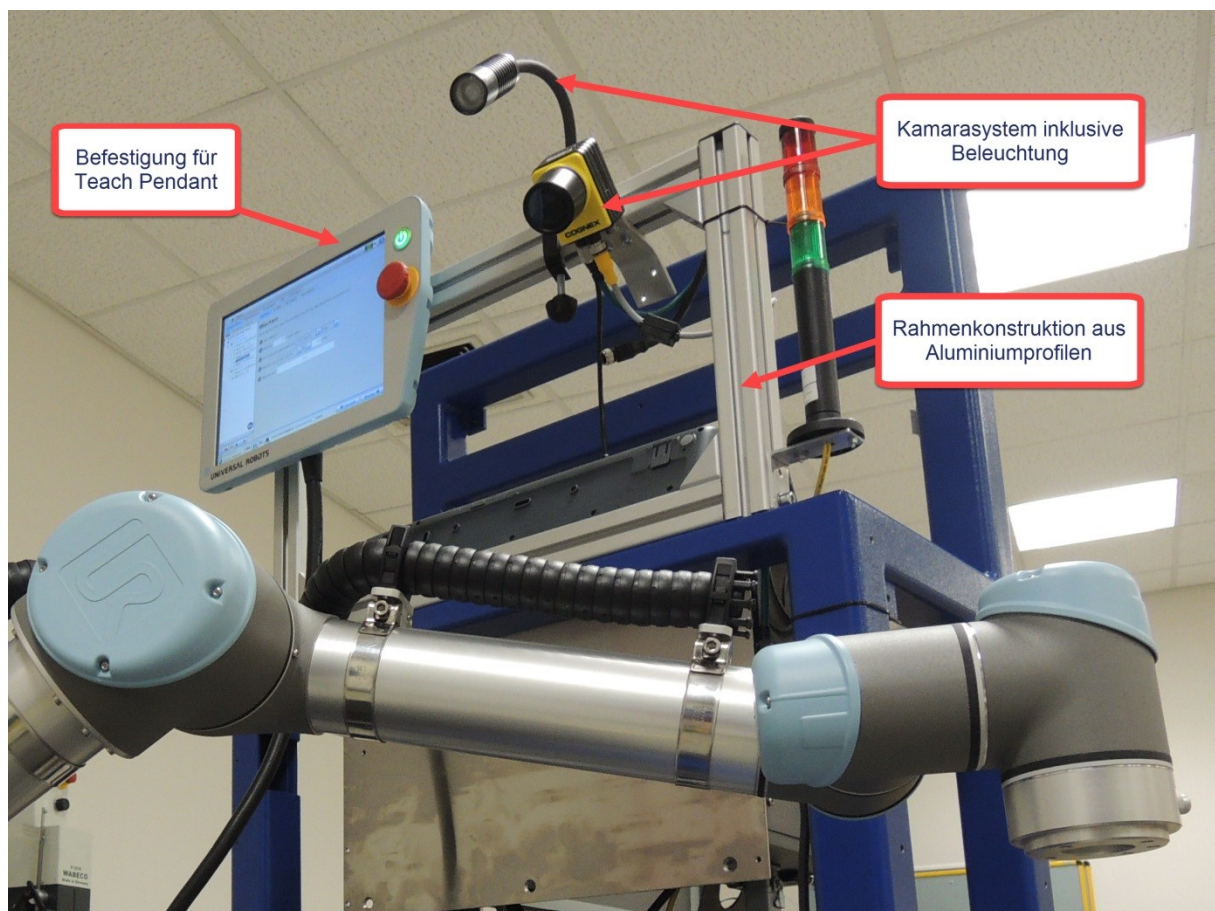


Abb. 29: Montage des Kamerasystems und des Teach-Pendants am Aluminiumrahmen, Quelle: Eigene Darstellung

6.3.4 Werkzeugwechselsystem

Der Abschnitt 6.2.5 beinhaltet Informationen hinsichtlich Endeffektoren und Werkzeugen, woraus abgeleitet wird, dass aus Flexibilitätsgründen die Einbindung eines Greifers für Manipulationszwecke vorzuziehen ist.

Zum Zeitpunkt der Fertigstellung der Masterarbeit war die Auswahl eines entsprechenden Greifers noch ausständig. Die Tab. 9 im Abschnitt 6.2.5 gibt Aufschluss über verschiedenen Greifertypen und kann als Hilfestellung zur Auswahl herangezogen werden. Die weiteren Aktivitäten und Untersuchungen beschränkten sich auf die Roboterfunktionalitäten und Sicherheitsaspekte, wie sie im Kapitel 7 beschrieben werden.

6.4 Elektrische Schnittstellen und Integration

Die elektrischen Schnittstellen des Roboters und der Robotersteuerung sind laut Hersteller folgendermaßen unterteilt:¹⁰

- Controller-E/A
- Werkzeug-E/A
- Ethernet
- Netzanschluss
- Roboteranschluss

Die für diese Untersuchungen wichtigste Schnittstelle ist die Controller-E/A, da sie auch die Kommunikation zwischen den einzelnen angeschlossenen Equipments darstellt. Der Begriff E/A nimmt Bezug auf die Eingangs- und Ausgangssignale und gilt gleichermaßen für die digitalen als auch für die analogen Signale.

6.4.1 Controller-E/A

Die Robotersteuerung CB3 ist in einem stabilen Metallkasten verbaut (siehe auch Abb. 17 auf Seite 33) und beinhaltet neben Mikrocontrolleranschlüssen des Motherboards auch sämtliche elektrischen Anschlüsse für verschieden Geräte – beispielsweise Relais, Not-Halt-Schalter, Laserscanner, etc.

In nachstehender Abbildung sind alle verfügbaren Ein- und Ausgänge der Robotersteuerung abgebildet.

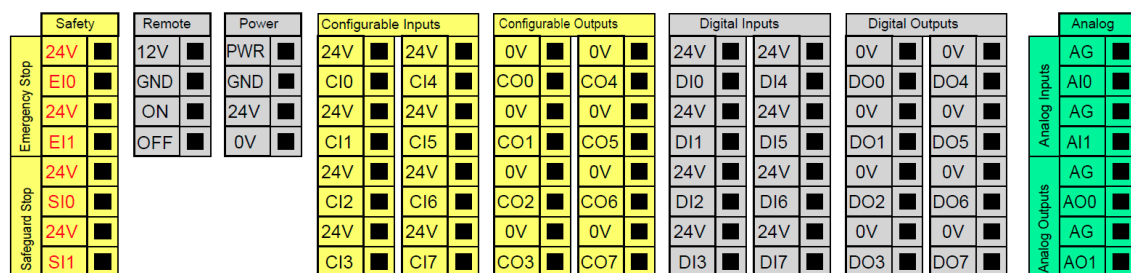


Abb. 30: Elektrische Ein- und Ausgänge der Robotersteuerung CB3, Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-32.

¹⁰ Vgl. Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-29 ff.

Je nach Anwendung oder Funktionalität sind den Anschlüssen spezielle Farben und Beschriftungen zugeordnet. Folgende Farbcodierung gilt es zu beachten:

- Gelbe Klemmen mit roter Schrift: Anschlüsse für Sicherheitssignale
- Gelbe Klemmen mit schwarzer Schrift: Anschlüsse für konfigurierbare Sicherheitssignale
- Graue Klemmen mit schwarzer Schrift: Allgemeine Anschlüsse für digitale Eingangs-Ausgangssignale
- Grüne Klemmen mit schwarzer Schrift: Allgemeine Anschlüsse für analoge Eingangs-Ausgangssignale

Der Not-Halt-Taster wird an die Klemmen „Safeguard Stop“ angeschlossen und für den Sicherheitslaserscanner werden die gelben, konfigurierbaren Klemmen verwendet. Alle Sicherheitsanschlüsse an der Steuerung sind redundant ausgeführt und benötigen aus diesem Grund immer zwei unabhängige Kanäle. Dieses Prinzip ist außerdem Voraussetzung, um den geforderten Performancelevel PL d einzuhalten.

Für den Anschluss an die Eingänge der Robotersteuerung müssen beide Equipments zuerst verkabelt werden. Abb. 31 zeigt die Kabelbelegungen von Taster und Sicherheitslaserscanner.

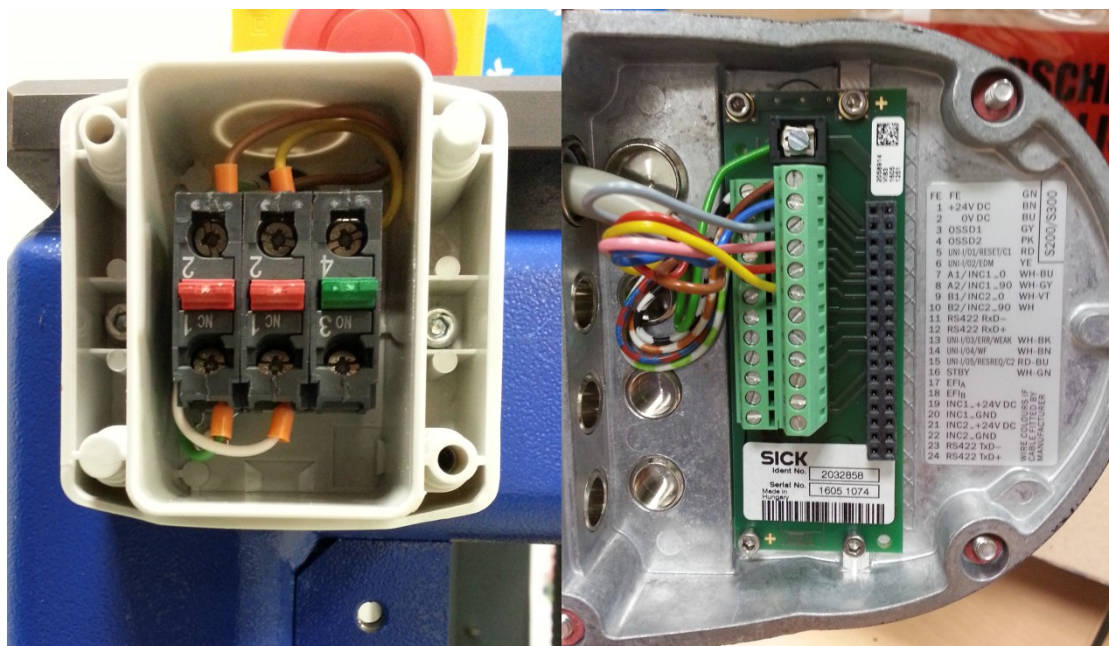


Abb. 31: Verkabelung der Sicherheitsequipments; links Not-Halt-Taster; rechts S300 Sicherheitslaserscanner, Quelle: Eigene Darstellung

Mittels dieser Beschaltung wird einerseits gewährleistet, dass nach Betätigung des Not-Halt-Tasters das System auch einen Not-Stopp durchführt und andererseits, dass das Auslösen des Sicherheitslaserscanners den reduzierten Modus (reduzierte Robotergeschwindigkeit) hervorruft.

Damit das Signal des S300 auch bewirkt, dass der reduzierte Modus ausgelöst wird, müssen über das Graphical User Interface (GUI) des Teach-Pendants zuerst die konfigurierbaren Eingänge aktiviert werden. Die neu konfigurierten Sicherheitseinstellungen werden gespeichert und das System wird neu hochgefahren.

Die Inbetriebnahmetests und Ergebnisse werden im Kapitel 7 erläutert.

6.4.2 Werkzeug-E/A

Die Eingänge bzw. Ausgänge für das Werkzeug befinden sich am letzten Gelenk des Roboterarmes. Es handelt sich dabei um einen achtpoligen Stecker, der für Industriekabel vom Typ Lumberg RKMV 8-354 geeignet ist. Über diese Schnittstelle werden sämtliche Werkzeuge bzw. Endeffektoren angeschlossen.

Die Steckerbelegung inklusive der verschiedenen Verwendungsmöglichkeiten der digitalen und analogen E/A's sind detailliert im Benutzerhandbuch des Roboters beschrieben.

An dieser Stelle sei erwähnt, dass sämtliche von Universal Robots zertifizierten Endeffektoren, siehe auch Abschnitt 6.2.5, direkt ins System integriert werden können, was sowohl den Installationsaufwand als auch die Stehzeiten erheblich reduziert.

Da (noch) kein Endeffektor ausgewählt wurde, wird dieser Punkt nicht weiter behandelt.

6.4.3 Netzanschluss, Roboteranschluss

Die Robotersteuerung wird über einen standardmäßigen IEC Stecker an das 230 V AC-Stromnetz angeschlossen. Dabei sollte die Spannungsversorgung eine Verbindung mit Masse, eine vorgeschaltete Hauptsicherung und eine Fehlerstromeinrichtung haben.

Damit das Robotersystem in Betrieb genommen werden kann, muss das Teach-Pendant an die Robotersteuerung angesteckt werden. Hierfür ist ein eigener Stecker an der Unterseite des Steuerungsgehäuses angebracht.

Während des Betriebes darf diese Verbindung aus Sicherheitsgründen niemals getrennt werden!

Ebenso darf die sechs Meter lange Zuleitung zum Pendant nicht verlängert werden.

6.4.4 USB Anschlüsse

Neben der Ethernetanbindung, die in erster Linie zur Fernwartung und für Remote-Anwendungen verwendet wird, bietet das Motherboard der Robotersteuerung CB3 noch die Möglichkeit, drei USB-Ports zu nutzen. Ein USB-Port ist mit dem Systemdongle belegt, der auch die Lizenzdaten der PolyScope Software enthält und für einen störungsfreien Betrieb nicht entfernt werden kann.

Die USB-Schnittstelle bietet eine Menge Vorteile. Allen voran kann eine Maus-Tastaturkombination per USB-Dongle realisiert werden, wodurch man jetzt in der Lage ist, Namen- oder Werteeingaben wesentlich bequemer umzusetzen.

Des Weiteren kann man per USB-Stick umgehend Aktualisierungen der Firmware einspielen. Dazu bietet Universal Robots auf der Homepage die entsprechenden Firmwarepakete an.

Zusätzlich sind auch sogenannte MagicFiles aus dem Downloadportal der Homepage per USB-Stick hochladbar. Dabei handelt es sich um nützliche Programme, die für verschieden Wartungsaufgaben genutzt werden können, beispielsweise zum Erzeugen von Screenshots nach Betätigung der „Drucken“-Taste auf der Tastatur.

7 INBETRIEBNAHME UND EVALUIERUNG

Dieses Kapitel widmet sich der praktischen Umsetzung der in den vorigen Kapiteln festgehaltenen Aufgaben und Untersuchungsziele unter Einhaltung aller geforderten Sicherheitsaspekte.

7.1 Sicherheitsaspekte

Der Einsatz und der Betrieb eines hinsichtlich MRK in allen Belangen konformen Roboters entbindet den Betreiber nicht von der Pflicht, den Arbeitsplatz in Summe auf geforderte und erreichte Sicherheitsstandards zu evaluieren.

Aus diesem Grund wird bereits im Zuge des Aufbaues des Roboterarbeitsplatzes anhand der in den Unterlagen von Universal Robots aufgelisteten möglichen Gefährdungen eine zweistufige FMEA erstellt und ausgewertet.

Folgende Risiken werden in der ersten Stufe als sehr hoch eingestuft:

- Einklemmen von Fingern zwischen Roboterfuß und Basisgelenk
- Einklemmen von Fingern zwischen Handgelenk 1 und 2 (Gelenk 3 und 4)
- Offene Wunden durch scharfe Kanten oder Ecken auf Werkzeug oder Werkzeug- Anschluss
- Offene Wunden durch scharfe Kanten oder Ecken auf Hindernissen in der Nähe des Roboters
- Blutergüsse durch Schlag des Roboters

Die komplette Stufe 1 der FMEA ist in Tab. 13 als Anhang 8 beigelegt.

Aus diesem Ergebnis ist ersichtlich, dass der verletzungsfreie Betrieb ohne zusätzliche Maßnahmen und Sicherheitseinrichtungen nicht gewährleistet werden kann!

Folgende Maßnahmen wurden erörtert; die komplette Stufe 2 der FMEA ist in Tab. 14 als Anhang 9 beigelegt:

- Anbringung von Sicherheitssymbolen bei potentiellen Gefährdungsstellen.
- Implementierung eines Schutzfeldes mittels Laserscanner (Reduzierter Modus)
- Fertigung eines Sockels (Vermeidung Quetschgefahr)
- Fertigung einer Grundplatte, die den kompletten Arbeitsbereich des Roboters abdeckt

Wie aus dem Ergebnis der 2. Stufe der FMEA ersichtlich werden bereits im Vorfeld potentielle Risiken bewertet und durch Maßnahmen entschärft (z. B. S300 Sicherheitslaserscanner).

Die baulichen Maßnahmen, wie die Fertigung einer Grundplatte und eines Sockels werden noch nicht realisiert und sind deshalb als Empfehlung an das Unternehmen im Unterkapitel 8.3 angeführt.

Der Konstruktionsvorschlag für diese Maßnahme kann der Abb. 35 im Unterkapitel 7.6 entnommen werden.

Ein wesentliches Merkmal des Roboters UR5 ist die Leistungs- und Kraftbegrenzung durch die Steuerung bzw. durch die Sensoren. Dieses Merkmal gewährleistet, dass auch im Falle einer Kollision zwischen Mensch und Roboter keine Verletzung der Person stattfindet.

Folgende Begrenzungen sind integriert:¹¹

- Kraft und Leistungsbegrenzung
- Drehmomentbegrenzung
- Gelenk- und TCP Positionsbegrenzung
- Begrenzung von TCP und Werkzeugausrichtung
- Geschwindigkeitsbegrenzung

Mit der Geschwindigkeitsbegrenzung wird erreicht, dass der Person im kollaborativen Arbeitsraum genügend Zeit gegeben wird, sich oder seine Extremitäten rechtzeitig zu entfernen und dass kürzere Wege für einen Sicherheits-Halt des Roboters ermöglicht werden.

In diesem Zusammenhang müssen die Risikopunkte aus der FMEA, insbesondere das Quetschen an scharfen Kanten, auf jeden Fall berücksichtigt und umgesetzt werden.

7.2 S300-Implementierung

Nach erfolgreicher Montage und ordnungsgemäßigem Anschluss aller eingesetzten Bauteile erweist sich die Erstinbetriebnahme als nicht realisierbar. Dies liegt weder in einer fehlerhaften Verkabelung noch in einer falschen Systemeinstellung, sondern an den konfigurierbaren Sicherheitseingängen der Robotersteuerung, die äußerst sensibel und sehr schnell auf Spannungsänderungen reagieren.

Der Grund liegt in der Schaltung und im Aufbau des Laserscanners. Die reibungslose Einbindung des Lasers in den Verbund eines dem Performancelevel PL d entsprechenden Systems, erfordert, dass die beiden OSSD Sicherheitsausgänge aus Sicherheitsgründen getaktet und überwacht werden. Damit wird ein Fehler der Anschlussleitung, beispielsweise ein Kabelbruch zwischen dem Ausgang des Scanners und dem Eingang an der Robotersteuerung, detektiert. Die Steuerung des S300 unterbricht alle 120 ms das Ausgangssignal für eine Zeitdauer von 300 μ s und misst dabei das Signal. Ein Fehler würde somit erkannt werden. In Abb. 32 ist der Signalverlauf der Schaltungsüberwachung abgebildet.

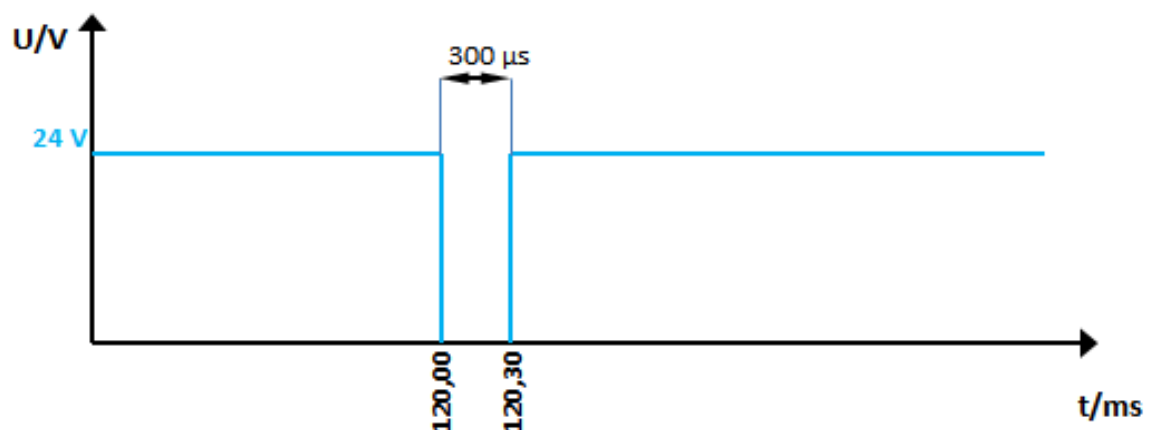


Abb. 32: Signalverlauf der Schaltungsüberwachung für Sick S300, Quelle: Eigene Darstellung

¹¹ Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-9, I-10.

Da die Sicherheitseingänge der Robotersteuerung auf diese Schaltungscharakteristik reagieren, wird ständig ein Sicherheitshalt ausgelöst.

Seitens des Herstellers SICK gibt es speziell für diesen Zweck zwangsgeführte Relais wie beispielsweise das Modell UE10-2FG.

Für die korrekte Integration des Sicherheitslaserscanners muss diese Lösung angestrebt werden, da bis auf weiteres der Sicherheitslaserscanner deaktiviert ist und somit das Auslösen des reduzierten Modus (Safe Speed) nicht gewährleistet werden kann.

7.3 Roboterbedienung und Roboterprogrammierung

Im Zuge der Systemeinschulung, siehe auch Abschnitt 6.2.1, wurden bereits die grundlegendsten Programmier- und Teachverfahren gelernt.

Die Programmierung des Roboters erfolgt über den Touchscreen des Teach-Pendants. Die Programmiersprache ist PolyScope, eine von Universal Robots patentierte Scriptsprache, deren Basis ein Linuxsystem ist.

Ein wesentliches Merkmal des Roboters ist das Sicherheitssystem, das für verschiedenen Szenarien angepasst werden kann. Sämtliche sicherheitsrelevanten Einstellungen werden passwortgeschützt in der Sicherheitskonfiguration gespeichert und nach Neustart des Systems mittels Prüfsumme auf Konsistenz verifiziert.

In der Sicherheitskonfiguration sind folgende Parameter und Daten hinterlegt:¹²

- Allgemeine Grenzen
- Gelenkgrenzen
- Grenzen
- Sicherheits-E/A

Das Sicherheitssystem ist in drei Sicherheitsmodi eingeteilt, wobei jedem Modus eigene Grenzen zugeordnet sind:

- Normaler Modus: Standardmodus
- Reduzierter Modus: Sicherheitsmodus, mit reduzierten Geschwindigkeiten
- Wiederherstellungsmodus: Ausgelöst durch Grenzüberschreitung

Für die beiden ersten Modi sind die zuvor genannten Grenzen modifizierbar und werden wiederum in der Sicherheitskonfiguration hinterlegt.

Der Wiederherstellungsmodus wird ausgelöst, wenn eine Grenze in einer der beiden anderen Modi überschritten wird. Das Robotersystem führt an dieser Stelle einen Systemhalt aus. Um den Roboter aus diesem Zustand wieder zu befreien, muss man wie beim Teaching mittels Zustimmungstaster an der Rückseite des Tech-Pendants den Roboterarm per Hand wieder aus der Zone führen. Erst danach kann das System wieder in den normalen oder reduzierten Modus wechseln.

¹² Vgl. Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. II-4 ff.

Ein sehr wichtiger Teilbereich im Zuge der Roboterprogrammierung ist das Implementieren sogenannter Sicherheitsebenen. Dabei bilden diese programmierten Ebenen eine fiktive Wand und werden mit der Sicherheitskonfiguration abgespeichert. Funktionell betrachtet haben diese Ebenen den Charakter der Schutz- und Warnfelder eines Sicherheitslaserscanners. Überschreitet der TCP des Robotersystems diese Ebene, so wird je nach Ebenenkonfiguration der reduzierte oder der Wiederherstellungsmodus ausgelöst. Dementsprechend wird diese Sicherheitsfunktion auch zur Überwachung des MRK-Raumes herangezogen. Der Screenshot in Abb. 33 zeigt, wie diese Ebenen im System integriert werden.

Die Überschreitung des TCP im Falle der Safety Plane 0 oder der Safety Plane 1 würde einen Sicherheitshalt hervorrufen. Im Falle der Überschreitung der Safety Plane 2 würde der reduzierte Modus aktiv werden.

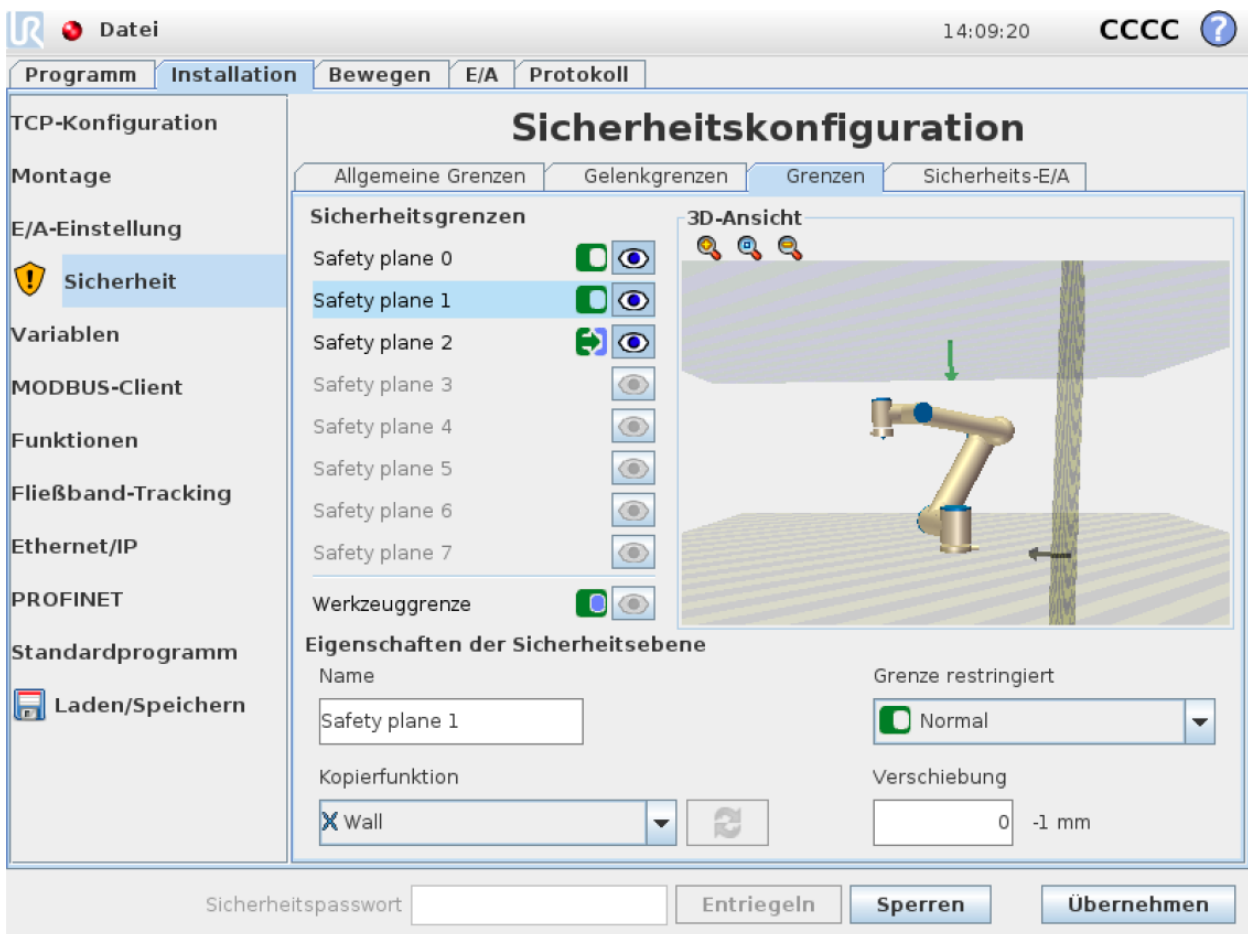


Abb. 33: Konfiguration der Sicherheitsebenen; Quelle: Eigene Darstellung

Die anwenderfreundliche und übersichtliche Programmieroberfläche der PolyScope Software lässt sich mittels Touchscreen intuitiv bedienen. Programmieraufgaben sind logisch in Scriptsprache gehalten.

Zur Überprüfung der Roboterposition oder der Bahnbewegung werden sowohl die aktuelle Position des Roboters als auch die definierte Zielposition als 3D-Grafik in Echtzeit angezeigt. Über die Schaltfläche „Simulation“ ist man somit in der Lage die vorab definierten Positionen anzufahren und am Display zu verifizieren. Abb. 33 zeigt die 3D-Grafik des Roboters.

7.4 Arbeitsüberwachung MRK

Die Ergebnisse aus der FMEA im Unterkapitel 7.1 zeigen, dass der Kollaborationsraum trotzdem überwacht werden muss, solange es potentielle Gefährdungen gibt. Wird künftig ein Endeffektor montiert, müssen parallel dazu auch die potentiellen Risikopunkte in die FMEA aufgenommen und bewertet werden.

Während der Inbetriebnahmetests ist ein Fall eingetreten, der trotz Risikobetrachtung und Implementierung einer Schutzmaßnahme zu einer Gefährdung geführt hat.

Zu Testzwecken wurde der Roboter, wie in Abb. 34 zu sehen ist, in eine Position gebracht, in der das obere Schultergelenk über die Schutzebene hinaus ragt und mit der Rückwand kollidiert. Während des gesamten Vorgangs war die rot markierte Schutzebene in der Sicherheitskonfiguration stets aktiv, die Abschaltung wurde aber nicht ausgelöst. Da sich die Einstellungen hinsichtlich Schutzebenen immer auf den TCP beziehen wurde kein Vergehen detektiert und die Schutzmaßnahme, ein Schutz-Stopp vor Kollision wurde nicht eingeleitet.

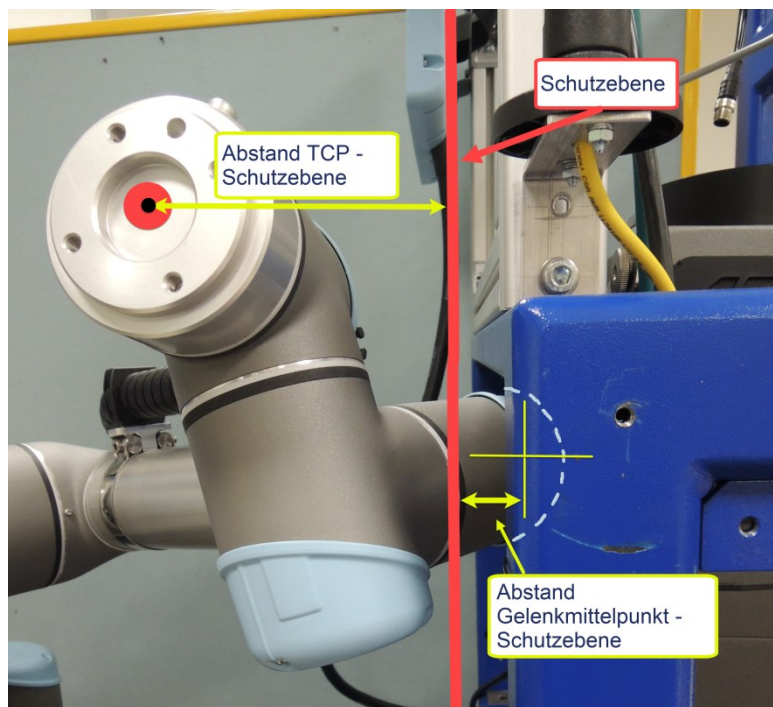


Abb. 34: Kollision des Roboters mit der Rückwand, ohne Überschreitung der Schutzebene, Quelle: Eigene Darstellung

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass es unabdingbar ist, zu jeder Zeit sensibel und aufmerksam die Arbeitsumgebung wahr zu nehmen und alle erdenklichen, potentiellen Gefahren zu analysieren.

7.5 Teileerkennung mittels Kamerasystem

Wie bereits erwähnt kommt es in dieser Arbeit nicht zur kompletten Umsetzung in Bezug auf die Inbetriebnahme einer Teileerkennung mittels Cognex Kamera 7400C. Das Kamerasystem ist zumindest physisch soweit vorbereitet (siehe Abb. 29), dass es mit Strom versorgt wird und per Ethernet beispielsweise an einen Laptop angeschlossen werden kann. Mit der entsprechenden Auswerte- und Lesesoftware kann das System künftig für die optische Analyse verwendet werden.

7.6 Erkenntnisse aus der Inbetriebnahme / Evaluierung

Für einen absolut sicheren, kollaborativen Arbeitsplatz müssen künftig noch einige Verbesserungen und Maßnahmen umgesetzt werden.

Die wichtigste Erkenntnis ist die Tatsache, dass trotz Vorsichtsmaßnahmen und Sicherheitsvorrichtungen keine hundertprozentige Personensicherheit gewährleistet werden kann, was eine permanente Evaluierung des Arbeitsplatzes und der kollaborativen Arbeitsumgebung notwendig macht.

Abgeleitet aus den Erkenntnissen und aus dem Ergebnis der FMEA gibt es einen Konstruktionsvorschlag, der in nachstehender Abb. 35 veranschaulicht wird.

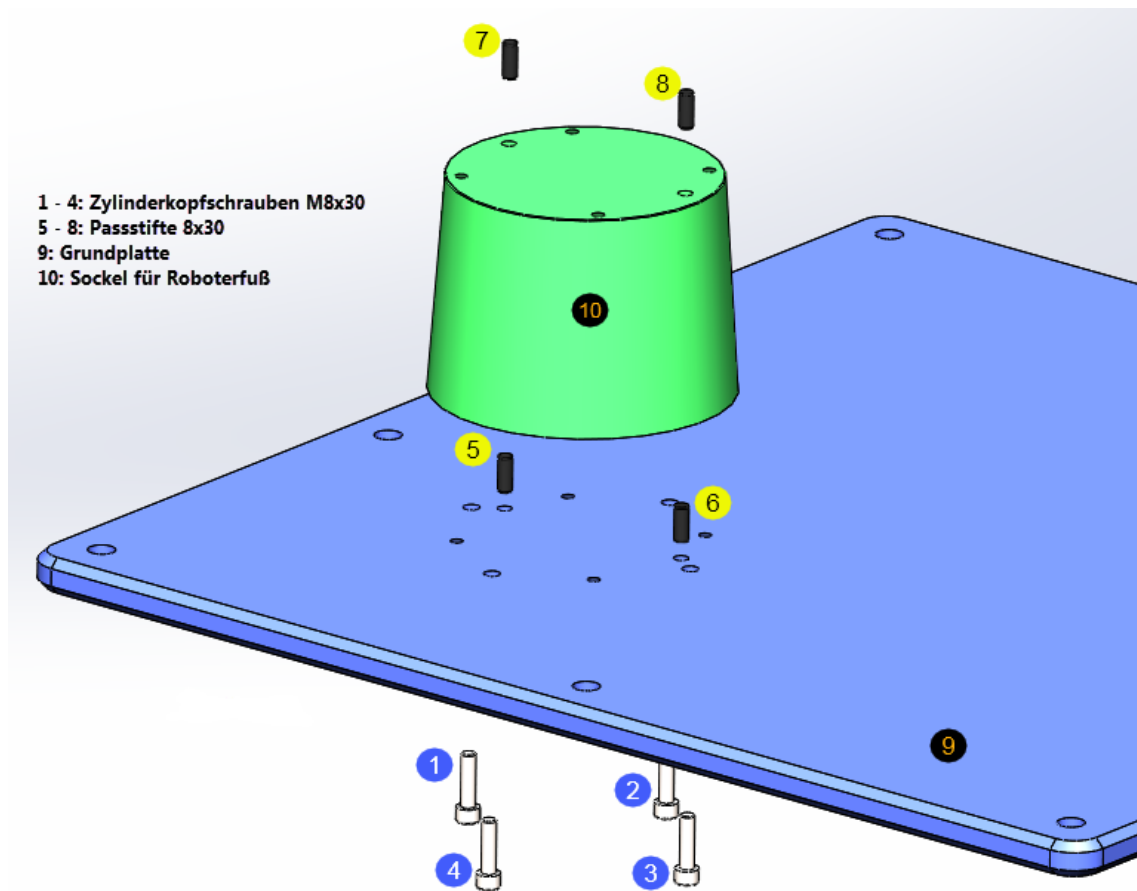


Abb. 35: Konstruktionsvorschlag Grundplatte und Sockel für den kollaborativen Roboterarbeitsplatz,
Quelle: Eigene Darstellung

Dabei wird die aktuelle Grundplatte durch eine durchgehende, aus Aluminium gefertigte Grundplatte ersetzt und darauf ein Sockel zur Erhöhung des Roboterfußes montiert. Durch diese bauliche Maßnahme werden aktuell vorhandene, scharfe Kanten eliminiert.

Die Erhöhung durch den Sockel entschärft den Kniegelenk-Effekt, der auftritt, wenn der Roboter bei langsamen Bewegungen in seiner gestreckten Lage unter seine Fußflanschebene fährt. In diesem Fall entstehen an dieser Position hohe radial wirkende Kräfte die zu Verletzungen führen können.

8 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Das Resümee dieser Arbeit fällt durchwegs positiv aus, obwohl zum aktuellen Zeitpunkt eine hundertprozentige Verletzungsfreiheit von Personen im Arbeitsbereich nicht gewährleistet werden kann. Dies liegt darin begründet, dass die wichtige Implementierung des Sicherheitslaserscanners S300 aus steuerungstechnischer Hinsicht scheiterte. Hier gibt es Nachholbedarf um die Anforderungen an einen kollaborativen Arbeitsplatz zu erfüllen.

Die vollständige Implementierung des Kamerasystems, insbesondere die Bildauswertung und die anschließende Weiterverarbeitung, waren aus zeitlichen Gründen nicht möglich.

Nachstehende Unterkapitel behandeln zusammengefasst die Ergebnisse dieser Arbeit und zeigen nach Umsetzung einiger Empfehlungen künftige Möglichkeiten, das Kameraprojekt an der FH CAMPUS 02 weiterzuführen.

8.1 Ergebnisse

Die Gestaltung eines mobilen, kollaborativen Roboterarbeitsplatzes, der den aktuell gültigen Normen, Richtlinien und Spezifikationen entspricht, konnte mithilfe von Risikobewertungswerkzeugen und den daraus verpflichten Maßnahmen, zum Großteil umgesetzt werden.

Es war möglich, den grundsätzlichen Aufbau eines kollaborativen Robotersystems zu realisieren, Risiken zu bewerten und daraus Maßnahmen zu definieren, aber die Umsetzung einer dieser Maßnahmen, die erfolgreiche Arbeitsraumüberwachung, wurde nicht vollständig implementiert.

Als Risikobewertungswerkzeug wurde eine FMEA erstellt, die die weiteren Maßnahmen zur Risikominimierung enthält. Als Hilfestellung zur Vorgehensweise der Risikominimierung soll auch das in Abb. 12 dargestellte Prozessschaubild dienen.

Die im Zuge der Risikobewertung angewendete Methode der FMEA hat sich als geeignetes Werkzeug zur Risikobetrachtung etabliert. Risiken wurden identifiziert, bewertet und beispielsweise durch Schutzzonen und/oder Verringerung der Maximalgeschwindigkeit der Roboterbewegung minimiert.

Der direkte Einsatz des Sicherheitslaserscanners — die Ausgänge des Lasers liegen direkt an den Safety-Eingängen der Robotersteuerung an — konnte aufgrund der Sensibilität der Robotersteuerung nicht realisiert werden. Es handelt sich dabei nicht um ein Fehlverhalten der Schutzfeldeinrichtung oder der Steuerung, sondern um ein nicht unmittelbar lösbares Problem hinsichtlich des Schaltzeitvorgangs. Abhilfe würde hier ein vorgeschaltetes Umsatzrelais schaffen, beispielsweise der Typ UE10-2FG oder der Typ UE10-30S, beide von der Firma SICK.

Die Werkzeugschnittstelle bietet aufgrund des durchdachten Designs einen großen Spielraum für die Art und Verwendung eines geeigneten Endeffektors. Auf jeden Fall ist für eine rasche und unkomplizierte Einbindung eines Greifers oder eines ähnlichen Werkzeuges jenes zu bevorzugen, das durch die Firma Universal Robots zertifiziert und freigegeben wurde. Ist das der Fall, werden im Zuge der Installation sämtliche Endeffektordaten, wie TCP-Verschiebung, CoG-Punkt-Verschiebung automatisch mittels USB-Stick eingespielt und gespeichert.

Die komplette Umsetzung einer optischen Teilekontrolle konnte aus Zeitmangel nicht weitergeführt werden. Das Kamerasystem Cognex 7400C, inklusive Beleuchtung, wurde zumindest physisch und anschlusstechnisch vollwertig implementiert und es kann für weitere Aufgaben und Projekte genützt werden.

Die Spannungsversorgung von 24 V sowohl für die Kamera, für die Beleuchtung als auch für den Sicherheitslaserscanner direkt über die Robotersteuerung selbst abzugreifen, erwies sich dabei als äußerst effizient und vor allem platzsparend.

8.2 Ausblick

Die Ergebnisse zeigen eindeutig, dass der Integrator oder der Betreiber eines kollaborativen Arbeitsplatzes bzw. der Einsatz eines kollaborativen Roboters trotz Einhaltung aller Konformitäten in Bezug auf zugrundeliegende Normen und Richtlinien nicht von der Pflicht entbunden ist, risikobehaftete Situationen oder Gefährdungen zu identifizieren, zu minimieren oder gegebenenfalls zu eliminieren.

Je nach Verwendungszweck und Situation sind separate Risikobetrachtungen durchzuführen und geeignete Maßnahmen umzusetzen.

Das Kamerasystem Cognex 7400C ist soweit vorbereitet, dass es für die optische Teileerkennung eingesetzt werden kann. Abzuklären ist dabei, wie die weitere Bildverarbeitung durchgeführt wird, beispielsweise durch einen separaten PC oder einen Laptop mit entsprechender Auswertungssoftware.

8.3 Empfehlung(en) an das Unternehmen

Das Ziel, einen sicheren kollaborativen Arbeitsplatz zu gestalten, bedarf zum aktuellen Zeitpunkt einiger Maßnahmen und Aktivitäten. Dabei sollte die Einbindung des Sicherheitslaserscanners S300 mit entsprechender Steuerung oberste Priorität haben. Die iterative Abhandlung der FMEA wäre im zweiten Schritt durchzuführen, um die Risikobewertung des Systems auf aktuellem Stand zu halten.

Betrachtet man die angewandten Risikomaßnahmen, wie die Installation von Schutzzonen und/oder die Geschwindigkeitsbegrenzung der Roboterbewegung von wirtschaftlicher Seite, so haben diese Maßnahmen eine negative Auswirkung auf die Produktivität.

Durch entsprechende, zusätzliche konstruktive Maßnahmen, wie den Tausch der Robotergrundplatte inklusive Montage des Roboters auf einem Sockel, würde man nicht nur eine deutliche Minderung und teilweise sogar eine Eliminierung möglicher Verletzungsgefährdungen der in der FMEA aufgezeigten Risikopunkte erreichen, sondern es würde damit auch eine Produktivitätssteigerung erreicht werden. Aktuell notwendige Schutzzonen, die einen reduzierten Geschwindigkeitsmodus hervorrufen, wären nicht mehr notwendig.

Der Auswahl eines Greifers bzw. allgemein eines Endeffektors liegt immer der entsprechende Verwendungszweck zugrunde. Dabei sollten sowohl die wirtschaftlichen als auch die sicherheitsspezifischen Gesichtspunkte das Entscheidungskriterium darstellen. Die im Abschnitt 6.2.5 angeführte Nutzwertanalyse stellt vier Greifer gegenüber, die für einen flexiblen Einsatz des Arbeitsplatzes in Frage kommen würden. Die Nutzwertanalyse ist als Hilfestellung zur Auswahl gedacht.

LITERATURVERZEICHNIS

Gedruckte Werke (4)

Almansa, Ana; Ambrosch, Roland; Graf, Birgit; Hesse, Stefan; Hieger, Christof; Komenda, Titanilla; Malisa, Viktorio; Wagner, Erwin (2016): *Taschenbuch Robotik - Montage - Handhabung*, 2 Auflage, Carl Hanser Verlag, Leipzig

Cognex (2013): *Installationshandbuch für In-Sight® Vision-Systeme der Serie 7000*, Rev. D Auflage, ohne Verlagsangaben, Rueil Malmaison Cedex – Frankreich

Harer, Johann; Gübitz, Brigitte; Klinger, Udo (2014): *Anforderungen an Medizinprodukte - Praxisleitfaden für Hersteller und Zulieferer*, 2 Auflage, Carl Hanser Verlag, München

Patzak, Gerold; Rattay, Günter (2008): *Projektmanagement - Leitfaden zum Management von Projekten, Projektportfolios, Programmen und projektorientierten Unternehmen*, 5. Auflage Auflage, Linde Verlag Ges.m.b.H., Wien

Wissenschaftliche Artikel (1)

Heulke, Michael (2015): *Arbeitsplätze der Industrie 4.0 - Kollaborierende Roboter*, in: DGUV Forum, 3/2015, Universum Verlag GmbH, Taurusstraße 54, 65183 Wiesbaden, S. 10-13

Online-Quellen (10)

GTE Industrieelektronik GmbH (2017): *GTE Industrieelektronik GmbH*

https://www.gte.de/material/GTE__KDMG-KOLROBOT__Systembeschreibung__DE01.pdf [Stand: 28.02.2017]

Universal Robots (2016): *Benutzerhandbuch UR5 / CB3*

https://s3-eu-west-1.amazonaws.com/ur-support-site/22056/UR5_User_Manual_de_E67ON_Global.pdf [Stand: 27.02.2017]

SICK AG (2016): *Optoelektronische Schutzeinrichtungen - Produkte im Überblick*

https://www.sick.com/media/dox/3/43/743/Product_overview_Optoelektronische_Schutzeinrichtungen_de__IM0068743.PDF [Stand: 28.02.2017]

KUKA AG (2017): *KUKA AG*

<https://www.kuka.com/-/media/kuka-corporate/documents/press/lbr-iiwa.zip> [Stand: 06.05.2017]

SICK AG (2017): *SickInSight - Das Magazin von Sick*

<http://www.sickinsight-online.de/wp-content/uploads/2016/07/human-robot-collaboration.jpg> [Stand: 06.05.2017]

Universal Robots (2017): *Universal Robots*

https://www.universal-robots.com/media/442098/ur5_left.png [Stand: 06.05.2017]

Universal Robots (2017): *Universal Robots*

https://www.universal-robots.com/media/837306/ur_controller_open.jpg [Stand: 06.05.2017]

Universal Robots (2017): *Universal Robots*

https://www.universal-robots.com/media/903586/ur_teach_pendant_welcome.jpg [Stand: 06.05.2017]

Cognex Corporation (2017): *Cognex Corporation*

[http://www.cognex.com/uploadedImages/2014_Taxonomy/Products/Product_Pages/Machine_Vision/2D_Machine_Vision/In-Sight_Vision_Systems/In-Sight_7000_Series/WithAndWithoutLensCap\(1\).jpg](http://www.cognex.com/uploadedImages/2014_Taxonomy/Products/Product_Pages/Machine_Vision/2D_Machine_Vision/In-Sight_Vision_Systems/In-Sight_7000_Series/WithAndWithoutLensCap(1).jpg) [Stand: 06.05.2017]

Universal Robots (2017): *Universal Robots*

https://www.universal-robots.com/media/240988/ur3_infinite_rotation_03.jpg [Stand: 06.05.2017]

Normen (7)

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2012): *DIN EN ISO 10218-1: Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter*

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2012): *DIN EN ISO 10218-2: Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration*

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2008): *DIN EN ISO 13489-2: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung*

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2008): *DIN EN ISO 13849-1: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsgrundsätze*

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2010): *DIN EN ISO 13855: Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen*

DIN Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2012): *DIN ISO/TR 14121-2: Sicherheit von Maschinen - Risikobeurteilung - Teil 2: Praktischer Leitfaden und Verfahrensbeispiele*

International Organization for Standardization (Hrsg.) (2016): *ISO/TS 15066: Technical Specification - Robots and robotic devices - Collaborative Robots*

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 1: Werkstücktausch im Arbeitsraum eines kollaborativen Roboters, Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017] (leicht modifiziert).....	3
Abb. 2: Kollaborativer Arbeitsraum, Quelle: ISO/TS 15066 (2016), S. 3.....	4
Abb. 3: Leichtbauroboter der Firma Kuka, Typ: LBR iiwa, Quelle: KUKA AG (2017), Online-Quelle [06.05.2017] (leicht modifiziert).	5
Abb. 4: Teaching eines Roboterarmes am Kuka LBR iiwa, Quelle: KUKA AG (2017), Online-Quelle [06.05.2017] (leicht modifiziert).	7
Abb. 5: Schematische Darstellung einer Schutzfeldüberwachung, Quelle: SICK AG (2017), Online-Quelle [06.05.2017].	7
Abb. 6: Physikalisches Messprinzip nach IFA, Quelle: Heulke (2015), S. 12.....	9
Abb. 7: Risikomanagementprozess nach ISO 14971, Quelle: Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 19.	10
Abb. 8: Top-down und Bottom-up Ansätze, Quelle: DIN ISO/TR 14121-2 (2012), S. 10.	11
Abb. 9: Risikograf zur Bestimmung des Performance Levels, DIN EN ISO 13849-1 (2008), S. 55.	12
Abb. 10: Akzeptanzbereiche bei Kraft- bzw. Druckeinwirkung, Quelle: ISO/TS 15066 (2016), S. 18.	15
Abb. 11: Risikobewertungsmatrix, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 25.	17
Abb. 12: Prozessablauf einer Risikominimierung, Quelle: Eigene Darstellung	18
Abb. 13: Prozess einer FMEA, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 37.....	21
Abb. 14: Telezentrisches Objektiv der Firma Sill Optics, Quelle: Eigene Darstellung.....	28
Abb. 15: Roboter UR5 der Firma Universal Robots, Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017]	32
Abb. 16: Teach-Pendant für Programmier- und Bedienungsaufgaben, Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017]	33
Abb. 17: Geöffnete Robotersteuerung, Typ CB3, Quelle: Universal Robots (2017), Online-Quelle [06.05.2017]	33
Abb. 18: Unterbaukonstruktion aus Formrohren, Quelle: Eigene Darstellung.....	35
Abb. 19: Sicherheitslaserscanner Typ S300-Expert der Firma Sick inklusive Montagebügel, Quelle: Eigene Darstellung	35
Abb. 20: Gestaltungsmöglichkeit der Schutz- und Warnfelder mittels Sicherheitslaserscanners, Quelle: SICK AG (2016), Online-Quelle [28.02.2017], S. 5 (leicht modifiziert).	36
Abb. 21: Cognex 7400 C Kamera, Quelle: Cognex Corporation (2017), Online-Quelle [06.05.2017].....	37

Abb. 22: Schaubild zur Ermittlung des korrekten Arbeitsabstandes, Quelle: Cognex (2013), S. 11.	38
Abb. 23: TCP im Ursprung des Werkzeugflansches (Ohne Werkzeug), Quelle: Eigene Darstellung	39
Abb. 24: CoG versus TCP am Beispiel eines Endeffektors, Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017].....	40
Abb. 25: Beziehungsdiagramm zwischen maximal zulässiger Nutzlast und Schwerpunktverschiebung, Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-28 (leicht modifiziert).....	40
Abb. 26: Verschraubung Grundplatte – Roboterfuß, Quelle: Eigene Darstellung	42
Abb. 27: Befestigung der Robotersteuerung am Aufbau, Quelle: Eigene Darstellung	42
Abb. 28: Sicherheitslaserscanner und Not-Halt-Taster im vorderen Zugangsbereich montiert, Quelle: Eigene Darstellung	43
Abb. 29: Montage des Kamerasystems und des Teach-Pendants am Aluminiumrahmen, Quelle: Eigene Darstellung	44
Abb. 30: Elektrische Ein- und Ausgänge der Robotersteuerung CB3, Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-32.....	45
Abb. 31: Verkabelung der Sicherheitsequipments; links Not-Halt-Taster; rechts S300 Sicherheitslaserscanner, Quelle: Eigene Darstellung	46
Abb. 32: Signalverlauf der Schaltungsüberwachung für Sick S300, Quelle: Eigene Darstellung.....	49
Abb. 33: Konfiguration der Sicherheitsebenen; Quelle: Eigene Darstellung	51
Abb. 34: Kollision des Roboters mit der Rückwand, ohne Überschreitung der Schutzebene, Quelle: Eigene Darstellung	52
Abb. 35: Konstruktionsvorschlag Grundplatte und Sockel für den kollaborativen Roboterarbeitsplatz, Quelle: Eigene Darstellung	53
Abb. 36: Systembeschreibung des Kraft-Druck-Mess-Gerätes der Firma GTE, Quelle: GTE Industrieelektronik GmbH (2017), Online-Quelle [28.02.2017]	63
Abb. 37: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 57.....	64
Abb. 38: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 58.....	65
Abb. 39: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 59.....	66
Abb. 40: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quell: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 60.....	67
Abb. 41: Technische Spezifikationen des Sicherheitslaserscanners S300 der Firma SICK, Quelle: SICK AG (2016), Online-Quelle [28.02.2017], S. 8, 9., leicht modifiziert.....	71

Abb. 42: Technische Spezifikationen der Bildverarbeitungskamera 7400C der Firma Cognex, Quelle:
Cognex (2013), S. 15, 16. 72

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1: Vergleich der Halt-Funktionen, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an DIN EN ISO 10218-1 (2012), S. 15.	6
Tab. 2: Äquivalenztabelle für Bewertungskategorien zwischen PL und SIL, Quelle: DIN EN ISO 13849-1 (2008), S. 23.	13
Tab. 3: Ursprung und Auswirkung mechanischer Gefährdungen, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 57-60. (stark modifiziert).	14
Tab. 4: Einteilung und Arten der Risikomanagementmethoden, Quelle: Eigene Darstellung in Anlehnung an Harer/Gübitz/Klinger (2014), S. 35.	19
Tab. 5: Anwendungsmöglichkeiten von Risikomanagementmethoden, Quelle: Eigene Darstellung	20
Tab. 6: Wertezuordnung der Berechnungsfaktoren einer FMEA, Quelle: Eigene Darstellung.....	22
Tab. 7: Beispiel einer NWA für einen Zu- bzw. Neubau, Quelle: Eigene Darstellung	25
Tab. 8: Auflistung der Roboterauswahl, Quelle: Eigene Darstellung	31
Tab. 9: Ergebnisse der Nutzwertanalyse verschiedener Greifer, Quelle: Eigene Darstellung	41
Tab. 10: Gesamtübersicht der Einstufung für die Risikoprioritätszahl, Quelle: Eigen Darstellung	68
Tab. 11: Ermittlung des geeigneten Lieferanten mittels Nutzwertanalyse, Quelle: eigene Darstellung	69
Tab. 12: Technische Spezifikationen des Robotersystems UR5 / CB3, Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-73.....	70
Tab. 13: Auswertung der 1. Stufe der FMEA zur Risikominimierung, Quelle: Eigene Darstellung	73
Tab. 14: Auswertung der 2. Stufe der FMEA zur Risikominimierung, Quelle: Eigene Darstellung	74

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

MRK	Mensch-Roboter-Kollaboration
PLd	Performance Level D
FMEA	Fehlermöglichkeits- und -einflussanalyse / Failure Mode and Effects Analysis
RPZ	Risikoprioritätszahl
RM	Risikomanagement
IFA	Institut für Arbeitsschutz
NWA	Nutzwertanalyse
UVA	Use Value Analysis
OCR	Optical Character Recognition
OCV	Optical Character Verification
CMOS	Complementary Metal–Oxide–Semiconductor
CCD	Charge-Coupled Device
TCP	Tool-Center-Point
CoG	Center of Gravity
USB	Universal Serial Bus
PWM	Pulse-Width Modulation
ROI	Region Of Interest
LED	Light-Emitting Diode
MOD	Minimum Object Distance
RGB	Red Green Blue
FFT	Fast Fourier Transformation
JPEG	Joint Photographic Experts Group
GUI	Graphical User Interface
OSSD	Output Signal Switching Device

ANHANG 1 SYSTEMBESCHREIBUNG KDMG-KOLROBOT



GTE Industrietechnik GmbH

**KDMG
KOLROBOT**

KDMG

Kraft-Druck-Messsystem für kollaborierende Roboter gemäß ISO/PDTS 15066, ISO 10218-1 und ISO 10218-2

Mit der Einführung neuer industrieller Fertigungsmaschinen in Form von kollaborierenden Robotern erschließt sich gleichermaßen ein neuer Bereich des Arbeitsschutzes.

In der sogenannten Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK), in welcher menschliche Fähigkeiten und Fertigkeiten mit den präzisen Funktionen des Roboters kombiniert werden und in der die bisherigen, trennenden Schutzzäune nicht mehr vorgesehen sind, lassen sich Kollisionen zwischen Mensch und Roboter nicht mehr ausschließen.

Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten müssen somit neben einer geeigneten Gestaltung des Arbeitsplatzes zusätzlich durch eine präzise Validierung des Roboters gewährleistet sein. Zur Einstufung möglicher Gefahren und Anwendung präventiver Sicherheitsmaßnahmen, gilt es die Einhaltung von Grenzwerten am konkreten Roboterarbeitsplatz zu überprüfen.

Für die Messung und Bewertung möglicher Kollisionen hat das Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) ein spezielles Messverfahren entwickelt und die GTE exklusiv mit der Fertigung des entsprechenden Messequipments beauftragt.

Das KDMG (Kraft-Druck-Mess-Gerät) berücksichtigt die wesentlichen biomechanischen Körpereigenschaften wie Verformbarkeit, Trägheitsverhalten und Bewegungsverhalten kollidierender Körperbereiche und misst anhand dieser Vorgaben die in der Kollisionsfläche auftretenden Gesamtkräfte und lokalen Druckmaxima.

Die einzelnen Messelemente sind handlich, erlauben eine vielseitige Montage und ermöglichen eine praxisgerechte Anwendung. Für Auswertung und Visualisierung und Dokumentation ist eine speziell entwickelte IFA-Software verfügbar.



Eigenschaften

- *Präzise Validierung durch biofidele Merkmale des Messgerätes*
- *Standardisiertes Messverfahren zur realitätsbezogenen Bewertung von Arbeitsplätzen*
- *Messung der mechanischen Größen Kraft und Druck unter Berücksichtigung von Reliabilität, Validität und Objektivität*
- *Reproduzierbarkeit und Kalibrierbarkeit zur Berücksichtigung aller Vorschriften zur Signalauswertung*

www.gte.de



VO.1 - 12/2015

Abb. 36: Systembeschreibung des Kraft-Druck-Mess-Gerätes der Firma GTE, Quelle: GTE Industrietechnik GmbH (2017), Online-Quelle [28.02.2017]

ANHANG 2 LISTE SIGNIFIKANTER GEFÄHRDUNGEN

DIN EN ISO 10218-2:2012-06
EN ISO 10218-2:2011 (D)

Anhang A (informativ)

Liste signifikanter Gefährdungen

Tabelle A.1 enthält eine Liste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme

ANMERKUNG Die Liste in Tabelle A.1 ist abgeleitet von ISO 12100.

Tabelle A.1 — Liste signifikanter Gefährdungen

Nr.	Art oder Gruppe	Gefährdungsbeispiele		Abschnitt Bezug
		Ursprung	Mögliche Auswirkungen	
1	Mechanische Gefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> — Bewegungen jedes Teils des Roboterarms (einschließlich zurück), des Endeffektors oder beweglichen Teilen der Roboterzelle — Bewegungen der externen Achse (einschließlich Endeffektorwerkzeug in der Wartungsposition) — Bewegung oder Rotation eines scharfen Werkzeugs am Endeffektor oder an externen Achsen — eines zu handhabenden Teils — von zugehöriger Ausrüstung — Rotationsbewegung aller Roboterachsen — herabfallende oder herausgeschleuderte Materialien oder Produkte — Ausfall des Endeffektors (Verlust) — lose Kleidung, lange Haare — zwischen Roboterarm und jedem festen Gegenstand — zwischen Endeffektor und jedem festen Gegenstand (Zaun, Balken, usw.) — zwischen Befestigungen (Hineinfallen); zwischen Shuttles, Versorgungseinrichtungen — nicht vorhandene Möglichkeit, die Roboterzelle zu verlassen (durch Zellentür) für einen eingeschlossenen Bediener in der Betriebsart Automatik 	<ul style="list-style-type: none"> — Quetschen — Scheren — Schneiden oder Abtrennen — Erfassen — Einziehen oder Fangen — Stoß — Durchstich oder Einstich — Reibung, Abrieb — Einspritzen oder Herausspritzen von Flüssigkeiten / Gas unter hohem Druck 	4.1; 4.2; 4.2 d) 6); 4.2 (f); 4.3; 4.4; 4.4.1; 4.4.2 d); 4.4.2 f); 4.5; 5.2; 5.2.1; 5.2.2; 5.2.3; 5.3; 5.3.2; 5.3.6; 5.3.7; 5.3.8.2; 5.3.9; 5.3.10; 5.5.1; 5.5.2; 5.5.3; 5.5.4; 5.6.4; 5.8; 5.9; 5.10.2; 5.10.3; 5.10.6.1; 5.10.6.2; 5.10.6.4; 5.10.7; 5.11; 5.11.4; 5.11.5.4

Abb. 37: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 57.

DIN EN ISO 10218-2:2012-06
 EN ISO 10218-2:2011 (D)

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Nr.	Art oder Gruppe	Gefährdungsbeispiele		Abschnitt Bezug
		Ursprung	Mögliche Auswirkungen	
1	Mechanische Gefährdungen (fortgesetzt)	<ul style="list-style-type: none"> — unerwartete Bewegung der Spannvorrichtungen oder des Greifers — unerwartete Werkzeugfreigabe — unerwartete Bewegung von Maschinen oder Teilen der Roboterzelle während Handhabungsvorgängen — unbeabsichtigte Bewegung oder Betätigung eines Endeffektors oder zugehöriger Ausrüstung (einschließlich robotergesteuerter externer Achsen, prozessspezifisch für Schleifscheiben, usw.) — unerwartetes Freisetzen potentieller Energie aus Speicherquellen 		
2	Elektrische Gefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> — Kontakt mit spannungsführenden Teilen oder Verbindungen (Steuerschrank, Anschlusskästen, Schaltpulte an der Maschine) — Verwechslung von verschiedenen Spannungen innerhalb eines Systems, Steuerschrank und Anschlüsse; d. h. Antriebsenergie, Steuerenergie (24 V vs 110 V) — Kontakt mit diskreten Bauteilen im elektrischen (elektronischen) Schaltkreis, d. h. Kondensatoren — Exposition gegenüber Lichtbogenstrahl — Arbeitsprozesse unter Hochspannung oder Hochfrequenz, d. h. elektrostatisches Lackieren — Induktionserwärmung — Schweißen mit Hochspannung 	<ul style="list-style-type: none"> — tödlicher Stromschlag — Schlag — Verbrennung — freiliegende geschmolzener Partikel 	4.4.1; 5.3.2; 5.3.6; 5.3.7; 5.8.2; 5.10.6.1; 5.10.6.2; 5.10.7

Abb. 38: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 58.

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Nr.	Art oder Gruppe	Gefährdungsbeispiele		Abschnitt Bezug
		Ursprung	Mögliche Auswirkungen	
3	Thermische Gefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> — heiße Oberflächen in Verbindung mit dem Endeffektor; oder zugehöriger Ausrüstung oder Werkstück (z. B. Schweißbrenner, heiße Werkstoffe in Schmiedepressen, Spritzgießen, Schleif- und Abgratvorgänge) — kalte Oberflächen oder Gegenstände (Tiefemperaturverfahren) — prozessbedingte explosionsfähige Atmosphäre, d. h. Lackieren (versprühte Partikel, Pulverbeschichten), entzündliche Lösungsmittel, Schleif- und Frässtaub — prozessunterstützende extreme Temperaturen (geschmolzene Werkstoffe; Öfen zum Kochen oder Heizen (Autoklaven); Tiefkühlgeräte oder Kältekompressoren, usw.) — brennbare Stoffe (in Staubabscheidersystemen, Reinigungstanks, Dichtstoffapplikatoren) 	<ul style="list-style-type: none"> — Verbrennung (heiß oder kalt) — Strahlungsverletzung 	5.3; 5.5.2; 5.5.4
4	Gefährdungen durch Lärm	<ul style="list-style-type: none"> — spezielle, sehr lärmintensive Anwendungen (z. B. Wasserstrahlschneider, Prägepressen, Pumpen und Ventile; Bearbeitungen mit Metallbeseitigung) — Lärmpegel verhindert das Hören oder Verstehen akustischer Warnsignale; ferner ist es Personen nicht möglich, ihre Handlungen über normale Konversation abzustimmen 	<ul style="list-style-type: none"> — Hörverlust — Gleichgewichtsverlust — Bewusstseinsverlust, -trübung — andere (z. B. mechanisch) als Auswirkung von Umgebungsbedingungen oder Ablenkung 	Lärm ist vom Anwendungsbereich dieses Teils der ISO 10218 ausgeschlossen
5	Gefährdungen durch Vibration	<ul style="list-style-type: none"> — direkter Kontakt mit der Quelle — Lösen von Verbindungen, Befestigungen, — falsche Anbringung von Bauteilen oder Teilen 	<ul style="list-style-type: none"> — Ermüdung — neurologische Schäden — Gefäßerkrankung — Stöße 	4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 5.5.2, 5.5.9
6	Gefährdungen durch Strahlung	<ul style="list-style-type: none"> — Störung des ordnungsgemäßen Robotersystembetriebs durch elektromagnetische Beeinflussung — Exposition gegenüber prozessbedingter Strahlung, d. h. Lichtbogenschweißen, Laser 	<ul style="list-style-type: none"> — Verbrennung — Schäden an Augen und Haut — damit verbundene Erkrankung 	4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 5.5.2, 5.5.9
7	Gefährdungen durch Materialien und Substanzen	<ul style="list-style-type: none"> — Kontakt mit Bauteilen, die mit schädlichen Flüssigkeiten behaftet sind — Ausfälle mechanischer und elektrischer Bauteile — ätzende Dämpfe und Stäube 	<ul style="list-style-type: none"> — Sensibilisierung — Brand — chemische Verbrennung — Erkrankung durch Einatmen 	4.2, 4.3, 4.4, 4.5, 5.5.2, 5.5.3

Abb. 39: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quelle: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 59.

Tabelle A.1 (fortgesetzt)

Nr.	Art oder Gruppe	Gefährdungsbeispiele		Abschnitt Bezug
		Ursprung	Mögliche Auswirkungen	
8	Ergonomische Gefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> — unzureichend gestaltetes Programmierhandgerät (HMI), Touch Screen oder Bedientafel (zu weit entfernt oder zu hoch) — unzureichend gestaltete Be- und Entladestation (z. B. weite Entfernung zwischen Standort des Teilebehälters und des Be- und Entladebereichs) — unzureichend gestaltete Zustimmungseinrichtungen — ungeeigneter Ort oder ungeeignete Markierung der Steuerungselemente (z. B. schwer zu erreichen) — ungeeigneter Ort für Bauteile, die Zugang erfordern (Fehlerbeseitigung, Reparatur, Einstellung) — verborgene Gefährdungen, ungenügende oder blockierte örtliche Beleuchtung 	<ul style="list-style-type: none"> — ungesunde Körperhaltung oder übermäßige Anstrengung (Dauerbelastung) — Ermüdung 	4.2 d); 4.3; 4.4; 4.5; 5.3.2; 5.3.13; 5.5; 5.5.2; 5.5.3; 5.9
9	Gefährdungen in Zusammenhang mit der Einsatzumgebung der Maschine	<ul style="list-style-type: none"> — Einbau in Erdbebengebieten — elektromagnetische Störung oder Spannungsstöße in der Energiequelle — Feuchtigkeit — Temperatur 	<ul style="list-style-type: none"> — Verbrennung — Erkrankung oder (chronische) Krankheit — Ausrutschen, Stürzen — Schädigung der Atemwege 	4.1; 4.2; 5.2; 5.3; 5.5
10	Kombinationen von Gefährdungen	<ul style="list-style-type: none"> — Robotersystem soll von einer Person gestartet werden, dieser Vorgang wird jedoch von einer anderen Person nicht erwartet — Gefährdungen aufgrund mehrfacher Ausfälle/Situationen — Fehlinterpretation des tatsächlichen Problems und dadurch weiteres Problem durch falsche oder unnötige Handlungen — Handlung erhöht die Schwere der Verletzung; z. B. in der Absicht, eine scharfe Kante zu vermeiden, kommt es stattdessen zu Kontakt mit einer heißen Oberfläche — unbeabsichtigtes Lösen von Halteeinrichtungen, die Bewegung unter Restkräften ermöglicht (Trägheit, Schwerkraft, Feder/Energiespeichermittel) — Ausfall einer Schutzeinrichtung im Hinblick auf ihre erwartete Funktion 	<ul style="list-style-type: none"> — jede andere Auswirkung einer Kombination von Gefährdungen und Gefährdungssituationen 	4.2; 4.3; 4.4; 4.5; 5.2; 5.3.10; 5.6.3.3; 5.8; 5.9; 5.9.1;

Abb. 40: Gesamtliste signifikanter Gefährdungen für Roboter und Robotersysteme, Quell: DIN EN ISO 10218-2 (2012), S. 60.

ANHANG 3 BEWERTUNGSSCHEMA RISIKOPRIORITÄTSAZHL

B Bedeutung - Schadensausmaß (= Qualitatives Maß für die möglichen Konsequenzen einer Gefährdung)	A Auftretenswahrscheinlichkeit eines möglichen Fehlers	E Erkennbarkeit, Entdeckbarkeit (=Möglichkeit der Erkennung eines Fehlers, bevor er einen Schaden hervorruft)
1 Vernachlässigbar Harmloser Schönheitsfehler. Keine wahrnehmbare Auswirkung.	1 Unvorstellbar, theoretisch Theoretisch denkbar, praktisch im Grunde genommen unmöglich, ähnlich gelagerte Fälle wurden in der Vergangenheit in der Praxis nicht beobachtet.	1 Sofort, eindeutig, sicher erkennbar Automatische Fehlerkorrektur
3 Unwesentlich Geringer Leistungsverlust. Die Auswirkung ist minimal. Der Kunde ist kaum berührt.	3 unwahrscheinlich, entfernt vorstellbar Wurde in der Vergangenheit mit ähnlichen Produkten schon beobachtet, gilt aber als Ausnahme.	3 Sehr wahrscheinlich Fehlererkennung ist vorhanden und geeignet, kann aber gelegentlich bzw. unter bestimmten Bedingungen versagen.
5 Gering Minderung der Produktleistungen/-eigenschaften, z.B. Fehlfunktion oder fehlerhaftes analytisches Resultat aufgrund des Fehlerausmaßes jedoch keine direkte Auswirkung (Schädigung) auf Patient, Anwender, Umwelt, Eigentum.	5 vorstellbar, niedrig, selten manchmal zu beobachten, tritt eher sporadisch, nicht systematisch auf.	5 Wahrscheinlich Fehler ist durch zusätzliche Maßnahmen leicht zu erkennen, wird aber nicht systematisch erfasst.
7 Schwerwiegend Minderung der Produktleistungen/-eigenschaften, z.B. Fehlfunktion oder fehlerhaftes analytisches Resultat. Mögliche unmittelbare Schädigung von Patient, Anwender, Umwelt, Eigentum, ohne bleibende Beeinträchtigung oder Schädigung.	7 Gelegentlich wird voraussichtlich in regelmäßigen Abständen auftreten.	7 Unsicher oder spät Die sofortige Entdeckung des Fehlers ist unsicher. Fehler kann aber durch Kontrollmaßnahmen oder an seinen Auswirkungen erkannt werden.
9 Kritisch Minderung der Produktleistungen/-eigenschaften, z.B. Fehlfunktion oder fehlerhaftes analytisches Resultat. Mögliche unmittelbare schwere Schädigung von Patient, Anwender, Umwelt, Eigentum mit bleibender Beeinträchtigung oder Schädigung.	9 Wahrscheinlich, hoch Ähnliche Probleme mit vergleichbaren Produkten verursachten in der Vergangenheit schon immer Schwierigkeiten, (fsp. führten zu Fehlern).	9 Wahrscheinlich nicht Nur schwer zu entdeckendes oder zu prüfendes Merkmal; Fehler können im normalen Betrieb nur zufällig entdeckt werden oder wenn ein besonderer Aufwand hierfür betrieben wird.
10 Katastrophal Erhebliche oder irreparable Schädigung oder mögliche Gesetzesverletzung. Möglicher Tod eines Patienten oder Anwenders.	10 Sehr hoch Es ist nahezu sicher, dass ein Fehler in absehbarer Zeit auftreten wird oder Probleme (Fehler) in größerem Umfang auftreten werden.	10 Unentdeckbar Versteckte Fehlfunktion, Merkmal wird nicht oder kann nicht geprüft werden.

Tab. 10: Gesamtübersicht der Einstufung für die Risikoprioritätszahl, Quelle: Eigen Darstellung

ANHANG 4 NUTZWERTANALYSE LIEFERANTENAUSWAHL

NUTZWERTANALYSE		Fragestellung: Untersuchung und Bewertung der einzelnen Angebote anhand definierter Kriterien													
Ausgangssituation: Auswahl eines geeigneten Anbieters eines Robotersystemes (UR5) für Schulungs- und Forschungszwecke am Campus02		Bewertungsschlüssel: 10 = sehr gut / 8 = gut / 6 = befriedigend / 4 = schlecht / 2 = sehr schlecht / 0 = nicht vorhanden bzw. nicht anwendbar													
Anforderungskriterien		Anbieter A			Anbieter B			Anbieter C			Anbieter D				
Allgemeine Informationen Anbieter		Robotersystem Universal Robots UR-5													
Anforderungen		UR-5													
Physische Eigenschaften		850mm													
Max. Arbeitsradius		5kg													
Max. Tragfähigkeit		18,4kg													
Eigengewicht															
Sollkriterien		Anbieter A			Anbieter B			Anbieter C			Anbieter D				
1. Angebot		X	R	R	X	R	R	X	R	R	X	R	R	X	R
1.1 Preis pro Roboter € 18500,- = 8	Gewichtung [%] 70	8	560	560	8	560	560	8	560	560	8	560	560	8	560
1.2 Lieferung / Versand € 0,- = 10 € 250,- = 2	10	10	100	100	10	100	100	6	60	60	2	20	20	2	20
1.3 Installation / Aufbau vor Ort (Campus02) Im Preis enthalten = 10 10% vom Preis = 8 20% vom Preis = 6	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe	100		660	660		660	660		660	660		620	620		580
2. Zusatzleistungen 1															
2.1 Einschulung vor Ort (Campus02) Im Preis enthalten = 10 5% vom Preis = 8 10% vom Preis = 6	50	10	500	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.2 Einschulung beim Anbieter Im Preis enthalten = 10 10% vom Preis = 8 20% vom Preis = 6	25	10	250	250	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2.3 Preisnachlass verhandelbar 50% = 10 / 0% = 0	25	2	50	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe	100		800	800		0	0		0	0		0	0		500
3. Zusatzleistungen 2															
3.1 Manipulator (Greifer) über selben Händler bestellbar JA = 10 / NEIN = 0	50	10	500	500	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3.2 Preisgestaltung Manipulator 10% vom Preis = 10 20% vom Preis = 8 30% vom Preis = 6	30	8	240	240	8	240	240	8	240	240	8	240	240	8	240
3.3 Implementierung Manipulator direkt kompatibel Plug n' Play = 10 Zusatzlösung notwendig = 6 n.a. = 0	20	10	200	200	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Summe	100		940	940		240	240		240	240		860	860		2020

Tab. 11: Ermittlung des geeigneten Lieferanten mittels Nutzwertanalyse, Quelle: eigene Darstellung

ANHANG 5 TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN UR5 / CB3

Robotertyp	UR5
Gewicht	18.4 kg / 40.6 lb
Max. Nutzlast (s. Abschnitt 4.4)	5 kg / 11 lb
Reichweite	850 mm / 33.5 in
Gelenkreichweite	± 360 ° für alle Gelenke
Geschwindigkeit	Gelenke: Max 180 %s. Werkzeug: Ca. 1 m/s/ Ca. 39.4 in/s.
Wiederholgenauigkeit	± 0.1 mm / ± 0.0039 in (4 mils)
Grundfläche	Ø149 mm / 5.9 in
Freiheitsgrade	6 Drehgelenke
Abmessungen Controller (W × H × D)	475 mm × 423 mm × 268 mm / 18.7 in × 16.7 in × 10.6 in
Controller E/A-Anschlüsse	16 Digitaleingänge, 16 Digitalausgänge, 2 Analogeingänge, 2 Analogausgänge
Werkzeug E/A-Anschlüsse	2 Digitaleingänge, 2 Digitalausgänge, 2 Analogeingänge
E/A-Stromversorgung	24 V/2 A im Controller und 12 V/24 V/600 mA im Werkzeug-
Kommunikation	TCP/IP 100 Mbit: IEEE 802.3u, 100BASE-TX Ethernetanschluss, Modbus TCP & EtherNet/IP Adapter
Programmierung	PolyScope grafische Benutzeroberfläche auf einem 12" Touch-Screen
Lärm	Vergleichsweise geräuschlos
IP-Klassifizierung	IP54
Stromverbrauch	Ca. 200 W mit einem typischen Programm
Kollaborierender Betrieb	15 erweiterte Sicherheitsfunktionen. Gemäß: EN ISO 13849-1:2008, PLd und EN ISO 10218-1:2011, Abschnitt 5.10.5
Temperatur	Der Roboter funktioniert in einer Umgebungstemperatur von 0- 50 °C.
Stromversorgung	100-240 VAC, 50-60 Hz
Berechnete Betriebsdauer	35,000 hours
Verkabelung	Kabel zwischen Roboter und Controller (6 m / 236 in) Kabel zwischen Touchscreen und Controller (4.5 m / 177 in)

Tab. 12: Technische Spezifikationen des Robotersystems UR5 / CB3,
Quelle: Universal Robots (2016), Online-Quelle [27.02.2017], S. I-73.

ANHANG 6 TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN S300 EXPERT



Vielseitig und wegweisend –
für herausfordernde Aufgaben

Technische Daten im Überblick	
Schutzfeldreichweite	2 m / 3 m
Warnfeldreichweite	8 m
Scanwinkel	270°
Anzahl Felder	48
Anzahl Überwachungsfälle	32
Auflösung	30 mm, 40 mm, 50 mm, 70 mm, 150 mm, konfigurierbar
OSSD-Paare	1
Ansprechzeit	80 ms
Sichere Geräte- kommunikation	EFI

Auf einen Blick	
	<ul style="list-style-type: none"> • Kompakte Bauweise • 16 umschaltbare Feldsätze • Im Systemstecker integrierter Konfigurationsspeicher • Schnittstelle (EFI) zur sicheren SICK-Gerätekommunikation • Inkrementalgebereingänge zur geschwindigkeitsabhängigen Feldumschaltung • Erweiterte Messdatenausgabe über RS-422 mit Landmarkenerkennung

Abb. 41: Technische Spezifikationen des Sicherheitslaserscanners S300 der Firma SICK, Quelle: SICK AG (2016), Online-Quelle [28.02.2017], S. 8, 9., leicht modifiziert

ANHANG 7 TECHNISCHE SPEZIFIKATIONEN COGNEX 7400C

Vision System Specifications

Table 3-1: Vision System Specifications

Specifications	In-Sight 7010C/7200/7400C/7402C	In-Sight 7010C/7200/7400C/7402C	In-Sight 7010C/7200/7400C/7402C
Minimum Firmware Requirement	In-Sight Version 4.7.1/4.7.3 ¹	In-Sight Version 4.8.0	In-Sight Version 4.8.0
Job/Program Memory	512MB non-volatile flash memory, unlimited storage via remote network device.		
Image Processing Memory	256MB SDRAM		
Sensor Type	1/1.8-inch CMOS		
Sensor Properties	5.3mm diagonal, 5.3 x 5.3µm sq. pixels	8.7mm diagonal, 5.3 x 5.3µm sq. pixels	
Resolution (pixels)	800 x 600	1280 x 1024	
Electronic Shutter Speed	16µs to 950ms		
Acquisition	Rapid reset, progressive scan, full-frame integration.		
Bit Depth	256 grey levels (8 bits/pixel).	256 grey levels (8 bits/pixel).	24-bit color.
Image Gain/Offset	Controlled by software.		
Frames Per Second ²	102 full frames per second.	50 full frames per second.	30 full frames per second.
Lens Type	M12 or C-Mount.		
Image Sensor Alignment Variability ³	±0.127mm (0.005in), (both x and y) from lens C-Mount axis to center of imager.		
Trigger	1 opto-isolated, acquisition trigger input	Remote software commands via Ethernet and RS-232C.	
Discrete Inputs	3 general-purpose inputs when connected to the Power and I/O Breakout cable. (Eight additional inputs available when using the optional CIO-MICRO or CIO-MICRO-CC I/O module.)		
Discrete Outputs	4 high-speed outputs when connected to the Power and I/O Breakout cable. (Eight additional outputs available when using the optional CIO-MICRO or CIO-MICRO-CC I/O module.)		
Status LEDs	Network link and activity, power and 2 user-configurable.		
Internal LED Ring Light	Red, Green, Blue, White, IR (M12 lens configuration only).		
Network Communication	Ethernet port, 10/100 BaseT with auto MDI/MDIX. IEEE 802.3 TCP/IP protocol. Supports DHCP (factory default), static and link-local IP address configuration.		
Serial Communication	RS-232C: 4800 to 115,200 baud rates.		

Abb. 42: Technische Spezifikationen der Bildverarbeitungskamera 7400C der Firma Cognex, Quelle: Cognex (2013), S. 15, 16.

Specifications	In-Sight 7010C/7200/7400C/7402C	In-Sight 7010C/7200/7400C/7402C	In-Sight 7010C/7200/7400C/7402C
Power Consumption	24VDC ±10%, 2.0 amp. External Light - Continuously on; output 24V, 500mA Max. External Light - Strobe; output 24V, 1 amp Max at 50% duty cycle (max on time of 100ms).		
Material	Aluminum housing.		
Finish	Painted.		
Mounting	Four M3 threaded mounting holes (1/4" - 20, M6 and flathead mounting holes also available on mounting bracket).		
M12 Lens Configuration Dimensions	55mm (2.17in) x 84.8mm (3.34in) x 55mm (2.17in)		
C-Mount Lens Configuration Dimensions	75mm (2.95in) to 83mm (3.27in) x 84.8mm (3.34in) x 55mm (2.17in) with lens cover installed.		
Weight	42.7mm (1.68in) x 84.8mm (3.34in) x 55mm (2.17in) without lens cover installed.		
Operating Temperature	220 g (7.8 oz.) with lens cover and typical M12 lens installed.		
Storage Temperature	0°C to 45°C (32°F to 113°F)		
Humidity	-30°C to 80°C (-22°F to 176°F)		
Protection	90%, non-condensing (Operating and Storage)		
Shock	IP67 with lens cover properly installed. 80 G Shock per IEC 60068-2-27.		
Vibration	10 G from 10-500 Hz with 150 grams lens per IEC 60068-2-6.		
Regulatory Compliance	CE, FCC, KCC, TUV SUD NRTL, RoHS		

¹ Firmware version 4.7.1 is the minimum firmware requirement for models with the C-Mount Lens configuration. Firmware version 4.7.3 is the minimum firmware requirement for models with the M12 Lens configuration.
² Maximum frames per second is job-dependent, based on the minimum exposure for a full image frame capture using the dedicated acquisition trigger, and assumes there is no user interface connection to the vision system.
³ Expected variability in the physical position of the image sensor, from vision system-to-vision system. This equates to ~±24 pixels on a 800 x 600 resolution CMOS and a 1280 x 1024 resolution CMOS.

ANHANG 8 FMEA STUFE 1

Feststellung eines möglichen Risikos (First Detection of possible risk)													
Laufende Nr.	Referenz (Reference)	Merkmal, Funktion / Prozessschritt (Character, Function / Process Step)	Möglicher Fehler (Possible failure)	Hat Auswirkung auf (to have an effect on)	Mögliche Folge des Fehlers (Effect subsequent hazard)	B	GW	Mögliche Fehlerursache (Potential Cause)	A	Festgelegte / vorhandene Vorkehrungs- bzw. Prüfmaßnahmen (defined/implemented controls)	Randbedingungen, Anmerkungen (ancillary conditions, note)	E	RPZ
1			Einklemmen von Fingern zwischen Roboterfuß und Basisgelenk (Gelenk 0).	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	7		Bedienfehler	5	Schulung des Personals		3	105
2			Einklemmen von Fingern zwischen Handgelenk 1 und 2 (Gelenk 3 und 4).	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	9		Bedienfehler	5	Schulung des Personals		5	225
3			Offene Wunden durch scharfe Kanten oder Ecken auf Werkzeug oder Werkzeug-Anschluss.	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	9		Bedienfehler	5	Schulung des Personals		5	225
4			Offene Wunden durch scharfe Kanten oder Ecken auf Hindernissen in der Nähe des Roboters. Grundplatte	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals			Bedienfehler		Schulung des Personals			
5			Blutergüsse durch Schlag vom Roboter.	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	9		Bedienfehler	5	Schulung des Personals		5	225

Tab. 13: Auswertung der 1. Stufe der FMEA zur Risikominimierung, Quelle: Eigene Darstellung

ANHANG 9 FMEA STUFE 2

Laufende Nr.		Referenz	Feststellung eines mögliche					Risikoverminderung (Risk reduction phase)					Endbewertung (Final state)							
Merkmal, Funktion / Prozessschritt (Character, Function / Process Step)	Möglicher Fehler (Possible failure)	Hat Auswirkung auf (to have an effect on)	Mögliche Folge des Fehlers (Effect subsequent hazard)	Be	Ae	Ee	RPZe	Geplante Abhilfemaßnahme (additional controls)	Verantwortlicher, Termin (responsible, target date)	Be	Ae	Ee	RPZe	Getroffene Massnahme, Nachweisdokument (Verification, documentary evidence)	Be	Ae	Ee	RPZt	RPZ Δ RPZt	RPZe Δ RPZt
1	Einklemmen von Fingern zwischen Roboterfuß und Basisgelenk (Gelenk 0).	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	7	1	1	7	Fertigung eines Sockels -> Sicherheitsabstand zw Achse und Fuß.	HPI	7	1	1	7		7	1	1	7	98	0
2	Einklemmen von Fingern zwischen Handgelenk 1 und 2 (Gelenk 3 und 4).	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	9	3	3	81	1. Separate Schulung 2. Anbringung eines Sicherheitssymbol im Gefahrenbereich	HPI	9	3	3	81		9	3	3	81	144	0
3	Offene Wunden durch scharfe Kanten oder Ecken auf Werkzeug oder Werkzeug-Anschluss.	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	9	5	3	135	1. Separate Schulung 2. Anbringung eines Sicherheitssymbol im Gefahrenbereich	HPI	9	5	3	135		9	5	3	135	90	0
4	Offene Wunden durch scharfe Kanten oder Ecken auf Hindernissen in der Nähe des Roboters. Grundplatte	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	9	3	3	81	1. Fertigung einer Grundplatte, die kompletten Arbeitsbereich des Roboters abdeckt (Fase an Kantenoberseite) 2. Implementierung eines Schutzfeldes mittels Laserscanner 3. Anbringung von Sicherheitssymbolen bei potentiellen Gefährdungsstellen.	HPI	9	3	3	81		9	3	3	81	144	0
5	Blutergüsse durch Schlag vom Roboter.	Benutzer	Verletzung des Bedienpersonals	9	3	3	81	1. Implementierung eines Schutzfeldes mittels Laserscanner	HPI	9	3	3	81		9					

Tab. 14: Auswertung der 2. Stufe der FMEA zur Risikominimierung, Quelle: Eigene Darstellung