



Aktives 2D-Sensorprinzip und Methode zur dynamischen
Generierung und funktional-sicheren Überwachung von
Schutzräumen bei der Mensch-Roboter-Kooperation

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommen durch die Fakultät für Informatik
der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

von Dipl.-Inf. Christian Vogel

geb. am 10.07.1982 in Stollberg

Gutachter

Hon.-Prof. Dr. Norbert Elkmann

Prof. Dr. Christian Hansen

Prof. Dr. Jochen Steil

Magdeburg, den 21.07.2023

Zusammenfassung

Steigende Bedarfe nach individualisierten Produkten bei gleichzeitigem Fachkräftemangel und demografischem Wandel erfordert seitens der Industrie neuartige, flexible Produktionskonzepte. Eine wesentliche Rolle spielen dabei Robotersysteme, die sich den Arbeitsraum mit dem Menschen teilen und so gemeinsam, kooperierend Aufgaben bearbeiten. Ziel dieser Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ist die Zusammenführung der kognitiven und hochgradig flexiblen Fähigkeiten des Menschen mit den Stärken von Robotern wie Präzision, hohe Tragfähigkeit und dauerhaftem Einsatz.

Neben dem Einsatz spezieller kollaborativer Roboter, die z. B. aufgrund reduzierter Bewegungsgeschwindigkeiten und geringer Handhabungsmassen das Gefährdungspotential für den Menschen vermindern, stellt die Einhaltung eines separierenden Abstandes zwischen Mensch und Roboter eine allgemeingültige Lösung zur Realisierung von MRK-Applikationen dar. Für die dynamische Bestimmung und Überwachung des Mindestabstandes in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration (u. a. Gelenkstellungen, -geschwindigkeiten) werden im Stand der Wissenschaft eine Vielzahl an verschiedenen Sensorsystemen und Verfahren vorgestellt, die jedoch aus unterschiedlichen Gründen bisher nicht als Schutzeinrichtungen umgesetzt wurden.

Die vorliegende Arbeit adressiert die Konzeption und Entwicklung eines neuartigen *aktiven 2D-Sensorprinzips* (A2S) und Methode zur Absicherung industrieller MRK-Arbeitsplätzen mittels dynamischer Abstandsüberwachung. Für einen zukünftigen Einsatz dieser Technologie als Schutzeinrichtung wurden die Anforderungen (1) *Ganzheitliche sensorische Erfassung*, (2) *Minimale Mindestabstände*, (3) *Funktionale Sicherheit*, (4) *Maximale Verfügbarkeit* und (5) *Dynamische Sicherheitsabstände* auf Basis einer Analyse der Rahmenbedingungen abgeleitet. Diese Anforderungen bilden das Fundament für die Analyse und Bewertung des aktuellen Standes der Wissenschaft, auf dessen Grundlage schließlich folgende Forschungsfrage abgeleitet wurde:

Können auf Basis passiver 2D-Kameratechnik ein aktives 2D-Sensorprinzip und Methode konzipiert werden, welche die Anforderungen an eine Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ per sicherer Schutzraumüberwachung erfüllen?

Für die Beantwortung dieser Frage werden etablierte Sicherheitsprinzipien analysiert sowie bezüglich einer 3D-Arbeitsraumüberwachung mittels dynamisch-gerichteter Beleuchtung und kamerabasierter 2D-Intensitätserfassung adaptiert. Mit dem *Ruhestromprinzip* als Fundament des entwickelten A2S konnte gezeigt werden, dass ein erforderliches Sicherheitsniveau (Performance Level $PL = d$ nach ISO 13849-1) erreicht werden kann und das A2S damit prinzipiell als zukünftige Schutzeinrichtung für die MRK qualifiziert ist.

Aufbauend auf den Sensorkomponenten (Lichtmodulator, Kameratechnik) wurde ein modellbasiertes, geometrisches Verfahren zur effizienten und dynamischen Abstandsbestimmung in

Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration gemäß ISO/TS 15066 entwickelt. Im Ergebnis liegt ein dynamischer Schutzraum vor, der die erforderlichen Mindestabstände beinhaltet und den Roboter als minimale Hülle umschließt. Die Schutzraumkontur wird durch den Lichtmodulator als sichtbare Linie direkt in den Arbeitsraum projiziert und durch die umgebende Kamera hinsichtlich einer Unterbrechung des Lichtstrahlenganges überwacht. Da die Handhabung von Objekten (Bearbeitung, Pick & Place usw.) deren Einbeziehung in den Roboter-Schutzraum erfordert, wurde das Verfahren hinsichtlich einer Fusion mehrerer Schutzräume weiterentwickelt. Im Rahmen einer umfassenden Evaluierung konnte gezeigt werden, dass die realisierte Lösung für verschiedenste MRK-Szenarien prädestiniert ist.

Neben der Sicherheit stellt die Verfügbarkeit eine weitere Hürde für den zukünftigen Einsatz des A2S im industriellen Bereich dar. Eine hohe Verfügbarkeit zeichnet sich durch eine robuste Objekterfassung (unabhängig von Oberflächeneigenschaften) und minimaler Beeinflussung durch Umgebungsbedingungen aus. Insbesondere bei optischen, kamerabasierten Systemen können ambiente und/oder hoch-dynamische Fremdlichtänderungen einen zuverlässigen Überwachungsbetrieb stören oder gänzlich verhindern. Zur Erreichung des Ziels einer maximalen Verfügbarkeit wurde eine Methode zur Detektion von Schutzraumverletzungen auf Grundlage (i) einer robusten Extraktion aktiv beleuchteter Bildbereiche mittels Bildfolgeauswertung und (ii) einer modellbasierten Generierung von Ground Truth Daten der Schutzräume konzipiert. Die Umsetzung dieser Methode resultiert darin, dass einerseits beliebige nicht-transparente Objekte unabhängig von ihren Oberflächeneigenschaften während einer Schutzraumeindringung zuverlässig detektiert werden. Andererseits führen ambiente Fremdlichtänderungen bis zu einer Beleuchtungsstärke von 50.000 *lux* zu keiner Beeinflussung der Überwachungsfunktion. Durch die Erweiterung der entwickelten Methode um raumzeitlich veränderbare Codierungen diskreter Schutzraumregionen konnten Störungen der Detektionsleistung aufgrund hoch-dynamischer Fremdlichteinflüsse vermieden werden.

Das konzipierte Prinzip und die entwickelten Methoden wurden schließlich an einem industriellen MRK-Versuchsstand implementiert. Die Analyse der Reaktionszeit und Detektionsauflösung unter Verwendung konkreter Hardwarekomponenten zeigte schließlich, dass mit einer erreichten Reaktionszeit von 34 *ms* und einer optimalen Detektionsauflösung von 14 *mm* (Fingerauflösung) die resultierenden Mindestabstände des A2S gegenüber vergleichbaren Sensorsystemen im Stand von Wissenschaft und Technik signifikant reduziert werden.

Zusammenfassend präsentiert diese Arbeit ein neuartiges, innovatives und funktional-sicheres Arbeitsraumüberwachungssystem zur Gewährleistung der Personensicherheit bei der MRK, welches die abgeleiteten Anforderungen an eine Schutzeinrichtung in hohem Maße erfüllt und darüber hinaus ein großes Potential zur Umsetzung weiterer zukünftiger Funktionalitäten (z. B. Interaktion, Werkerassistenz, 3D-Vermessung) bietet.

Ehrenerklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; verwendete fremde und eigene Quellen sind als solche kenntlich gemacht. Insbesondere habe ich nicht die Hilfe einer kommerziellen Promotionsberaterin / eines kommerziellen Promotionsberaters in Anspruch genommen. Dritte haben von mir weder unmittelbar noch mittelbar geldwerte Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Ich habe insbesondere nicht wissentlich:

- Ergebnisse erfunden oder widersprüchliche Ergebnisse verschwiegen,
- statistische Verfahren absichtlich missbraucht, um Daten in ungerechtfertigter Weise zu interpretieren,
- fremde Ergebnisse oder Veröffentlichungen plagiiert,
- fremde Forschungsergebnisse verzerrt wiedergegeben.

Mir ist bekannt, dass Verstöße gegen das Urheberrecht Unterlassungs- und Schadensersatzansprüche der Urheberin / des Urhebers sowie eine strafrechtliche Ahndung durch die Strafverfolgungsbehörden begründen kann. Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form als Dissertation eingereicht und ist als Ganzes auch noch nicht veröffentlicht.

Magdeburg, den 12.04.2023

Christian Vogel

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	III
Ehrenerklärung	V
Inhaltsverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielstellung und wissenschaftlicher Beitrag	4
1.3 Struktur der Arbeit	5
2 Beschreibung der Rahmenbedingungen und Ableitung der Anforderungen	7
2.1 Verwendung von Industrierobotern	7
2.1.1 Arten eines Robotereinsatzes	8
2.1.2 Mensch-Roboter-Kollaboration	9
2.1.3 Auswahl von MRK-Methoden	11
2.2 Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	13
2.2.1 Dynamische Abstandsbestimmung	13
2.2.2 Anordnung von BWS	15
2.3 Sicherheitstechnik	18
2.3.1 Schutzeinrichtungen	19
2.3.2 Bestimmung des erreichten Sicherheitsniveaus	22
2.4 Ableitung der Anforderungen an BWS	24
3 Stand der Wissenschaft	29
3.1 Beschreibung aktueller Ansätze und Entwicklungen	30
3.2 Strategien zur Abstandsüberwachung	36
3.2.1 Distanzüberwachung	37
3.2.2 Schutzraumüberwachung	38
3.2.3 Klassifikation und Bewertung	38

3.3	<i>Klassifikation und Analyse der Basistechnologien</i>	40
3.3.1	Passive Sensorsysteme	40
3.3.2	Aktive Sensorsysteme	42
3.4	<i>Bewertung der Basistechnologien</i>	45
3.4.1	Einsatz von Tiefenbildkameras für MRK	45
3.4.2	Sichtbarkeit von Sicherheitsabständen	46
3.4.3	Bewertungsmatrix	48
4	Forschungsfrage und Handlungsbedarf	49
4.1	<i>Ableitung der Forschungsfrage</i>	49
4.2	<i>Konkretisierung des Handlungsbedarfes</i>	50
4.2.1	Analyse der Anforderungen	50
4.2.2	Schwerpunkte der Arbeit	53
5	Aktives 2D-Sensorprinzip	55
5.1	<i>Einführung</i>	55
5.1.1	Zielstellung	55
5.1.2	Vorgehen	56
5.2	<i>Analyse bewährter Sicherheitsprinzipien</i>	57
5.2.1	Prinzip des sicheren Bestehens – Safe Life	57
5.2.2	Prinzip des beschränkten Versagens – Fail Safe	57
5.2.3	Prinzip der Redundanz	58
5.2.4	Zusammenfassung	59
5.2.5	Diskussion des Sicherheitsprinzips „Ruhestromprinzip“	59
5.3	<i>Sichere 3D-Raumüberwachung</i>	61
5.3.1	3D-Erweiterung des Prinzips „Reflexlichtschranke“	61
5.3.2	Adaption des Funktionsprinzips an Sensorkomponenten	62
5.3.3	Konfiguration von Schutzräumen	65
5.4	<i>Mensch-Roboter-Kooperation</i>	66
5.4.1	Systemarchitektur und Verarbeitungsprozess	67
5.4.2	Notwendige Umgebungsinformationen	68
5.4.3	Dynamische Bestimmung des Roboter-Schutzraumes	72
5.5	<i>Ergebnisse</i>	81
5.5.1	Prinzipielle Zertifizierbarkeit	81
5.5.2	Dynamische Sicherheitsabstände	85
5.6	<i>Zwischenfazit</i>	89

6	Verfahren zur Schutzraumüberwachung	91
6.1	<i>Einführung</i>	91
6.1.1	Zielstellung.....	91
6.1.2	Vorgehen	92
6.2	<i>Analyse der Rahmenbedingungen</i>	93
6.2.1	Anforderungen zur Extraktion des Schutzraumes	95
6.2.2	Anforderungen zur Bestimmung der Referenzinformationen	96
6.3	<i>Systemarchitektur und Verfahren</i>	97
6.3.1	Raumzeitliche Codierung des Schutzraumes.....	99
6.3.2	Bildfolgeauswertung – Aktuelles Zustandsbild.....	103
6.3.3	Ground Truth Bestimmung - Erwartetes Zustandsbild.....	106
6.3.4	Detektion einer Schutzraumverletzung	110
6.4	<i>Evaluierung - Analyse des Systemverhaltens</i>	112
6.4.1	Analyse einer Schutzraumverletzung durch Objekteindringung	112
6.4.2	Einfluss optischer Merkmale der Objekte	115
6.4.3	Einfluss von Fremdlichtänderungen	117
6.5	<i>Zwischenfazit</i>	123
7	Implementierung und Integration	125
7.1	<i>Implementierung der Softwaremodule</i>	125
7.2	<i>Aufbau und Integration eines MRK-Versuchsstandes</i>	128
7.2.1	Hardware-Komponenten	128
7.2.2	Einmessen aller Komponenten.....	130
7.2.3	Konfiguration der Schutzraumregionen	131
7.3	<i>Ergebnisse</i>	132
7.3.1	Detektionsauflösung.....	132
7.3.2	Reaktionszeit	136
7.4	<i>Zwischenfazit</i>	139
8	Zusammenfassung	141
8.1	<i>Einordnung in den aktuellen Stand der Wissenschaft</i>	143
8.2	<i>Ausblick</i>	144
A	Anhang – Grundlagen der Industrierobotik	147
A.1	<i>Richtlinien, Gesetze und Normen</i>	147
A.2	<i>Risikobeurteilung und Risikominderung</i>	151

A.3	<i>Kenngrößen zur Bestimmung des Sicherheitsniveaus PL</i>	154
A.4	<i>Abstandsformel nach ISO/TS 15066</i>	155
B	Anhang – Prüfungen an BWS	157
C	Anhang – Bewertungsergebnisse CCF	159
D	Anhang – Abbildungsmatrix	161
	Verzeichnis der Abkürzungen	163
	Symbolverzeichnis	165
	Abbildungsverzeichnis	169
	Tabellenverzeichnis	175
	Literaturverzeichnis	177
	Eigene Publikationen, Fachvorträge und Patente	195

1 Einleitung

1.1 Motivation

Der Industrieroboter wurde offiziell 1954 mit einer Patentanmeldung von George Devol (Devol) erfunden und schließlich 1961 bei General Motors erstmalig eingesetzt. Die Erfolgsgeschichte des Industrieroboters spiegelt sich darin wieder, dass im Jahr 2021 mehr als 3.5 Millionen Roboter in den Fabriken dieser Welt zum Einsatz gekommen sind. Allein im Jahr 2021 wurden laut der *International Federation of Robotics (IFR)* weltweit 517.385 weitere Einheiten eingesetzt, was einem neuen Höchststand und einer Steigerung von 31 % gegenüber dem Vorjahr entspricht (IFR 2022a). Damit hat sich die Zahl der jährlich neu installierten Roboter in den letzten sechs Jahren mehr als verdoppelt. Für das Jahr 2030 wird gar ein weltweiter Einsatz von rund 25 Millionen Robotern (mobil, stationär, kollaborativ) im industriellen Bereich prognostiziert (ABI 2021).

Die Bedarfe an Industrierobotern gehen mit den Forderungen nach neuartigen, flexiblen Produktionskonzepten im Rahmen der Digitalisierung und Industrie 4.0 sowie der Berücksichtigung des Fachkräftemangels und demografischen Wandels einher. Die industrielle Produktion und Fertigung vollzieht einen Umbruch, der mit den vorhandenen Systemen kaum realisierbar ist und dringend neuartige, innovative Technologien erfordert. Individualisierte Produkte bei Losgrößen von Eins führen zu neuartigen und hochkomplexen Produktionsprozessen, in denen Robotersysteme eine wichtige Rolle übernehmen, indem sie sich den Arbeitsraum mit dem Menschen teilen und so gemeinsam, kooperierend Aufgaben bearbeiten. Ziel dieser Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ist die Zusammenführung der kognitiven und hochgradig flexiblen Fähigkeiten des Menschen mit den Stärken von Robotern wie Präzision, enorme Tragfähigkeit und Ausdauer (IFR 2018b). Aktuelle Schätzungen gehen laut IFR davon aus, dass bereits in wenigen Jahren ca. 5 – 10 % der verkauften Roboter an kollaborativen Arbeitsplätzen in direkter Nähe des Menschen zum Einsatz kommen werden.

Im industriellen Bereich existiert eine Vielzahl an normativen Vorgaben und Richtlinien, welche die Verwendung von Robotern bzw. Maschinen im Hinblick auf die Gewährleistung der Sicherheit des Menschen reglementieren (Maschinenrichtlinie 2006/42/EG; Produktsicherheitsrichtlinie 2001/95/EG; Norm DIN EN ISO 12100). Unter keinen Umständen darf dem Menschen bei der Zusammenarbeit mit dem Roboter ein gesundheitlicher Schaden durch den Roboter zugeführt werden. Potentielle Gefährdungen entstehen dabei zum einen aufgrund der Roboterbewegung und den daraus resultierenden Kollisionen und zum anderen durch die Verwendung von Werkzeugen (z. B. Fräse) am Roboter. Die Reduzierung von Gefahren und damit einhergehend von Verletzungsrisiken für den Menschen muss durch geeignete Maßnahmen umgesetzt und während des Betriebes permanent gewährleistet werden. Dies stellt eine Kernvoraussetzung für die Etablierung von MRK-Arbeitsplätzen im industriellen Bereich dar.

Um den Menschen vor Verletzungen zu schützen, stellt die Einhaltung eines separierenden Abstandes zwischen Mensch und Robotersystem eine wirksame Lösung dar. Solange ein angemessener Abstand zwischen dem Menschen und den gefahrbringenden Teilen des Robotersystems (z. B. Robotergeometrie, Roboterwerkzeuge oder Werkstücke) eingehalten werden kann, wird das Risiko einer möglichen Verletzung auf ein Minimum reduziert. Der Vorteil dieses Prinzips besteht darin, dass für deren Umsetzung keine spezifischen Voraussetzungen vom Robotersystem erfüllt sein müssen. Es erlaubt maximale Geschwindigkeiten des Roboters und den Einsatz vielfältiger Werkzeuge zur Bearbeitung oder zum Transport von Werkstücken. Darüber hinaus ist es unerheblich, ob der Mensch mit einem kleinen, mittelgroßen oder Schwerlast-Roboter zusammenarbeitet. Entscheidend für die Umsetzung dieses Prinzips ist die Bestimmung und Einhaltung des erforderlichen, separierenden Abstandes zwischen Mensch und Roboter.

Die Gewährleistung dafür, dass die erforderlichen Abstände auch tatsächlich eingehalten werden, übernehmen Schutzeinrichtungen. Aktuelle, am Markt verfügbare Schutzeinrichtungen werden in zwei Kategorien unterteilt: Trennende Schutzeinrichtungen (i) verhindern durch eine physische Trennung (z. B. Schutzzaun) die Annäherung und Unterschreitung des einzuhaltenden Abstandes. Nicht-Trennende Schutzeinrichtungen (ii) basieren auf einer sensorischen Erfassung des von Mensch und Roboter gemeinsam genutzten Arbeitsbereiches. Diese sensorbasierten Schutzeinrichtungen wie Trittmatten, Lichtgitter oder Laserscanner detektieren den Zutritt oder die Annäherung des Menschen im Überwachungsbereich und signalisieren eine Unterschreitung des einzuhaltenden Abstandes. Dies resultiert dann z. B. in einem Stopp der Roboterbewegung oder einer Unterbrechung des Werkzeugeinsatzes, so dass die Gefahr verhindert und Verletzungen für den Menschen ausgeschlossen werden.

Der Nachteil dieser aktuell verfügbaren Schutzeinrichtungen liegt in der stark eingeschränkten Flexibilität hinsichtlich der Anpassung von Schutzbereichen. Schutzzäune, Schaltmatten oder Lichtgitter definieren direkt mit dem Ort der Installation den abzusichernden Bereich (Ortsbindung). Werden hierbei zu einem späteren Zeitpunkt Anpassungen notwendig, muss die Schutzeinrichtung unter Umständen aufwändig demontiert und am neuen Ort wieder installiert werden. Aktuelle Laserscanner (Keyence Corporation AG 2022) oder auch kamerabasierte Sensorsysteme (Pilz GmbH & Co. KG 2022) erlauben zwar die Konfiguration von mehreren Schutzbereichen, die auch während des Betriebes geschaltet (aktiviert/deaktiviert) werden können, eine dynamische und jederzeit minimale Etablierung von Schutzbereichen ist damit aber nicht möglich.

Demgegenüber beschreiben die internationalen Roboternormen (Norm DIN EN ISO 10218-1) und (Norm DIN EN ISO 10218-2) eine Möglichkeit, die eine permanente Neubestimmung und somit dynamische Anpassung der einzuhaltenden Abstände erlaubt. Diese sogenannte *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* stellt eine MRK-Methode dar, welche den erforderlichen Abstand zwischen Mensch und Robotersystem dynamisch während des Betriebes in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration definiert. Damit wird die

Umsetzung minimal einzuhaltender Abstände zu jedem Zeitpunkt möglich. Da neben der Robotergeometrie auch gleichzeitig die aktuell eingesetzten Werkzeuge, Werkstücke und zusätzliche Bauteile im Kollaborationsraum bei der Bestimmung der einzuhaltenden Sicherheitsabstände berücksichtigt werden können, bietet diese Methode eine größtmögliche Flexibilität.

Trotz einer Vielzahl an Vorteilen und Einsatzmöglichkeiten existiert aktuell keine kommerziell erhältliche Schutzeinrichtung, welche diese MRK-Methode umsetzt. Im aktuellen Stand der Wissenschaft finden sich verschiedenste Ansätze von Sensorsystemen und Verfahren zur dynamischen Bestimmung und Überwachung von Abständen bzw. Schutzräumen zwischen Mensch und Roboter. Eine marktfähige Umsetzung als Schutzeinrichtung unterliegt jedoch vielfältigen Anforderungen, die von den aktuellen Entwicklungen bislang nicht erfüllt werden. Aus diesem Grund umfasst die vorliegende Arbeit die Konzeption eines Sensorprinzips und Entwicklung einer Methode zur funktional-sicheren Bestimmung und Überwachung von dynamischen Schutzräumen zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*.

1.2 Zielstellung und wissenschaftlicher Beitrag

Das Ziel der vorliegenden Arbeit besteht in der Konzeption und Entwicklung eines neuartigen Sensorprinzips und Methode zur Absicherung von industriellen Mensch-Roboter-Kollaborationsarbeitsplätzen durch Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*. Dieses System soll die Defizite der Ansätze und Entwicklungen im aktuellen Stand der Wissenschaft und Technik umgehen, indem insbesondere folgende Anforderungen berücksichtigt werden:

1. Ganzheitliche sensorische Arbeitsraumerfassung
2. Minimale Mindestabstände
3. Funktionale Sicherheit
4. Maximale Verfügbarkeit
5. Dynamische Sicherheitsabstände

Durch Analyse und Bewertung des aktuellen Standes der Wissenschaft wurde die folgende Forschungsfrage abgeleitet, welche im Rahmen dieser Arbeit beantwortet werden soll:

Können auf Basis passiver 2D-Kameratechnik ein aktives 2D-Sensorprinzip und Methode konzipiert werden, welche die Anforderungen an eine Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ per sicherer Schutzraumüberwachung erfüllen?

Diese Arbeit trägt zur Fortschreibung des aktuellen Standes der Wissenschaft im Bereich der aktiven 2D-Kamerasysteme zur Gewährleistung der Personensicherheit an MRK-Arbeitsplätzen insbesondere durch folgende Aspekte bei:

- Ableitung von fünf wesentlichen Anforderungen an berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS) zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*
- Präsentation eines neuartigen, aktiven 2D-Sensorprinzips (A2S) zur funktional-sicheren Schutzraumüberwachung auf Basis von Kameratechnik in Kombination mit einer eigenen Beleuchtung (Lichtmodulator)
- Präsentation einer Methode zur verfügbarkeitsmaximierten Detektion von Schutzraumverletzungen auf Basis einer (i) robusten Extraktion aktiv beleuchteter Bildbereiche mittels Bildfolgeauswertung und einer (ii) modellbasierten Bestimmung der Ground Truth Daten von Schutzräumen
- Präsentation eines geometrischen Verfahrens zur effizienten und dynamischen Bestimmung einzuhaltender Mindestabstände in Abhängigkeit des Roboterzustandes
- Präsentation einer Methode zur Detektion hoch-dynamischer Fremdlichteinflüsse durch raumzeitlich dynamische Codierungen diskreter Schutzraumregionen
- Experimentelle Evaluierung des A2S an einem MRK-Versuchsstand sowie Bewertung und Einordnung in den aktuellen Stand der Wissenschaft

1.3 Struktur der Arbeit

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der Konzeption eines Sensorprinzips und Methode zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*. Dabei gliedert sich die Arbeit in folgende Kapitel:

Kapitel 2 Beschreibung der Rahmenbedingungen und Ableitung der Anforderungen	In diesem Kapitel werden zunächst die Grundlagen der Mensch-Roboter-Kollaboration im industriellen Bereich vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Anforderungen inklusive Bewertungskriterien an das zu konzipierende Sensorsystem abgeleitet.
Kapitel 3 Stand der Wissenschaft	Ansätze und Entwicklungen im aktuellen Stand der Wissenschaft werden vorgestellt und hinsichtlich des Erfüllungsgrades der abgeleiteten Anforderungen bewertet.
Kapitel 4 Forschungsfrage und Handlungsbedarf	Die identifizierten Lücken im Stand der Wissenschaft bilden die Grundlage zur Formulierung der Forschungsfrage und zur Herleitung des weiteren Handlungsbedarfes.
Kapitel 5 Aktives 2D-Sensorprinzip	In diesem Kapitel wird die Konzeption eines neuartigen aktiven 2D-Sensorprinzips auf Basis von Kameratechnik und einem Lichtmodulator zur dynamischen Schutzraumüberwachung präsentiert.
Kapitel 6 Verfahren zur Schutzraumüberwachung	Die entwickelten Verfahren zur zuverlässigen Detektion von Schutzraumeindringungen auch beim Vorliegen von ambienten oder hoch-dynamischen Fremdlichteinflüssen werden in diesem Kapitel vorgestellt.
Kapitel 7 Implementierung und Integration	Das konzipierte Sensorprinzip und Methode werden an einem industriellen Versuchsstand implementiert und integriert. Dies bildet die Basis zur Evaluierung der Detektionsleistung und Reaktionszeit.
Kapitel 8 Zusammenfassung	Die Arbeit wird abschließend zusammengefasst, eine Bewertung der konzipierten Technologie durchgeführt und ein Ausblick bzgl. weiterführender Entwicklungen gegeben.

2 Beschreibung der Rahmenbedingungen und Ableitung der Anforderungen

Dieses Kapitel beschreibt die Grundlagen des Einsatzes von Industrierobotern. Es werden zunächst verschiedene Arten eines Robotereinsatzes präsentiert und deren Möglichkeiten zur Umsetzung in Form einer *Kollaboration* beschrieben. Es wird gezeigt, dass die *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* das größte Potential im Hinblick auf eine zweckmäßige und sichere Zusammenarbeit von Mensch und Roboter in einem gemeinsam genutzten Arbeitsraum bietet. Die Realisierung dieser MRK-Methode gemäß der Abstandsformel nach ISO/TS 15066 wird anschließend unter besonderer Berücksichtigung der Anordnung einer Schutzeinrichtung vorgestellt. Weiterhin werden die grundsätzlichen Anforderungen an Sicherheitstechnik zur Gewährleistung der Personensicherheit beschrieben und aktuelle Realisierungen *nicht-trennender Schutzeinrichtungen* dargelegt. Im Hinblick auf die Konzeption und Entwicklung einer *berührungslos wirkenden Schutzeinrichtung* (BWS) werden Herausforderungen zur Umsetzung einer kamerabasierten Sensorlösung diskutiert. Abschließend erfolgt die Definition von Anforderungen mit spezifischen Kriterien an eine BWS zur Umsetzung der *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*.

2.1 Verwendung von Industrierobotern

Die Vorteile von Industrierobotern liegen neben der hohen Präzision, Wiederholgenauigkeit und Ausdauer vor allem in der Universalität, um diese individuell an spezifische Situationen, Aufgaben und Prozesse anpassen zu können (VDI-Richtlinie VDI 2860). Durch die Vielzahl an verschiedensten Endeffektoren kann ein und derselbe Industrieroboter als Schweißsystem, Fügeeinheit, Transport- und Handhabungssystem, Mess- und Prüfsystem und in unzähligen weiteren Szenarien eingesetzt werden. Im Laufe der Zeit haben die unterschiedlichen Anforderungen der Einsatzzwecke zu Variationen von Industrierobotern geführt, wobei einzelne Merkmale wie Traglast (Fanuc K.K. 2019), Geschwindigkeit (Comau S.p.A 2019) oder Präzision (ABB Ltd 2019) besonders stark ausgeprägt sind. Die dadurch entstandene Vielfalt an Einsatzmöglichkeiten wird schon seit vielen Jahren von Produktionsbetrieben genutzt (Bernd Beckert et al. 2016). Die *Boston Consulting Group* hat darüber hinaus eine Studie zur *Fabrik der Zukunft* durchgeführt, wobei die Unternehmen im Durchschnitt eine Steigerung des Automatisierungsgrades der Produktion durch Roboter bis zum Jahr 2025 um 15 % angeführt haben (The Boston Consulting Group 2019). Parallel dazu werden auch die Entwicklungen im Bereich der Industrie 4.0 hinsichtlich neuer Konzepte und Technologien wie Smart-Factories, Cloud-Robotics, Machine Learning, Vision-Systeme und adaptive Greifkonzepte voranschreiten (IFR 2018a). Die zunehmende Vernetzung von Industrierobotern mit Sensoren, Effektoren, sowie Produktionsprozessen mit Werkzeugen und Werkstücken in Kombination mit neuen Technologien zur Umgebungswahrnehmung, -interpretation und -verständnis führen nicht zuletzt zu einer neuen Rolle des Menschen im Arbeitsumfeld (Kersten et al. 2014).

2.1.1 Arten eines Robotereinsatzes

In der Vergangenheit wurden bereits vielfältige Analysen zur Planung und Umsetzung einer Zusammenarbeit von Mensch und Roboter in unterschiedlichen Applikationen durchgeführt (Thiemermann 2005; Spillner 2014; Bauer et al. 2016). Zur Unterscheidung grundsätzlicher Arten der Zusammenarbeit haben sich spezifische Begriffe etabliert. In Anlehnung an (Behrens et al. 2015; Behrens et al. 2016) werden die Arten der Zusammenarbeit in Abbildung 1 schematisch dargestellt und im Verlauf dieser Arbeit verwendet.

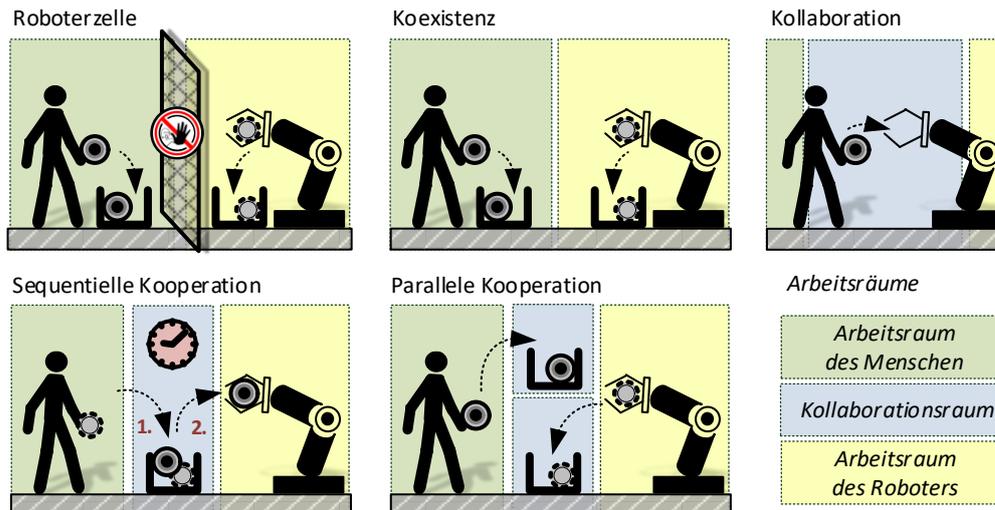


Abbildung 1: Piktografische Darstellung der Arten einer Zusammenarbeit von Mensch und Roboter nach (Behrens et al. 2015).

Zellenbetrieb Die Verwendung von Roboterzellen stellt die traditionelle/konventionelle Variante des Robotereinsatzes dar, wobei die Sicherheit des Menschen im Wesentlichen aufgrund trennender Schutzeinrichtungen (z. B. Schutzzaun) gewährleistet wird. Eine zweckmäßige Zusammenarbeit von Mensch und Roboter ist hierbei kaum möglich.

Koexistenz Die Koexistenz beschreibt die gleichzeitige, jedoch voneinander unabhängige Arbeit von Mensch und Roboter. Diese arbeiten zwar in unmittelbarer Nähe zueinander, teilen sich aber keinen gemeinsamen Arbeitsraum. Die Gewährleistung der Sicherheit des Menschen findet dabei schutzzaunlos durch bspw. BWS (Laserscanner, Lichtgitter) statt.

Kooperation Eine Kooperation von Mensch und Roboter definiert die Bearbeitung einer Aufgabe in einem gemeinsam genutzten Arbeitsraum. Ist der Arbeitsprozess derart zeitlich aufgeteilt, dass Mensch und Roboter nacheinander Arbeiten durchführen, wird dies als *sequentielle Kooperation* bezeichnet. Werden die Arbeiten zur Erledigung einer Aufgabe von Mensch und Roboter gleichzeitig durchgeführt, wobei physische Kontakte verboten sind, findet eine *parallele Kooperation* statt.

Kollaboration Der Unterschied zwischen einer *Kooperation* und *Kollaboration* liegt darin, dass Kontakte zwischen Mensch und Roboter im gemeinsam genutzten Arbeitsraum erlaubt oder zur Durchführung der Aufgabe gar notwendig sind.

Der Begriff *Kollaboration* wird darüber hinaus in den entsprechenden Normen (Norm DIN EN ISO 10218-2; Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066) sowie von Verbänden (VDMA und MHI e.V. 2016)(Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. 2015) und Unternehmen (Pilz GmbH & Co. KG 2017) auch als Überbegriff dafür verwendet, dass Mensch und Roboter einen gemeinsamen Arbeitsraum nutzen.

2.1.2 Mensch-Roboter-Kollaboration

Da der Mensch aufgrund des Aufenthaltes im gemeinsam genutzten Arbeitsraum (*Kollaborationsraum*) unmittelbaren Gefahren (z. B. Kollisionen) ausgesetzt ist, spezifizieren die Roboternormen (Norm DIN EN ISO 10218-1) und (Norm DIN EN ISO 10218-2) den *Kollaborierenden Roboterbetrieb*. Mit dieser Betriebsart gehen wiederum vielfältige sicherheitstechnische Anforderungen an den Industrieroboter selbst und an die umzusetzende Applikation/Anlage einher, um die Sicherheit des Menschen bei der Zusammenarbeit mit dem Roboter zu gewährleisten (Norm DIN EN ISO 10218-2). Dazu werden in (Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066) vier Methoden konkretisiert, die einzeln oder in Kombination zur Umsetzung einer sicheren Kollaboration angewendet werden können (Abbildung 2):

1. Sicherheitsbewerteter überwachter Halt
2. Handführung
3. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung (SSM)
4. Leistungs- und Kraftbegrenzung (PFL)

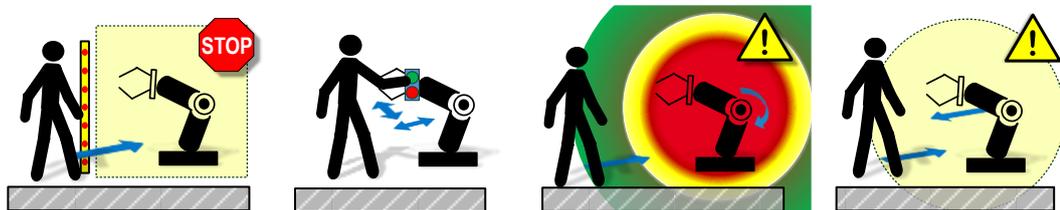


Abbildung 2: Piktografische Darstellung der vier Methoden einer Kollaboration von Mensch und Roboter gemäß (Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066): Von links nach rechts: „Sicherheitsbewerteter überwachter Halt“, „Handführung“, „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“, „Leistungs- und Kraftbegrenzung“

Sicherheitsbewerteter überwachter Halt

Die Anwendung dieser Methode erlaubt keine simultane Arbeit von Mensch und Roboter im gemeinsam genutzten Arbeitsraum. Während des Aufenthalts des Menschen im Kollaborationsraum muss die Roboterbewegung gestoppt und ein sicherheitsbewerteter überwachter Halt aufrechterhalten werden. Der Eintritt bzw. die Anwesenheit des Menschen im Kollaborationsraum kann bspw. sensorisch unter Verwendung von Lichtgittern, Trittmatten oder Laserscannern erfasst und signalisiert werden, sodass der Roboterprozess gestoppt und Gefährdungen für den Menschen ausgeschlossen werden können.

Handführung

Die 2. MRK-Methode definiert die Ausführung von Roboterbewegungen aufgrund der manuellen Eingabe durch den Menschen an einem Handführgerät. Dieses Handführgerät kann

bspw. eine Kraft-Momenten-Sensorik zur Erfassung der menschlichen Bewegungsvorgaben enthalten. Der Roboter führt die manuell vorgegebene Bewegung mit einer sicher überwachten Geschwindigkeit aus. Ein autonomer Roboterbetrieb ist hiermit nicht möglich.

Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Die *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* stellt die 3. MRK-Methode dar und erlaubt die simultane Arbeit von Mensch und Roboter im Kollaborationsraum. Dies setzt jedoch voraus, dass permanent ein notwendiger Mindestabstand zwischen Mensch und Roboter eingehalten wird. Die in der technischen Spezifikation ISO/TS 15066 definierte Abstandsformel (siehe Abschnitt 2.2.1) erlaubt die dynamische Bestimmung des einzuhaltenden Mindestabstandes in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration (Gelenkstellungen, -geschwindigkeiten, Traglast, Ausladung usw.) und Menschverhaltens (Bewegungsgeschwindigkeit, -richtung) zu jedem Zeitpunkt. Dies ermöglicht zum einen die Freigabe eines maximalen Arbeitsbereiches für den Menschen während der Bewegung des Roboters. Zum anderen können verschiedene Strategien zur flexiblen Vermeidung von Kollisionen (z. B. Reduzierung der Geschwindigkeit, Änderung der Trajektorie) bei einer Abstandsverringerung zwischen Mensch und Roboter angewendet werden.

Aktuell existiert keine kommerziell erhältliche Sicherheitstechnik, welche die Umsetzung dieser MRK-Methode unterstützt. Eine ausführliche Beschreibung zu aktuellen Ansätzen und Entwicklungen im wissenschaftlichen Bereich hinsichtlich der Umsetzung dieser MRK-Methode wird in Kapitel 3.1 präsentiert.

Leistungs- und Kraftbegrenzung

Im Gegensatz zu den vorangegangenen drei Methoden findet bei der *Leistungs- und Kraftbegrenzung* eine direkte, physische Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter in einem gemeinsam genutzten Arbeitsraum statt. Ein Kontakt zwischen Mensch und Roboter ist prinzipiell erlaubt, wobei sichergestellt werden muss, dass die dabei auftretenden Kräfte die spezifischen biomechanischen Grenzwerte einhalten (siehe Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066)). Bezüglich dieser Belastungs- und Schmerzgrenzen wurden in den vergangenen Jahren vielfältige Untersuchungen und Studien durchgeführt (Behrens und Elkmann 2014; Haddadin et al. 2009a; Haddadin et al. 2009b; Yamada et al. 1997). Gleichzeitig wurden im industriellen Bereich sogenannte kollaborative Roboter (auch Leichtbauroboter – LBR) entwickelt, die in der Lage sind Kollisionen zu detektieren und darauf geeignet zu reagieren (KUKA AG 2018; Fanuc K.K. 2018; Universal Robots 2019), um das Verletzungsrisiko bei Kollisionen für den Menschen auf ein Minimum zu reduzieren. Für die Absicherung der gesamten Roboterapplikation wurden dann spezifische MRK-fähige Werkzeuge, wie Greifer (Zimmer Group GmbH) oder Werkzeugüberwachungssysteme (Mayser GmbH & Co KG 2019b) entwickelt.

Obwohl es seit über 10 Jahren kollaborative Roboter am Markt gibt, wurden im Jahr 2021 lediglich 39.000 Einheiten weltweit neu installiert und nehmen gegenüber den 478.000 eingesetzten Industrierobotern weiterhin lediglich ein Nischendasein ein (IFR 2022b). Die Gründe dafür sind auf die Leistungseinschränkungen dieser kollaborativen Roboter und die Aufwendungen zur Umsetzung der Sicherheitsanforderungen in der Applikation zurückzuführen (Bauer et al. 2016). Kollaborative Roboter verfügen im Vergleich zu herkömmlichen Industrierobotern über geringe Traglasten (maximal 35 kg (Fanuc K.K. 2018)) und dürfen lediglich mit sicher reduzierter Geschwindigkeit betrieben werden. Für viele Applikationen sind diese Einschränkungen nicht akzeptabel.

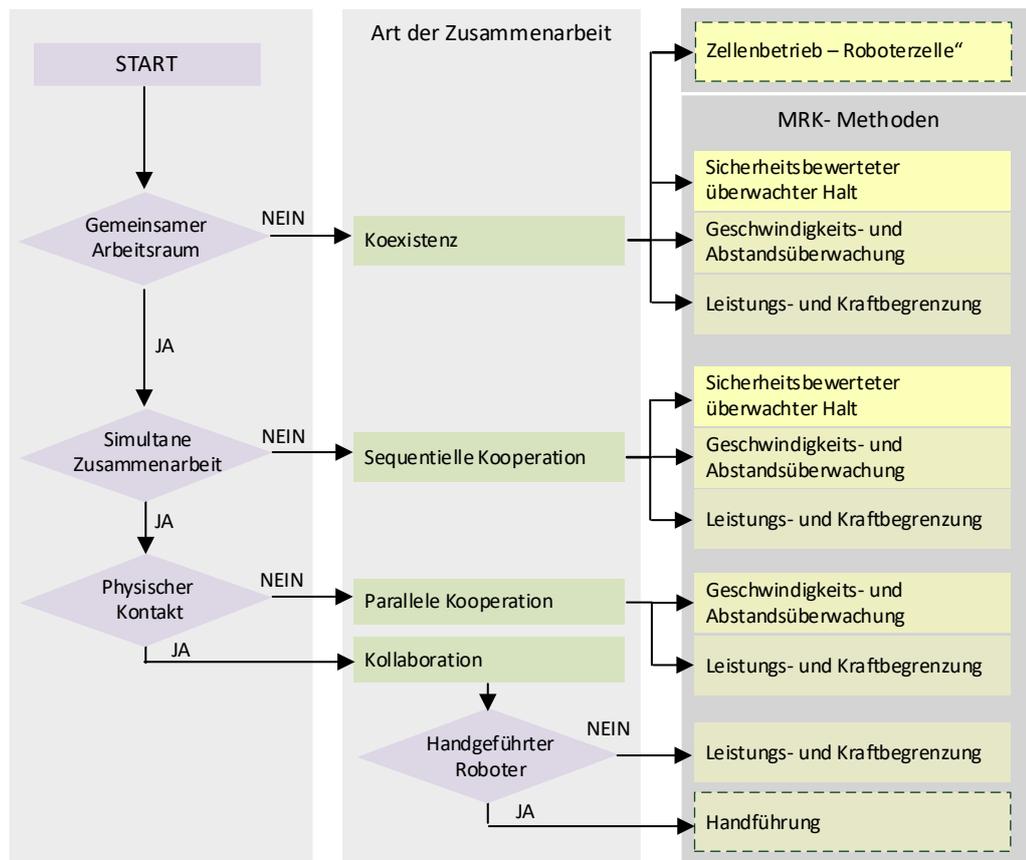


Abbildung 3: Abhängigkeit zwischen der Art der Zusammenarbeit und den vier Methoden der MRK gemäß (Behrens et al. 2015).

2.1.3 Auswahl von MRK-Methoden

Die Umsetzung einer MRK-Applikation (siehe Abschnitt 2.1.1) bedingt die Anwendung einer oder mehrerer der in Abschnitt 2.1.2 genannten MRK-Methoden. Es stellt sich die Frage, für welche Art der MRK-Applikation eine MRK-Methode geeignet ist. In Anlehnung an (Behrens et al. 2015) zeigt Abbildung 3 ein Ablaufdiagramm, welches auf Basis von drei Fragen zunächst die entsprechende Art der Zusammenarbeit und schließlich die möglichen anzuwendenden MRK-Methoden spezifiziert. In diesem Ablaufdiagramm wird ersichtlich, dass die MRK-Methode *Leistungs- und Kraftbegrenzung* prinzipiell bei jeder Art der Zusammenarbeit angewendet werden kann. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Sicherheit des

Menschen selbst bei Kontakten bzw. Kollisionen mit dem Roboter gewährleistet wird. Eine engere Zusammenarbeit mit dem Roboter ist prinzipiell nicht möglich.

Die MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* eignet sich besonders für die Arten der Zusammenarbeit, bei denen Kontakte aus Sicherheitsgründen zwischen Mensch und Roboter verboten bzw. für die Durchführung der Arbeiten nicht zwingend erforderlich sind. Dies betrifft alle Arten der Zusammenarbeit, bis auf die *Kollaboration*. Sind physische Kontakte zwischen Mensch und Roboter zur Umsetzung einer Applikation nicht zwingend erforderlich, kommen somit beide MRK-Methoden in Betracht. Gemäß Tabelle 1 kann jedoch festgestellt werden, dass die *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* das größte Potential für eine kontaktfreie Zusammenarbeit von Mensch und Roboter bietet.

Tabelle 1: Schema zur Bewertung der MRK-Methoden: 0 - Merkmal nicht erfüllt; × - Merkmal erfüllt

Gegenüberstellung der 4 MRK-Methoden nach ISO/TS 15066 hinsichtlich grundsätzlicher industrieller Anforderungen		Handführung	Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	Leistungs- und Kraftbegrenzung
Anforderungen	Autonome Roboterbewegung bei Anwesenheit des Menschen im gemeinsam genutzten Arbeitsraum	0	0	×	×
	Keine Einschränkung hinsichtlich des Einsatzes kleiner/ mittelgroßer / Schwerlastroboter	×	×	×	0
	Keine Einschränkung hinsichtlich Robotergeschwindigkeit	0	×	×	0
	Berücksichtigung des Robotersystems inklusive Werkzeugen und Werkstücken	×	×	×	0
	Kollision zwischen Mensch und Roboter möglich bzw. erlaubt	×	0	0	×
Anzahl erfüllter Anforderungen (max. 5)		3	3	4	2

2.2 Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

In diesem Abschnitt werden die Abhängigkeiten und Anforderungen zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* beschrieben. Dies beinhaltet in erster Linie die *Abstandsformel* zur Bestimmung des einzuhaltenden Mindestabstandes gemäß (Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066). Da der Sicherheitsabstand auch von der *Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf die Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen* (Norm DIN EN ISO 13855) und *Einhaltung von Sicherheitsabständen* (Norm DIN EN ISO 13857) abhängt, werden diese Aspekte im Folgenden ebenfalls betrachtet.

2.2.1 Dynamische Abstandsbestimmung

Die (Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066) konkretisiert die Bestimmung des einzuhaltenden Mindestabstandes zwischen Mensch und Roboter, um vom Roboter ausgehende Gefährdungen (z. B. Kollisionen) und daraus resultierende Verletzungen für den Menschen zu verhindern. Dieser Mindestabstand bezieht sich auf alle existierenden Risiken im Zusammenhang mit der Umsetzung der roboterbasierten Applikation, bei denen eine Risikominderung erforderlich ist (z. B. auch Verletzungen durch Werkzeugeinsatz). Wird dieser Mindestabstand nicht eingehalten, müssen entsprechende Maßnahmen zur Verhinderung bzw. Reduzierung der Gefährdungen unmittelbar durchgeführt werden (z. B. Stopp der Roboterbewegung oder des gesamten Arbeitsprozesses). Die Roboterbewegung (oder der Prozess usw.) können automatisch fortgesetzt werden, wenn der erforderliche Mindestabstand wieder erreicht und eingehalten wird.

Die Abstandsformel zur Berechnung des erforderlichen Mindestabstandes \mathcal{S}_p zum Zeitpunkt t_0 lautet:

$$\mathcal{S}_p(t_0) = \mathcal{S}_h + \mathcal{S}_r + \mathcal{S}_s + \mathcal{C} + \mathcal{Z}_d + \mathcal{Z}_r \quad (1)$$

Bei der Anwendung von Gleichung (1) ist zu beachten, dass diese für alle Kombinationen von Personen und Gefährdungen (z. B. bewegliche Teile des Robotersystems) im Kollaborationsraum gilt. Eine piktografische Darstellung der einzelnen Terme und deren Einfluss auf den einzuhaltenden Mindestabstand ist in Abbildung 4 veranschaulicht. Der Mindestabstand setzt sich im Wesentlichen aus den Wegen \mathcal{S}_h , \mathcal{S}_r und \mathcal{S}_s zusammen, die während der Dauer von Reaktionszeit \mathcal{T}_r und der Dauer von Bremszeit \mathcal{T}_s von Mensch und Roboter zurückgelegt werden. Nach Ablauf der Zeitdauer $\mathcal{T}_r + \mathcal{T}_s$ hat der Roboter seine Bewegungsgeschwindigkeit bis zum Stillstand verringert. Die konstanten Anteile \mathcal{Z}_d und \mathcal{Z}_r repräsentieren die Positioniersicherheiten des Sensorsystems in Bezug auf Mensch und Roboter. Falls die Bewegungsgeschwindigkeiten und -richtungen von Mensch und Roboter unbekannt sind und nicht gemessen werden können, muss davon ausgegangen werden, dass sich Mensch und Roboter mit maximalen Geschwindigkeiten frontal aufeinander zu bewegen. Eine ausführliche Erläuterung aller Terme und Variablen der Abstandsformel findet sich in Anhang A.4.

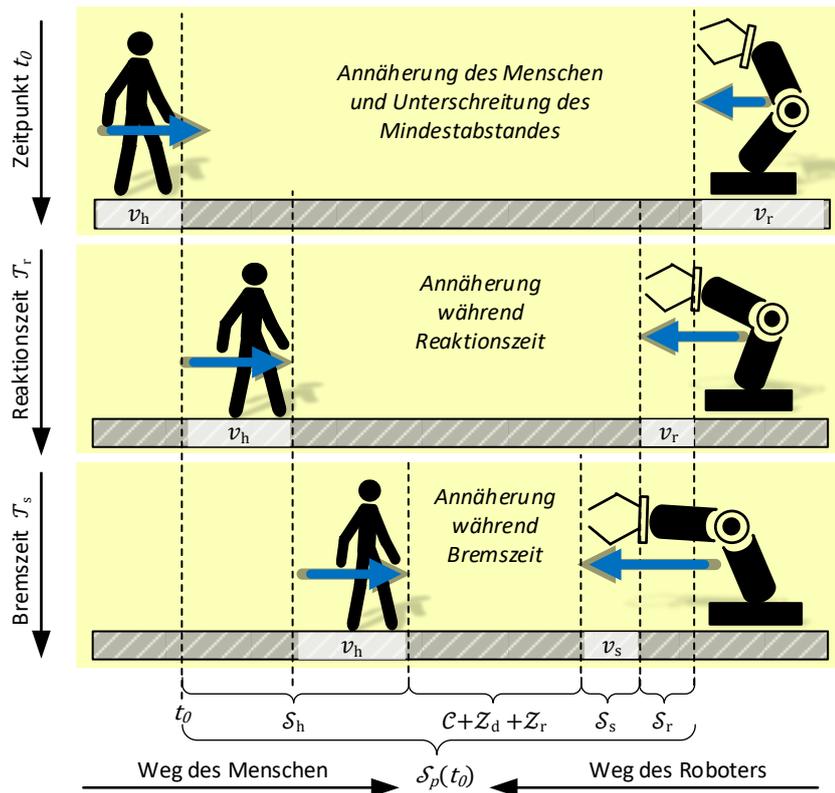


Abbildung 4: Schematische Darstellung der zurückgelegten Wege von Mensch und Roboter vom Zeitpunkt des Unterschreitens des Mindestabstandes bis zum Zeitpunkt des Roboter-Stillstandes.

Zuschlag C Einen wichtigen Faktor bezüglich des Mindestabstandes spielt der Zuschlag C . Dieser kann unter Umständen signifikant groß werden und ist von der Anordnung und Leistungsfähigkeit der Schutzeinrichtung abhängig (siehe dazu Abschnitt 2.2.2).

Bremszeit \mathcal{T}_s Die Bremszeit des Roboters wird ausschließlich von der technischen Leistungsfähigkeit des Roboters definiert und hängt von der aktuellen Geschwindigkeit, Ausladung und Traglast ab. Die Bremszeit kann nur insoweit gering gehalten werden, als das Trajektorien und Geschwindigkeiten des Roboters dahingehend optimiert werden.

Reaktionszeit \mathcal{T}_r Die Reaktionszeit entspricht der Zeitdauer vom Zeitpunkt der Unterschreitung des Mindestabstandes bis zum Zeitpunkt der Aktivierung des Roboters-Stoppes (bzw. Einleitung der gefahrreduzierenden Maßnahme). Diese Zeitdauer besteht somit im Wesentlichen aus der Zeit zur Detektion der Nicht-Einhaltung des Mindestabstandes und deren Signalisierung an das Robotersystem. Die Reaktionszeit \mathcal{T}_r und die damit verbundenen Wege von Mensch und Roboter hängen somit direkt von der Leistungsfähigkeit der Schutzeinrichtung ab.

In Abbildung 5 wird der Zusammenhang zwischen \mathcal{T}_r der Schutzeinrichtung und den dabei zurückgelegten Wegen von Mensch und Roboter veranschaulicht. Für die Geschwindigkeit des Menschen wird $v_h = 1.6 \frac{m}{s}$ (Worstcase) angenommen. Die zurückgelegten Wege des Roboters während \mathcal{T}_r werden zusätzlich in Abhängigkeit von verschiedenen Robotergeschwindigkeiten v_r dargestellt.

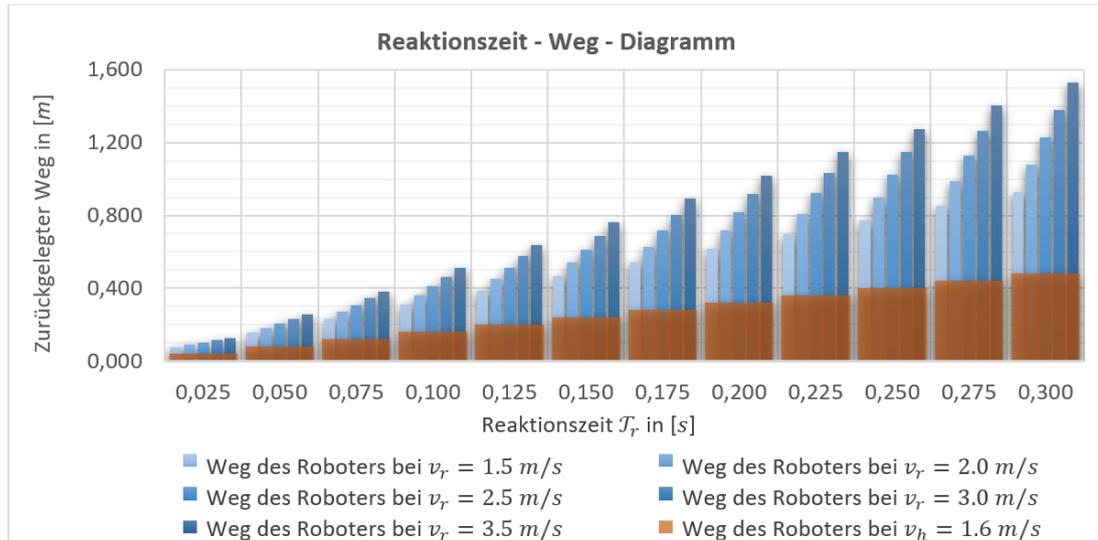


Abbildung 5: Reaktionszeit-Weg-Diagramm. In Abhängigkeit der Reaktionszeit T_r werden die zurückgelegten Wege von Mensch und Roboter für verschiedene Geschwindigkeiten veranschaulicht.

Schlussfolgerung Bei einer Robotergeschwindigkeit von $v_r = 2.5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ legen Mensch und Roboter während der Reaktionszeit von $T_r = 0.200 \text{ s}$ einen Gesamtweg von 0.82 m zurück. In Bezug auf den einzuhaltenden Mindestabstand stellt dies bereits einen beträchtlichen Wert dar, welcher weiter durch die Wege aufgrund der Bremszeit und den konstanten Zuschlägen vergrößert wird. Eine Verringerung der Reaktionszeit auf 0.050 s würde in einem Gesamtweg von lediglich 0.20 m resultieren, was die Signifikanz der Reaktionszeit T_r auf den einzuhaltenden Mindestabstand unterstreicht.

2.2.2 Anordnung von BWS

Die Wirksamkeit einer berührungslos wirkenden Schutzeinrichtung (BWS) zur Minderung eines Risikos hängt von verschiedenen Aspekten ab, die u. a. in (Norm DIN EN ISO 13855) beschrieben werden. Zum einen werden hierin typische Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen an Gefahrstellen definiert (Schrittgeschwindigkeit: $1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, Greifgeschwindigkeit: $2.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$), die immer dann zur Anwendung kommen (als Worstcase), wenn keine anderen Werte ermittelt werden können bzw. vorliegen. Zum anderen werden zwei grundsätzliche Möglichkeiten zur Anordnung von BWS erläutert, welche wiederum die erforderliche Detektionsleistung d und somit auch den Zuschlag C des Sicherheitsabstandes S beeinflussen.

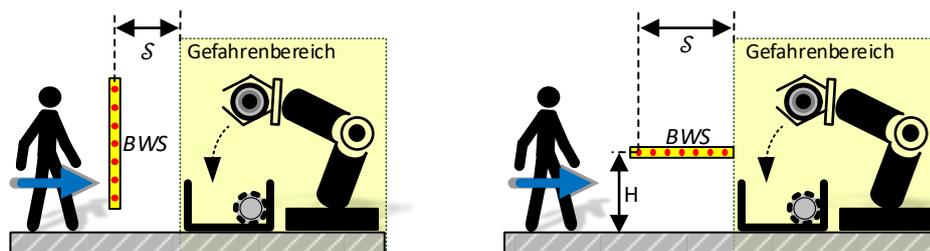


Abbildung 6: Einzuhaltende Mindestabstände bei orthogonaler (links) und paralleler Annäherung (rechts) des Menschen bezüglich der Schutzfeldausrichtung einer BWS (z. B. Lichtgitter).

Die Abhängigkeit zwischen der Anordnung einer BWS bzgl. einer Gefahrstelle und dem einzuhaltenen Mindestabstand S ist in Abbildung 6 am Beispiel eines Lichtgitters schematisch veranschaulicht. Man unterscheidet hierbei zwischen orthogonaler (linke Darstellung) und paralleler Anordnung (rechte Darstellung) der Schutzeinrichtung bezüglich der Annäherungsrichtung des Menschen.

Orthogonale Annäherung

Die orthogonale Ausrichtung einer BWS zur Annäherungsrichtung des Menschen wird auch als *Zutrittsüberwachung* oder *Zugriffsüberwachung* bezeichnet, da lediglich der Eintritt/Eingriff in den zu schützenden Bereich detektiert wird. Der Zuschlag C ist hierbei ausschließlich von der Detektionsauflösung d der BWS abhängig. Ab einer Detektionsauflösung von $d > 40 \text{ mm}$ muss davon ausgegangen werden, dass ein menschlicher Arm beim Ein- bzw. Durchdringen der BWS unbemerkt bleibt, so dass ein konstanter Zuschlag $C = 850 \text{ mm}$ (Armlänge) berücksichtigt werden muss (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Berechnung des Zuschlages C bei orthogonaler Annäherung des Menschen zur Schutzfeldausrichtung

Detektionsauflösung d	Berechnung des Zuschlages C	Bemerkungen
$d \leq 14 \text{ mm}$	$C = 0$	<ul style="list-style-type: none"> Fingerauflösung
$14 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm}$	$C = 8 * (d - 14)$	<ul style="list-style-type: none"> Hand-, Armauflösung
$d > 40 \text{ mm}$	$C = 850 \text{ mm}$	<ul style="list-style-type: none"> 850 mm entspricht Armreichweite Körperdetektion: Verwendung von 2-4 Einzelstrahlen Höhe des untersten Strahls $\leq 300 \text{ mm}$ Höhe des obersten Strahls $\geq 900 \text{ mm}$

In Abbildung 7 wird der Zusammenhang zwischen Detektionsauflösung d der Schutzeinrichtung und dem davon abhängigen Zuschlag C grafisch veranschaulicht. Es ist leicht zu erkennen, dass eine Detektionsauflösung $d \leq 40 \text{ mm}$ den Zuschlag C (bis auf null) minimiert.

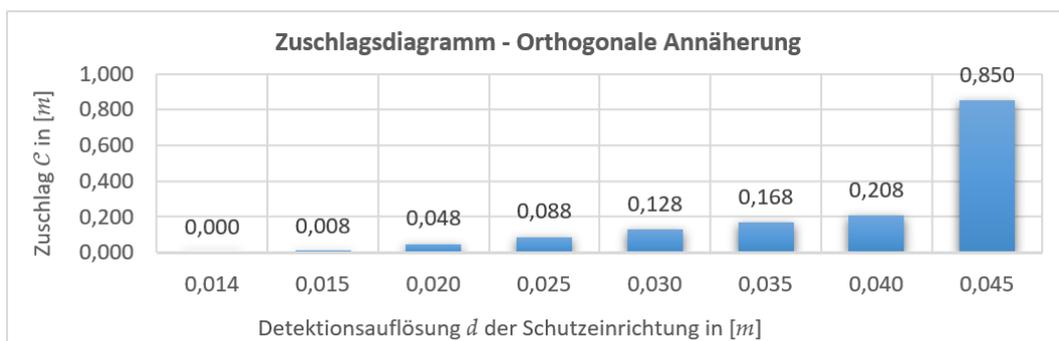


Abbildung 7: Darstellung des Zuschlages C in Abhängigkeit der Detektionsauflösung d der Schutzeinrichtung bei orthogonaler Annäherung.

Parallele Annäherung

Die parallele Ausrichtung einer BWS zur Annäherungsrichtung des Menschen wird auch als *Bereichsüberwachung* bezeichnet, da nicht nur der Eintritt sondern die Anwesenheit des Menschen im zu schützenden Bereich detektiert wird. Die Berechnung des Zuschlages C ist hierbei

maßgeblich von der Höhe H der BWS abhängig, da bei dieser Anordnung prinzipiell die Möglichkeit des Hineintretens bzw. Übergreifens besteht (siehe Tabelle 3).

Tabelle 3: Berechnung des Zuschlages C bei paralleler Annäherung des Menschen zur Schutzfeldausrichtung

Berechnung des Zuschlages C	Bemerkungen
$C = 1200 - 0.4 * H$	<ul style="list-style-type: none"> • $C \geq 850 \text{ mm}$ (Zuschlag mindestens einer Armlänge) • $H \leq 1000 \text{ mm}$ • erforderliche Detektionsauflösung d der BWS ergibt sich aus der Höhe H: $d \leq \frac{H}{15} + 50 \text{ mm} \leq 117 \text{ mm}$

Je nach Applikation kann es auch erforderlich sein, dass eine unbemerkte Annäherung durch ein Unterlaufen oder Unterkriechen der BWS verhindert werden muss. Um dies zu gewährleisten schreibt (Norm DIN EN ISO 13855) eine maximale Höhe der BWS von 200 mm über der Bezugsebene (z. B. Boden) vor.

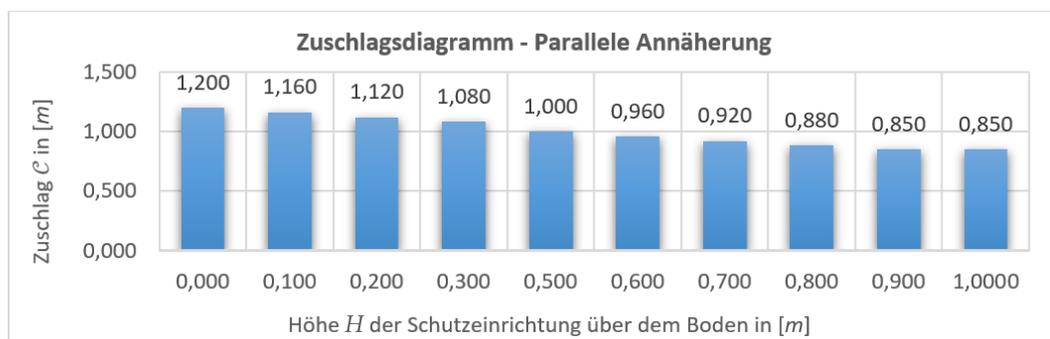


Abbildung 8: Darstellung des Zuschlages C in Abhängigkeit der Höhe H der Schutzeinrichtung bei paralleler Annäherung.

In Abbildung 8 wird der Zusammenhang zwischen der Höhe H der Schutzeinrichtung und dem resultierenden Zuschlag C grafisch veranschaulicht. Prinzipiell gilt, dass mit ansteigender Höhe H (max. 1.0 m) der maximale Zuschlag C von 1200 mm zwar geringer wird, aber lediglich bis zu der unteren Grenze von 850 mm .

Schlussfolgerungen

Die Erläuterungen und Diagramme zu orthogonaler und paralleler Annäherung zeigen deutlich, wie unterschiedlich die Zuschläge C (und somit auch der resultierende Mindestabstand S) in Abhängigkeit der Anordnung der BWS ausfallen. Bemerkenswert dabei ist, dass bei paralleler Annäherung im besten Fall ein Zuschlag von 850 mm erreicht werden kann, wobei dieser Wert bei der orthogonalen Annäherung den schlechtesten Fall darstellt. Die Anwendung einer Schutzeinrichtung als Zutrittsüberwachung kann bezüglich des Zuschlages C somit nicht schlechter sein, als bei Umsetzung mit Bereichsüberwachung. Eine deutliche Verringerung von C kann bei orthogonaler Annäherung dadurch erreicht werden, indem die Schutzeinrichtung eine Detektionsauflösung d aufweist, die im besten Fall 14 mm ist (oder geringer: Fingerdetektion $\rightarrow C = 0 \text{ mm}$) und im schlechtesten Fall 40 mm groß ist (Armdetektion, $C = 208 \text{ mm}$). Innerhalb dieses Bereiches werden die Zuschläge C in Abhängigkeit der Detektionsauflösung d bestimmt.

Auf den ersten Blick scheint es, dass eine Anordnung mit orthogonaler Annäherung prinzipiell zu bevorzugen ist, da hierbei deutlich geringere Abstände eingehalten werden müssen. Neben dem einzuhaltenden Mindestabstand existieren jedoch applikationsspezifisch oftmals weitere Aspekte die berücksichtigt werden müssen. Dies betrifft in erster Linie das Hintertreten einer Schutzeinrichtung. Befindet sich der Mensch zwischen Schutzeinrichtung (BWS) und Gefahrstelle (Roboter), ist dieser unmittelbar den Risiken ausgesetzt (vgl. dazu Abbildung 6, linke Darstellung). Somit können neben der bestehenden Zutrittsüberwachung unter Umständen weitere Schutzmaßnahmen, wie eine zusätzliche Bereichsüberwachung oder Wiederanlaufsperrung erforderlich sein.

Wird das Schutzfeld einer BWS parallel zur Annäherungsrichtung des Menschen ausgerichtet (siehe Abbildung 6, rechte Darstellung), führt dies zwar zu vergleichsweise sehr großen Mindestständen, bietet hingegen aber auch Vorteile, da bspw. ein zusätzlicher Hintertreterschutz entfällt oder ein automatischer Wiederanlauf der Maschine erfolgen kann. Dies spart Zeit und erhöht die Verfügbarkeit. Eine Kombination beider Verfahren, welche zum einen den Zutritt mit einer hohen Auflösung (Fingerdetektion) detektiert und gleichzeitig die Anwesenheit des Menschen im Schutzbereich permanent feststellt, vereint die Vorteile beider Systeme und stellt damit eine Anforderung an zukünftige Schutzeinrichtungen im Bereich der Sicherheitstechnik dar.

2.3 Sicherheitstechnik

Bei der Verwendung von Industrierobotern müssen wie auch beim Einsatz jeglicher Maschinen die Bestimmungen der EG-Maschinenrichtlinie (Maschinenrichtlinie 2006/42/EG) berücksichtigt werden (siehe Anhang A.1 für Hintergrundinformationen zu *Richtlinien, Gesetze und Normen*). Dabei gilt, dass alle Gefährdungen identifiziert (*Risikoanalyse*), als Risiken bewertet (*Risikobewertung*) und die bestehenden Risiken durch Umsetzung risikomindernder Maßnahmen (*Risikominderung*) reduziert werden müssen (Europäische Kommission 2020). Ziel dieses Prozesses (siehe Anhang A.2 und *Ablaufdiagramm* in (Norm DIN EN ISO 12100)) stellt die Minderung aller Risiken auf ein annehmbares Restrisiko dar (Abbildung 9).

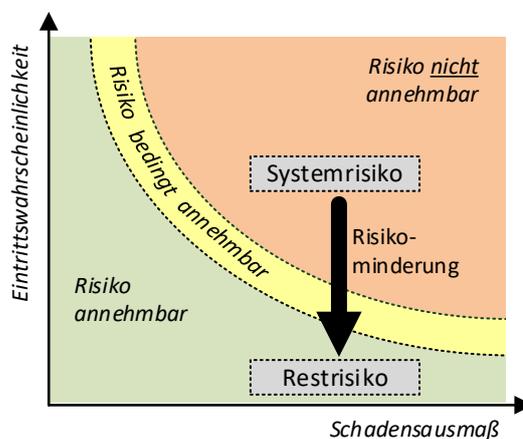


Abbildung 9: Bei der Verwendung und Integration von Robotern müssen alle Risiken mit Hilfe der Risikobewertung und Risikominderung auf ein akzeptables Restrisiko reduziert werden.

Zur Minderung bestehender Risiken bei der Verwendung von Robotern kommen Schutzeinrichtungen zum Einsatz. Derartige Maßnahmen gehören zur Kategorie der *Mittelbaren Sicherheitstechnik* (Neudörfer 2016) und vermindern das Risiko indem die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der Gefährdung verhindert oder reduziert wird. Generell bleibt jedoch die Schwere der Verletzung bei einem tatsächlichen Eintritt der Gefährdung weiter bestehen. Damit gilt: Je höher das Risiko, desto niedriger die Wahrscheinlichkeit eines Ausfalls/Defektes der eingesetzten Schutzeinrichtung. Dieser Grundsatz führte zu einer Klassifikation von Ausfallwahrscheinlichkeiten in Form eines *Performance Levels* (PL) (Norm DIN EN ISO 13849-1). Der PL repräsentiert die durchschnittlichen Wahrscheinlichkeiten eines gefährlichen Ausfalls der Schutzeinrichtung je Stunde (Tabelle 4).

Tabelle 4: Performance Level mit Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde gemäß ISO 13849-1.

Performance Level PL	Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde (PFH _D) 1/h
a	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ bis 3×10^{-6}
d	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$

Durch Anwendung des Risikographen in (Norm DIN EN ISO 13849-1) kann einem bestehenden Risiko in Abhängigkeit von (i) *Schwere der Verletzung*, (ii) *Häufigkeit/Dauer der Exposition* und (iii) *Gefährdungsvermeidung* ein erforderlicher Performance Level PL_r zugeordnet werden (siehe Anhang A.2). Eine akzeptable Minderung des bestehenden Risikos wird dadurch erreicht, dass der Performance Level der Schutzeinrichtung mindestens dem geforderten PL_r des Risikos entspricht ($PL \geq PL_r$).

Da in Bezug auf die Verwendung von Industrierobotern generell von einem hohen Risiko ausgegangen werden muss ($PL_r = d$) (Norm DIN EN ISO 10218-2) bestehen für die Schutzeinrichtungen auch entsprechend hohe sicherheitstechnische Anforderungen. Für am Markt verfügbare Schutzeinrichtungen (Stand der Technik) existieren dafür Handlungsanweisungen/Vorschriften/Prüfungen in Form von Normen, deren Einhaltung von den Herstellern der Schutzeinrichtungen bestätigt werden muss.

2.3.1 Schutzeinrichtungen

Im Bereich der Sicherheitstechnik gibt es eine Vielzahl unterschiedlichster Schutzeinrichtungen, die sich seit vielen Jahren im industriellen Produktionsbereich etabliert haben. Neben grundsätzlichen Maßnahmen wie Not-Halt Einrichtungen (Norm DIN EN ISO 13850), Zweihandschaltungen (Norm DIN EN 574) oder Freigabesteuerungen (Norm DIN EN 60204-1) wird im Allgemeinen zwischen *trennenden Schutzeinrichtungen* und *nicht-trennenden Schutzeinrichtungen* unterschieden (Maschinenrichtlinie 2006/42/EG). Der Vorteil trennender Schutzeinrichtungen (Norm DIN EN ISO 14120) liegt darin, dass ein physischer Schutz vor dem Roboter, aber auch vor herumfliegenden Partikeln (z. B. Späne), Strahlung, Hitze und/oder Lärm besteht (Görnemann und Stubenrauch 2013). Da allerdings mit trennenden

Schutzeinrichtungen kaum eine zweckmäßige Zusammenarbeit mit dem Roboter möglich ist (siehe Abschnitt 2.1), kommen hierfür nicht-trennende Schutzeinrichtungen zur Anwendung.

Druckempfindliche Schutzeinrichtungen

Durch Kontakt wirkende Schutzeinrichtungen detektieren z. B. in Form von Schaltplatten den Zutritt des Menschen in den Kollaborationsbereich (Mayser GmbH & Co KG 2019a; Norm DIN EN ISO 13856-1; Norm DIN EN ISO 13856-2). Schaltmatten der Firma Pilz bieten neben der sicheren Erkennung der Betätigung perspektivisch zudem eine Ortsdetektion des auslösenden Objektes (Pilz GmbH & Co. KG 2018).

Berührungssensitive Sensorik kann auch direkt am Roboter als *lokale Schutzeinrichtung* zur Detektion von Kontakten zum Einsatz kommen (Haake Technik GmbH 2019)(MRK-Systeme GmbH 2019; Blue Danube Robotics GmbH 2018). Hierzu werden Standard-Industrieroboter mit einer taktilen Haut und nachgiebiger Unterstrukturen ausgestattet, um für den kollaborierenden Betrieb mit Kollisionsdetektion (PFL, siehe Abschnitt 2.1.2) qualifiziert zu sein (Fritzsche et al. 2011).

Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen

Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS) (Norm DIN EN 61496-1) erlauben einen barrierefreien und kontaktunabhängigen Zugang zum Kollaborationsraum. Zu den bekanntesten Vertretern im Bereich der BWS, die nach dem aktiven opto-elektronischen Prinzip arbeiten (AOPD) (Norm DIN EN 61496-2) gehören Lichtschranken, Lichtgitter bzw. Lichtvorhänge. Mit Hilfe dieser Sicherheitstechnik kann der Zugriff/Zutritt zum Gefahrenbereich zuverlässig überwacht und deren Feststellung zum Stillsetzen der Anlage bzw. Gefahrenreduktion genutzt werden. Für eine 2-dimensionale Überwachung großflächiger Bereiche eignen sich insbesondere Laserscanner. Diese gehören zur Klasse der Systeme, die nach dem aktiven opto-elektronischen Prinzip arbeiten und auf diffuse Reflexion reagieren (AOPDDR) (Vornorm DIN EN IEC 61496-3). Laserscanner vermessen dabei zyklisch den Erfassungsbereich und signalisieren den Eintritt von Objekten in Schutzräume. Aktuelle Modelle erlauben die Konfiguration von bis zu 32 Schutzfeldern, denen wiederum bis zu zwei Warnfelder zugeordnet werden können (Keyence Corporation AG 2022). Neben der Verwendung als ortsfeste Sicherheitstechnik zur vertikalen oder horizontalen Überwachung werden Laserscanner üblicherweise auch zur ortsflexiblen Bereichsüberwachung (Annäherungsdetektion von Objekten/ Menschen) an mobilen Systemen (z. B. fahrerlose Transportsysteme) eingesetzt.

Neueste Entwicklungen auf dem Gebiet der BWS basieren jedoch auf bildverarbeitenden Kamerasystemen (VBPD) (Technischer Report IEC/TR 61496-4). Von der Firma Sick (Sick AG 2018) existiert dazu ein Kamerasystem mit eigener Beleuchtung und passivem Referenzmuster (VBPDPP) (Technische Spezifikation DIN IEC/TS 61496-4-2), welches zur 2-dimensionalen Zugriffsüberwachung von Gefahrenbereichen eingesetzt werden kann. Das erste sichere Kamerasystem *SafetyEye* zur Überwachung 3-dimensionaler Raumbereiche stammt von der Firma Pilz (Hausmann und Hader 2007; Pilz GmbH & Co. KG 2022). Dieses basiert auf einem

stereoskopischen Verfahren (VBPDS) (Technische Spezifikation DIN IEC/TS 61496-4-3) zur 3D-Erfassung des Sichtbereiches. Die zu überwachenden Raumbereiche können per Software konfiguriert und während des Betriebes aktiviert bzw. deaktiviert werden. Von (Karagiannis et al. 2022) wurde das SafetyEye zur adaptiven Arbeitsraumüberwachung auf Basis von 16 vorkonfigurierten Schutzräumen eingesetzt, wobei die Schutzräume in Abhängigkeit der Roboterbewegung geschaltet werden.

Neben den genannten opto-elektronischen Systemen, die zur globalen Absicherung des Arbeitsraumes in der Umgebung des Roboters installiert werden, gibt es weitere Entwicklungen bzw. Lösungsansätze, die direkt am Roboter angebracht werden und potentielle Kollisionen mit dem Roboter im Voraus erkennen. Diese *lokalen Schutzeinrichtungen* überwachen die unmittelbare Umgebung des Roboters hinsichtlich der Annäherung von Objekten. Hierbei kommen z. B. Ultraschallsensoren (Ostermann 2014), Kapazitivsensoren (Schlegl et al. 2013), Distanzsensoren (Buizza Avanzini et al. 2014) oder Radarsensoren (Abdelawwad et al. 2020) zum Einsatz. Derartige Lösungen sind jedoch sehr stark vom jeweiligen Robotertyp abhängig und prinzipiell nur für kleine bzw. mittelgroße Industrieroboter praktikabel. Ein Nachteil dieser Ansätze liegt außerdem darin, dass Greifer und Werkstücke am Roboter nicht im Sicherheitskonzept inbegriffen sind und somit durch zusätzliche Maßnahmen sicherheitstechnisch betrachtet werden müssen. Hierzu existieren wiederum spezifische Technologien, die beispielsweise auf Basis von Ultraschall (Mayser GmbH & Co KG 2019b) Annäherungen des Menschen an das Werkzeug detektieren.

Der Einsatz von Kamertechnik als optische, bildverarbeitende Schutzeinrichtung (VBP) bietet sich aufgrund vielfältiger Vorteile wie hohe Auflösung, hohe Frameraten sowie leistungsfähige Verarbeitungs- und Auswertemöglichkeiten an (siehe Abschnitt 3.3). Die hohe technische Komplexität derartiger Systeme birgt jedoch auch eine entsprechende Fehler- und Ausfallwahrscheinlichkeit, die im Eintrittsfall zu gesundheitlichen Schäden oder gar zum Tod des Menschen führen kann. Der Aufwand zur Erfüllung der Anforderungen für die Erreichung eines Sicherheitsniveaus von $PL = d$ sind demnach sehr hoch und beziehen sich u. a. auf folgende Aspekte (vgl. Anhang B):

- Methoden zur zuverlässigen Fehler- und Ausfalldetektion (z. B. Bauteilversagen)
- Systemverhalten bei Umwelteinflüssen:
 - Fremdlicht (z. B. Blitzlicht)
 - Verschmutzungen der Sensorik

Für die Umsetzung einer funktionalen Sicherheit der kamerabasierten Schutzeinrichtung stellt sich grundsätzlich die Frage: Gibt es Umstände (Ausfälle, Fehler, Umwelteinflüsse, etc.), die dazu führen, dass die Schutzeinrichtung ihre Sicherheitsfunktion (Überwachung der Menschannäherung an den Roboter) nicht mehr (korrekt) ausführen kann? Liegen derartige Umstände vor, müssen diese von der Schutzeinrichtung rechtzeitig erkannt und signalisiert werden (Hauke et al. 2017). Dies führt unmittelbar zu einer weiteren Herausforderung: Eine

Schutzeinrichtung, die z. B. aufgrund äußerer Einflüsse (Fremdlicht) die Sicherheitsfunktionalität nicht aufrechterhalten kann und somit ihren Überwachungsbetrieb und damit einhergehend den Roboterbetrieb deaktiviert, wird von Unternehmen aufgrund der resultierenden Stillstandzeiten nicht eingesetzt werden. Aus diesem Grund werden an Schutzeinrichtungen neben der funktionalen Sicherheit auch Anforderungen an die Verfügbarkeit gestellt. Für kamerabasierte Systeme sind dies insbesondere Anforderungen im Umgang mit Fremdlichteinflüssen und Verschmutzungen während des Überwachungsbetriebes (Heinke und Bömer 2009). Eine Übersicht zu weiteren Maßnahmen und Verfahren zur Umsetzung der funktionalen Sicherheit und Verfügbarkeit findet sich in Anhang B.

2.3.2 Bestimmung des erreichten Sicherheitsniveaus

Bei der Entwicklung und Umsetzung einer neuen Technologie zur Gewährleistung der Personensicherheit existieren noch keine technischen Beschreibungen, Handlungsanweisungen oder Normen, um ein gewisses Sicherheitsniveau (PL) zu erreichen bzw. nachzuweisen. Zur Bestimmung des erreichten Performance Level dieser neuen Schutzeinrichtung können jedoch spezifische Kenngrößen herangezogen werden (Norm DIN EN ISO 13849-1). In Anhang A.3 (Abbildung 83) wird der Zusammenhang und Einfluss der Kenngrößen auf die Bewertung des resultierenden Sicherheitsniveaus der Schutzeinrichtung dargestellt und im Folgenden kurz erläutert:

Ausfall in Folge gemeinsamer Ursache Ein gefahrbringender Ausfall in Folge einer gemeinsamen Ursache (*Common Cause Failure - CCF*) bezieht sich auf systematische Ausfälle von Systemen der Kategorien 2, 3 oder 4 (mehrkanalig oder Verwendung einer Testeinrichtung). Bspw. können beide Kanäle eines redundanten Systems ausfallen, was auf eine einzige Ursache (z. B. ungünstige Umgebungsbedingungen) zurückzuführen ist. Die Bewertung des Systems hinsichtlich eines CCF geschieht anhand einer Checkliste mit 8 Maßnahmen und entsprechender Punktevergabe.

Diagnosedeckungsgrad Die Möglichkeit zur Selbstüberwachung oder Durchführung von Selbsttests zur Aufdeckung von Fehlern in einem sicherheitsbezogenen System wird durch den Diagnosedeckungsgrad (*Diagnostic Coverage - DC*) beschrieben. Dieser gibt den Anteil an erkannten gefahrbringenden Ausfällen an allen denkbaren gefahrbringenden Ausfällen an. Eine sehr gute Aufdeckung von Fehlern kann beispielsweise die schlechte Zuverlässigkeit einer Komponente des Systems kompensieren.

Mittlere Zeit bis zu einem gefahrbringenden Ausfall Bei der mittleren Zeit bis zu einem gefahrbringenden Ausfall (*Mean Time to Dangerous Failure - MTTF_D*) handelt es sich um den Erwartungswert der mittleren Lebensdauer bis zum Ausfall oder Defekt eines Bauteils, eines Kanals oder des gesamten Systems. Die Gesamt-MTTF_D ergibt sich dann unter Berücksichtigung der MTTF_D aller zugehörigen Einzelkomponenten.

Kategorie Die Struktur bzw. Architektur eines sicherheitsbezogenen Systems kann in Verbindung mit der Zuverlässigkeit der verwendeten Komponenten in Form einer Kategorie

(*Category*) klassifiziert werden. Diese Kategorien repräsentieren den Grad an Widerstandsfähigkeit gegenüber Fehlern und das Verhalten im Fehlerfall. Die Experten des IFA sagen dazu weiter (Hauke et al. 2017):

„Für die Bestimmung der Ausfallwahrscheinlichkeit und des PL bilden die Kategorien deshalb das Rückgrat, das durch die Bauteilzuverlässigkeit ($MTTF_D$), die Tests (DC_{avg}) und die Widerstandsfähigkeit gegenüber Ausfällen infolge gemeinsamer Ursache (CCF) komplettiert wird.“

Mit diesen Kenngrößen (CCF, DC_{avg} , $MTTF_D$, Kategorie) kann schließlich der daraus resultierende PL für die realisierte Schutzeinrichtung mit Hilfe des vereinfachten Verfahrens auf Basis eines Diagramms (siehe Abbildung 83, oben) bestimmt werden.

2.4 Ableitung der Anforderungen an BWS

Auf Basis der Ausführungen in den vorangegangenen Kapiteln werden im Folgenden die Anforderungen an eine berührunglos wirkende Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* abgeleitet. Darüber hinaus werden für jede Anforderung ein Kriterium oder mehrere Kriterien zur Bewertung der Anforderungserfüllung definiert.

Anforderung 1: Ganzheitliche sensorische Arbeitsraumerfassung

Nicht-trennende Schutzeinrichtungen können prinzipiell in *globale* und *lokale* Sensorsysteme unterteilt werden. Lokale Sensorsysteme werden direkt am Roboter montiert, um die unmittelbare Umgebung zu erfassen (siehe Abschnitt 2.3.1). Globale Sensorsysteme erlauben hingegen eine ganzheitliche Erfassung des Robotersystems bzw. des gemeinsam genutzten Arbeitsraumes (Kollaborationsraum) aufgrund einer Installation in der Umgebung.

Tabelle 5: Schema zur qualitativen Bewertung trennender und nicht-trennender (lokaler/globaler) Schutzeinrichtungen. 0 – Kriterium nicht erfüllt; × – Kriterium erfüllt.

		Schutzeinrichtungen		
		Trennend	Nicht-trennend	
			lokal	global
Kriterium	Berücksichtigung aller Gefährdungen des Robotersystems inkl. Werkzeugen, Werkstücken und zusätzlicher Gefährdungen im Kollaborationsraum	×	0	×
	Barrierefreier Zugang (keine physische Trennung) zum gemeinsam genutzten Arbeitsraum	0	×	×

Wie in Tabelle 5 ersichtlich eignen sich globale, nicht-trennende Schutzeinrichtungen für die Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*. Daraus folgt:

- *Ganzheitliche (globale), sensorische Erfassung des gemeinsam genutzten Arbeitsraumes (Kollaborationsraum) mit dem Ziel der Berücksichtigung des gesamten Robotersystems inklusive Werkzeugen, Werkstücken und zusätzlichen Maschinen- und Anlagenkomponenten*

Kriterium – Ganzheitlich Das Kriterium ist erfüllt, wenn der gemeinsam genutzte Arbeitsraum von Mensch und Roboter von der Technologie vollumfänglich sensorisch erfassbar ist. Wird nur ein Teilbereich von der Technologie erfasst, fällt die Bewertung entsprechend schlechter aus. Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 6.

Tabelle 6: Bewertungsschema für das Kriterium "Ganzheitlich"

Symbol	Bedeutung
–	nicht erfüllt
+	Arbeitsraum wird teilweise erfasst
++	Arbeitsraum wird ganzheitlich erfasst

Anforderung 2: Minimale Mindestabstände

Eine zweckmäßige Zusammenarbeit von Mensch und Roboter ist nur möglich, wenn die einzuhaltenden Mindestabstände nicht zu groß werden. Der Platzbedarf bei

MRK-Arbeitsplätzen ist für die Effizienz und Ergonomie der Arbeitsprozesse wesentlich. Zur Berechnung des einzuhaltenden Mindestabstandes sind dabei folgende Systemeigenschaften maßgeblich (siehe Abschnitt 2.2):

- Reaktionszeit T_r
- Zuschlag C

Tabelle 7: Zuschlag C in [m] in Abhängigkeit der Annäherung des Menschen zur Schutzfeldausrichtung und Detektionsauflösung d in [mm] der Schutzeinrichtung.

Annäherung des Menschen zur Ausrichtung des Schutzfeldes	parallel	0.85 - 1.20 m	
	orthogonal	0.0 - 0.208 m	0.85 m
		$d \leq 40 \text{ mm}$	$d > 40 \text{ mm}$
		Detektionsauflösung d	

Wie in Tabelle 7 ersichtlich, führt eine parallele Ausrichtung des Schutzfeldes dazu, dass der Zuschlag und die entsprechenden einzuhaltenden Mindestabstände sehr groß und die resultierenden, für den Menschen nutzbaren Bereiche sehr klein werden bzw. gar nicht vorhanden sind. Ähnlich verhält es sich bei orthogonaler Schutzfeldausrichtung und einer Detektionsauflösung von Objekten mit einem Durchmesser von über 40 Millimeter. In diesen Fällen wäre eine zweckmäßige Umsetzung eines MRK-Arbeitsplatzes nicht möglich. Daraus folgt:

- Umsetzung einer Schutzeinrichtung mit orthogonaler Anordnung bzgl. der Annäherungsrichtung des Menschen (Zutritts- bzw. Zugriffsüberwachung) zur Minimierung des Zuschlages C
- Minimierung des einzuhaltenden Mindestabstandes durch eine Detektionsauflösung mit dem Ziel einer Fingerdetektion ($d \leq 14 \text{ mm}$)
- Minimierung der Reaktionszeit T_r zur Gewährleistung minimaler Mindestabstände

Kriterium 1 – Detektionsauflösung Das Kriterium ist erfüllt, wenn die Schutzeinrichtung eine Zutrittsüberwachung umsetzt und eine Detektionsauflösung $d \leq 14 \text{ mm}$ aufweist (Fingerauflösung). Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 8.

Tabelle 8: Bewertungsschema für das Kriterium "Detektionsauflösung"

Symbol	Bedeutung
-	Bereichsüberwachung oder $d > 40 \text{ mm}$ (Körperdetektion)
+	$14 \text{ mm} < d \leq 40 \text{ mm}$ (Armdetektion)
++	$d \leq 14 \text{ mm}$ (Fingerdetektion)

Kriterium 2 – Reaktionszeit Eine geringe Reaktionszeit resultiert in geringen Mindestabständen. Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 9.

Tabelle 9: Bewertungsschema für das Kriterium "Reaktionszeit"

Symbol	Bedeutung
-	$100 \text{ ms} < T_r$
+	$50 \text{ ms} < T_r \leq 100 \text{ ms}$
++	$T_r \leq 50 \text{ ms}$

Anforderung 3: Funktionale Sicherheit

Da die Überwachung des einzuhaltenden Abstandes zwischen Mensch und Roboter im Fehlerfall direkte Auswirkungen auf die Gesundheit des Menschen haben kann, stellen die Normen hohe Anforderungen an Schutzeinrichtungen mit dem Einsatzzweck der Personensicherheit (siehe Anhang A.1 und A.2, Abschnitt 2.3). Aus diesem Grund soll das zu konzipierende Sensorsystem auf Basis etablierter Sicherheitsprinzipien mit dem Ziel der prinzipiellen Erfüllung der normativen Anforderungen umgesetzt werden. Daraus folgt:

- *Adaption eines bewährten Funktionsprinzips im Bereich der industriellen Sicherheitstechnik*

Kriterium – Zertifizierbarkeit Eine Technologie gilt als zertifizierbar, wenn fundierte Kenntnisse zum Funktionsprinzip und/oder dem erreichbaren Sicherheitsniveau (PL) vorliegen. Existieren für eine Technologie keine Informationen bezüglich einer Zertifizierbarkeit, wird auf die Kenntnis bereits bestehender und vergleichbarer zertifizierter Technologien zurückgegriffen. Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas Tabelle 10.

Tabelle 10: Bewertungsschema für das Kriterium "Zertifizierbarkeit"

Symbol	Bedeutung
-	Keine Informationen verfügbar
+	Vergleichbare zertifizierte Technologie mit PL = d liegt vor
++	Kenntnisse zum Funktionsprinzip und/oder Sicherheitsniveau PL = d liegen vor

Anforderung 4: Maximale Verfügbarkeit

Die Einsatzmöglichkeiten optischer Sensorsysteme werden stark von den umgebenden Verhältnissen geprägt. Fehldetektionen des Systems aufgrund plötzlicher Veränderungen der Lichtverhältnisse können einen Stopp des Robotersystems nach sich ziehen, wobei die vermeintliche Detektion einer nicht existenten Unterschreitung des Sicherheitsabstandes schlimmstenfalls die gesamte Produktionsanlage zum Stillstand bringen kann. Aus diesem Grund sind entsprechende Anforderungen zum Umgang mit Umgebungseinflüssen (Fremdlicht, Blitzlicht, etc.) vom Sensorsystem zu erfüllen (siehe Abschnitt 2.3).

Darüber hinaus wird die Verfügbarkeit auch durch die Häufigkeit unnötiger bzw. unbeabsichtigter Verletzungen der einzuhaltenden Sicherheitsabstände durch den Menschen beeinflusst. Zu deren Vermeidung werden bei statischen Sicherheitsbereichen bspw. Markierungen in der Umgebung angebracht (*hinweisende Sicherheitstechnik*, siehe Anhang A.2), um die Grenzen der Annäherung für den Menschen zu verdeutlichen. Bei der Umsetzung dynamischer Sicherheitsabstände und sich demnach ständig ändernden Grenzen der für den Menschen nutzbaren Bereiche, sind Hinweise darauf von noch größerer Relevanz.

Des Weiteren soll das System maximal unabhängig von der Oberflächenbeschaffenheit bzw. speziellen Merkmalen (z. B. künstliche Marken, spezifische Textur, Form, etc.) zur Erfassung von Objekten (Mensch) und der darauf basierenden Feststellung von Unterschreitungen des Mindestabstandes ausgelegt sein.

Da eine geringe Verfügbarkeit zu häufigen Ausfällen bzw. Stillsetzen des Roboters bzw. Anlage kommt, werden derartige Schutzeinrichtungen zur Aufrechterhaltung des Produktionsbetriebes oftmals manipuliert oder gar stillgelegt. Die Sicherheit des Menschen kann dann nicht mehr gewährleistet werden. Zusammenfassend folgt daraus:

- *Robuste Objekterfassung unabhängig von deren Beschaffenheit und spezifischen Merkmalen*
- *Maximale Unabhängigkeit gegenüber Fremdlichtbedingungen und dadurch Minimierung des Einflusses von Störgrößen (z. B. Blitzlicht) auf die Detektionsleistung*
- *Sichtbarkeit der einzuhaltenden Sicherheitsabstände zur Vermeidung unnötiger Sicherheitsbereichsverletzungen*

Kriterium 1 – Robustheit Die Robustheit der Technologie bezieht sich auf das Detektionsvermögen bezüglich Objekten mit verschiedensten Oberflächeneigenschaften. Eine robuste Objektdetektion ist gegeben, wenn stark reflektierende, stark absorbierende, texturierte, farbige, einfarbig homogene oder Kombinationen davon die Detektionsleistung nicht negativ beeinflussen bzw. einschränken. Transparente Objekte stellen einen Sonderfall dar und werden hier nicht berücksichtigt. Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 11.

Tabelle 11: Bewertungsschema für das Kriterium "Robustheit"

Symbol	Bedeutung
–	Direkte Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit
+	Geringe (teilweise) Abhängigkeit von der Oberflächenbeschaffenheit
++	Detektion unabhängig von Oberflächenbeschaffenheit

Kriterium 2 – Fremdlichtunabhängig Die umgebenden Beleuchtungsverhältnisse können die sensorische Erfassung von Objekten unter Umständen negativ beeinflussen. Eine Technologie gilt als fremdlichtunabhängig, wenn ambiente und hoch-dynamische Fremdlichtänderungen den Überwachungsbetrieb nicht negativ beeinflussen. Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 12.

Tabelle 12: Bewertungsschema für das Kriterium "Fremdlichtunabhängig"

Symbol	Bedeutung
–	Direkte Abhängigkeit von Fremdlichtbedingungen
+	Geringe Abhängigkeit von Fremdlichtbedingungen
++	Unabhängig von Fremdlichtbedingungen

Kriterium 3 – Sichtbarkeit Die Sichtbarkeit der einzuhaltenden Mindestabstände direkt im gemeinsam genutzten Arbeitsraum stellt einen wesentlichen Aspekt bei der Maximierung der Verfügbarkeit dar. Die Darstellung der aktuellen Grenzen der Mindestabstände soll dabei vom Sensorsystem selbst realisiert werden. Eine bestmögliche Bewertung der Technologie erfolgt, wenn neben den einzuhaltenden Mindestabständen auch weitere unterstützende Informationen wie Zielposition der Roboterbewegung dargestellt werden können. Die Anzeige der Informationen auf zusätzlichen Monitoren, Projektoren oder AR-Brillen ist generell möglich und wird als Lösung nicht weiter berücksichtigt. Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 13.

Table 13: Bewertungsschema für das Kriterium "Sichtbarkeit"

Symbol	Bedeutung
-	Keine Darstellung / statische Markierungen / Zusätzliche Hardware
+	Dynamische Darstellung der Grenzen der einzuhaltenden Mindestabstände
++	Dynamische Darstellung der Grenzen der einzuhaltenden Mindestabstände und Visualisierung weiterer Informationen/ Hinweise

Anforderung 5: Dynamische Sicherheitsabstände

Das Sensorsystem bzw. Verfahren der Schutzeinrichtung muss des Weiteren in der Lage sein, die einzuhaltenden Mindestabstände entsprechend der Abstandsformel (siehe Abschnitt 2.2.1) während des Betriebes dynamisch zu bestimmen und zu überwachen. Dies beinhaltet die Berücksichtigung der aktuellen Roboterkonfiguration (Gelenkstellungen, -geschwindigkeiten) zu jedem Zeitpunkt. Daraus folgt:

- *Dynamische Bestimmung und Überwachung des einzuhaltenden Mindestabstandes gemäß Abstandsformel der MRK-Methode „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ nach ISO/TS 15066.*

Kriterium – Dynamik Dieses Kriterium beschreibt die Möglichkeit einer permanenten Anpassung der einzuhaltenden Mindestabstände in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration (gemäß Abstandsformel ISO/TS 15066). Abstufungen von diesem Idealzustand stellen vorkonfigurierte statische Schutzzonen dar, die während des Betriebes aktiviert oder deaktiviert werden können. Die Bewertung erfolgt anhand des Schemas in Tabelle 14.

Table 14: Bewertungsschema für das Kriterium "Dynamik"

Symbol	Bedeutung
-	Vorkonfigurierte statische Schutzzonen
+	Adaptive Aktivierung/Deaktivierung von vorkonfigurierten Schutzzonen
++	Dynamische Bestimmung und Überwachung der Mindestabstände

3 Stand der Wissenschaft

Die sensorische Erfassung von Mensch und/oder Roboter zur Gewährleistung der Personensicherheit stellt seit vielen Jahren ein aktuelles Forschungsgebiet dar. Dies liegt vor allem an den derzeit am Markt verfügbaren Sicherheitstechnologien, die nur unzureichend die heutigen Anforderungen an intelligente, industrielle Produktionsumgebungen mit einer flexiblen Zusammenarbeit von Mensch und Roboter erfüllen. Dieser hohe Bedarf an neuartigen und innovativen Lösungen resultiert in vielfältigen neuen Ansätzen aus den Entwicklungs- und Forschungseinrichtungen im wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Bereich. Zusammenfassungen dieser Ansätze und Technologien werden unter anderem von (Siciliano und Khatib 2016; Lasota et al. 2017; Robla-Gomez et al. 2017; Villani et al. 2018; Halme et al. 2018) gegeben.

Mit der Markteinführung einer Vielzahl an kostengünstigen Klein- bzw. Leichtbaurobotern wie (Universal Robots 2019; KUKA AG 2018) sowie der seit einigen Jahren zur Verfügung stehenden performanten 2D- oder 3D-Sensoren, z. B. (Teledyne FLIR LLC; ASUSTek Computer Inc; Intel Corporation; PMD Technologies AG) haben die Aktivitäten in diesem Bereich noch einmal stark zugenommen.

Aufgrund der Vielfältigkeit der existierenden Ansätze und im Hinblick auf den Forschungsschwerpunkt der vorliegenden Arbeit, wurde der aktuelle Stand der Wissenschaft anhand folgender Anforderungen kanalisiert (siehe Abbildung 10):

- ganzheitliche sensorische Arbeitsraumerfassung (Anforderung 1)
- dynamische Sicherheitsabstände (Anforderung 5)

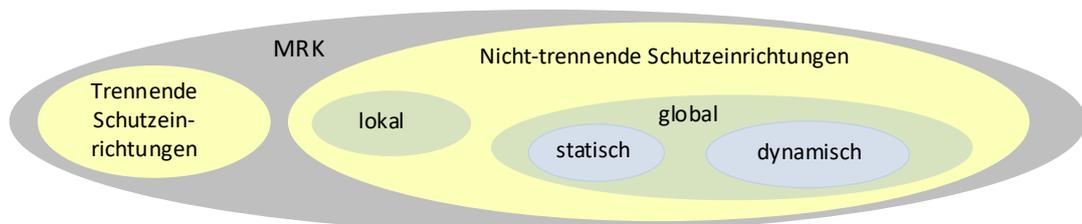


Abbildung 10: Venn-Diagramm: Kanalisierung des aktuellen Standes der Wissenschaft hinsichtlich globaler, nicht-trennender Schutzeinrichtungen mit dynamischen Sicherheitsabständen.

In Abschnitt 3.1 werden zunächst Ansätze und Entwicklungen aus dem Stand der Wissenschaft und Technik vorgestellt. Anschließend werden diese zum einen hinsichtlich der Strategien zur Einhaltung von Mindestabständen (Abschnitt 3.2) und zum anderen bezüglich der zugrundeliegenden Technologien (Abschnitt 3.3) klassifiziert. Es folgt eine Bewertung der Technologien (Abschnitt 3.4) auf Basis der abgeleiteten Anforderungen und entsprechender Bewertungskriterien aus Abschnitt 2.4.

Dies stellt die Basis zur Ableitung der Forschungsfrage und Einordnung der vorliegenden Arbeit in den Stand der Wissenschaft in Abschnitt 4.1 dar. Darauf aufbauend wird der weitere Handlungsbedarf in Form von Schwerpunkten in Abschnitt 4.2 konkretisiert.

3.1 Beschreibung aktueller Ansätze und Entwicklungen

Die Autoren (Ebert und Henrich 2002) präsentieren ein Verfahren für die sichere MRK, bei dem unter Verwendung einer im Raum verteilten Anordnung von Kameras potentielle Kollisionen zwischen Roboter und Objekten detektiert werden. Hierzu ist keine 3D-Repräsentation der Szene notwendig. Das Verfahren (siehe Abbildung 11) beruht darauf, dass zunächst die bekannte, statische Umgebung als Hintergrund-Information für jede Kamera abgelegt wird (Roboter ist dynamisches Objekt und wird nicht berücksichtigt). Während des Betriebes werden die aktuellen Bild-Informationen der Kameras mit den hinterlegten Hintergrund-Informationen verglichen (Differenzbild-Verfahren) und bei einer Abweichung als unbekannte Objekte interpretiert. Da die Robotergeometrie und die aktuelle Roboterkonfiguration bekannt sind, können die entsprechenden Bildbereiche als bekanntes Objekt (Roboter) im Kamerabild klassifiziert werden. Dieses Verfahren wurde hinsichtlich der Berücksichtigung von verdeckten Objekten von (Gecks und Henrich 2006) und (Henrich und Gecks 2008) weiterentwickelt. Auf Basis der klassifizierten unbekannt Objekte (z. B. Mensch), bekannten Objekte (z. B. Roboter) und Hintergrund-Objekten (z. B. Wände, Tische) können die zukünftigen eingenommenen Roboterkonfigurationen hinsichtlich einer möglichen Kollision mit unbekannt Objekten ausgewertet werden. In (Kuhn und Henrich 2007) wurde zusätzlich ein Verfahren zur Bestimmung der Distanzen zwischen den unbekannt und bekannten Objekten vorgestellt.

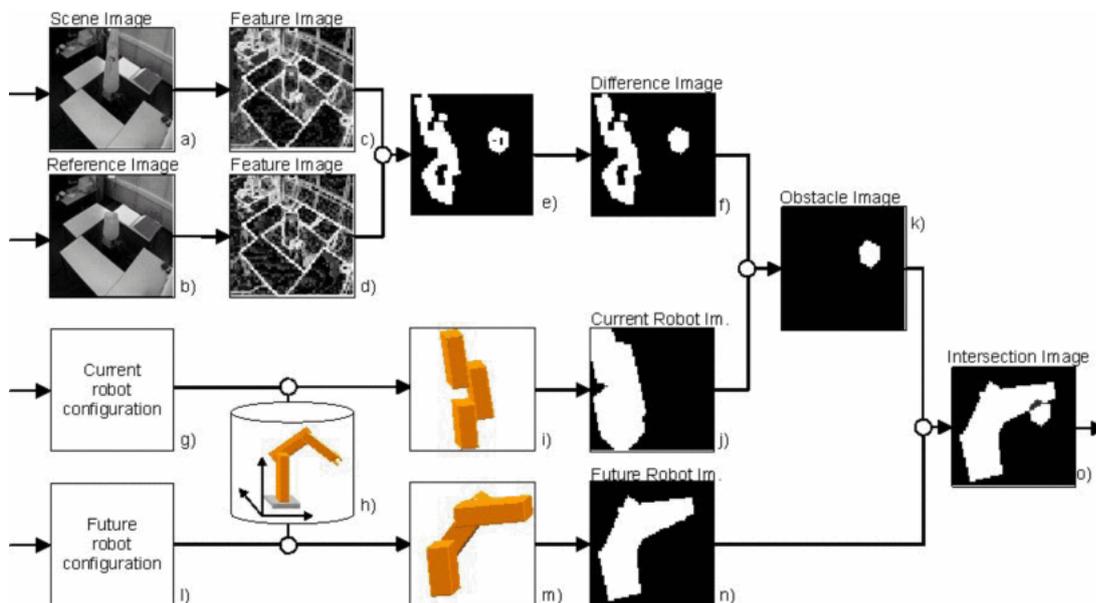


Abbildung 11: Verfahren zur Detektion von Kollisionen zwischen Roboter und unbekannt Objekten aus Perspektive einer Kamera. Aus (Henrich und Gecks 2008). Copyright © 2008, IEEE.

In (Spingler und Thiernemann 2002; Thiernemann 2003; Kruger et al. 2004) wird ein Kamerasystem und Verfahren für die Mensch-Roboter-Kooperation präsentiert, welches mit einem SCARA-Roboter in der Kleinteilemontage konzipiert und umgesetzt wurde. Dabei dienen drei Farbkameras über dem Kooperationsarbeitsplatz dazu den Menschen (Hände und Hals) sowie den Roboter zu detektieren. Der Roboter wird in den Kamerabildern aufgrund

spezifischer Marken, die auf dem Roboterarm aufgebracht wurden, erfasst. Die Identifikation des Menschen basiert zunächst darauf, dass aufgrund einer Bewegungsanalyse alle sich zeitlich ändernden Bildbereiche bestimmt werden, welche dann den Menschen, den Roboter oder das Werkstück repräsentieren. Die Klassifikation des Menschen bzw. der Körperteile basiert auf deren charakteristischen Merkmalen (Farbe, Textur) in den Kamerabildern. Um die Abstände zwischen Körperteilen und Roboter zu bestimmen, bilden die Kameras ein Stereosystem zur Berechnung der entsprechenden 3D-Positionen. In Abhängigkeit der aktuellen Abstände dieser Körperteile zum Roboter wird die Geschwindigkeit des Roboters entsprechend angepasst. Die Betrachtung des Systemverhaltens bei einer Verdeckung der Körperteile bzw. die Berücksichtigung weiterer Körperregionen wird nicht näher erläutert.

Zur Verbesserung der Erkennung menschlicher Haut haben (Sporrer et al. 2015) ein aktives Nahinfrarot (NIR)-Kamerasystem entwickelt, um Eindringungen des Menschen in den Arbeitsraum des Roboters zu detektieren. Vorteil dieses Systems stellt die Möglichkeit zur Unterscheidung zwischen Mensch und anderen Objekten (z. B. Werkstücke) dar, so dass in Abhängigkeit der Objekteindringung der Roboter angemessen reagieren kann. Eine verdeckungsfreie Sicht auf Kopf und Hände (Haut) wird dabei vorausgesetzt.

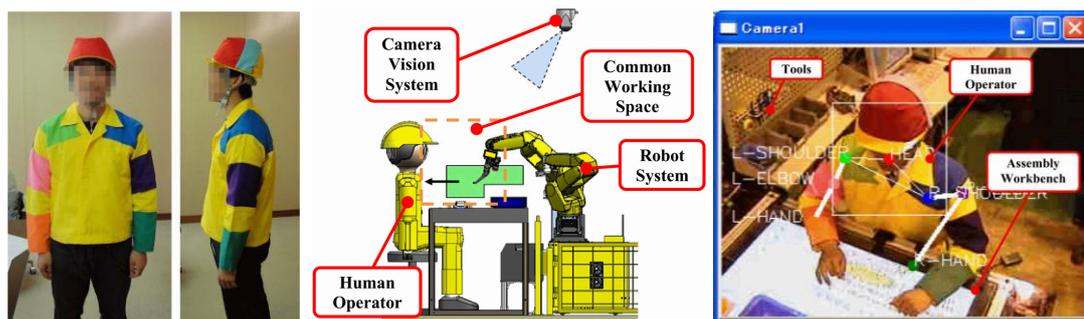


Abbildung 12: Links: Spezifische Kleidung zur Detektion des Werkers. Mitte: MRK-Arbeitsplatz. Rechts: Detektion des Menschen am Arbeitsplatz. Aus (Tan und Arai 2011). Copyright © 2011, IEEE.

Ebenfalls unter Verwendung von drei Farbkameras haben (Tan und Arai 2011) ein System zur Erkennung des Menschen an einem MRK-Arbeitsplatz umgesetzt. Dabei trägt der Mensch eine spezifische Jacke und Kopfbedeckung, wobei diese aus jeweils unterschiedlichen Farben an Unterarm, Oberarm, Schulter und Kopf besteht (siehe Abbildung 12, links). Auf Basis der Farbmerkmale werden die Positionen der Körperteile in den Kamerabildern zunächst grob bestimmt und unter Berücksichtigung eines Körpermodells weiter verfeinert (siehe Abbildung 12, rechts). Für die Bestimmung der 3D-Positionen fungieren die drei Kameras als Stereosystem. Das System befindet sich über dem Arbeitsplatz des Menschen, den er sich mit einem Industrieroboter zur Durchführung von Montage-Tätigkeiten teilt (siehe Abbildung 12, mittlere Darstellung). Weitere Informationen bezüglich der Bestimmung oder Einhaltung von Mindestabständen werden nicht gegeben.

Die Autoren (Fischer und Henrich 2009) beschreiben ein Verfahren unter Verwendung von mehreren Time-of-Flight-Kameras (ToF) zur Abstandsbestimmung zwischen Mensch und Roboter. Die Kameras beobachten dabei die Szene in Form einer Multi-View-Anordnung. Zur

Bestimmung der Abstände zwischen Roboter (oder weiteren gefahrbringenden Objekten) und unbekanntem Objekten (Menschen) müssen die 3D-Daten der Kameras hinsichtlich der Repräsentation eines bekannten oder unbekanntem Objekts ausgewertet werden. Auf Basis eines 3D-Modells der Umgebung und des Roboters werden all jene 3D-Daten nicht weiter berücksichtigt, welche der Umgebung oder dem Roboter zugeordnet werden können. Die resultierenden 3D-Daten repräsentieren unbekannte Objekte deren Geometrie durch Fusion der 3D-Daten aller Kameras verfeinert wird. Auf Basis der aktuellen Roboterkonfiguration und entsprechender Anpassung des Roboter-Modells können schließlich die Abstände zu den unbekanntem Objekten bestimmt und beispielsweise Geschwindigkeitsanpassungen der Roboterbewegung initiiert werden.

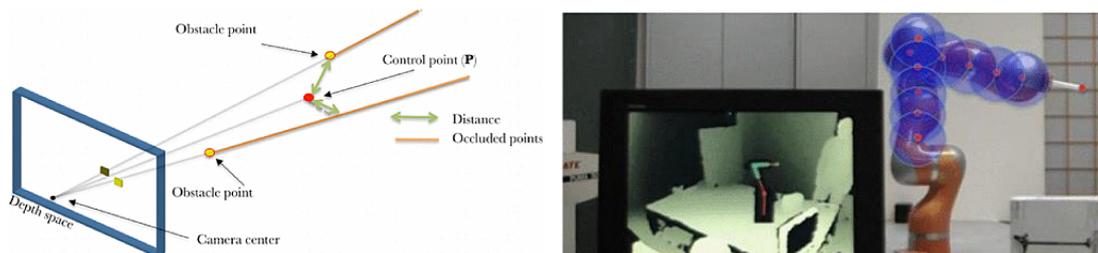


Abbildung 13: Links: Bestimmung der minimalen Distanz von Objekten zu einem Kontrollpunkt (Control Point) auf Basis eines Tiefenbildes. Rechts: KUKA LBR wird durch mehrere Kontrollpunkte zur Distanzbestimmung repräsentiert. Aus (Flacco et al. 2012). Copyright © 2012, IEEE.

Einen anderen Ansatz entwickelten (Flacco et al. 2012; Flacco et al. 2015), um Abstände zwischen Roboter und unbekanntem Objekten zu bestimmen. Statt der Verwendung der 3D-Messdaten eines Microsoft Kinect Sensors zur Bestimmung des Abstandes zwischen zwei Punkten, kann die minimale Distanz von Objekten in der Umgebung zu einem Kontrollpunkt (Control Point) auf Basis der Tiefeninformation für jedes Pixel im Tiefenbild berechnet werden (siehe Abbildung 13, links). Der verwendete KUKA Leichtbauroboter wird durch mehrere Kontrollpunkte in den Roboterachsen im 3D-Raum repräsentiert, welche permanent entsprechend der aktuellen Gelenkstellungen des Roboters aktualisiert werden (siehe Abbildung 13, rechts). Die Kontrollpunkte werden in das 2D-Tiefenbild des Kinect Sensors transformiert und der minimale Abstand zu allen Punkten in der Umgebung inklusive unbekanntem Objekten berechnet. Da auch der Roboter im Tiefenbild repräsentiert wird, werden dessen entsprechende Bildpunkte zuvor bestimmt, indem ein aktuelles 3D-Modell des Roboters in das 2D-Tiefenbild transformiert und die entsprechenden Bildbereiche bei der Distanzbestimmung nicht berücksichtigt werden. In (Flacco und Luca 2017) wurde das Verfahren hinsichtlich der Verwendung von mehreren Sensoren erweitert, um Verdeckungen auflösen zu können (z. B. Objekt vor dem Roboter). Mit zwei Kinect Sensoren konnten die minimalen Distanzen zu 9 Kontrollpunkten mit einer Frequenz von 300 Hz bestimmt werden.

Unter Einsatz einer Microsoft Kinect V2 präsentieren (Rosenstrauch et al. 2018) einen Ansatz zur Abstandsbestimmung und dynamischen Geschwindigkeitsänderung des Roboters. Dabei werden zunächst die Positionen und Orientierungen von Körperregionen bzw. -teilen auf Basis eines Skelett-Trackings bestimmt und parallel dazu die aktuellen Gelenkstellungen des

Roboters zur Berechnung der aktuellen Lage der Robotergelenke verwendet. Anschließend erfolgt die Bestimmung der Abstände zwischen allen Körperteilen und Robotergelenken. Die minimale Distanz wird schließlich zur Adaption der Robotergeschwindigkeit verwendet. Ob bzw. wie die Geschwindigkeiten und Bewegungsrichtungen von Mensch und Roboter berücksichtigt werden, wird von den Autoren nicht genannt. Mögliche Kollisionen des Roboters mit Objekten (z. B. vom Menschen getragen) werden nicht berücksichtigt. Auch Beeinträchtigungen des Skelett-Trackings aufgrund von Verdeckungen werden nicht näher betrachtet.

In (Shackleford et al. 2010; Szabo et al. 2012; Shackleford et al. 2012) wurde ein System auf Basis zweier 2D-Laserscanner zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* realisiert. Die Laserscanner sind in einer Höhe von 0.40 Meter horizontal über dem Boden auf gegenüberliegenden Seiten des abzusichernden Raumes montiert und erfassen statische und dynamische Objekte (z. B. Beine des Menschen). Mensch und Roboter werden durch ein bzw. mehrere Kreise als 2D-Repräsentationen modelliert, wobei der Radius der Kreise die mensch- bzw. roboterbezogenen Parameter der Abstandsformel aus ISO/TS 15066 beinhaltet. Unter Berücksichtigung der aktuellen Geschwindigkeiten des Roboters vergrößern bzw. verkleinern sich die Kreisradien, wobei ein Stopp der Roboterbewegung initiiert wird, sobald eine Überschneidung der Kreise von Mensch und Roboter und demzufolge eine Unterschreitung des einzuhaltenden Mindestabstandes stattfindet. Die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit des Menschen werden hierbei nicht berücksichtigt.

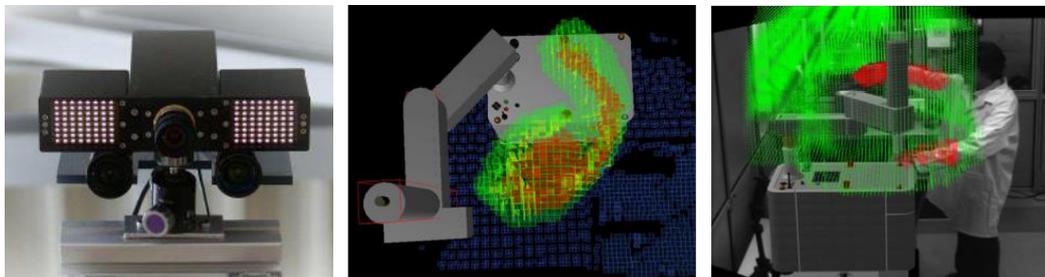


Abbildung 14: Links: Sensorsystem bestehend aus ToF- und Stereo-Kamera. Mitte: Sensorische Erfassung des Menschen. Rechts: Verletzung des Gefahrenraumes. Copyright © 2012, IFF.

Eine Kombination aus ToF-Kamera und Stereo-Kamerasystem wurde von (Walter et al. 2010) vorgestellt (Abbildung 14, links), welches zur Überwachung der Manipulator-Bewegungen einer mobilen Plattform eingesetzt wurde (Walter et al. 2011; Elkmann et al. 2012). An einem stationären, mit einem Menschen geteilten Arbeitsplatz erfasst das darüber angebrachte Sensorsystem die Bewegungen des Manipulators und die Annäherung des Menschen. Die Vorteile des Systems liegen darin, dass durch die Kombination der beiden Sensortechnologien die Schwächen des jeweils anderen teilweise kompensiert werden. Während die ToF-Kamera gute Messdaten bei homogenen, unstrukturierten Oberflächen liefert, bestimmt das Stereo-System an den kanten- und merkmalsintensiven Bildbereichen robuste 3D-Informationen. Vor der tatsächlichen Ausführung einer Manipulator-Bewegung wird diese zunächst geplant und virtuell, modellbasiert durchgeführt, um den potentiellen Gefahrenraum/Kollisionsraum zu bestimmen. Dieser Raum wird unter Berücksichtigung von Annäherungsgeschwindigkeiten und Bremszeiten vergrößert und durch eine Octree-basierte Struktur modelliert. Während

der Manipulatorbewegung werden die erfassten Sensordaten hinsichtlich bekannter Objekte in der Umgebung (Manipulator, Tisch, Wand, etc.) klassifiziert (Abbildung 14, mittlere Darstellung). Das Eindringen eines unbekanntes Objektes (z. B. Mensch) in den Gefahrenraum führt dann zu einem Bewegungsstopp des Manipulators (Abbildung 14, rechts).

Für die Absicherung der Bewegungen von Großraum- bzw. Schwerlastrobotern wurden von (Vogel et al. 2016) ortsauflösende Trittmatten verwendet, die auf Basis einer berührungsempfindlichen Sensorik die Positionen von Objekten bzw. des Menschen erfassen können. Dieser taktile Fußboden (Größe: $6.0\text{ m} \times 4.0\text{ m}$) besteht aus einer matrixförmigen Anordnung von Sensorzellen (Zellengröße: $0.125\text{ m} \times 0.125\text{ m}$), deren Messdaten mit einer Frequenz von etwa 30 Hz ausgelesen werden. Objekte ab einem Gewicht von 20 kg können damit robust erfasst werden. Diese Technologie wurde hinsichtlich der Generierung und Überwachung von dynamischen Schutzbereichen in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit des Roboters weiterentwickelt (ECHORD++ 2016; Vogel und Elkmann 2017).

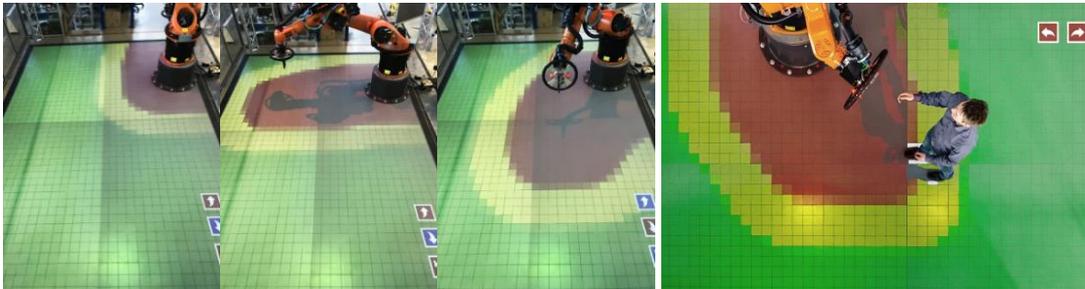


Abbildung 15: Absicherung eines Kooperationsarbeitsplatzes mit Schwerlastroboter durch Verwendung ortsauflösender Trittmatten. Dynamische Bestimmung und Visualisierung der Schutzzeiten (grün – begehbar, gelb – Geschwindigkeitsreduktion, rot – Bewegungsstopp). Aus (Vogel und Elkmann 2017), Copyright © 2017, ACM.

Um den Menschen auf die aktuellen Schutzraumgrenzen hinzuweisen wurde ein Visualisierungssystem mit vier Projektoren umgesetzt (siehe Abbildung 15). In Abhängigkeit des aktuell einzuhaltenden Mindestabstandes wird jede Sensorzelle hinsichtlich der Zugehörigkeit zu einer Schutzzone klassifiziert. Während die grüne Zone vom Menschen frei zugänglich ist, führt der Eintritt in die gelbe Warnzone zu einer Geschwindigkeitsreduzierung und das Betreten der roten, kritischen Zone zu einem Bewegungsstopp des Roboters.

Ebenfalls auf Basis eines taktilen Fußbodens haben (Najmaei und Kermani 2011) ein Verfahren zur Bestimmung der Position und Bewegungsrichtung des Menschen entwickelt. Dabei kommt ein neuronales Netz zur Anwendung, welches die zukünftigen Schritte (Fußpositionen) auf dem taktilen Fußboden prognostiziert. Weiterhin wurde eine Strategie zur Vermeidung von Kollisionen präsentiert, welche darauf beruht, dass eine Bewegungstrajektorie des Menschen abgeleitet wird. Auf Basis dieser Trajektorie wird das Kollisionsrisiko mit dem Roboter unter Berücksichtigung der geplanten Robotertrajektorie bestimmt und gegebenenfalls Anpassungen der Robotertrajektorie zur Kollisionsvermeidung vorgenommen.

Unter Verwendung von mehreren Microsoft Kinect Sensoren haben (Morato et al. 2014) ein Verfahren zur Detektion potentieller Kollisionen zwischen Mensch und Roboter umgesetzt. Dabei werden nicht die 3D-Daten des Sensors direkt verwendet, sondern ein aus 20 Gelenken

bestehendes Skelett-Modell. Dadurch kann die Datenmenge signifikant verringert und der Verarbeitungsaufwand reduziert werden. Morato et al. setzen vier Kinect Sensoren zur Erfassung des gesamten Mensch-Roboter-Kooperationsarbeitsplatzes ein. Auf Basis der Skelett-Schätzungen der Einzelsensoren wird zunächst ein optimiertes Skelett-Modell des Menschen bestimmt. In einer Simulationsumgebung (Physik-Engine) wird der Mensch entsprechend der Skelett-Schätzung als Kugel-Modell repräsentiert und der Roboter unter Berücksichtigung der aktuellen Gelenkstellungen abgebildet. Zur Detektion potentieller Kollisionen nimmt das Roboter-Modell auf Basis der geplanten Trajektorie die entsprechenden Konfigurationen bis drei Sekunden in die Zukunft an und prüft diese hinsichtlich einer Überschneidung mit dem Kugel-Modell des Menschen. Falls eine Kollision detektiert wird, stoppt der Roboter seine Bewegung.

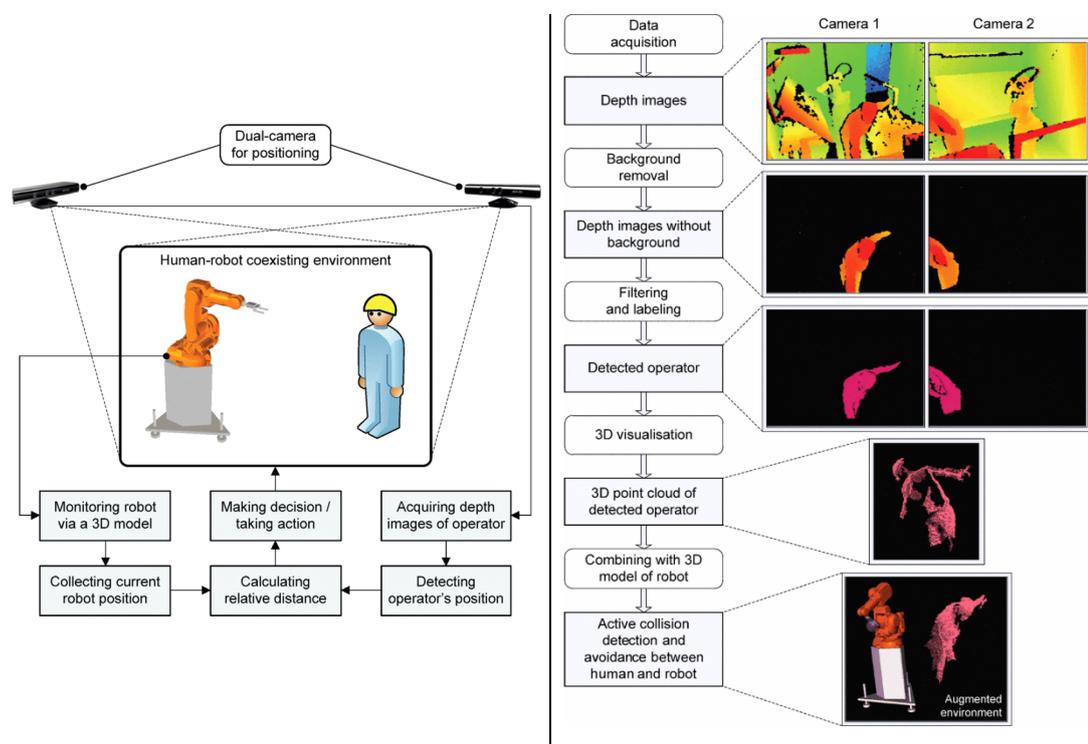


Abbildung 16: Links: System zur Absicherung der Koexistenz von Mensch und Roboter im gemeinsamen Arbeitsraum. Rechts: Verfahren zur Detektion von unbekannten Objekten (z. B. Mensch) auf Basis der 3D-Punktwolken von zwei Microsoft Kinects. Aus (Wang 2012), Copyright © 2012, IEEE.

Die Bestimmung des einzuhaltenden Abstandes zwischen Mensch und Roboter führt (Wang 2012; Schmidt und Wang 2014) in einem 3D-Modell der Umgebung durch. Darin sind alle bekannten Objekte der Umgebung modelliert. Neue, unbekannte Objekte (z. B. Mensch) werden von zwei Kinects 3-dimensional erfasst (siehe Abbildung 16, links). Um aus den Tiefenbildern der Sensoren die unbekannt Objekte zu bestimmen, wird das aktuelle Abbild der Umgebung mit einem zuvor aufgenommenen Referenz-Tiefenbild verglichen. All jene Tiefenwerte, welche von den Referenzwerten abweichen, werden als unbekannt Objekte angenommen. Anschließend werden Filter zur Verringerung des Rauschens angewendet und die 3D-Punkt wolken aus den resultierenden Tiefenwerten bestimmt. Die Punkt wolken der beiden Kinects werden anschließend fusioniert und der modellierten 3D-Umgebung hinzugefügt. Das Robotermodell wird entsprechend der aktuellen Gelenkstellungen angepasst und

der minimale Abstand zwischen Roboter und 3D-Punktwolke berechnet. Liegt dieser Abstand unterhalb eines spezifizierten Grenzwertes, führt der Roboter Ausweichbewegungen durch bzw. stoppt seine Bewegung (siehe Abbildung 16, rechts).

Das Unternehmen Veo Robotics (Veo Robotics) arbeitet aktuell an einem sicherheitszertifizierten Sensorsystem auf Basis von ToF-Kameras zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*. Hierbei kommen mehrere im Raum verteilte Sensoren zur 3-dimensionalen Erfassung des Arbeitsraumes zum Einsatz. Nach (Vu et al. 2019) kann der Überwachungsraum als Voxel-Struktur repräsentiert werden, wobei jedes Voxel als *frei*, *belegt* oder *unbekannt* entsprechend der aktuellen Sensordaten klassifiziert wird. Gemäß der Abstandsformel nach ISO/TS 15066 werden Schutzzonen um den Roboter herum (oder Teile davon) bestimmt, deren Voxel hinsichtlich des Eindringens von unbekanntem Objekten bzw. deren Sensorrepräsentation überwacht werden. Die Verletzung der äußeren Schutzzone führt dabei zu einer Verringerung der Robotergeschwindigkeit, wobei die Verletzung der inneren Schutzzone zu einem Bewegungsstopp des Roboters führt.

Einen ähnlichen Ansatz auf Basis einer ToF-Kamera zur Arbeitsraumüberwachung verfolgt (Ramer 2019) in ihrer Dissertationsschrift. Anstatt den Roboter zu stoppen, hat sie jedoch ein Bahnplanungsverfahren entwickelt, womit der Roboter zur Kollisionsvermeidung dem eingedungenen unbekanntem Objekt ausweichen kann.

Unter Verwendung von drei RGB-D Kameras in Kombination mit zwei Laserscannern haben (de Gea Fernández et al. 2017) ein System zur überwachten Zusammenarbeit von Menschen mit zwei Leichtbaurobotern entwickelt. Die Laserscanner erfassen zunächst die Annäherung des Menschen und aktivieren den Interaktions-Modus (reduzierte Robotergeschwindigkeit, Gesteneingabe möglich) bei Menschdetektion. Im Interaktions-Modus werden die 3D-Daten der RGB-D Kameras u. a. gefiltert, segmentiert und schließlich zur Vermeidung von Kollisionen mit dem Menschen verwendet.

Die Autoren (Degani und Tartaro 2019b) präsentieren in Ihrer Patentschrift ein Arbeitsraumüberwachungssystem auf Basis von Radartechnik. Innerhalb des Erfassungsbereiches kann eine Schutzzone definiert werden. Die Eindringung eines Objektes in diese Schutzzone wird vom Radarsystem detektiert und signalisiert. Das System kann somit als Zutrittsüberwachung zum Schutz vor Gefahren eingesetzt werden. Zur Erhöhung der Robustheit wurden in (Degani und Tartaro 2019a) Weiterentwicklungen des Radarsystems präsentiert, wobei bspw. stark reflektierende Targets in den Erfassungsbereich eingebracht werden. Eine Verminderung des von diesen Targets reflektierten Radarsignals lässt dann auf eine Objekteindringung schließen.

3.2 Strategien zur Abstandsüberwachung

Die Vermeidung von Kollisionen zwischen Mensch und Roboter verlangt bei SSM die Einhaltung eines Mindestabstandes. Die Methoden zur Überwachung bzw. Feststellung der

Unterschreitung eines einzuhaltenden Abstandes können auf zwei grundsätzliche Strategien zurückgeführt werden (siehe Abbildung 17). Diese sind die *Distanzüberwachung* und *Schutzraumüberwachung* (vgl. (Ebert 2003)).

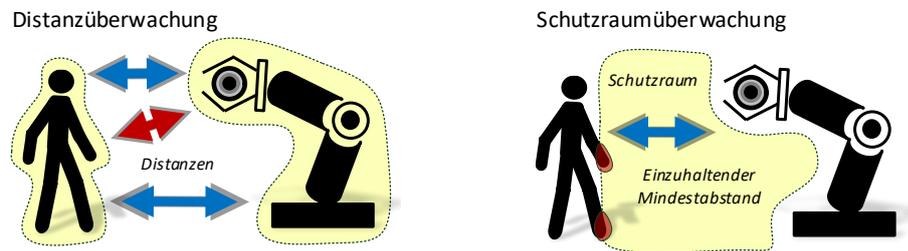


Abbildung 17: Strategien zur Einhaltung von Mindestabständen. Links: Bestimmung und Überprüfung von Distanzen/Abständen zwischen Mensch und Roboter. Rechts: Bestimmung und Überwachung eines Schutzraumes, welcher die einzuhaltenden Mindestabstände repräsentiert.

3.2.1 Distanzüberwachung

Bei der Distanzüberwachung werden die Abstände zwischen Roboter und unbekanntem Objekt/Menschen berechnet und mit dem entsprechenden einzuhaltenden Mindestabstand verglichen (siehe Abbildung 17, links). Die Herausforderung besteht darin, die Messdaten hinsichtlich der relevanten und zu schützenden Objekte/Menschen, sowie des Roboters zu klassifizieren, um schließlich die Abstände zwischen diesen bestimmen zu können.

Hierzu existieren zwei grundlegende Verfahren:

- **Detektion von spezifischen, bekannten Merkmalen**

Entwicklungen, die auf diesem Verfahren basieren, detektieren die relevanten Objekte in den Sensordaten aufgrund spezifischer Merkmale. Dies können definierte Texturen, Farben, Intensitätsmerkmale, Gradienten oder ähnliches sein. Die Sensordaten werden hinsichtlich derartiger Merkmale klassifiziert und die relevanten Objekte, Roboter oder Menschen identifiziert. Dies muss nicht den gesamten Menschen oder Roboter betreffen, sondern kann auch auf bestimmte Bereiche des Roboters (einzelne Gelenke) oder Körperteile/-regionen des Menschen beschränkt sein.

- **Detektion von Änderungen bzgl. Referenz-Information**

Eine weitere Möglichkeit zur Detektion der relevanten Objekte besteht darin, Referenz-Informationen der Umgebung aufzunehmen bzw. zu bestimmen, welche alle statischen Objekte der Umgebung (Wände, Tische, etc.) beinhaltet. Die sensorische Repräsentation von neuen Objekten bzw. Änderungen von Objekten (z. B. Position) in der Umgebung unterscheidet sich üblicherweise von der bestehenden Referenz-Information, so dass diese Objekte in den Sensordaten detektiert werden können. Eine Klassifikation der Objekte hinsichtlich Mensch, Objekt, etc. wird im Allgemeinen nicht durchgeführt.

Da die Position des Roboters bezüglich der Welt bekannt ist und die aktuelle Konfiguration des Roboters von dessen Steuerung bereitgestellt wird, ist eine Detektion des Roboters in den

Sensordaten meist nicht notwendig. Somit werden die Distanzen zwischen Roboter und detektierten, relevanten Objekten bestimmt und hinsichtlich eines einzuhaltenden Mindestabstandes ausgewertet.

3.2.2 Schutzraumüberwachung

Die Schutzraumüberwachung bezieht sich auf die Überwachung des Raumes, welcher eine Gefahr für den Menschen darstellt (siehe Abbildung 17, rechts). Dieser Schutzraum (Kollisionsraum, Gefahrenraum) wird sowohl durch die Bewegung des Robotersystems definiert, als auch durch die Gefahren, welche beispielsweise beim Einsatz eines Werkzeuges entstehen können (z. B. Fräsen, Bohren). Darüber hinaus können zusätzliche Gefahren im Arbeitsraum (unabhängig vom Robotersystem) berücksichtigt werden (z. B. Presse im Arbeitsraum). Nach der Definition des Schutzraumes wird dieser hinsichtlich des Eindringens von Objekten überwacht. Dabei wird üblicherweise nicht zwischen einer Schutzraumverletzung aufgrund eines unbekanntes Objektes oder aufgrund einer Person unterschieden. Dies ist in den meisten Fällen auch vorteilhaft, da bspw. auch Kollisionen mit unbekanntes Objekten (z. B. Kisten) und resultierender herumfliegender Teile eine Gefahr für den Menschen darstellen können. Darüber hinaus kann auch der Mensch unbekanntes Objekte mit sich führen, die mit dem Roboter kollidieren und zu einer Verletzung des Menschen führen können.

3.2.3 Klassifikation und Bewertung

Die Klassifikation der Ansätze und Entwicklungen des aktuellen Standes der Wissenschaft bezüglich der Erkennungsstrategie erfolgt in Tabelle 15.

Tabelle 15: Klassifikation der Ansätze und Entwicklungen im aktuellen Stand der Wissenschaft bezüglich der Erkennungsstrategie.

Distanzüberwachung		Schutzraumüberwachung
Detektion spezifischer Merkmale	Detektion von Änderungen	
(Spingler und Thiemermann 2002) (Thiemermann 2003) (Kruger et al. 2004) (Tan und Arai 2011) (Rosenstrauch et al. 2018)	(Kuhn und Henrich 2007) (Fischer und Henrich 2009) (Flacco et al. 2012) (Flacco et al. 2015) (Flacco und Luca 2017) (Shackleford et al. 2010) (Szabo et al. 2012) (Shackleford et al. 2012) (Wang 2012)	(Ebert und Henrich 2002) (Gecks und Henrich 2006) (Henrich und Gecks 2008) (Walter et al. 2010) (Walter et al. 2011) (Elkmann et al. 2012) (Vogel et al. 2016) (Vogel und Elkmann 2017) (ECHORD++ 2016) (Morato et al. 2014) (Vu et al. 2019)

Bezüglich der abgeleiteten Anforderungen in Abschnitt 2.4 sind prinzipiell beide Verfahren zur Umsetzung der MRK-Methode SSM anwendbar (siehe Tabelle 16).

Tabelle 16: Qualitative Bewertung der Erkennungsstrategie hinsichtlich der Anforderungserfüllung.

Anforderungen	Distanzüberwachung - Schutzraumüberwachung
Ganzheitlich	Betrachtung des Robotersystems inklusive Werkzeuge, Werkstücke, etc. und zusätzlicher Gefahren im Arbeitsraum.
Minimale Mindestabstände	Detektion von kleinen Objekten (Fingerauflösung) möglich.
	Schutzraumüberwachung offenbart Potential für kürzere Verarbeitungszeiten gegenüber Distanzüberwachung.
Funktionale Sicherheit	Einschränkungen/Gründe gegen eine Umsetzung des Verfahrens sind nicht bekannt.
Maximale Verfügbarkeit	<i>Keine Bewertung</i>
Dynamische Sicherheitsabstände	Einzuhaltende Mindestabstände können unter Berücksichtigung der Abstandsformel bestimmt werden.

Hinsichtlich der Anforderung *Minimale Mindestabstände* ergibt sich jedoch ein Vorteil der Schutzraumüberwachung gegenüber der Distanzüberwachung aufgrund einer potentiell kürzeren Verarbeitungszeit, welche zu einer kürzeren Reaktionszeit und demzufolge kleineren Mindestabständen führt. Der prinzipielle Verarbeitungsablauf der Distanzüberwachung wird in Abbildung 18 schematisch dargestellt. Wesentlich dabei ist die sequentielle Prozessfolge der Verarbeitungsschritte, wobei zunächst die Sensordaten hinsichtlich der relevanten Objekte ausgewertet und anschließend die Distanzen zwischen den Objekten bestimmt werden. Erst dann kann die Einhaltung der Mindestabstände überprüft werden.

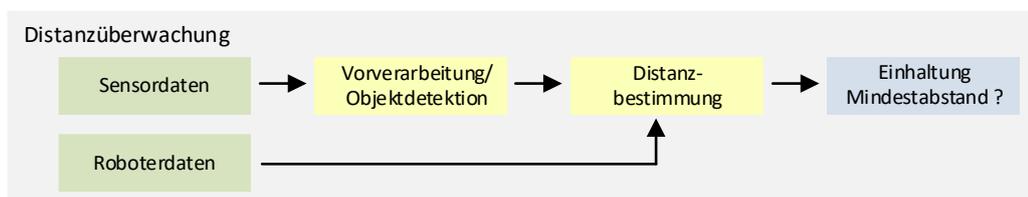


Abbildung 18: Schematische Darstellung des Verarbeitungsablaufes bei der Distanzüberwachung

Die Prozessfolge der Schutzraumüberwachung (siehe Abbildung 19) unterscheidet sich zur Distanzüberwachung durch einen vorzugsweise parallelen Verarbeitungsablauf. Während der Vorverarbeitung der Sensordaten findet parallel dazu die Generierung der einzuhaltenen Mindestabstände respektive des zu überwachenden Schutzraumes auf Basis des aktuellen Roboterzustandes statt. Im Anschluss daran erfolgt die Auswertung hinsichtlich einer Verletzung dieser Schutzräume.



Abbildung 19: Schematische Darstellung des Verarbeitungsablaufes bei der Schutzraumüberwachung.

Im Hinblick auf die Umsetzung minimaler Mindestabstände stellt die Schutzraumüberwachung gegenüber der Distanzüberwachung unter Betrachtung des jeweiligen prinzipiellen Verarbeitungsablaufes ein höheres Potential dar.

3.3 Klassifikation und Analyse der Basistechnologien

Die Ansätze und Entwicklungen aus dem Stand der Wissenschaft können entsprechend Abbildung 20 in aktive und passive Systeme unterschieden werden (Giancola et al. 2018). Die einzelnen Basistechnologien, deren Merkmale, sowie Vor- und Nachteile der Einsatzmöglichkeiten im Bereich der MRK werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben.

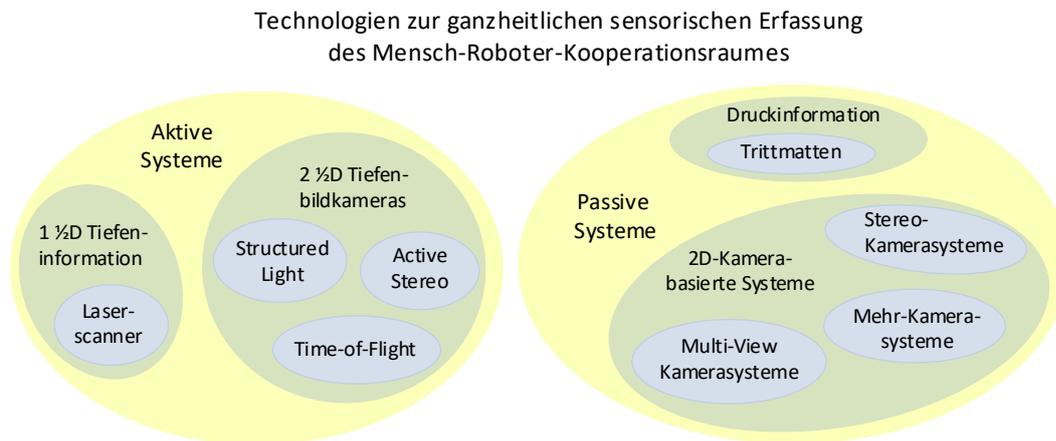


Abbildung 20: Klassifikation der Sensortechnologien in aktive und passive Systeme.

3.3.1 Passive Sensorsysteme

Ein Großteil der Ansätze und Entwicklungen im Stand der Wissenschaft basieren auf 2D-Kameratechnik. Daneben stellen druckempfindliche Fußböden/Trittmatten eine weitere Technologie der passiven Sensorsysteme dar.

2D-Kamerabasierte Systeme

Kameratechnik bietet eine einfache Möglichkeit die zu überwachende Szene in Form von Grauwert- oder Farbbildern 2-dimensional zu erfassen. Kameras können hinsichtlich verschiedener Wellenlängenbereiche spezialisiert sein, wobei das Spektrum vom UV-Bereich, über das sichtbare Spektrum bis zum IR-Bereich reicht.

Die stetigen technologischen Weiterentwicklungen führen dazu, dass aktuelle industrielle Kameras Frameraten von über 200 Hz bei gleichzeitiger Auflösung von über 1.6 Megapixel und hohem Dynamikumfang (Analog-Digital-Umsetzer mit Bittiefe von 12 Bit) liefern (Teledyne FLIR LLC). Kameras mit deutlich höheren Frameraten oder auch Auflösungen gehören ebenfalls zum Stand der Technik, wobei aufgrund der hohen Datenmengen ein Kompromiss zwischen Auflösung und Framerate eingegangen werden muss.

Kameras sind aufgrund der technischen Leistungsfähigkeit (Auflösung, Framerate, Dynamikumfang) für die Detektion kleiner Objekte und entsprechend geringer Distanzen sowie minimaler Reaktionszeiten sehr gut geeignet. Mit der sicherheitsbezogenen Zertifizierung des rein kamerabasierten Stereosystems *SafetyEye* (Haussmann und Hader 2007; Merx 2019) kann

außerdem von einer prinzipiellen sicherheitsbezogenen Zertifizierbarkeit von Kameratechnik ausgegangen werden.

Die Datenerfassung ist generell robust gegenüber vielfältigen Oberflächen von Objekten. Weder spiegelnde, stark absorbierende oder transparente Objekte führen zu einer eingeschränkten Datenerfassung oder gar Datenverlust. Der wesentliche Nachteil von Kameratechnik liegt in der direkten Abhängigkeit von den umgebenden Lichtverhältnissen. Eine unzureichende oder zu starke Umgebungsbeleuchtung kann zu einer eingeschränkten Datenerfassung führen. Im Bereich der MRK kann dies zu einem häufigen Auslösen der optischen Schutzeinrichtung durch falsch detektierte Verletzungen der Schutzräume resultieren und die Verfügbarkeit stark negativ beeinflussen (Augustsson et al. 2014).

Kamerabasierte Sensorsysteme werden häufig als *Mehr-Kamerasysteme* oder *Multi-View-Systeme* umgesetzt (Hahn 2010). *Mehr-Kamerasysteme* bestehen aus zwei oder mehr Kameras, welche in einem geringen Basisabstand (etwa 0.20 m) zueinander angeordnet sind. Dabei beobachten alle Kameras die Szene aus der gleichen Perspektive. Bekannteste Vertreter dieser Mehr-Kamerasysteme stellen *Stereo-Kamerasysteme* dar, welche konventionell aus zwei parallel angeordneten Kameras bestehen. Die Weiterentwicklung und Optimierung von Algorithmen zur Lösung des *Korrespondenzproblems* (Zanuttigh et al. 2016; Scharstein et al. 2001) ist weiterhin aktuell. Dabei können die Verfahren hinsichtlich der Vollständigkeit der Tiefenbilder (*Dense Vs. Sparse*), Matching-Methode (*Global Vs. Local*) oder hinsichtlich des Basisabstandes (*Wide Vs. Short*) unterschieden werden. Eine umfangreiche Sammlung aktueller Stereoverfahren, sowie ein Vergleich und Ranking dieser Verfahren werden von (Scharstein et al.; Robust Vision Challenge; ETH3D) präsentiert.

Im Bereich der industriellen Bildverarbeitung existieren heutzutage eine Vielzahl an Stereosystemen (RAUSCHER GmbH; e-con Systems), die als Stand-Alone-Lösungen mit eingebetteten Stereoverfahren Tiefenbilder der Umgebung erstellen. Hierbei kommen hochaufgelöste Kameras zum Einsatz, mit denen Bildraten von bis zu 90 Hz erreicht werden. Um der prinzipbedingten Abhängigkeit gegenüber den Umgebungsbedingungen (z. B. Lichtverhältnisse, strukturierte/texturierte Oberflächen) entgegenzuwirken, werden Stereosysteme mit zusätzlichen Beleuchtungen ausgestattet (siehe Abschnitt 3.3.2) oder mit weiteren Sensoren (z. B. ToF-Kamera) kombiniert (Walter et al. 2010). Im Bereich der MRK sind Stereosysteme zur 2½D-Erfassung der Umgebung bzw. einzelner Objekte weit verbreitet.

Multi-View-Kamerasysteme unterscheiden sich von *Mehr-Kamerasystemen* vor allem darin, dass die verwendeten Kameras räumlich verteilt aus unterschiedlichen Perspektiven die zu erfassende Szene beobachten. Aufgrund der resultierenden Minimierung von Verschattungsbereichen ist somit eine 3D-Abbildung der gesamten Umgebung bzw. einzelner Objekte per Triangulation möglich. Dies stellt zwar prinzipiell einen Vorteil gegenüber einer 2½D-Erfassung bei Stereo-Systemen dar, der Aufwand der Installation, Ausrichtung und Kalibrierung der verteilten Sensoren ist jedoch deutlich größer.

Trittmatten

Trittmatten oder auch Schalmatten stehen als zertifizierte Sicherheitstechnik zur großflächigen Absicherung von Gefährdungsbereichen zur Verfügung (Mayser GmbH & Co KG 2019a). Die Firma Pilz bewirbt eine neue Generation von Trittmatten, die mit einer Ortsauflösung den Menschen (oder Objekte) auf einer Matte genau lokalisiert (Pilz GmbH & Co. KG 2018). Ein Vorteil der Technologie stellt die hohe Verfügbarkeit aufgrund der Unabhängigkeit gegenüber äußeren Umgebungsbedingungen wie Fremdlicht, Spänen- oder Funkenflug usw. dar. Eine Beeinträchtigung der Messdaten durch spezifische Objekteigenschaften ist ebenfalls nicht gegeben. Einzige Voraussetzung stellt die Einwirkung einer Kraft (Mindestgewicht Objekt/Mensch) auf den Sensor dar.

Aktuelle Trittmatten weisen Ansprechzeiten von unter 30 Millisekunden auf und können durch Aneinanderreihung sehr große Arbeitsbereiche (über 25 m^2) abdecken. Der Nachteil bei der Verwendung von Schalt- bzw. Trittmatten liegt in dem sehr großen Zuschlag von 1200 mm aufgrund einer parallelen Annäherung (siehe Abschnitt 2.2.2), der in dem einzuhaltenen Sicherheitsabstand berücksichtigt werden muss (Hineintreten mit ausgestrecktem Arm). Die geringe Ansprechzeit der Matten kann diesen Nachteil nicht kompensieren.

3.3.2 Aktive Sensorsysteme

Aktive optische Sensorsysteme bringen eine eigene Lichtquelle zur sensorischen Erfassung der Umgebung mit. Abhängig vom Funktionsprinzip existieren hierzu unterschiedliche zeitliche und räumliche Beleuchtungsvarianten, wobei die Umgebung mit nicht-sichtbarem Licht z. B. unter Verwendung von NIR-LEDs oder Laser in Form von Punkten, Linien oder Mustern angereichert wird. In der Literatur findet man häufig den Begriff der *RGB-D-Kameras*, welche nicht die zugrundeliegende Technologie spezifiziert, sondern lediglich die Kombination einer oder mehrerer (Farb-) Kameras mit einem Tiefenbildsensor beschreibt (Rosin et al. 2019). Die Generierung des Tiefenbildes bzw. $2\frac{1}{2}$ D-Abbildes kann dabei auf dem Prinzip von *strukturiertem Licht*, *Lichtlaufzeit* oder auch *Stereoverfahren* basieren.

Structured-Light

Für die robuste Erfassung dynamischer Szenen wurden die Ansätze der Streifenprojektionssysteme (Berndt und Bauer 2003) hinsichtlich der Anzahl notwendiger Projektionsbilder weiterentwickelt (Zanuttigh et al. 2016). *Structured-Light* oder auch *Coded-Light-Tiefenbildkameras* arbeiten, wie auch Stereo-Kamerasysteme, nach dem Triangulationsprinzip und können in verschiedenen Varianten (*time-multiplexing strategy*, *direct coding*, *spatial neighborhood*) umgesetzt werden (Giancola et al. 2018). Microsoft stellte im Jahr 2010 mit der Kinect™ einen derartigen Sensor für den Massenmarkt zur Verfügung, welcher auf der *PrimeSense*-Technologie (Shpunt und Zalevsky 2009) basiert. Hierbei wird ein statisches IR-Punktmuster in die Umgebung projiziert und von einer IR-Kamera aufgenommen und ausgewertet. IR-Projektor und Kamera fungieren hierbei als Stereo-System, wobei die Herausforderung darin besteht,

projizierte Punkte mit den entsprechenden aufgenommenen Punkten in Korrespondenz zu bringen. Wird eine Zuordnung gefunden, kann deren 3D-Position per Triangulation bestimmt werden.

Von (Zanuttigh et al. 2016) werden systematische Schwächen dieser Systeme beschrieben. Hierbei spielt der Reflexionsgrad der bestrahlten Oberfläche eine wichtige Rolle. Auf stark absorbierenden Oberflächen kann das projizierte Muster kaum bzw. nicht wahrgenommen werden, was zu ungültigen Messwerten führt. Zusätzlich werden die Oberflächen von den umgebenden Lichtverhältnissen beleuchtet, so dass es zu einer Sättigung im Bildaufnehmer der Kamera kommen kann. Inhomogene Szenen mit Tiefensprüngen führen häufig dazu, dass Bereiche des projizierten Musters in der Szene verdeckt werden und von der Kamera nicht sichtbar sind. Dies muss vom implementierten Verfahren entsprechend erkannt und als ungültiger Messwert deklariert werden. Aufgrund des Triangulations-Prinzips zur Bestimmung der Distanzwerte nimmt die Genauigkeit und Zuverlässigkeit mit zunehmender Entfernung ab, was bei der Bestimmung der Sicherheitsabstände berücksichtigt werden muss (Wasenmüller und Stricker 2016) (Pilz GmbH & Co. KG 2017).

Lichtlaufzeit

Für die Erfassung von Objektentfernungen können Sensoren zum Einsatz kommen, die auf dem Prinzip der Lichtlaufzeit basieren. Diese bestehen aus einem Lichtsender und -empfänger. Ein Lichtpuls wird ausgesendet, von der Umgebung (Objekt) reflektiert und vom Sensor wieder empfangen. Aufgrund der zeitlichen Dauer (*Round Trip Time*) zwischen dem Aussenden und der Detektion des reflektierten Lichtpulses vom Sensor, kann auf die Entfernung des Objektes zum Sensor geschlossen werden (Foix et al. 2011). Diese Art der Distanzmessung wird auch als *Pulsed Time-of-Flight* bezeichnet und ist unter dem Begriff *LiDAR* bekannt.

Laserscanner nutzen das Prinzip der Lichtlaufzeit indem ein Laserstrahl mit Hilfe eines Ablenkspiegels die Umgebung sequentiell abtastet und die entsprechenden Entfernungen zwischen Objekt und Lichtsender bestimmt werden. In Abhängigkeit des Abstrahlwinkels benachbarter Messungen (räumliche Auflösung) kann dieses Verfahren zur Erfassung großer 3-dimensionaler Raumbereiche jedoch zeitaufwendig werden. 2D-Laserscanner können einerseits für die Zutrittsüberwachung (vertikaler Schutzbereich) oder für die Bereichsüberwachung (horizontaler Schutzbereich) eingesetzt werden und verfügen in neuesten Entwicklungen (Keyence Corporation AG 2022) über bis zu 32 konfigurierbare Schutzfelder, die während des Betriebes aktiviert bzw. deaktiviert werden können. Um Annäherungen an den Roboter zu detektieren werden die Laserscanner derart montiert, dass der horizontale Schutzbereich 200 mm über dem Boden eingerichtet wird, um ein Unterkriechen zu verhindern. Dies führt jedoch dazu, dass ein Zuschlag von 1120 mm an den einzuhaltenen Sicherheitsabstand angerechnet werden muss, um ein Hineintreten bei ausgestrecktem Arm zu berücksichtigen (siehe Abschnitt 2.2.2). Die vertikale Anordnung von 2D-Laserscannern (Zutritts- bzw. Zugriffsüberwachung) erlaubt aufgrund einer guten Detektionsauflösung (etwa 20 mm) und durchschnittlichen Reaktionszeiten (etwa 80 ms) (Keyence Corporation

AG 2022) die Umsetzung von akzeptablen Mindestabständen. Allerdings würde hierbei nur ein Teilbereich des Arbeitsraumes sensorisch erfasst werden und dynamische Sicherheitsbereiche sind bei dieser Anordnung ebenfalls nicht umsetzbar.

Time-of-Flight (ToF) Kameras (*Continuous Wave Time-of-Flight*) stellen eine weitere Möglichkeit dar, um einen Raumbereich ganzheitlich und 3-dimensional zu erfassen. Hierbei kommen Sensorchips zum Einsatz, deren Pixel gleichzeitig und unabhängig voneinander Entfernungen zu Objekten in der Umgebung bestimmen. Eine NIR-Beleuchtung bestehend aus einer Anordnung von LEDs oder Laser sendet moduliertes Licht in die Umgebung, welches von dort reflektiert und vom Sensorchip aufgenommen wird. Jeder Pixel bestimmt schließlich die Phasenverschiebung von ausgesendetem und aufgenommenem Licht, sodass aufgrund dieser Verschiebung die Entfernung von Objekten in der Umgebung bestimmt werden kann. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens und der verschiedenen Möglichkeiten zur Modulation des auszusendenden Lichts wird in (Grzegorzek et al. 2013; Zanuttigh et al. 2016; Rosin et al. 2019) gegeben. In (Giancola et al. 2018) werden zudem aktuelle am Markt verfügbare Systeme (z. B. von Intel, Microsoft, PMD Tec), und deren technische Details beschrieben.

Im Gegensatz zu den *Structured-Light*- oder *Active Stereo-Kameras* benötigen *Time-of-Flight-Kameras* leistungsstarke Beleuchtungen zur Bestrahlung der gesamten Umgebung. Hierzu wurde von (Wasenmüller und Stricker 2016) bezüglich der Microsoft Kinect V2 evaluiert, dass die Genauigkeit der Distanzwerte von Pixeln abnimmt, je weiter diese vom Bildzentrum entfernt sind. Dies ist auf die inhomogene Bestrahlung der Szene zurückzuführen. Weiterhin wurde von den Autoren festgestellt, dass die Distanzwerte stark von der Temperatur des Sensors und vom Reflexionsgrad der bestrahlten Oberfläche abhängen. Stark absorbierende Oberflächen führen zu ungenauen und stark streuenden Messwerten (Lefloch et al. 2013).

Ein generelles Problem von ToF-Kameras stellen sogenannte *Flying Pixels* dar. Dieses Phänomen ist auf das Funktionsprinzip der Kameras zurückzuführen und tritt vor allem bei Tiefensprünge bzw. Kanten in der Umgebung auf. Ein weiteres Problem stellen Mehrfachreflektionen dar, was unter dem Begriff *Multipath-Interference* bekannt wurde. Der ausgesendete Lichtstrahl/Lichtpuls wird nicht direkt vom Objekt reflektiert, sondern kann unter Umständen mehrfach zwischen Objekten in der Umgebung reflektiert werden bevor dieser von der Kamera detektiert wird (Wasenmüller und Stricker 2016). Ebenso kommt es an Kanten dynamischer Objekte zu *Motion Artifacts*. Generell besteht eine hohe Abhängigkeit zwischen der Stärke des Messrauschens und der Integrationszeit. Für optimale Messwerte muss die Integrationszeit zum einen an die umgebenden Lichtverhältnisse und zum anderen an den Messabstand angepasst werden (Klopot et al. 2016).

An MRK-Arbeitsplätzen bei denen Objekte bzw. der Mensch die Positionen oftmals ändern und auch die Lichtverhältnisse dynamisch sind, können optimale Messwerte unter diesen Umständen kaum erreicht bzw. aufrechterhalten werden (siehe Abschnitt 3.4.1).

Active Stereo

In Abschnitt 3.3.1 wurden Prinzipien und Varianten von passiven Stereo-Kamerasystemen erläutert. Diese Systeme sind auf entsprechende Merkmale (z. B. Texturen) in Form von Grauwert- oder Farbwertunterschieden für die Zuordnung von Bildpunkten der Kameras im Stereosystem angewiesen. Sind derartige Merkmale nicht vorhanden (z. B. weiße Fläche) können keine Bildpunkt-Korrespondenzen gefunden und entsprechend keine 3D-Koordinaten bestimmt werden. Um dem entgegenzuwirken existieren aktive Stereokamerasysteme, wobei das Kamerasystem mit einer zusätzlichen Beleuchtung (Projektor) ausgestattet ist. Mit deren Hilfe können Strukturen (z. B. Punktmuster) in die Umgebung projiziert und somit künstliche Merkmale geschaffen werden. Hierzu existieren beispielsweise die Systeme D430 und D435 von Intel RealSense (Intel Corporation). Das System von Roboception (Roboception GmbH) kann sowohl mit als auch ohne zusätzlichem Musterprojektor betrieben werden.

In (Keselman et al. 2017) wird das von Intel verwendete aktive Stereoverfahren detailliert beschrieben und evaluiert. Die Qualität und Dichte des generierten Tiefenbildes ist dabei von verschiedenen *Presets* und *Post-Processing* Methoden, sowie Umgebungsbedingungen abhängig. Mit Presets werden die Anforderungen an die Qualität einer gefundenen Zuordnung festgelegt. Je höher die definierten Anforderungen, desto zuverlässiger und genauer ist eine gefundene Zuordnung. Dies führt jedoch auch dazu, dass einige Zuordnungen nicht den Anforderungen genügen und als ungültig deklariert werden (Giancola et al. 2018). Im Ergebnis führt dies zu lückenhaften Tiefenbildern. Zum Schließen kleinerer Lücken können wiederum beim *Post-Processing* verschiedene Filter wie Median-Filter angewendet werden.

Ein Vorteil aktueller Stereokamerasysteme liegt darin, dass im Vergleich zu *Structured-Light* und *ToF-Kameras* deutlich höhere Auflösungen und Frameraten erreicht werden. Dies ist unter anderem auf die hohe Parallelisierbarkeit der zugrundeliegenden Stereoverfahren und leistungsfähiger Hardware zurückzuführen (Nerian Vision GmbH).

3.4 Bewertung der Basistechnologien

In Abschnitt 3.3 wurden die Basistechnologien der aktuellen Ansätze im Stand der Wissenschaft näher betrachtet. Dabei hat sich gezeigt, dass insbesondere Tiefenbildkameras in jüngsten Entwicklungen zur Anwendung kommen. Der Einsatz dieser Kameras im Kontext der MRK wird im Folgenden diskutiert.

3.4.1 Einsatz von Tiefenbildkameras für MRK

In den vorangegangenen Abschnitten wurden aktuelle Tiefenbildkameras (Structured-Light, Stereo, ToF) hinsichtlich ihrer Eigenschaften beschrieben. Hierbei wurde festgestellt, dass jede dieser Technologien Nachteile aufweisen, die im Ergebnis zu stark abweichenden oder ungültigen Tiefeninformationen führen können. Wenn allein durch das Tragen unterschiedlicher

Kleidung und demzufolge verschiedener Texturen oder Farben die entsprechenden 3D-Sensordaten des Menschen nicht zuverlässig bestimmt werden können, stellt dies im Bereich der MRK ein hohes Gefährdungsrisiko für den Menschen dar. Die Abhängigkeit der Messwerte von der Oberflächenbeschaffenheit ist demnach nicht vernachlässigbar. Jedes dieser Systeme setzt Metriken zur Bewertung eines gemessenen Tiefenwertes ein, wobei in Abhängigkeit davon ein Messwert als gültig oder ungültig deklariert wird. Je höher die Anforderungen an den Messwert sind, desto genauer und zuverlässiger sind die als gültig deklarierten Messwerte. Mit steigender Qualität der Messdaten nimmt jedoch auch die Anzahl der ungültigen Messwerte zu.

Im Bereich der MRK stellt dieser Sachverhalt eine große Herausforderung dar. Es ist nicht abschließend geklärt, inwieweit mit ungültig deklarierten Messwerten umgegangen werden muss. Aus Sicht der Personensicherheit muss prinzipiell davon ausgegangen werden, dass sich an diesen für ungültig erklärten Bildpositionen bzw. entsprechenden kartesischen Räumen ein Objekt (z. B. Körperteil des Menschen) befindet. Da unter Umständen die Anzahl an ungültig deklarierten Messwerten sehr hoch sein kann, führt dies in der Folge zu einem Anstieg falsch positiver Sicherheitsbereichsverletzungen (Mindestabstandsunterschreitungen), wodurch die Verfügbarkeit des Systems stark beeinträchtigt wird. Diesem Sachverhalt könnte man eine Verringerung der Qualitätsanforderungen an die Messwerte entgegensetzen, um die Anzahl der ungültig deklarierten Messwerte zu reduzieren. Dies führt zwar zu einem Anstieg der als gültig deklarierten Messwerte, jedoch sind diese dann ungenau bzw. unzuverlässig. Auch dies führt wiederum zu einem Verfügbarkeitsproblem und darüber hinaus zu größeren Sicherheitsabständen, da diese Messunsicherheit bei der Bestimmung des einzuhaltenden Mindestabstandes berücksichtigt werden muss.

Einen weiteren Aspekt im Zusammenhang mit Tiefenbildkameras stellt der Aufwand zur Verarbeitung der 3D-Messdaten dar. Da die Reaktionszeit einen signifikanten Einfluss auf die resultierenden einzuhaltenden Mindestabstände besitzt, sollten Verarbeitungszeiten möglichst geringgehalten werden (siehe Abschnitt 2.2.1). Demgegenüber steht die Anforderung an eine möglichst hohe räumliche Auflösung zur Detektion kleiner Objekte (Finger), was prinzipiell die Anzahl der Messdaten wiederum maximiert.

3.4.2 Sichtbarkeit von Sicherheitsabständen

Mit dynamisch generierten Sicherheitsabständen ist es für den Menschen nur schwer nachvollziehbar inwieweit er sich dem Roboter nähern darf, bevor es zu einer Unterschreitung des einzuhaltenden Mindestabstandes kommt und der Roboter in der Folge stoppt. Die Sichtbarkeit der einzuhaltenden Sicherheitsabstände wird von einigen Ansätzen durch Verwendung zusätzlicher Visualisierungstechnologien umgesetzt. Insbesondere Projektoren eignen sich zur Darstellung von verschiedensten Informationen direkt im Arbeitsraum des Roboters (Ramer 2019; Vogel et al. 2020). Die Sichtbarmachung der Sicherheitsabstände, das heißt, die Grenze bis zu der sich der Mensch annähern darf, stellt einen wichtigen Punkt hinsichtlich

der Verfügbarkeit des Roboters bzw. der gesamten Anlage dar. Der Mensch kann durch die Sichtbarkeit der Grenze aktiv einer möglichen unbeabsichtigten Unterschreitung des Sicherheitsabstandes entgegenwirken. Eine Vermeidung der Mindestabstandunterschreitung hat den großen Vorteil, dass dadurch die Eintrittswahrscheinlichkeit einer Gefährdung aktiv reduziert werden kann und somit die Gewährleistung der Sicherheit und Gesundheit des Menschen positiv beeinflusst. Die Sichtbarmachung der Sicherheitsabstände entspricht somit gemäß EG-Maschinenrichtlinie der *Hinweisenden Sicherheit* (siehe *3-Stufen-Methode* zur Risikominderung in Anhang A.2).

Entgegen der nachteiligen Verwendung zusätzlicher Projektionstechnik (oder anderer Visualisierungstechnologien wie AR-Brillen) sollte eine Schutzeinrichtung, insbesondere bei der Generierung und Überwachung dynamischer Sicherheitsabstände, die Visualisierungsfunktionalität inhärent mitbringen (siehe *Anforderungen*, Abschnitt 2.4).

3.4.3 Bewertungsmatrix

Auf Basis der in Abschnitt 2.4 definierten Kriterien mit Bewertungspunkten werden die zugrundeliegenden Basistechnologien der Lösungsansätze aus dem aktuellen Stand der Wissenschaft qualitativ und quantitativ bewertet sowie in Form einer Bewertungsmatrix (Tabelle 18) gegenübergestellt.

Folgende Symbole mit entsprechenden Bewertungspunkten werden verwendet (Tabelle 17):

Tabelle 17: Symbole und zugehörige Punktevergabe zur Technologiebewertung.

Symbol	Bedeutung	Punkte
-	- kriteriumspezifisch -	-1
0	unbekannt/ nicht verfügbar	0
+	- kriteriumspezifisch -	1
++	- kriteriumspezifisch -	2

Tabelle 18: Qualitative Bewertung der Technologien auf Basis der Beschreibungen in Abschnitt 3.3 und unter Berücksichtigung der Kriterien in Abschnitt 2.4. Vergabe der Bewertungspunkte entsprechend Tabelle 17.

		Technologien						
		Aktiv					Passiv	
		Radarsysteme	Laserscanner horizontal	Structured Light-Kamera	Time-of-Flight-Kamera	Active Stereo-Kamera	Kameratechnik	Trittmatten
Anforderung	Kriterien	Bewertungsmatrix						
Anf. 1	Ganzheitlich	++	++	++	++	++	++	++
Anf. 2	Detektionsauflösung	-	-	+	+	++	++	-
	Reaktionszeit	-	+	+	+	+	++	++
Anf. 3	Zertifizierbarkeit	++	++	0	+	+	++	++
Anf. 4	Robustheit	+	+	-	-	-	++	++
	Fremdlichtunabhängig	++	+	+	+	+	-	++
	Sichtbarkeit	-	-	-	-	-	-	-
Anf. 5	Dynamik	+	+	++	++	++	++	++
Bewertungspunkte (max. 16)		5	6	5	6	7	10	10

4 Forschungsfrage und Handlungsbedarf

4.1 Ableitung der Forschungsfrage

Auf Basis der Bewertungsmatrix in Tabelle 18 können folgende Aussagen zu den Technologien bezüglich der Eignung als Schutzeinrichtung für die Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* getroffen werden:

1. Trittmatten, Radarsysteme und horizontale Laserscanner sind aufgrund der systembedingten geringen Detektionsauflösung bzw. einer Bereichsüberwachung und daraus resultierender großer Zuschläge \mathcal{C} (siehe Abschnitt 2.2.2) bezüglich des einzuhaltenden Mindestabstandes \mathcal{S} nicht geeignet. Die Umsetzung *minimaler Mindestabstände* (Anforderung 2) ist damit nicht erfüllbar.
2. Die sensorische Erfassung von Objekten ist bei Tiefenbildkameras stark von den Oberflächeneigenschaften und Entfernungen der Objekte abhängig (siehe Abschnitt 3.3.2). Dies kann zu fehlenden (gefilterten) Messwerten führen. Aus sicherheitstechnischer Sicht muss davon ausgegangen werden, dass sich an diesen nicht sensorisch erfassten Bereichen ein Mensch (oder Körperteile des Menschen) befinden (siehe Abschnitt 3.4.1). Dies beeinflusst die Verfügbarkeit maßgeblich, so dass Tiefenbildkameras als Schutzeinrichtung nicht geeignet sind.
3. Passive 2D-Kameratechnik bietet ein hohes Potential hinsichtlich der Umsetzung als Schutzeinrichtung. Als alleiniger Sensor ist Kameratechnik aufgrund der direkten Fremdlichtabhängigkeit jedoch ungeeignet.
4. Aktive Sensorsysteme sind unempfindlicher gegenüber Fremdlichteinflüssen als passive Kamerasysteme.
5. Keine Technologie erlaubt derzeit die Sichtbarmachung der einzuhaltenden Mindestabstände.

Aufgrund der Aussagen 3., 4. und 5. kann vermutet werden, dass der Nachteil *Fremdlichtabhängigkeit* passiver 2D-Kameratechnik durch Einsatz einer eigenen aktiven Beleuchtung kompensiert werden kann. Darüber hinaus würde dies die Möglichkeit der *Sichtbarkeit* von einzuhaltenden Mindestabständen eröffnen. Wesentlich dabei ist, dass dieses neue Sensorprinzip keine 3D-Messwerte (wie bei Tiefenbildkameras) generiert, sondern weiterhin auf den 2D-Intensitätsinformationen des Kamerabildes basiert. Dadurch sollen die Nachteile von Tiefenbildkameras (siehe Abschnitt 3.4.1) vermieden werden.

Wie in Abbildung 21 dargestellt, hätte ein derartiges neues *aktives 2D-Sensorprinzip* das Potential zur Erfüllung aller Anforderungen an eine Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*.

Diese These soll durch Beantwortung der folgenden Frage in dieser Arbeit bestätigt werden.

Forschungsfrage:

Können auf Basis passiver 2D-Kameratechnik ein aktives 2D-Sensorprinzip und Methode konzipiert werden, welche die Anforderungen an eine Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ per sicherer Schutzraumüberwachung erfüllen?

Damit wird der aktuelle Stand der Wissenschaft um ein aktives 2D-Sensorprinzip für die Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* mit dynamischer Schutzraumüberwachung erweitert (siehe Tabelle 19).

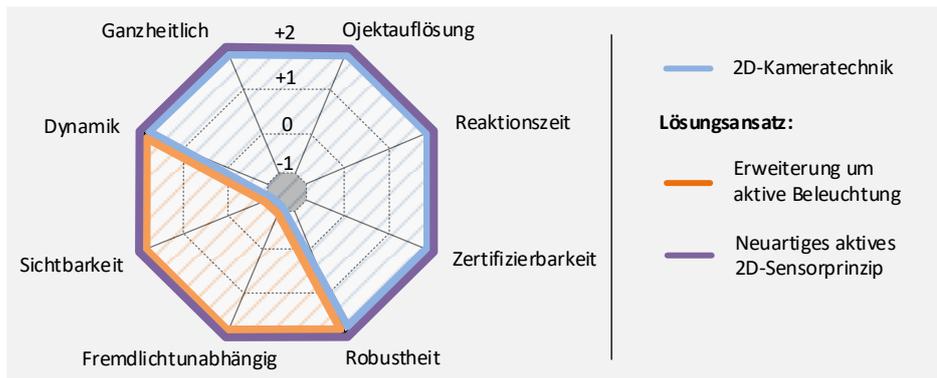


Abbildung 21: Vorteile bestehender 2D-Kameratechnik erweitert um eine eigene aktive Beleuchtung zur Umsetzung eines neuartigen aktiven 2D-Sensorprinzips. Punkteverteilung gemäß Bewertungsmatrix in Tabelle 18.

4.2 Konkretisierung des Handlungsbedarfes

Für die Beantwortung der Forschungsfrage (siehe Abschnitt 4.1) gilt es ein aktives 2D-Sensorprinzip (A2S) zu konzipieren, welches die Anforderungen an eine Schutzeinrichtung zur Umsetzung der *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* (siehe Abschnitt 2.4) erfüllt. Da im Rahmen dieser Arbeit nicht alle Anforderungen gleichermaßen in Bezug auf die Konzeption des Sensorsystems wissenschaftlich betrachtet werden können, wurde eine Analyse und Priorisierung der Anforderungen vorgenommen, um darauf aufbauend die zu behandelnden Schwerpunkte dieser Arbeit abzuleiten.

4.2.1 Analyse der Anforderungen

Für die zu erfüllenden Anforderungen (siehe Abschnitt 2.4) existieren im Stand von Technik und Wissenschaft in unterschiedlichem Maße Lösungsansätze oder gar etablierte Lösungen. Im Folgenden werden die Anforderungen hinsichtlich des für diese Arbeit erforderlichen Handlungsbedarfes analysiert.

Ganzheitliche sensorische Arbeitsraumerfassung

Die Einhaltung des separierenden Sicherheitsabstandes zwischen Mensch und Roboter kann nur dann überwacht werden, wenn der gemeinsam genutzte Arbeitsraum auch ganzheitlich sensorisch erfasst wird.

Tabelle 19: Einordnung der vorliegenden Arbeit in den aktuellen Stand der Wissenschaft.

			Distanzüberwachung	Schutzraumüberwachung
Tiefeninformationen	aktiv	1½ D Laserscanner	(Shackleford et al. 2010) (Szabo et al. 2012) (Shackleford et al. 2012)	(Keyence Corporation AG 2022; Vogel et al. 2020)
		2½ D Tiefenbild- kameras	(Fischer und Henrich 2009) (Wang 2012) (Flacco et al. 2012) (Flacco et al. 2015) (Flacco und Luca 2017) (Rosenstrauch et al. 2018)	(Walter et al. 2010) (Walter et al. 2011) (Elkmann et al. 2012) (Morato et al. 2014) (Vu et al. 2019)
		3D Radarsysteme		(Degani und Tartaro 2019a) (Degani und Tartaro 2019b)
	passiv	2D Kameratechnik	(Spingler und Thiemermann 2002) (Thiemermann 2003)	(Hausmann und Hader 2007) (Merx 2019)
Druckin- formation	passiv	2D Trittmatten	(Peter et al. 2020) (Najmaei und Kermani 2011)	(Vogel et al. 2016) (Vogel und Elkmann 2017)
Intensitäts- / Farb- information	passiv	2D Kameratechnik	(Kruger et al. 2004) (Tan und Arai 2011)	(Ebert und Henrich 2002) (Gecks und Henrich 2006) (Henrich und Gecks 2008) (Kuhn und Henrich 2007)
	aktiv		(Sporrer et al. 2015)	Vorliegende Arbeit

Im Stand der Wissenschaft und Technik hat sich hierfür der Lösungsansatz etabliert, den zu überwachenden Bereich aus einer zentralen Position über dem MRK-Arbeitsplatz (bzw. über dem Roboter) zu beobachten, z. B. (Tan und Arai 2011; Merx 2019). Dies hat den Vorteil, dass die Annäherung des Menschen aus verschiedenen Richtungen in gleichem Maße erfasst werden kann. Außerdem können Änderungen an der Applikation (angepasste Roboterbewegung) vorgenommen werden, ohne dass diese Auswirkungen auf die Installation des Sensorsystems haben. Gegenüber Sensoranordnungen bei denen bspw. Kameras räumlich verteilt die Szene aus verschiedenen Perspektiven beobachten (Ebert 2003; Fischer und Henrich 2009) haben zentralisierte Ansätze einen weitaus geringeren Einricht- und Kalibrieraufwand.

Aus den genannten Gründen wird das zu konzipierende A2S den Arbeitsraum aus einer darüber liegenden zentralen Position erfassen. Eine Analyse hinsichtlich weiterer Anordnungsmöglichkeiten findet in dieser Arbeit nicht statt.

Minimale Mindestabstände

Eine zweckmäßige Zusammenarbeit von Mensch und Roboter ist generell nur dann möglich, wenn die einzuhaltenden Sicherheitsabstände in Bezug auf ihre Größe den Aufenthalt des Menschen im gemeinsam genutzten Arbeitsraum überhaupt erlauben. Die wesentlichen Faktoren zur Minimierung der einzuhaltenden Mindestabstände stellen die *Detektionsauflösung* und die *Reaktionszeit* des Überwachungssystems dar.

Die Analyse des Standes von Wissenschaft und Technik hat bereits gezeigt, dass Kameratechnik aufgrund der Eigenschaften (hohe räumliche Auflösung, hohe Frameraten) das größte Potential hinsichtlich der Umsetzung minimaler Mindestabstände bietet (siehe Abschnitt 3.3). Aus diesem Grund wird als Basis-Technologie für das zu konzipierende A2S Kameratechnik verwendet. Eine Analyse bzgl. alternativer Technologien findet in dieser Arbeit nicht statt.

Sicherheit und Verfügbarkeit

Die Anforderungen *Funktionale Sicherheit* und *Maximale Verfügbarkeit* bilden das Fundament hinsichtlich eines zukünftigen Einsatzes als Schutzeinrichtung im industriellen Umfeld. Die Experten des IFA¹ sagen bezüglich dieser Anforderungen an ein kamerabasiertes System (Heinke und Bömer 2009):

„Ein Kamerasystem für sicherheitstechnische Aufgaben muss Bilder sicher erfassen, auswerten und sicherheitsgerichtet so verarbeiten, dass hieraus notwendige Reaktionen in der nachgeordneten Maschinensteuerung erfolgen können.“

Und darüber hinaus:

„[...] sind die „Umwelteinflüsse“ derart zu berücksichtigen, dass Sicherheit und Verfügbarkeit gleichermaßen gewährleistet werden. Dazu gehören natürlich bei einem optischen System primär Fremdlicht in allen Variationen, aber auch zunächst nicht naheliegende Einflüsse, wie Schattenwurf von bewegten Objekten und „Fliegendreck“ auf der Linse, wollen berücksichtigt werden.“

Das Verhalten eines Sensorsystems beim Auftreten von Fehlern, Ausfällen oder Einflüssen wird dabei direkt vom zugrundeliegenden Funktionsprinzip bedingt. Die präsentierten Ansätze im Stand der Wissenschaft adressieren diesen Aspekt bisher nur unzureichend (siehe Kapitel 3), insbesondere dann, wenn auf Sensoren zurückgegriffen wird, die generell nicht für den Einsatzzweck als Schutzeinrichtung entwickelt wurden (z. B. Microsoft Kinect).

Mit dem Ziel der Entwicklung einer neuartigen Schutzeinrichtung nehmen diese Anforderungen einen wesentlichen Stellenwert in der vorliegenden Arbeit ein und bedürfen einer detaillierten Betrachtung.

¹ IFA - Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung, St. Augustin

Dynamische Sicherheitsabstände

Da die grundsätzliche Motivation dieser Arbeit im Fehlen von Sicherheitstechnik liegt, welche die MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* gemäß ISO/TS 15066 umsetzen, stellt diese Anforderung einen wesentlichen Aspekt bei der Konzeption des A2S dar. Für die dynamische Bestimmung und Überwachung von Sicherheitsabständen in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration (Gelenkstellungen, Gelenkgeschwindigkeiten u. a.) existieren im Stand der Wissenschaft verschiedene Lösungsansätze (siehe Abschnitt 3.1), die jedoch jeweils auf das zugrundeliegende Funktionsprinzip adaptiert und optimiert sind. Im Zusammenhang mit der dynamischen Bestimmung und Überwachung von Sicherheitsabständen bzw. Schutzräumen stellt sich auch die Frage, inwieweit mit zu manipulierenden Objekten umgegangen werden kann. Zur prozessabhängigen Handhabung von Objekten (Manipulation, Pick and Place, etc.) müssen derartige Objekte in den Schutzraum einbezogen werden können, ohne dass dabei gleichzeitig der Mensch oder Körperteile des Menschen unbemerkt eindringen können bzw. einer Gefahr ausgesetzt werden.

Die zukünftige Einsatzfähigkeit des A2S hängt entscheidend von der Realisierung dynamischer Mindestabstände ab, so dass die Entwicklung eines geeigneten Verfahrens einen wesentlichen Aspekt in dieser Arbeit darstellt.

4.2.2 Schwerpunkte der Arbeit

Auf Basis der näheren Betrachtung der Anforderungen im vorangegangenen Abschnitt wurden diese priorisiert, Teilziele definiert und entsprechende Schwerpunkte der Arbeit abgeleitet (siehe Abbildung 22).

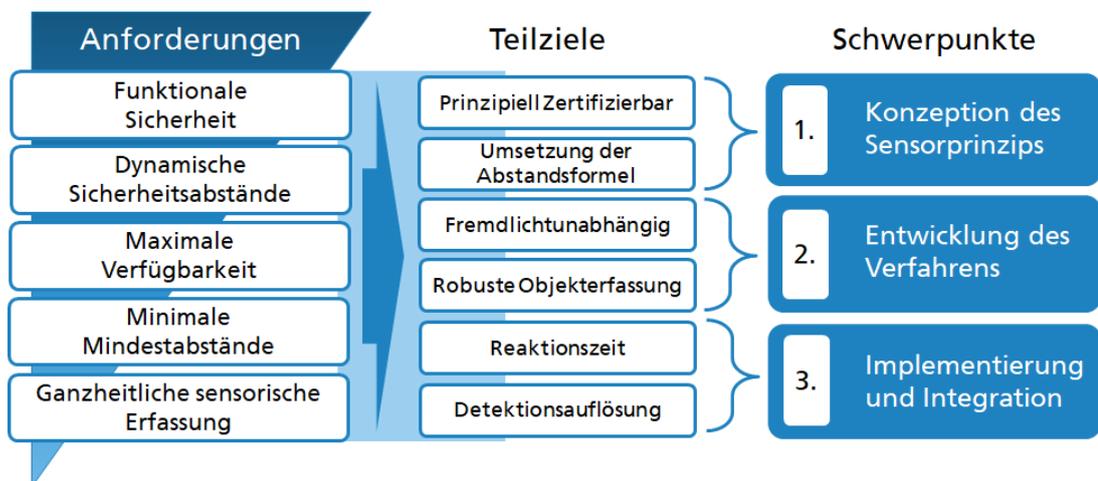


Abbildung 22: Priorisierung der Anforderungen und Ableitung der Schwerpunkte in dieser Arbeit. Der Fokus der Arbeit liegt auf den Anforderungen „Funktionale Sicherheit“, „Dynamische Sicherheitsabstände“ und „Maximale Verfügbarkeit“.

Da das zu konzipierende A2S den Anspruch erhebt zukünftig als Schutzeinrichtung im industriellen Bereich zur Überwachung dynamischer Sicherheitsabstände eingesetzt zu werden, sollen die Anforderungen *Funktionale Sicherheit*, *Dynamische Sicherheitsabstände* und *Maximale*

Verfügbarkeit im Besonderen bei der Konzeption des A2S betrachtet werden (hohe Priorität, siehe Abbildung 22). Diese bilden mit den Teilzielen *Prinzipiell Zertifizierbar*, *Umsetzung der Abstandsformel*, *Fremdlichtunabhängig* und *Robuste Objekterfassung* die Schwerpunkte 1 und 2 der Arbeit.

Mit dem Ziel der Erfüllung aller Anforderungen wurden die Anforderungen *Minimale Mindestabstände* und *Ganzheitliche sensorische Erfassung* bei der Konzeption des Sensorsystems berücksichtigt, in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht näher beschrieben. Auf Basis der konkreten Systemrealisierung in Schwerpunkt 3 sollen die Teilziele *Reaktionszeit* und *Detektionsauflösung* des A2S hinsichtlich der Auswirkungen auf die Umsetzung minimaler Mindestabstände analysiert und quantitativ betrachtet werden.

Zusammenfassend werden folgende Schwerpunkte in dieser Arbeit behandelt:

1. Konzeption des Sensorprinzips

Ein Teilziel des ersten Schwerpunktes besteht in der Konzeption eines aktiven 2D-Sensorprinzips (A2S) unter Verwendung von 2D-Kameratechnik in Kombination mit einer eigenen Beleuchtung. Dabei soll das A2S zum einen prinzipielle Voraussetzungen bezüglich einer Zertifizierung als Schutzeinrichtung für die Personensicherheit im industriellen Bereich erfüllen. Zum anderen soll das A2S für die Überwachung dynamischer Sicherheitsabstände gemäß Abstandsformel in ISO/TS 15066 ausgelegt sein. Diesbezüglich bildet die Konzeption einer geeigneten Methode schließlich das zweite Teilziel.

2. Entwicklung des Verfahrens

Das Ziel dieses Schwerpunktes stellt die Entwicklung und Umsetzung von Verfahren zur zuverlässigen Überwachung von Schutzräumen dar. Dabei sollen ambiente und hoch-dynamische Fremdlichteinflüsse berücksichtigt werden. Diese dürfen die Detektion von Schutzraumverletzungen entweder (i) nicht beeinflussen oder (ii) müssen vom Verfahren als Störung detektiert werden. In diesem Zusammenhang steht auch die robuste Erfassung von Objekten, deren Objekteindringungen in den Schutzraum möglichst unabhängig von deren Material- bzw. Oberflächeneigenschaften (Absorptions-, Reflexionsgrad, etc.) detektiert werden sollen.

3. Implementierung und Integration

Das konzipierte Sensorprinzip und Methode als Ergebnisse der Schwerpunkte 1 und 2 werden in Form von Hard- und Softwarekomponenten implementiert und in einen industriellen MRK-Versuchsstand integriert. Damit wird die Umsetzbarkeit und Anwendbarkeit des A2S demonstriert. Mit der konkreten Realisierung des A2S kann schließlich auf dieser Basis eine Evaluierung hinsichtlich der Teilziele *Reaktionszeit* und *Detektionsauflösung* durchgeführt werden. Dies erlaubt eine fundierte Einschätzung bezüglich der Anforderungserfüllung *Minimale Mindestabstände*.

5 Aktives 2D-Sensorprinzip

Die Erweiterung von 2D-Kameratechnik um eine eigene Beleuchtung bietet ein hohes Potential zur Erfüllung aller Anforderungen an eine Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* (siehe Abschnitt 4). Im Stand der Wissenschaft existieren bereits Ansätze auf Basis einer Kombination von Kamera- und Projektionstechnik (z. B. Tiefenbildkameras, siehe Abschnitt 3.3.2), wobei diese jedoch das Ziel einer 3D-Erfassung der Umgebung verfolgen. Wie in Abschnitt 3.4.1 diskutiert wurde, werden die Anforderungen an eine Schutzeinrichtung von diesen Technologien aufgrund fehlender bzw. abweichender 3D-Messwerte nur unzureichend erfüllt.

In diesem Kapitel wird die Konzeption eines neuartigen aktiven 2D-Sensorprinzips (A2S) präsentiert, welches die Vorteile von 2D-Kameratechnik mit den Vorteilen einer eigenen aktiven Beleuchtung (Lichtmodulator) kombiniert. Es wird gezeigt, dass dieses neu entwickelte Sensorprinzip die Anforderungen an eine Schutzeinrichtung hinsichtlich *Funktionaler Sicherheit* und *dynamischer Sicherheitsabstände* erfüllt. Auf Basis dieses Sensorprinzips wird in Kapitel 6 die Konzeption eines neuen Verfahrens zur Überwachung von Schutzräumen unter Berücksichtigung ambienter und hoch-dynamischer Fremdlichteinflüsse präsentiert.

Wesentliche Aspekte des konzipierten aktiven 2D-Sensorprinzips wurden in (Vogel et al. 2011), (Vogel et al. 2013) und (Vogel et al. 2015) veröffentlicht. Weiterhin wurden hierzu Patente im europäischen (EP2558886B1) und US-amerikanischen Raum (US9596451B2) erteilt.

5.1 Einführung

5.1.1 Zielstellung

Das Ziel stellt die Konzeption eines aktiven 2D-Sensorprinzips unter Verwendung von 2D-Kameratechnik und einer eigenen aktiven Beleuchtung dar. Dieses Ziel gilt als erreicht, wenn von diesem Sensorprinzip die folgenden Teilziele erfüllt werden:

- **Zertifizierbarkeit des Sensorprinzips**

Die Eignung des konzipierten Sensorprinzips hinsichtlich einer zukünftigen Umsetzung als industrielle Schutzeinrichtung hängt maßgeblich von der Wahrscheinlichkeit eines gefährbringenden Ausfalls des Sensorsystems ab (siehe Abschnitt 2.3). Nach (Hauke et al. 2017) kann ein Ausfall oder Defekt des Systems dabei auf zufällige oder systematische Ursachen

- Bauteilversagen (Alterung, Überbeanspruchung)
- Einflüsse aus der Umgebung (mechanisch, elektromagnetisch, Aerosole, Verschmutzungen)

zurückgeführt werden.

Da ein Ausfall oder Defekt des A2S unter Umständen schwerwiegende Verletzungen, gesundheitliche Schäden oder gar den Tod für den Menschen zur Folge haben kann, müssen entsprechende Maßnahmen von einzelnen Komponenten und/oder dem Gesamtsystem zur Verhinderung oder Aufdeckung derartiger Ausfälle umgesetzt werden.

- **Dynamische Sicherheitsabstände**

Das zweite Teilziel betrifft die Umsetzung dynamischer Sicherheitsabstände gemäß der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung*. Hierzu erlaubt die entsprechende Abstandsformel nach ISO/TS 15066 eine Bestimmung der erforderlichen einzuhaltenden Mindestabstände in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration (Gelenkstellungen, -geschwindigkeiten u. a.). Neben der Entwicklung eines geeigneten Verfahrens zur Bestimmung und Überwachung dynamischer Sicherheitsabstände muss auch die Frage nach der Berücksichtigung und Einbeziehung von dynamischen, zu manipulierenden Objekten (Werkstücke) beantwortet werden.

5.1.2 Vorgehen

Die größte Herausforderung hinsichtlich der Erreichung der definierten Teilziele stellt der Nachweis der Zertifizierbarkeit dar. Die dafür erforderliche exakte Bestimmung von Ausfallwahrscheinlichkeiten zum Gesamtsystem, der Teilsysteme bis hin zu einzelnen Bauteilen (siehe Abschnitt 2.3.2) ist im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Da auch die Ansätze im Stand der Wissenschaft den Aspekt der Zertifizierung als Schutzeinrichtung für die Personensicherheit nicht/unzureichend adressieren, wurde das folgende Vorgehen für die zielgerichtete Konzeption des A2S erarbeitet.

Der Lösungsweg besteht darin, dass das neuartige Sensorprinzip auf Basis etablierter Sicherheitsprinzipien umgesetzt und damit einhergehend der Nachweis der prinzipiellen Eignung als Schutzeinrichtung erbracht wird. Hierzu werden zunächst bewährte Sicherheitsprinzipien im aktuellen Stand der Technik recherchiert und deren Umsetzungen in existierenden Schutz-einrichtungen zur Gewährleistung der Personensicherheit analysiert (siehe Abschnitt 5.2). Dies bildet die Grundlage zur Bewertung der Sicherheitsprinzipien hinsichtlich Störungen aufgrund von Umgebungseinflüssen sowie Defekten/Ausfällen und zur anschließenden Auswahl eines favorisierten Funktionsprinzips. Die Adaption und Umsetzung dieses Funktionsprinzips zur Konzeption des A2S wird in Abschnitt 5.3 vorgestellt. Auf Basis des konzipierten A2S wird weiterhin ein modellbasiertes, geometrisches Verfahren zur Bestimmung dynamischer Sicherheitsabstände gemäß Abstandsformel (ISO/TS 15066) sowie unter Berücksichtigung der aktuellen Roboterkonfiguration entwickelt und in Abschnitt 5.4 detailliert beschrieben.

Die Ergebnisse bezüglich der Zielerreichung beider Teilziele aus Abschnitt 5.1.1 werden in Abschnitt 5.5 präsentiert.

5.2 Analyse bewährter Sicherheitsprinzipien

Zur Vermeidung des Auftretens von Fehlern oder Ausfällen bei Bauteilen, Komponenten oder auch Systemen finden sich im Stand der Technik verschiedene, bewährte Konstruktionsphilosophien bzw. Funktionsprinzipien. Die Anwendung dieser Methoden ist von den Eigenschaften des Bauteils, der Komponente oder des Systems (z. B. mechanisch, elektrisch, hydraulisch, etc.) abhängig. Im Folgenden werden grundlegende Sicherheitsprinzipien aus dem Stand der Technik präsentiert und im Zusammenhang mit existierenden Umsetzungen im Bereich der optischen und berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen analysiert.

5.2.1 Prinzip des sicheren Bestehens – Safe Life

Das Ziel dieses Prinzips stellt die Konstruktion und Realisierung von Bauteilen dar, deren Wahrscheinlichkeiten für einen Defekt, Versagen, Ausfall oder ähnlichem innerhalb deren vorgesehenen Lebensdauer minimal werden lassen. Solange das Bauteil in den hierfür vorgesehenen Parametern betrieben wird, kann von einem sicheren Bestehen ausgegangen werden (Saleh et al. 2014). Hierfür sind vielfältige und genaue Kenntnisse zum Bauteil und dessen Einsatzbedingungen unabdingbar. Dies betrifft beispielsweise Werkstoffkennwerte, Bauteilverhalten oder Betriebsbelastung. Für die Umsetzung dieses Prinzips werden unter anderem folgende Maßnahmen realisiert:

- Überdimensionierung
- Belastungs- / Beanspruchungs- / Restriktionsgerechtes Gestalten
- Reduzierung der Bauteilanzahl / Frühausfälle / Spätausfälle / Belastung

Trotz einer resultierenden geringen Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Fehlern, kann ein Ausfall durch unvorhersehbare Einflüsse nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund dieses Risikos werden Bauteile nach dem *Safe Life* Prinzip daher oftmals mit anderen Prinzipien kombiniert (z. B. *Redundanz*). Insbesondere bei elektronischen Systemen sieht ((Neudörfer 2016), S. 196) die Anwendung dieser Maßnahmen als „*nicht besonders wirkungsvoll*“ an.

Schlussfolgerung Die Anwendung dieses Prinzips auf das zu konzipierende Sensorprinzip muss als sehr aufwändig eingestuft werden, da ein sicheres Bestehen der Schutzeinrichtung wiederum ein sicheres Bestehen aller Einzelkomponenten und deren Bauteilen usw. voraussetzt. Aufgrund komplexer elektronischer Bauteile (z. B. CMOS-Sensor der Kamera) stellt dies eine große Herausforderung dar. Ebenso wären aufwendige Maßnahmen zum Schutz vor beeinträchtigenden Umwelteinflüssen zu treffen, um bspw. Verschmutzungen der Optik oder eine hohe Konzentration von Staubpartikeln in der Luft zu detektieren und darauf entsprechend zu reagieren.

5.2.2 Prinzip des beschränkten Versagens – Fail Safe

Maßnahmen mit dem Ziel der Umsetzung dieses Prinzips sollen bewirken, dass trotz auftretender Fehler ein vorab definiertes Sicherheitsniveau nicht unterschritten wird. Das System

wird somit bspw. bei einem Defekt eines technischen Bauteils zwangsläufig in einen sichereren Zustand überführt, von dem wiederum keine Gefährdung zu erwarten ist (Saleh et al. 2014). Voraussetzung dafür sind ein sicherer Systemzustand, Kenntnisse zu bspw. Störfallarten und Schadensverläufen sowie die prinzipielle Erkennbarkeit von Fehlern. Der Vorteil von *passiven Methoden* gegenüber *aktiven Methoden* besteht darin, dass bei einem Bauteilversagen ohne Zufuhr zusätzlicher Energie ein sicherer Zustand aufrechterhalten wird. Während im Normalfall das System autark mit Energie versorgt wird, geht das System im Fehlerfall in den energiearmen und sicheren Zustand über (Neudörfer 2016).

Existierende Schutzeinrichtungen Bekannteste Vertreter im Bereich der Sicherheitstechnik stellen Lichtschranken und Lichtgitter dar. An deren Schaltausgang wird nur genau dann ein fehlerfreier Zustand signalisiert, solange die Aussendung, Übertragung und der Empfang der elektromagnetischen Strahlung durch die entsprechenden Bauteile einwandfrei erfolgt. In jedem anderen Fall (Bauteildefekt, Strahlunterbrechung, etc.) wird dies durch einen energielosen Zustand am Schaltausgang repräsentiert.

Schlussfolgerung In Bezug auf das zu konzipierende A2S stellt die Möglichkeit zur Erkennung von Ausfällen/Defekten der Komponenten (Kamera, Lichtquelle) einen großen Vorteil dar. Außerdem würde dies auch die Erkennung von negativen Einflüssen/Effekten auf die Komponenten durch Umwelteinflüsse (z. B. kein Lichtempfang aufgrund verschmutzter Optik) ermöglichen.

5.2.3 Prinzip der Redundanz

Die Aufrechterhaltung der Sicherheitsfunktion trotz des Auftretens eines Fehlers in einem System kann auch durch Redundanzmaßnahmen erreicht werden. Dabei werden mehr Teilsysteme verwendet, als für die Erfüllung der Funktion prinzipiell erforderlich wären. Bei Ausfall eines Teilsystems übernehmen dann die redundanten Teilsysteme dessen Funktion (Neudörfer 2016). Redundanz kann hinsichtlich der Wirkungsweise (*aktive/passive Redundanz*), der Anordnung (*parallel/seriell/kreuzweise Redundanz*) und Bauteilverwendung (*homogene/diversitäre Redundanz*) unterschieden werden (Neudörfer 2016).

Existierende Schutzeinrichtungen Bei dem auf dem Markt befindlichen *SafetyEye* von Pilz (Pilz GmbH & Co. KG 2022; Haussmann und Hader 2007) bildet Redundanz den grundlegenden Sicherheitsaspekt (Heinke und Bömer 2009). Dies findet sich bspw. in der Anzahl eingesetzter Sensoren (drei Kameras) als auch bei der Verarbeitung der Sensordaten durch redundante Hardware und Algorithmen wieder. Aufgrund möglicher Programmier- und Hardwarefehler stellt hier die *diversitäre Redundanz* ein bewährtes Mittel zur Aufdeckung falscher Ergebnisse z. B. bei der Verarbeitung und Auswertung von Bildinformationen dar.

Schlussfolgerungen Die Umsetzung des Sensorprinzips durch redundante Auslegung der Komponenten erlaubt prinzipiell die Verringerung der Wahrscheinlichkeit gefahrbringender Ausfälle. Neben einem erhöhten Material- und Kostenaufwand sind negative Effekte auf das

Systemverhalten aufgrund von Umwelteinflüssen (z. B. Verschmutzungen der Optiken aller Sensoren) jedoch auch bei redundant ausgelegten Komponenten nicht auszuschließen.

5.2.4 Zusammenfassung

In den vorangegangenen Abschnitten wurden wesentliche Prinzipien zur Verringerung oder Vermeidung eines gefahrbringenden Ausfalls einer Schutzeinrichtung erläutert. In der folgenden Tabelle werden die gewonnen Erkenntnisse zusammengefasst und qualitativ bewertet. Diese bezieht sich auf die zwei wesentlichen Ursachen von Ausfällen: (i) Bauteilversagen und (ii) Umgebungseinflüsse.

Tabelle 20: Zusammenfassung der qualitativen Bewertung zur Anwendung von Sicherheitsprinzipien für das zu konzipierende Sensorprinzip.

	Ausfall durch Bauteilversagen	Ausfall durch Umgebungseinflüsse
Safe Life	Hoher technologischer Aufwand zu erwarten. Verminderung/Aufdeckung aller systematischer Ausfallmöglichkeiten ungewiss. Zufällige Bauteilausfälle möglich.	Negative Effekte auf die Komponenten und somit Ausfälle der Schutzeinrichtung können nicht ausgeschlossen werden.
Fail Safe	Hohes Potential zur Detektion von systematischen Fehlern und stochastischen Ausfällen.	Negative Effekte auf die Komponenten sind mit hoher Wahrscheinlichkeit feststellbar.
Redundanz	Verringerung der Ausfallwahrscheinlichkeit zu erwarten. Hoher Material- und Kostenaufwand.	Negative Effekte auf die Komponenten und somit Ausfälle der Schutzeinrichtung können nicht ausgeschlossen werden.

Als Ergebnis der qualitativen Bewertung in Tabelle 20 kann festgestellt werden, dass das *Fail Safe* Prinzip das größte Potential zur Verhinderung gefahrbringender Ausfälle einer Schutzeinrichtung sowohl beim Versagen von Bauteilen als auch bei Effekten durch Umgebungseinflüsse bietet. Dieses Prinzip wird hinsichtlich der Erfüllung weiterer Anforderungen im folgenden Abschnitt 5.2.5 näher betrachtet.

5.2.5 Diskussion des Sicherheitsprinzips „Ruhestromprinzip“

In Abschnitt 5.2.4 wurde festgestellt, dass das Prinzip des beschränkten Versagens *Fail Safe* in Bezug auf das zu konzipierende A2S das größte Potential zur Aufdeckung von Störungen bietet. Bei optischen Schutzeinrichtungen (z. B. Lichtschranken) kommt dabei insbesondere die passive *Fail Safe* Methode *Ruhestromprinzip* zum Einsatz. Das Ruhestromprinzip wird auch als *Prinzip der Energietrennung* bezeichnet, wobei die Experten des IFA diesbezüglich folgendes sagen (Hauke et al. 2017):

„Der sichere Zustand wird durch Wegnahme des Steuersignals (elektrische Spannung, Druck), also durch Energieabschaltung, erreicht.“

Das heißt, dass bspw. beim Auftreten eines Bauteilfehlers das System zwangsläufig in einen definierten sicheren Zustand übergeht und darin verweilt bis der Fehler behoben bzw. das System aktiv in einen anderen Zustand überführt wird.

Analysiert man die Umsetzung des *Ruhestromprinzips* am Beispiel einer Lichtschranke näher, ergeben sich dabei folgende Vorteile, die für die Konzeption des Sensorprinzips eine wesentliche Bedeutung haben:

- **Eindringende Objekte** (Unterbrechung des Strahlenganges) werden unabhängig von ihrer Oberflächenbeschaffenheit (Farbe, Textur) robust und zuverlässig detektiert. Der Grund dafür liegt darin, dass die Detektion nicht von Objekteigenschaften abhängig ist, sondern lediglich auf die Unterbrechung der emittierten Lichtstrahlen zurückzuführen ist (transparente Objekte werden vernachlässigt).
- **Defekte Komponenten** (z. B. Ausfall der Lichtquelle) führen ebenfalls zu einem energielosen Signal, so dass ein Funktionsausfall der Lichtschranke inhärent erkannt wird (Eigensicherheit/Selbstüberwachung der Komponenten). Das bedeutet, dass nur genau dann ein energievolleres Signal am Schaltausgang anliegt, wenn alle Komponenten einwandfrei funktionieren.
- **Umgebungseinflüsse** wie ändernde Lichtverhältnisse führen nicht zu einem Ausfall der Sicherheitsfunktion. Befinden sich die Lichtänderungen im Toleranzbereich wird der Energietransfer zwischen Lichtquelle und Lichtempfänger aufrechterhalten. Andernfalls wird die fehlerhafte bzw. fehlende Lichtübertragung detektiert und als energieloses Signal ausgegeben.
- **Muting** erlaubt bei Lichtschranken bzw. Lichtgittern das temporäre Aktivieren bzw. Deaktivieren der Sicherheitsfunktion. Dies erlaubt im Prinzip eine dynamische Anpassung des Überwachungsbereiches während des Betriebes.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die genannten Eigenschaften von Lichtschranken die Anforderungen zur Konzeption des A2S in optimaler Weise erfüllen. Neben bereits verfügbaren 1D- und 2D-Überwachungslösungen basierend auf dem Ruhestromprinzip existiert im Stand von Wissenschaft und Technik bisher keine Umsetzung in Form einer 3D-Raumüberwachung (siehe Abbildung 23).

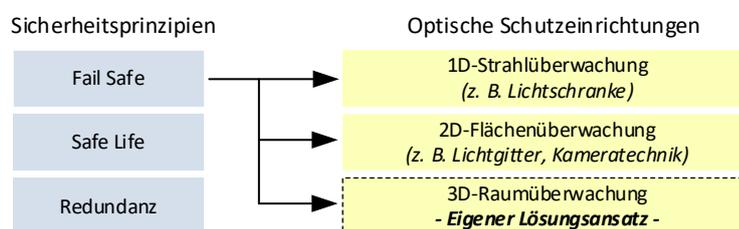


Abbildung 23: Erweiterung des Standes von Wissenschaft und Technik um ein optisches Sensorsystem auf Basis des Fail Safe Prinzips „Ruhestromprinzip“ zur 3D-Raumüberwachung.

Damit leistet diese Arbeit einen wesentlichen Beitrag zur Schließung dieser bestehenden Lücke mit einem neuartigen Lösungsansatz auf Basis von Kamertechnik in Kombination mit einer eigenen Beleuchtung. Der nächste Schritt besteht nun darin, dieses Funktionsprinzip hinsichtlich der Umsetzung einer 3D-Raumüberwachung zu erweitern und an geeignete Sensorkomponenten zu adaptieren.

5.3 Sichere 3D-Raumüberwachung

In Abschnitt 5.2.5 wurde gezeigt, dass das Funktionsprinzip einer Lichtschranke (*Ruhestromprinzip*) ein hohes Potential zur Erfüllung der spezifizierten Teilziele in Abschnitt 5.1.1 sowie der abgeleiteten Anforderungen in Abschnitt 2.4 aufweist. Mit dem Ziel der Erhaltung dieser positiven Eigenschaften basiert der Lösungsansatz zur Konzeption des A2S daher auf der Adaption dieses Funktionsprinzips (siehe Darstellung (a), Abbildung 24).

Hierbei gilt: Solange der Energietransfer ausgehend von der Lichtquelle über die Reflexionsoberfläche hin zum Lichtempfänger stattfindet, liegt ein entsprechendes energiegeloses Signal am Schaltausgang der Lichtschranke an. In jedem anderen Fall (Objekteindringung, Defekte, Umgebungseinflüsse) führt es zu einem energielosen Signal.

Dieses Prinzip einer einzelnen Reflexlichtschranke wurde zunächst auf die Überwachung eines 3-dimensionalen Bereiches erweitert (Abschnitt 5.3.1) und anschließend zur Umsetzung mit geeigneten Sensorkomponenten (Kameratechnik und Lichtmodulator) adaptiert (Abschnitt 5.3.2). Darauf aufbauend wird in Abschnitt 5.3.3 eine Möglichkeit zur Konfiguration von Schutzräumen vorgestellt.

5.3.1 3D-Erweiterung des Prinzips „Reflexlichtschranke“

In Bezug auf den überwachbaren Bereich bzw. Raum wirkt eine Lichtschranke lediglich eindimensional entlang des Strahlenganges (Darstellung (a), Abbildung 24). Die parallele Anordnung weiterer Lichtschranken, wie es bspw. bei Lichtgittern umgesetzt wird, erweitert den Überwachungsbereich auf zwei Dimensionen (Darstellung (b), Abbildung 24). Wird diese 2D-Anordnung um eine weitere Dimension erweitert, kann damit im Prinzip eine 3D-Raumüberwachung umgesetzt werden (Darstellung (c), Abbildung 24).

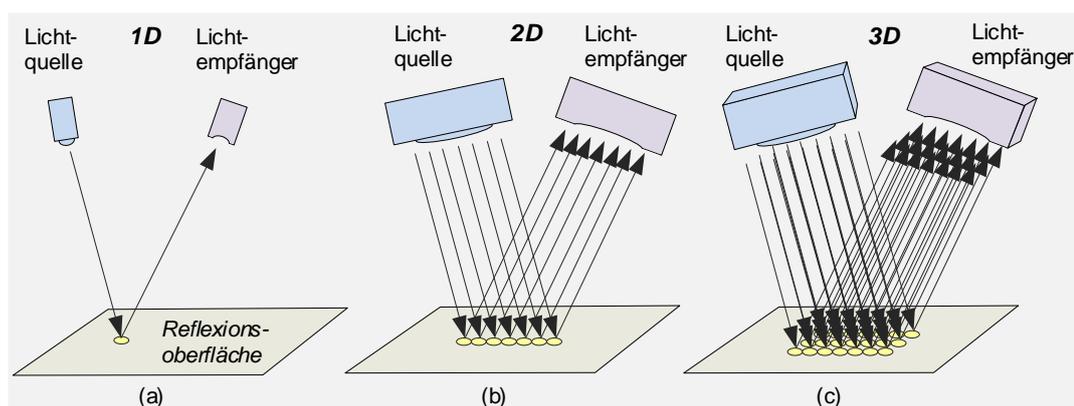


Abbildung 24: Schematische Darstellung zur Adaption des Funktionsprinzips. (a) Einzelanordnung zur 1D-Strahlüberwachung. (b) parallele, eindimensionale Anordnung zur 2D-Flächenüberwachung. (c) parallele, zweidimensionale Anordnung zur 3D-Raumüberwachung.

Eine derartige (z. B. matrixförmige) Anordnung von Lichtschranken würde dann auch durch eine situative und temporäre (z. B. in Abhängigkeit der Roboterbewegung) Aktivierung bzw. Deaktivierung von Lichtschranken (Muting) den zu überwachenden Bereich dynamisch in der Größe und Position verändern können.

5.3.2 Adaption des Funktionsprinzips an Sensorkomponenten

Die in Abschnitt 5.3.1 beschriebene Lösung einer 3D-Raumüberwachung auf Basis einer matrixförmigen Anordnung von Reflexlichtschranken birgt ein hohes Potential zur Erfüllung der Anforderungen, geht jedoch mit einer hohen technischen Komplexität² (Anzahl, Ausrichtung, Auflösung, etc.) einher. Daher gilt es nun, diesen Ansatz auf geeignete Sensorkomponenten zu übertragen, um zum einen die technische Komplexität zu verringern und zum anderen die Skalierbarkeit einhergehend mit einer Anpassung der räumlichen Auflösung für verschiedene geometrische Überwachungsbereiche zu ermöglichen. Dabei sollen die vorteilhaften Eigenschaften der Lösung beibehalten werden. Im Folgenden wird die Adaption der Reflexlichtschranken durch die Sensorkomponenten *Kameratechnik* und *Lichtmodulator* beschrieben.

Lichtemitter – Lichtmodulator

Die Menge der Lichtemitter aller Einzellichtschranken kann durch Projektionstechnik bzw. Lichtmodulatoren (siehe Darstellung (a) in Abbildung 25) ersetzt werden und bietet die folgenden Eigenschaften und Vorteile:

- Flächendeckende Beleuchtung (großer) Raumbereiche
- 2D-Projektionsbild LI mit einer Auflösung von $M_L \times N_L$ *Bildpunkten*
- Individuell ansteuerbare Bildpunkte
- Pixel-simultane Bilddarstellung
- Konstante Lichtemission für Zeitdauer Δt
- Triggerfähigkeit zur zeitsynchronen Bilddarstellung
- Emission eines definierten schmalbandigen Wellenlängenbereichs

Die unterschiedlichen Technologien von Lichtmodulatoren (z. B. DMD, LCD, LCoS) spielen für die Konzeption des Sensorprinzips eine untergeordnete Rolle. Im Kapitel 7 wird ein spezifischer Lichtmodulator im Versuchsstand eingesetzt und deren technische Leistungsparameter näher beschrieben.

Der wesentliche Unterschied eines Lichtmodulators bezüglich einer matrixförmigen Anordnung von Reflexlichtschranken liegt in der perspektivischen Projektion des Projektionsbildes. Dies führt dazu, dass in Abhängigkeit der Entfernung zwischen Projektionsoberfläche und Lichtmodulator eine unterschiedliche Größe des Pixelrasters und somit räumliche Auflösung der Pixel erzeugt wird. Damit einhergehend beschränkt sich der Überwachungsbereich auf ein pyramidenförmiges Überwachungsvolumen, welches am Lichtmodulator beginnt und von der Projektionsoberfläche (Reflexionsoberfläche) begrenzt wird (siehe Darstellung (a) in Abbildung 25).

² Bei $5\text{ cm} \times 5\text{ cm}$ räumliche Auflösung einer Einzellichtschranke sind für die Überwachung einer Fläche von 1 m^2 bereits 400 Einzellichtschranken erforderlich.

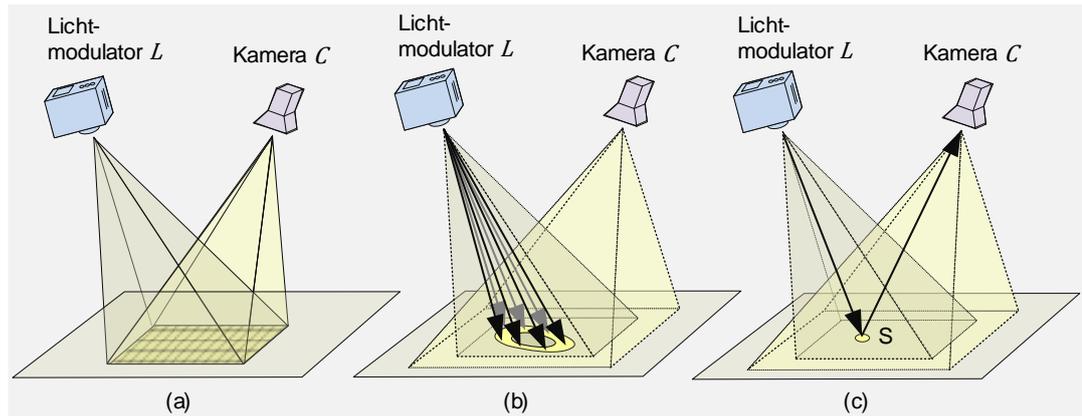


Abbildung 25: Adaptation des Prinzips eines Lichtschranken-Array auf ein 3D-Sensorprinzip. (a) Sensorprinzip besteht aus einem Lichtmodulator und Kameratechnik. (b) (De-)Aktivierung von Pixeln des Lichtmodulators zur Anpassung des abzusichernden Bereiches (c) Einzelpunktprojektion entspricht dem Prinzip einer einzelnen Reflexlichtschranke.

Durch Aktivierung (Licht wird emittiert) und Deaktivierung (Licht wird nicht emittiert) der individuell ansteuerbaren Bildpunkte des Lichtmodulators können zu überwachende Bereiche dynamisch in der Größe und Form angepasst werden (vgl. *Muting* in Abschnitt 5.2.5, siehe Darstellung (b) in Abbildung 25). Das emittierte Strahlenbündel eines einzelnen Bildpunktes stellt hierbei die kleinste adressierbare und steuerbare Einheit dar. Eine derartige Einzelpunktprojektion entspricht schließlich wieder der Funktionsweise einer einzelnen Reflexlichtschranke (siehe Darstellung (c) in Abbildung 25).

Lichtempfänger – Kameratechnik

Für die Erfassung der vom Lichtmodulator emittierten Lichtstrahlen kommt als Lichtempfänger Kameratechnik zum Einsatz (siehe Abbildung 25). Diese besitzt folgende Eigenschaften und Vorteile:

- Abbildung von (großen) Raumbereichen
- 2D-Intensitätsbild cI mit Auflösung von $M_c \times N_c$ Bildpunkten
- Pixel-simultane Bildaufnahme (Global-Shutter)
- Belichtungszeit für Zeitdauer Δt
- Triggerfähigkeit zur zeitsynchronen Bildaufnahme
- Bandpassfilter (optimiert auf emittierten Wellenlängenbereich)

Die zugrundeliegenden Technologien der Kameratechnik (z. B. CMOS, CCD) spielen für die Konzeption des Sensorprinzips eine untergeordnete Rolle. Im Kapitel 7 wird eine spezifische Kamera im Versuchsstand eingesetzt und deren technische Leistungsparameter näher beschrieben.

Wie auch beim Lichtmodulator besteht der wesentliche Unterschied bezüglich der matrixförmigen Anordnung der Reflexlichtschranken in dem pyramidenförmigen Erfassungsvolumen der Kamera (siehe Darstellung (a) in Abbildung 25). Für die ganzheitliche Erfassung der vom Lichtmodulator emittierten Lichtstrahlen muss die Kamera auf den vom Lichtmodulator beleuchteten Bereich entsprechend ausgerichtet sein (siehe Abbildung 25). Ein Bildpunkt des

Bildaufnehmers stellt hierbei die kleinste adressierbare Einheit zur Erfassung eines emittierten Lichtstrahlenbündels des Lichtmodulators dar. In Abhängigkeit der Kameraauflösung kann ein emittiertes Lichtstrahlenbündel auf ein oder mehrere Bildpunkte im Kamerabild abgebildet werden. Die Abhängigkeiten und die geometrischen Beziehungen zwischen Lichtmodulator, Kamera und Reflexionsoberfläche werden in Abschnitt 5.4.1 näher erläutert.

Reflexionsoberfläche – Projektionsoberfläche

Bei Reflexlichtschranken kommen üblicherweise Reflexionsoberflächen wie Spiegel, Reflektoren oder Reflexfolie (z. B. (ipf electronic gmbh)) zum Einsatz, die den emittierten Strahl der Lichtquelle zum Lichtempfänger reflektieren. Bezüglich des zu konzipierenden Sensorprinzips sollen jedoch möglichst keine spezifischen Oberflächen (Reflektoren, Reflexfolie, etc.) mit dem Ziel einer flexiblen Anwendung der Technologie erforderlich sein.

Da die prinzipielle Umsetzbarkeit des Sensorprinzips im Vordergrund steht, soll der Einfluss der Projektionsoberfläche auf die Detektionsleistung möglichst gering bzw. vernachlässigbar sein. Aus diesem Grund werden folgende, optimale Eigenschaften der Projektionsoberfläche gefordert und im Folgenden angenommen:

- Entspricht einer Ebene \mathbb{E}
- Minimaler Transmissionsgrad
- Minimaler Absorptionsgrad
- Diffuse Streuung (siehe Abbildung 26)

Generell sollten Projektionsoberflächen eine möglichst diffuse Lichtstreuung aufweisen, damit die Kamera(s) aus unterschiedlichen Positionen die vom Lichtmodulator emittierten und von der Projektionsoberfläche reflektierten (gestreuten) Strahlen empfangen.

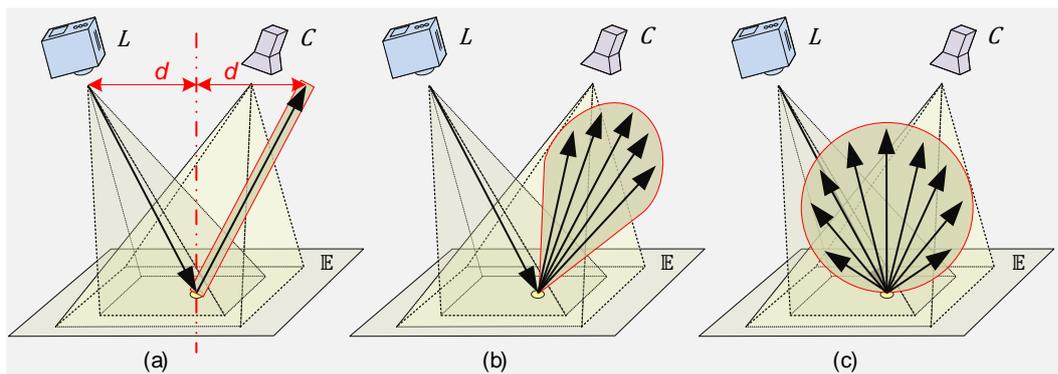


Abbildung 26: Auswirkungen verschiedener Oberflächeneigenschaften auf die Streuung der reflektierten Strahlung und resultierender Kameraerfassung (nach (Beyerer et al. 2016), S.87). (a) Perfekt spiegelnde Reflexion. (b) Schwach spiegelnde Reflexion. (c) Lambert'sche Streuung.

In Abbildung 26 wird die Abhängigkeit der Materialbeschaffenheit der Projektionsfläche und deren Auswirkungen auf die Erfassung durch die Kameras anhand einer Einzelpunktprojektion dargestellt (vgl. (Beyerer et al. 2016), S.87). *Spiegelnde Oberflächen* (Darstellung (a)) sind hierfür aufgrund des großflächigen Projektionsbereiches gänzlich ungeeignet. Eine Kamera wäre nicht in der Lage den gesamten Beleuchtungsbereich des Lichtmodulators zu erfassen.

Um dem entgegenzuwirken sollte die Streueigenschaft der Oberfläche zwischen einer *schwach spiegelnden Reflexion* (Darstellung (b)) und der *idealen diffusen Reflexion* (Darstellung (c)) liegen. Die quantitative Analyse des Einflusses der Oberflächenbeschaffenheit auf die Detektionsleistung wird in dieser Arbeit nicht näher betrachtet, stellt jedoch einen wesentlichen Aspekt weiterführender Untersuchungen dar (siehe Abschnitt 8.2).

5.3.3 Konfiguration von Schutzräumen

In Bezug auf die adaptierten Sensorkomponenten besteht ein großer Vorteil darin, dass die Strahlenbündel benachbarter Bildpunkte lückenlos (bzw. vernachlässigbar klein, siehe Abschnitt 5.3.2) aneinander anschließen. Durch (De-)Aktivierung von Bildpunkten des Lichtmodulators können damit einzelne Punkte, Linien, Flächen, geometrische Formen oder Kombinationen davon in verschiedensten Größen an unterschiedlichen Positionen auf der Projektionsoberfläche dargestellt und von der Kamera wiederum lückenlos überwacht werden (siehe Abbildung 27).

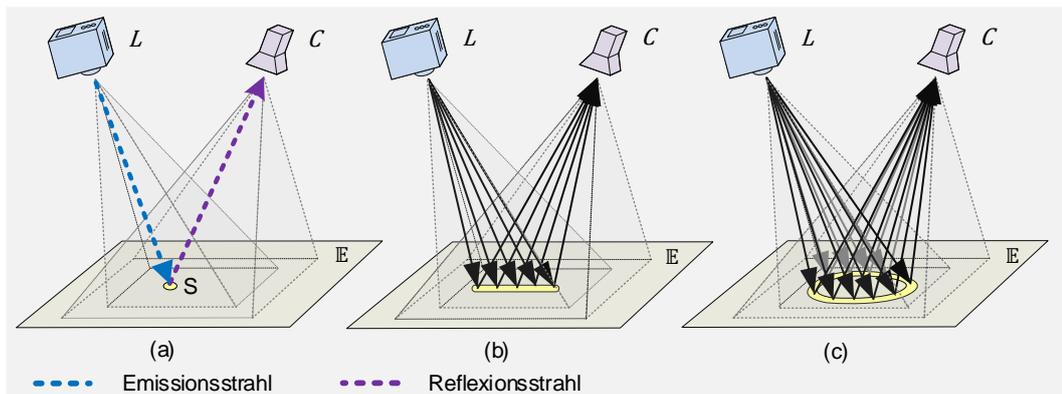


Abbildung 27: Varianten eines Schutzraumes mit unterschiedlicher Schutzraumkonfiguration: (a) Punktförmig (b) Offener Polygonzug (c) Geschlossener Polygonzug. Der Strahlengang ausgehend vom Lichtmodulator bis zur Erfassung durch die Kamera wird zwischen Emissionsstrahl und Reflexionsstrahl unterschieden.

Schutzraum (SR) In den Darstellungen der Abbildung 27 ist gut erkennbar, dass der tatsächlich überwachte Raum \mathcal{V} , der sogenannte *Schutzraum*, aus den Projektionsstrahlen (emittierte Strahlenbündel) und entsprechender Reflexionsstrahlen (bzw. Kamerasichtstrahlen) zur Darstellung und Überwachung der auf der Projektionsoberfläche abgebildeten geometrischen Form(en) besteht. Schutzräume können demnach komplexe 3-dimensionale Räume annehmen (siehe Darstellung (c) in Abbildung 27).

Schutzraumkonfiguration (SRK) Eine SRK \mathcal{G} definiert auf Basis einfacher geometrischer Formen F_i mit $i = 1 \dots n$ den zu überwachenden Bereich auf der Projektionsoberfläche \mathbb{E} . Da die Formen (z. B. Kreise, Rechtecke) innerhalb der Projektionsfläche \mathbb{E} liegen, gilt $\mathcal{G} \subseteq \mathbb{E}$ mit

$$\mathcal{G} = \{F_i \mid i = 1 \dots n\} \quad \forall p, i: p \in F_i \Rightarrow p \in \mathbb{E} \quad (2)$$

In der linken Darstellung von Abbildung 28 besteht der zu überwachende Bereich aus einer SRK mit vier einander überlappenden Formen (Kreise).

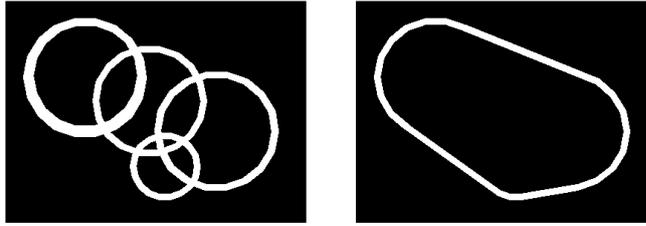


Abbildung 28: Links: Eine SRK G bestehend aus kreisrunden Formen F_i . Rechts: Konvexe Hülle über G bildet die Schutzraumsequenz S . Aus (Vogel et al. 2013), Copyright © 2013, IEEE.

Eine SRK kann auf unterschiedliche Weise bestimmt bzw. (de-) aktiviert werden:

- manuell
- zeitgesteuert (definierte Zeitpunkte)
- signalgesteuert (spezifische Eingangssignale)
- programmatisch (z. B. Berücksichtigung des aktuellen Roboterzustandes)
(siehe Abschnitt 5.4)

Schutzraumsequenz (SRS) Die F_i einer SRK G werden schließlich zur Bestimmung einer äußeren Kontur S von G herangezogen. Diese äußere Kontur kann als geschlossene Hülle ausgeprägt sein, um Objekte wie einen Roboter lückenlos zu umschließen. Zur Bildung dieser äußeren Kontur wurde die Methode der *konvexen Hülle* ($\text{convexHull}()$) über die Formen F_i gewählt, da somit eventuelle Verdeckungsgebiete aus Perspektive der Kamera reduziert werden konnten (siehe Abbildung 28, rechte Darstellung):

$$S = \bigcup_{i=1}^{m-1} [s_i \ s_{i+1}] = \text{convexHull}(G) \quad (3)$$

Die SRS $S \subseteq \mathbb{E}$ mit ($m > 1$) 3D-Punkten s_i repräsentiert einen Linienzug, der als offener oder geschlossener Polygonzug auf der Projektionsoberfläche \mathbb{E} ausgeprägt sein kann. Die Darstellung von S durch Emission der entsprechenden Lichtstrahlen durch den Lichtmodulator L und Überwachung von S durch die Kamera C bildet dann den Schutzraum \mathcal{V} .

5.4 Mensch-Roboter-Kooperation

In den vorangegangenen Abschnitten wurde das grundsätzliche Funktionsprinzip zur Konzeption des A2S vorgestellt. Darauf aufbauend wird in diesem Abschnitt die konkrete Umsetzung des A2S für die MRK präsentiert. Dabei liegt der Fokus auf der Entwicklung eines geometrischen Verfahrens zur dynamischen Bestimmung der Sicherheitsabstände in Form eines Schutzraumes, wobei prinzipbedingte Randbedingungen berücksichtigt werden müssen.

Im Folgenden werden zunächst die entwickelte Architektur und der entsprechende Verarbeitungsprozess präsentiert. Anschließend werden die dafür notwendigen Voraussetzungen in Form der *Umgebungsinformationen* näher beschrieben (siehe Abschnitt 5.4.2). Diese stellen die Basis zur dynamischen Bestimmung der erforderlichen SRS S für die Absicherung der Bewegungen eines Industrieroboters (Knickarmroboter) dar. Neben der Präsentation des hierfür entwickelten modellbasierten Lösungsansatzes wird in Abschnitt 5.4.3 ebenso eine neuartige

Methode *Schutzraumfusion* zur Berücksichtigung von zu manipulierenden Objekten vorgestellt. Die entwickelte Schutzraumfusion erlaubt die Eindringung von Objekten in den Schutzraum währenddessen die Annäherung des Menschen weiterhin sicher detektiert wird.

5.4.1 Systemarchitektur und Verarbeitungsprozess

Die konzipierte Architektur des A2S ist in Abbildung 29 schematisch dargestellt. Es beinhaltet die Sensorkomponenten bestehend aus einem Lichtmodulator L und einer Kamera C sowie die wesentlichen Softwarekomponenten und deren Beziehungen zueinander. L und C sind zeitlich synchronisiert, um die Aufnahme der Bilddaten von C zum Zeitpunkt der Darstellung eines Projektionsbildes von L zu gewährleisten.

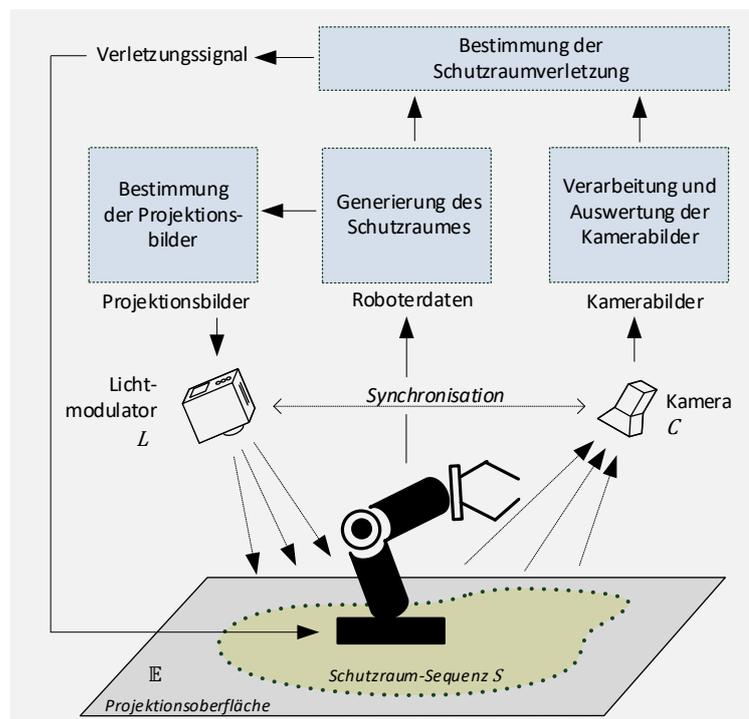


Abbildung 29: Schematische Darstellung der Architektur des A2S bestehend aus Hardware- und Softwarekomponenten und deren Beziehungen zueinander. Abbildung in Anlehnung an (Vogel et al. 2013).

Der generelle Verarbeitungsprozess (siehe Abbildung 30) beginnt mit der Generierung der erforderlichen SRS S auf Basis der aktuellen Gelenkstellungen und -geschwindigkeiten des Roboters. SRS S wird in jedem Durchlauf (Auswertezyklus) des Verarbeitungsprozesses dynamisch bestimmt und repräsentiert die einzuhaltenden Mindestabstände zur Gewährleistung der Sicherheit des Menschen in der Umgebung. Zur Darstellung von S auf der Projektionsoberfläche E werden entsprechende Projektionsbilder ${}^L I$ generiert und von L projiziert. Die emittierten Lichtstrahlen werden wiederum von C zeitsynchron als Kamerabild ${}^C I$ aufgenommen. Es gilt nun all die Bildpunkte in den Kamerabildern zu extrahieren, an denen emittierte Lichtstrahlen von L abgebildet werden. Die extrahierten Bildpunkte werden schließlich mit Referenzinformationen (RI) verglichen. Dringt ein Objekt in den SR ein, stimmen die RI nicht mit den extrahierten Bildpunkten überein, sodass ein Verletzungssignal an

den Roboter übermittelt wird. Daraufhin stoppt der Roboter unmittelbar seine Bewegung (bzw. reagiert entsprechend kollisionsvermeidend).

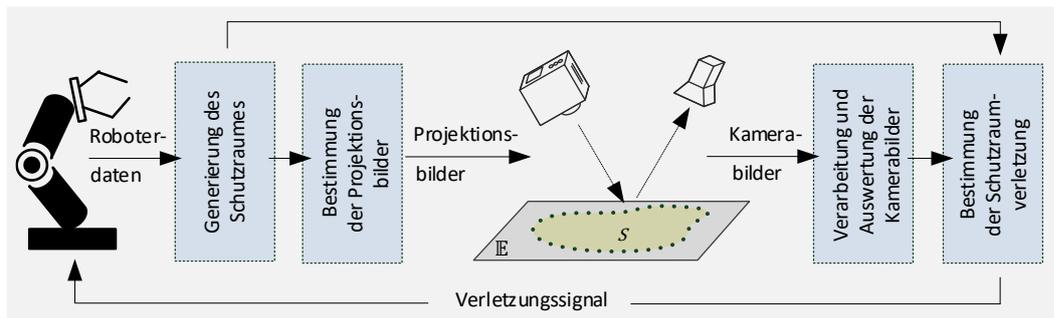


Abbildung 30: Schematische Darstellung des Verarbeitungsprozesses (am Roboter beginnend).

5.4.2 Notwendige Umgebungsinformationen

Für die Umsetzung der konzipierten Architektur und des Verarbeitungsprozesses im vorangegangenen Abschnitt 5.4.1 sind verschiedene *Umgebungsinformationen* notwendig. Allen voran müssen bestimmte Informationen zum Roboter vorliegen, damit zum einen ein SR derart in Größe und Form gebildet sowie überwacht werden kann, welcher die einzuhaltenden Mindestabstände zwischen Mensch und Roboter auch repräsentiert. Zum anderen muss dieser SR auch an der richtigen Position relativ zum Roboter (z. B. den Roboter vollständig und minimal umschließend) im Überwachungsraum dargestellt werden. Liegen diese Informationen nicht vor, könnte bspw. ein SR fälschlicherweise viel zu klein oder neben dem Roboter überwacht werden, was in Bezug auf die Personensicherheit unbedingt zu verhindern ist. Damit der SR also genau dort dargestellt und überwacht wird wo er benötigt wird, müssen entsprechende Voraussetzungen in Form der Umgebungsinformationen erfüllt sein. Diese repräsentieren eine übergeordnete Wissensbasis, welche die notwendigen Informationen bezüglich des Überwachungsbereiches in Form von Modellen und Beschreibungen beinhaltet:

- intrinsische und extrinsische Parameter der Sensorkomponenten Kamera und Lichtmodulator
- 3D-Geometrie-Modelle (Primitive) der Umgebung:
 - Projektionsoberflächen (z. B. Tisch, Boden)
 - statische und dynamische Objekte (z. B. Werkstücke, Werkzeuge)
 - Roboter
- Position und Lage aller 3D-Geometrie-Modelle
- Kinematisches Modell des Roboters
- Statische (z. B. manuell definierte) Schutzraumkonfigurationen

Geometrische Beziehungen

Die Darstellung und Überwachung einer SRS S an einer definierten Position im Überwachungsbereich bedingt, dass alle hierfür relevanten Entitäten zueinander in Beziehung gesetzt sind (siehe Abbildung 31). Dies betrifft in erster Linie die Sensorkomponenten Kamera C und Lichtmodulator L , aber darüber hinaus auch weitere Objekte (bzw. deren 3D-Modelle), wie Projektionsfläche, Roboter, Werkzeuge oder Werkstücke.

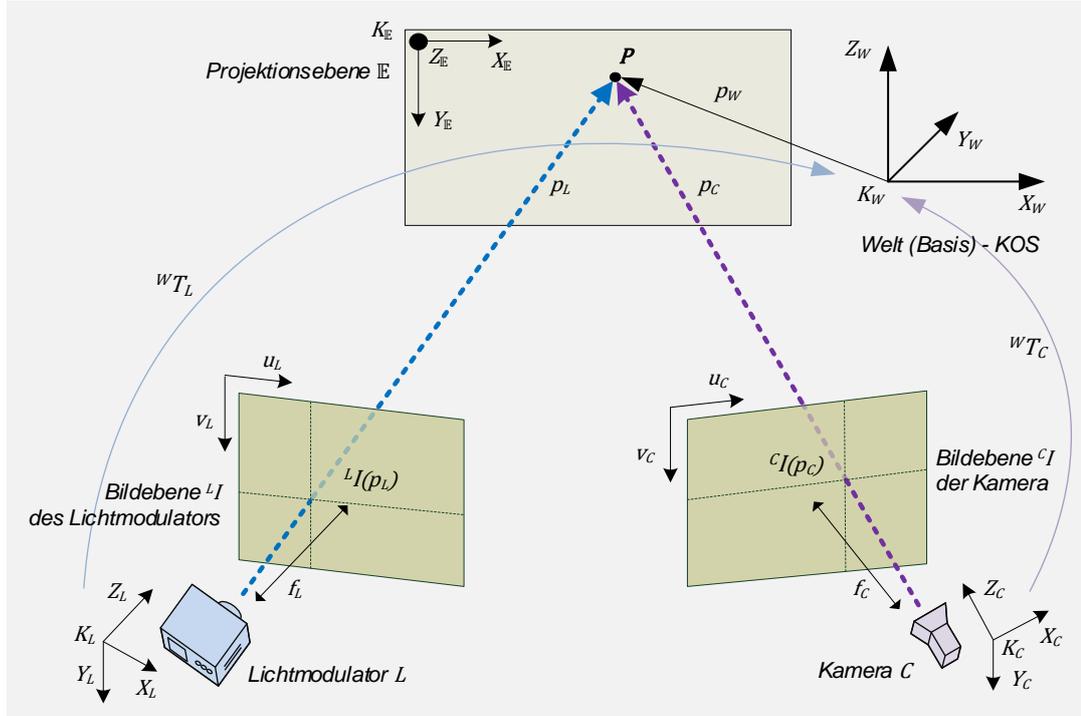


Abbildung 31: Schematische Darstellung der geometrischen Beziehungen mit Koordinatensystemen.

- **Weltkoordinatensystem K_W** (Basis-Koordinatensystem, Rechtssystem) Dies stellt ein einheitliches und bekanntes Koordinatensystem (KOS) in der Umgebung (Welt) dar. Bezüglich K_W sind alle Entitäten E (Kamera C , Lichtmodulator L , Objekte \hat{O} , Sequenzen S , Projektionsfläche \mathbb{E}) mit $E \in \{C, L, \hat{O}_1, \dots, \hat{O}_n, S_1, \dots, S_m, \mathbb{E}\}$ eindeutig definiert. Jedes E besitzt darüber hinaus ein eigenes Bezugs-KOS K_E .
- **Homogene Transformation T** definiert die vollständige Transformation (Rotation und Translation) zwischen zwei KOS. Die 6 Freiheitsgrade (DOF) eines KOS K_E bezüglich der Welt K_W werden durch Rotationsmatrix ${}^W R_E \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ (3 DOF) und Translationsvektor ${}^W t_E \in \mathbb{R}^{3 \times 1}$ (3 DOF) beschrieben:

$${}^W T_E = \begin{bmatrix} {}^W R_E & {}^W t_E \\ 0_{1 \times 3} & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Auf Basis von ${}^W T_E \in \mathbb{R}^{4 \times 4}$ lässt sich ein Punkt P mit dem Vektor $\tilde{p}^E \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ bzgl. K_E nach K_W transformieren.

$$\tilde{p}^W = {}^W T_E \tilde{p}^E \quad (5)$$

Die entgegengesetzte Transformation erfolgt mit Hilfe der inversen Transformationsmatrix $({}^W T_E)^{-1}$

$$\tilde{p}^E = {}^E T_W \tilde{p}^W = ({}^W T_E)^{-1} \tilde{p}^W \quad (6)$$

Die ${}^W T_E$ sind für alle K_E aufgrund von Kalibrierungen (Bestimmung durch Einmessen) oder durch Echtzeiterfassungen jederzeit bekannt.

- **Intrinsische Parameter** Beschreiben die spezifischen Sensor- und Objekteigenschaften der Sensorkomponenten Lichtmodulator L und Kamera C . Hierzu zählen Auflösung, Brennweite f , Bildhauptpunkt c und Verzerrungskoeffizienten k, p .

3D → 2D Abbildungsmodell mit Zentralprojektion

Auf Basis der intrinsischen Parameter von Kamera C (respektive Lichtmodulator L) findet die $3D \rightarrow 2D$ Abbildung bzw. $(x \ y \ z)^T \rightarrow (u \ v)^T$ durch Anwendung des Lochkameramodells mit Zentralprojektion statt (Süße und Rodner 2014).

Die Matrix \mathcal{H} wird als *intrinsische Matrix* oder *interne Projektionsmatrix* bezeichnet:

$$\mathcal{H} = \begin{pmatrix} f_x & \alpha & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (7)$$

- f_x, f_y – definieren die Brennweite in [Bildpunkten]
- c_x, c_y – definieren die Position des Bildhauptpunktes in [Bildpunkten]
- α – Faktor zur Berücksichtigung schiefwinkliger Bildkoordinatensysteme. Kann vernachlässigt werden, so dass gilt: $\alpha = 0$

Aus den Formeln (6) und (7) ergibt sich folgende Transformation, um einen Punkt P mit \tilde{p}^W bzgl. K_W zunächst in das Kamera-KOS K_C (respektive Lichtmodulator-KOS K_L) und anschließend in die Bildebene von C (respektive L) abzubilden:

$$\begin{pmatrix} u' \\ v' \\ w' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathcal{H} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} {}^C T_W \tilde{p}^W = \mathcal{M} \begin{pmatrix} \tilde{p}_x^W \\ \tilde{p}_y^W \\ \tilde{p}_z^W \\ \tilde{p}_w^W \end{pmatrix} \quad (8)$$

Die Matrix \mathcal{M} ist als *Projektionsmatrix* oder *Kameramatrix* bekannt (Beyerer et al. 2016). Neben den bereits berücksichtigten Eigenschaften des Sensors und der Optik in der intrinsischen Matrix \mathcal{H} , werden weitere Eigenschaften der abbildenden Optik (Objektive) durch die *Verzerrungsparameter* modelliert. Diese Parameter beinhalten sowohl *radiale* als auch *tangentiale* Verzerrungen (*Plumb Model*, (Brown 1966)).

Im Folgenden wird das *Heikkilä-Modell* (Zanuttigh et al. 2016; Heikkila und Silven 1997) angewandt, welches in vielen Software-Bibliotheken zum Einsatz kommt (z. B. (OpenCV 2020)).

Die verzerrte Bildposition $(u \ v)^T$ wird auf Basis der unverzerrten Bildposition $(u' \ v')^T$ und den Verzerrungskoeffizienten k, p nach folgender Formel bestimmt:

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + 2p_1 u' v' + p_2 (r^2 + 2u'^2) \\ v' (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_3 r^6) + p_1 (r^2 + 2v'^2) + 2p_2 u' v' \end{pmatrix} \quad (9)$$

wobei:

- $r = \sqrt{(u' - c_x)^2 + (v' - c_y)^2}$
- k_i mit $i = 1, 2, 3$ sind die Koeffizienten für die radiale Verzerrung
- p_i mit $i = 1, 2$ sind die Koeffizienten für die tangentielle Verzerrung

Im Ergebnis werden mit den beschriebenen Formeln (8) und (9) 3D-Punkte P bezüglich der Welt K_W auf die 2D-Bildebene der Kamera C (respektive Lichtmodulator L) abgebildet.

3D-Umgebungsmodelle

Die 3D-Modellierung der Umgebung beinhaltet die wesentlichen Objekte im Überwachungsbereich, die für den Überwachungsprozess erforderlich sind bzw. diesen direkt und/oder indirekt beeinflussen. Die Modellierung der Objekte erfolgt durch Verwendung einfacher geometrischer Primitive, sogenannter *Kollisionsprimitive* wie Ebene, Quader, Kugel oder Zylinder. Dabei können Objekte auch durch eine Kombination dieser Primitive approximiert werden. Der Grund für die Verwendung dieser Primitive anstatt realistischer 3D-Objektmodelle liegt darin, dass diese einfach und effizient weiter verarbeitet/transformatiert werden können. Diese Minimierung des Rechenaufwandes resultiert in minimierten Reaktionszeiten und damit einhergehend minimalen einzuhaltenden Mindestabständen.

Projektionsflächen Arbeitstisch, Werkbank oder Fußboden, die als Projektionsflächen zur Darstellung und Überwachung der Schutzräume dienen, werden in Form einer Ebene \mathbb{E} bezüglich der Welt repräsentiert (siehe Abbildung 32).

Roboter und weitere zu überwachende Objekte Alle Objekte, die vom A2S überwacht werden sollen, müssen entsprechend modelliert werden. Das betrifft in erster Linie den Roboter, aber auch Objekte, die dynamisch in den Überwachungsraum eingeführt oder auch entnommen werden. Beispielsweise sind das Objekte, die als Werkstücke vom Roboter bearbeitet oder bewegt werden.

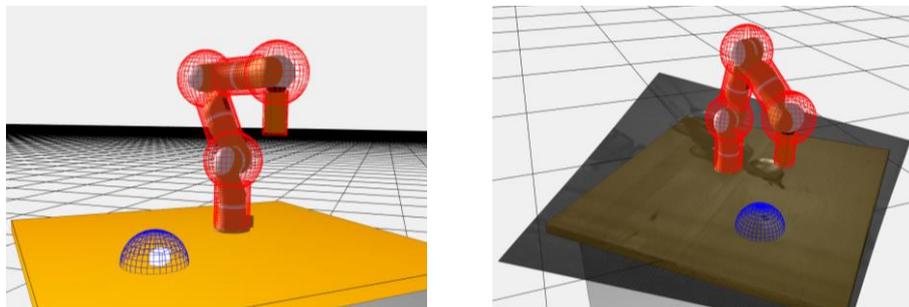


Abbildung 32: Repräsentation relevanter Objekte als 3D-Modelle in Form geometrischer Kollisionsprimitive. Kinematisches Robotermodell bestehend aus Kugeln und Zylindern (rotes Drahtgittermodell). Werkstück als Kugel (blaues Drahtgittermodell). Projektionsoberfläche als Ebene (gelb). Rechts: Überblendung der Szene mit realer Kamerabild. Aus (Vogel et al. 2015), Copyright © 2015, IEEE.

Wie in Abbildung 32 dargestellt, wird der Roboter durch mehrere Zylinder und Kugeln (rote Drahtgittermodelle) approximiert. Ein weiteres vom Roboter zu transportierendes Objekt wird als Kugel (blaues Drahtgittermodell) modelliert.

Verdeckende Objekte MRK-Arbeitsplätze bestehen nicht nur aus Roboter und Werkstücken, sondern auch aus weiteren prozessnotwendigen Objekten (z. B. Presse) oder baulichen Gegebenheiten (z. B. Trennwände). Diese können unter Umständen (größere) Teilbereiche des Überwachungsbereiches einnehmen und damit als Störkontur die Darstellung und Überwachung von Schutzräumen beeinflussen bzw. verhindern. Durch Modellierung dieser Objekte als 3D-Störkonturen können diese bei der Generierung des Schutzraumes entsprechend berücksichtigt werden.

Generell gilt: Jedes Objekt $\hat{\mathcal{O}}$ besteht aus einer Menge an geometrischen Primitiven \mathcal{O}

$$\hat{\mathcal{O}} = \{\mathcal{O}_k \mid k = 1 \dots m\} \quad (10)$$

und besitzt ein Objekt-KOS $K_{\hat{\mathcal{O}}}$. Mit Hilfe der Transformationsmatrix ${}^W T_{\hat{\mathcal{O}}}$ kann ein Punkt $P^{\mathcal{O}}$ bezüglich $K_{\hat{\mathcal{O}}}$ in die Welt K_W transformiert werden. Weiterhin besitzt jedes Primitiv \mathcal{O} ein lokales Primitiv-KOS $K_{\mathcal{O}}$ und eine Transformationsmatrix ${}^{\hat{\mathcal{O}}} T_{\mathcal{O}}$.

Die Transformation eines Punktes $P^{\mathcal{O}}$ des Primitives $\mathcal{O} \in \hat{\mathcal{O}}$ mit dem Vektor $\tilde{p}^{\mathcal{O}} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ von $K_{\mathcal{O}}$ nach K_W (Welt-KOS) erfolgt dann durch:

$$\tilde{p}^W = {}^W T_{\hat{\mathcal{O}}} \cdot {}^{\hat{\mathcal{O}}} T_{\mathcal{O}} \tilde{p}^{\mathcal{O}} \quad (11)$$

5.4.3 Dynamische Bestimmung des Roboter-Schutzraumes

Die primäre Anwendung des konzipierten A2S als Schutzeinrichtung stellt die dynamische Absicherung der Bewegungen eines Industrieroboters gemäß der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* mit dem Ziel der Kollisionsvermeidung dar. In Bezug auf das A2S muss hierbei die Frage nach der Größe, Form und Position des Schutzraumes, also die Bestimmung der SRS S beantwortet werden. Die hierfür notwendigen Grundlagen und das entwickelte modellbasierte Verfahren werden im Folgenden vorgestellt. Einzelne Aspekte und weiterführende Details werden in (Vogel et al. 2013) und (Vogel et al. 2015) beschrieben.

Abstandsformel

Die Formel zur Bestimmung der erforderlichen Sicherheitsabstände in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration und des Menschverhaltens wird in ISO/TS 15066 folgendermaßen beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.1, Gleichung (1), sowie Anhang A.4):

$$\mathcal{S}_p = v_h * \mathcal{J}_r + v_r * \mathcal{J}_r + v_h * \mathcal{J}_s + \mathcal{S}_s + \mathcal{C} + \mathcal{Z}_d + \mathcal{Z}_r \quad (12)$$

Da die gerichtete Geschwindigkeit des Menschen v_h von der aktuellen Konzeption des A2S nicht messbar ist (siehe Ausblick, Kapitel 8), wird gemäß ISO/TS 15066 die konstante Geschwindigkeit von $v_h = 1.6 \frac{m}{s}$ angenommen. Mit einer konstanten Reaktionszeit T_r des A2S, kann der Term

$$v_h * T_r = C_H \quad (13)$$

als Konstante C_H zusammengefasst werden, sodass sich mit den weiteren Konstanten aus Gleichung (12) der konstante Term δ_c ergibt:

$$\delta_c = C + Z_d + Z_r + C_H \quad (14)$$

Die übrigen Parameter aus Gleichung (12) werden zu einem dynamischen Anteil δ_D zusammengefasst:

$$\delta_D = v_r * T_r + v_h * T_s + \delta_s \quad (15)$$

Gleichung (12) kann nun durch δ_c und δ_D derart vereinfacht werden:

$$\delta = \delta_D + \delta_c \quad \text{mit } \delta \geq \delta_p \quad (16)$$

Kinematisches Roboter-Modell

Das kinematische Roboter-Modell beinhaltet eine mathematische Beschreibung über Anzahl und Anordnung der Achsen (bzw. Gelenke) eines Roboters. Mit Hilfe dieses Modells können spezifische Werte als Gelenkstellungen den einzelnen Achsen zugewiesen und eine entsprechende kartesische Position der Achsen oder des Tool Center Point (TCP) zu einem Referenz-KOS bestimmt werden (*Vorwärtstransformation*, (Bartenschlager et al. 1998)).

Im Folgenden wird das Modell eines Knickarmroboters (serielle Kinematik) mit $n = 6$ Achsen (entsprechend Freiheitsgraden - DOF) als offene kinematische Kette angenommen. Für jede Achse A_i mit $i = 1 \dots n$ kann ein spezifischer Gelenkwinkel φ_i (in [rad]) mit $A_i = \varphi_i$ zugewiesen werden. Die Achskonfiguration \hat{A}_t mit $\hat{A}_t = [A_1 A_2 \dots A_n]$ beinhaltet dann die Achsstellungen des Roboters zum Zeitpunkt t .

Jede Achse A_i besitzt eine Transformationsmatrix ${}^{A_{i-1}}T_{A_i}$ zur Beschreibung von Position und Orientierung des Achs-KOS K_{A_i} bezüglich der vorhergehenden Achse A_{i-1} mit $K_{A_{i-1}}$. Das Bezugs-KOS K_{A_0} der Achse A_0 entspricht dabei dem Welt-KOS K_W , so dass für die erste Achse A_1 gilt:

$${}^{A_0}T_{A_1} = {}^W T_{A_1} \quad (17)$$

Durch Multiplikation der Transformationsmatrizen entlang der kinematischen Kette erhält man die Position und Orientierung der letzten Achse A_n (TCP) bezüglich des Welt-KOS K_W :

$${}^W \hat{T}_{A_n} = {}^W T_{A_1}(A_1) * {}^{A_1} T_{A_2}(A_2) * \dots * {}^{A_{n-1}} T_{A_n}(A_n) = \prod_{i=1}^n {}^{A_{i-1}} T_{A_i}(A_i) \quad (18)$$

Mit Hilfe der Gleichung (18) kann somit ein beliebiger Punkt P mit dem Vektor $\tilde{p}^{A_k} \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ bezüglich eines Achs-KOS K_{A_k} in das Welt-KOS K_W folgendermaßen transformiert werden (Bartenschlager et al. 1998):

$$\tilde{p}^W = {}^W\mathbf{T}_{A_k} \tilde{p}^{A_k} = \prod_{i=1}^k {}^{A_{i-1}}T_{A_i}(A_i) \tilde{p}^{A_k} \quad \text{mit } 1 \leq k \leq n \quad (19)$$

Geometrisches Roboter-Modell

Mit dem Ziel einer geometrischen Bestimmung des erforderlichen Mindestabstandes wurde das kinematische Robotermodell in Form von Kollisionsprimitiven erweitert. Dazu wurden an jeder Achse A_i mit $i = 1 \dots n$ eine Menge $\hat{\mathcal{O}}^{A_i}$

$$\hat{\mathcal{O}}^{A_i} = \{\mathcal{O}_k^{A_i} \mid k = 1 \dots m_{A_i}\} \quad (20)$$

bestehend aus m_{A_i} Kollisionsprimitiven \mathcal{O}^{A_i} gekoppelt. Die Menge an Kollisionsprimitiven $\hat{\mathcal{O}}^{A_i}$ repräsentieren die Geometrie einer Achse A_i bestmöglich (minimal), dürfen jedoch nicht kleiner als die reale Geometrie sein (berechnete Mindestabstände sind sonst zu gering, was zu Kollisionen führen kann). Wie in Abbildung 32 dargestellt, werden hierfür bspw. Zylinder und Kugeln verwendet. Die gesamte Menge $\hat{\mathcal{O}}^R$ beinhaltet dann die Kollisionsprimitive aller Achsen und somit des Roboters R :

$$\hat{\mathcal{O}}^R = \bigcup_{i=1}^n \hat{\mathcal{O}}^{A_i} \quad (21)$$

Jedes Kollisionsprimitiv $\sigma \in \hat{\mathcal{O}}^R$ besitzt ein lokales Kollisionsprimitiv-KOS K_σ , wobei jeder Punkt P von σ mit dem Vektor $\tilde{p}^\sigma \in \mathbb{R}^{4 \times 1}$ bezüglich K_σ definiert ist.

Die Transformation von \tilde{p}^σ in das zugehörige Achs-KOS K_{A_k} , wobei gilt $\sigma \in \hat{\mathcal{O}}^{A_k}$ ($1 \leq k \leq n$), erfolgt mit Hilfe der Transformationsmatrix ${}^{A_k}T_\sigma$.

$$\tilde{p}^{A_k} = {}^{A_k}T_\sigma \tilde{p}^\sigma \quad (22)$$

Durch Erweiterung der Gleichung (19) kann \tilde{p}^σ schließlich bzgl. des Welt-KOS K_W in Abhängigkeit der A_i folgendermaßen transformiert werden:

$$\tilde{p}^W = {}^W\mathbf{T}_{A_k} {}^{A_k}T_\sigma \tilde{p}^\sigma = \prod_{i=1}^k ({}^{A_{i-1}}T_{A_i}(A_i)) {}^{A_k}T_\sigma \tilde{p}^\sigma \quad \text{mit } 1 \leq k \leq n \quad (23)$$

Geometrische Bestimmung des Mindestabstandes

Im Folgenden werden auf Basis der vorangegangenen Definitionen zu Abstandsformel, kinematischem Robotermodell und geometrischem Robotermodell das entwickelte Verfahren zur geometrischen Bestimmung der einzuhaltenen Mindestabstände eines Knickarmroboters R mit $n = 6$ Achsen präsentiert.

Zunächst werden folgenden Annahmen getroffen (vgl. (Petersen et al. 2018)):

- Bewegungstrajektorie des Roboters ist bekannt.
- Bahntreuer Bremsvorgang. Dabei bestimmt die Methode

$$\mathcal{T}_s = \text{brakeTime}(t_i) \quad (24)$$

die maximale Bremszeit \mathcal{T}_s aller Achsen, um diese zum Zeitpunkt t_i bis zum Stillstand abzubremsen. Informationen zu achsspezifischen Bremswegen und Bremszeiten in Abhängigkeit von Achsgeschwindigkeiten, Ausladung und aktueller Traglast des Roboters liegen gemäß Anhang B der Norm ISO 10218-1 vor.

- Achskonfiguration $\hat{A}_{t_i} = [A_1 A_2 \dots A_n]$ zum Zeitpunkt t_i mit $t \leq t_i \leq (t + \mathcal{T}_r + \mathcal{T}_s)$ ist bekannt³. Die Bereitstellung der Achskonfiguration zu einem spezifischen Zeitpunkt t_i erfolgt durch die Methode

$$\hat{A}_{t_i} = \text{axisAtTime}(t_i) \quad (25)$$

Das entwickelte Verfahren basiert auf einer Verarbeitung der definierten Kollisionsprimitive $\hat{\mathcal{O}}^{A_i}$ (Gleichung (20)) für jede Achse A_i ($i = 1 \dots n$). Das Ziel besteht darin, mit Hilfe der Kollisionsprimitive den erforderlichen, zu überwachenden geometrischen Raum zu bestimmen, der die einzuhaltenden Mindestabstände gemäß Gleichung (16) beinhaltet: $\mathcal{S} = \mathcal{S}_D + \mathcal{S}_C$.

Bestimmung von \mathcal{S}_C Der konstante Anteil \mathcal{S}_C wird zunächst initial auf Basis der ermittelten bzw. vorliegenden Parameter gemäß Gleichung (14) bestimmt. Die Berücksichtigung von \mathcal{S}_C bezüglich des einzuhaltenden Mindestabstandes \mathcal{S} erfolgt dadurch, dass \mathcal{S}_C als Offset auf die Größe der Kollisionsprimitive angerechnet wird. (Bezüglich einer Kugel mit Radius r , welche die reale Form des Roboters beinhaltet, ändert sich die Größe der Kugel auf $r_{\mathcal{S}_C} = r + \mathcal{S}_C$.)

In Bezug auf alle Kollisionsprimitive $\hat{\mathcal{O}}^R$ von R ergibt sich somit die Menge $\bar{\mathcal{O}}^R$ mit Kollisionsprimitive, deren Größe durch die Methode *offset $_{\mathcal{S}_C}$* um \mathcal{S}_C erweitert wurde:

$$\bar{\mathcal{O}}^R = \text{offset}_{\mathcal{S}_C}(\hat{\mathcal{O}}^R, \mathcal{S}_C) \quad (26)$$

Die Kollisionsprimitive von $\bar{\mathcal{O}}_t^R$ repräsentieren die Position und Ausrichtung der Achsen zum Zeitpunkt t auf Basis der Achskonfiguration \hat{A}_t

$$\bar{\mathcal{O}}_t^R = \bar{\mathcal{O}}^R(\hat{A}_t) \quad (27)$$

Bestimmung von \mathcal{S}_D Der dynamische Anteil \mathcal{S}_D setzt sich zum einen aus den Roboterwegen \mathcal{S}_r sowie \mathcal{S}_s und zum anderen aus dem Weg \mathcal{S}_H des Menschen zusammen (siehe Gleichung (15)). Mit dem Eindringen eines Objektes in den SR zum Zeitpunkt t dauert es zunächst die Reaktionszeit \mathcal{T}_r bis der Bremsvorgang von R initiiert wird. Während \mathcal{T}_r bewegt sich R entlang

³ Für die vorliegende Arbeit wird davon ausgegangen, dass die Achsstellungen des Roboters ausgehend vom aktuellen Zeitpunkt t zumindest für die Zeitdauer der Reaktionszeit \mathcal{T}_r und anschließender Bremszeit \mathcal{T}_s bekannt sind.

seiner Trajektorie weiter. Anschließend bremst R während \mathcal{T}_s bis zum Stillstand ab. Die resultierenden Achsstellungen \hat{A}_{t^*} repräsentieren die finale Achskonfiguration von R , sobald dieser nach Ablauf von \mathcal{T}_r und \mathcal{T}_s zum Stillstand gekommen ist.

Der Lösungsansatz zur Bestimmung der Roboterwege $S_r + S_s$ zum Zeitpunkt t besteht in der Prädiktion der Achsstellungen \hat{A}_{t^*} , die der Roboter in der Zukunft zum Zeitpunkt t^* mit $t^* = t + \mathcal{T}_r + \mathcal{T}_s$ einnehmen würde. Da der Roboter während der Zeitdauer von $\mathcal{T}_r + \mathcal{T}_s$ prinzipiell einen weit ausladenden Raum durchfahren kann, werden in diskreten zeitlichen Abständen θ ausgehend von t bis t^* zu den Zeitpunkten t_θ eine Folge von Achsstellungen zur Berücksichtigung des Bewegungsablaufes (Trajektorie) von R während der Zeitdauer $\mathcal{T}_r + \mathcal{T}_s$ bestimmt:

$$t_\theta = t + i\theta \quad \text{mit } i \in \mathbb{N}, i = 0 \dots \frac{(t^* - t)}{\theta} \quad (28)$$

Zu jedem Zeitpunkt t_θ werden die Achsstellungen \hat{A}_{t_θ} durch die Methode $\hat{A}_{t_\theta} = \text{axisAtTime}(t_\theta)$ (Gleichung (25)) bestimmt und die Kollisionsprimitive $\bar{\mathcal{O}}^R$ des Roboters R gemäß der Achsstellungen \hat{A}_{t_θ} transformiert. Die Menge der Kollisionsprimitive $\bar{\mathcal{O}}_{t_\theta}^R$ von R zu allen Zeitpunkten t_θ beinhaltet schließlich den Bewegungsablauf von R zwischen den Zeitpunkten t und t^* :

$$\bar{\mathcal{O}}_{t_\theta}^R = \bigcup_{t_\theta=t}^{t^*} \bar{\mathcal{O}}^R(\hat{A}_{t_\theta}) = \bigcup_{t_\theta=t}^{t^*} \bar{\mathcal{O}}^R(\text{axisAtTime}(t_\theta)) \quad (29)$$

Bezüglich \mathcal{S}_D muss nun noch der Weg S_H des Menschen während der Bremszeit \mathcal{T}_s mit $\mathcal{T}_s = \text{brakeTime}(t + \mathcal{T}_r)$ (Gleichung (24)) berücksichtigt werden. Da der Mensch sich prinzipiell aus allen Richtungen dem Roboter nähern kann⁴, wird der Weg

$$v_h * t_s \quad \text{mit } t_s = 0 \dots \mathcal{T}_s \quad (30)$$

äquivalent zu Gleichung (26) wiederum als Größen-Offset den Primitiven $\bar{\mathcal{O}}_{t_\theta}^R$ in Abhängigkeit des Zeitpunktes t_θ aufgeschlagen:

$$\bar{\mathcal{O}}_{t_\theta}^R = \bigcup_{t_\theta=t+\mathcal{T}_r}^{t^*} \text{offset}_{\mathcal{S}_H}(\bar{\mathcal{O}}^R(\hat{A}_{t_\theta}), (v_h * t_s)), \quad \text{mit } t_s = t_\theta - t - \mathcal{T}_r \quad (31)$$

Zusammenfassend repräsentiert schließlich \mathcal{D}_t mit

$$\mathcal{D}_t = \bar{\mathcal{O}}_{t_\theta}^R \cup \bar{\mathcal{O}}_{t_\theta}^R \quad (32)$$

den geometrischen Kollisionsraum zum Zeitpunkt t , der durch die Menge der transformierten Kollisionsprimitive gebildet wird und die einzuhaltenen Mindestabstände gemäß Abstandsformel nach ISO/TS 15066 (siehe Gleichung (16)) beinhaltet.

⁴ Ein Tracking des Menschen könnte in Kombination mit einer Messung der Bewegungsgeschwindigkeit zukünftig durch A2S selbst oder einem externen System erfolgen und somit den Mindestabstand weiter verringern.

Projektive Abbildung von Objekten

Für die Generierung eines Projektionsbildes ${}^L I$ ist die aktuelle SRS S erforderlich, die wiederum aus einer Menge an geometrischen Formen F_i nach Gleichung (3) gebildet wird. Da jedoch oftmals und insbesondere für dynamische Objekte wie Roboter oder Werkstücke keine geometrischen Formen F_i initial vorliegen, müssen diese zunächst auf Basis der bestehenden aktuellen 3D-Kollisionsprimitive \mathcal{O}_k eines Objektes $\hat{\mathcal{O}}$ bestimmt werden.

Dazu wird jedes Primitiv \mathcal{O}_k des Objektes $\hat{\mathcal{O}}$ (siehe Gleichung (10)) unter Anwendung einer $3D \rightarrow 2D$ projektiven Abbildung auf die Projektionsoberfläche \mathbb{E} transformiert. Die 2D-Abbildung von \mathcal{O}_k auf \mathbb{E} resultiert dann in der Form F_k . In Abbildung 33 ist dieser Sachverhalt unter Anwendung einer Zentralprojektion mit dem Lichtmodulator L als Projektionszentrum (Augpunkt) dargestellt. Für die Bestimmung einer Form $F(\mathcal{O})$ auf \mathbb{E} sind lediglich die Vektoren $p_{\mathcal{O}}$ (Sichtstrahlen von L) zu den Punkten $P_{\mathcal{O}}$ des Primitives \mathcal{O} mit der Ebene \mathbb{E} zu schneiden. Die $3D \rightarrow 2D$ projektive Abbildung eines Primitives \mathcal{O} auf die Projektionsebene \mathbb{E} zur Bestimmung der Form $F(\mathcal{O})$ wird im folgenden Verlauf der Arbeit durch die Funktion $project()$ beschrieben:

$$F(\mathcal{O}) = project(\mathcal{O}) \quad (33)$$

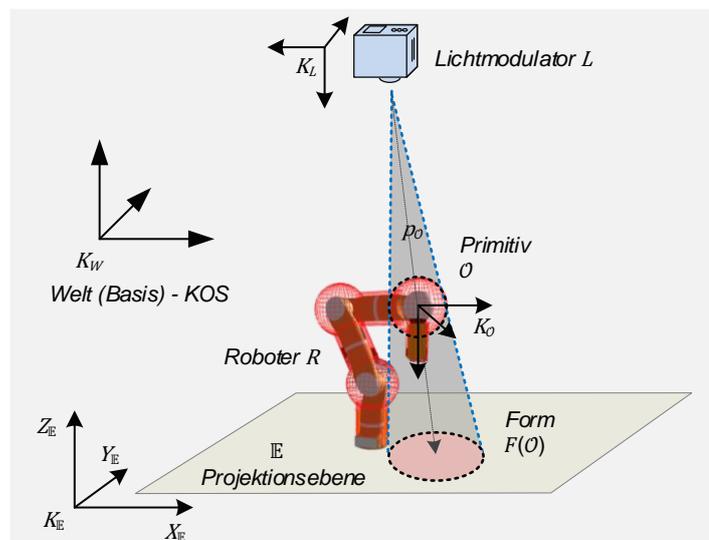


Abbildung 33: Zentralprojektive Abbildung eines Primitives \mathcal{O} auf die Projektionsfläche \mathbb{E} mit dem Projektionszentrum L und der resultierenden Form $F(\mathcal{O})$ auf \mathbb{E} .

Fusionierung von Schutzräumen

Die Verwendung eines Industrieroboters beinhaltet üblicherweise auch eine entsprechende Aufgabe zur Manipulation, Perception, Transport usw. von Objekten (z. B. Werkstücke). Hierfür muss sich der Roboter R zunächst zum Ziel-Objekt $\hat{\mathcal{O}}$ hinbewegen, um anschließend eine Aufgabe am Objekt durchzuführen (oder dieses zu transportieren, etc.). In Bezug auf Schutzeinrichtungen stellen derartige Situationen jedoch eine Herausforderung dar: Mit dem Ziel einer sicheren und zuverlässigen Detektion jeglicher annähernder und in Schutzräume eindringender Objekte (Mensch) führen schließlich auch die zu handhabenden Objekte

(Werkstücke) zu einem Stopp der Roboterbewegung, wenn diese den Mindestabstand unterschreiten. Als Lösung dieses Problems werden im Stand der Technik die (semi-) statischen Schutzräume derart konfiguriert, sodass der Roboter und alle prozessnotwendigen Betriebsmittel generell innerhalb des Schutzraumes liegen (Merx 2019). Die Schutzräume werden dadurch jedoch sehr groß (größer als erforderlich) und eine zweckmäßige Zusammenarbeit von Mensch und Roboter ist damit kaum möglich. Als Alternative dazu werden die Objekte hinsichtlich *bekannt* (z. B. Werkstück) und *unbekannt* (Mensch) klassifiziert (Henrich und Gecks 2008; Fischer und Henrich 2009). Bekannte Objekte werden dann von der Schutzeinrichtung „ignoriert“ und können somit in den Schutzraum eindringen bzw. diesen durchdringen (siehe z. B. *Muting* bei Lichtschranken).

In Bezug auf das konzipierte A2S stellt sich nun die Frage, wie bekannte Objekte in den Schutzraum aufgenommen werden ohne dass gleichzeitig der Mensch oder Körperteile des Menschen unbemerkt in diesen SR eindringen können. Zur Lösung dieses Problems wurde das in Abbildung 34 dargestellte *Fusionsverfahren* entwickelt.

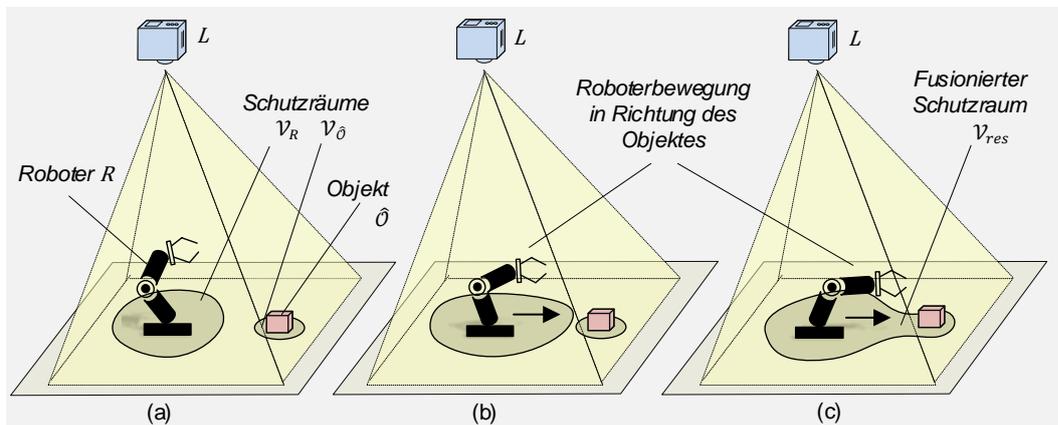


Abbildung 34: Ablauf zum Greifen eines Objektes per Schutzraumfusion. (a) Zusätzliche Darstellung und Überwachung eines objektspezifischen Schutzraumes $\mathcal{V}_{\hat{o}}$. (b) Annäherung des Roboter-Schutzraumes \mathcal{V}_R an Objekt-Schutzraum $\mathcal{V}_{\hat{o}}$ während der Roboterbewegung. (c) Fusion der Schutzräume \mathcal{V}_R und $\mathcal{V}_{\hat{o}}$ bei Überschneidung/Überlagerung der Schutzräume. Eine Separierung der Schutzräume erfolgt in umgekehrter Reihenfolge.

Der Lösungsansatz besteht darin, dass neben dem SR \mathcal{V}_R zur Absicherung des Roboters R auch das zu manipulierende Ziel-Objekt \hat{O} von einem eigenen separaten SR $\mathcal{V}_{\hat{o}}$ umgeben wird (Darstellung (a), Abbildung 34). Bei der Annäherung von R an \hat{O} verändert sich einhergehend mit der Roboterbewegung der \mathcal{V}_R (Darstellung (b)). Mit zunehmender Annäherung beider Schutzräume kommt es schließlich zu einer Überschneidung von \mathcal{V}_R und $\mathcal{V}_{\hat{o}}$ (Darstellung (c)), so dass diese zu einem einzigen resultierenden Schutzraum \mathcal{V}_{res} fusionieren:

$$\mathcal{V}_R \cup \mathcal{V}_{\hat{o}} \Rightarrow \mathcal{V}_{res} \quad (34)$$

Das Objekt \hat{O} kann somit zu keinem Zeitpunkt die emittierten Lichtstrahlen des \mathcal{V}_R unterbrechen und als eindringendes Objekt detektiert werden. Parallel dazu wird der Roboter R permanent weiter vollumfänglich überwacht und andere unbekannte eindringende Objekte werden sicher detektiert.

Für die Umsetzung dieses Verfahrens sind folgende Informationen erforderlich:

- Objekt \hat{O} ist in Form und Größe bekannt
- 3D-Modell bestehend aus Kollisionsprimitiven O_i liegt für \hat{O} vor
- Position und Ausrichtung von \hat{O} (Transformationsmatrix ${}^W T_{\hat{O}}$) ist bekannt

Da die Aufgabe des Roboters darin besteht eine spezifische Manipulation mit diesem Objekt durchzuführen, liegen diese Informationen in der Regel auch vor.

Dieses Verfahren hat darüber hinaus eine Reihe weiterer Vorteile:

- Während ein Objekt \hat{O} von einem separaten Schutzraum $\mathcal{V}_{\hat{O}}$ umschlossen wird, findet permanent eine Überwachung von $\mathcal{V}_{\hat{O}}$ hinsichtlich des Eindringens unbekannter Objekte statt. Dadurch können eventuelle Änderungen von \hat{O} bezüglich deren Position oder Lage sicher detektiert werden.
- Ein vom Roboter transportiertes Objekt \hat{O} ändert während des Transportes mit dem Roboter permanent seine Position, so dass eine Überschneidung und somit Fusion von $\mathcal{V}_{\hat{O}}$ und \mathcal{V}_R inhärent erfolgt. Nach Ablage des Objektes \hat{O} entfernt sich der Roboter von \hat{O} , so dass sich $\mathcal{V}_{\hat{O}}$ und \mathcal{V}_R automatisch wieder separieren.
- Das Verfahren ist generell unabhängig davon, welcher Schutzraum \mathcal{V}_a sich einem anderen Schutzraum \mathcal{V}_b annähert oder auch entfernt. Die Fusion hängt ausschließlich davon ab, ob eine Überschneidung von Schutzräumen zum Zeitpunkt t vorliegt oder nicht. Dabei können beliebig viele Schutzräume miteinander fusionieren oder voneinander separieren.
- Das Verfahren erlaubt die Berücksichtigung von spezifischen Bereichen oder Objekten im Arbeitsraum, die bspw. eine Störgeometrie darstellen, prozessrelevant sind oder generell nicht als Projektionsfläche genutzt werden sollen (z. B. Ablage diverser Werkzeuge, Werkstoffe, etc.). Dazu können an diesen Bereichen bspw. statische SRS, SRK oder 3D-Primitive definiert werden.

Die Fusion der Schutzräume basiert auf einem 2D-Gradientenverfahren, dessen Entwicklung und Umsetzung in (Vogel et al. 2015) im Detail präsentiert wird.

Voraussetzung für die Fusion einer Menge an Schutzräumen $\{\mathcal{V}_i\}$ sind das Vorliegen der entsprechenden SRS S_i , die auf Basis der SRK \mathcal{G}_i gemäß Gleichung (3) gebildet wurden. Das Fusionsverfahren wird im folgenden Verlauf der Arbeit durch die Funktion $fusion()$ beschrieben, durch deren Anwendung eine resultierende SRS S_{res} bestimmt wird.

$$S_{res} = \bigcup_{j=1}^m S_j = fusion\left(\bigcup_{i=2}^n S_i\right) = fusion(S_{in}) \quad (35)$$

Der Funktion $fusion()$ wird eine Menge an n SRS S_i mit $i = 2 \dots n$ übergeben und daraus eine Menge an m resultierenden SRS S_j mit $j = 1 \dots m$ bestimmt. Findet keine Fusion der SRS S_{in} statt, so gilt $S_{res} = S_{in}$. Werden alle S_{in} miteinander fusioniert, so gilt $|S_{res}| = 1$. Damit gilt weiter: $S_{res} \subseteq S_{in}$.

Methode zur dynamischen Bestimmung der Schutzraumsequenz S

In den vorangegangenen Abschnitten wurden wesentliche Aspekte und entwickelte Verfahren zur Umsetzung einer dynamischen Bestimmung der SRK und entsprechender SRS S_{res} präsentiert. In Abbildung 35 wird nun der gesamte Ablauf als Algorithmus zusammengefasst.

```

Algorithmus zur dynamischen Bestimmung der Schutzraumsequenz  $S_{res}$ 

1 Function determine_sequence(timestamp  $t$ )
2
3   // Daten zuruecksetzen
4    $S_{in} = \{ \}$ ,  $S_{res} = \{ \}$ 
5    $\bar{O}_{t_\theta}^R = \{ \}$ ,  $\hat{O}_{t_\theta}^R = \{ \}$ 
6
7   bestimme Bremszeit:  $T_s = brakeTime(t + T_r)$ 
8
9   // bestimme geometrischen Kollisionsraum  $\mathcal{D}_t$ 
10  aktualisiere Kollisionsprimitive:  $\bar{O}^R = offset_{S_c}(\hat{O}^R, S_c)$ 
11
12  for each  $t_\theta$  ( $t_\theta = t \dots t + T_r + T_s$ ) do
13    bestimme Achsstellungen:  $\hat{A}_{t_\theta} = axisAtTime(t_\theta)$ 
14    transformiere Kollisionsprimitive:  $\bar{O}_{t_\theta}^R = \bar{O}_{t_\theta}^R \cup \bar{O}^R(\hat{A}_{t_\theta})$ 
15
16  for each  $t_\theta$  ( $t_\theta = t + T_r \dots t + T_r + T_s$ ) do
17    bestimme Offset der Kollisionsprimitive:
18     $\bar{\bar{O}}_{t_\theta}^R = \bar{O}_{t_\theta}^R \cup offset_{S_H}(\bar{O}^R(\hat{A}_{t_\theta}), (1.6 \frac{m}{s} * t_s))$  mit  $t_s = t_\theta - t - T_r$ 
19
20   $\mathcal{D}_t = \bar{O}_{t_\theta}^R \cup \bar{\bar{O}}_{t_\theta}^R$ 
21
22  // bestimme SRS  $S_R$  fuer den Roboter  $R$ 
23  for each  $o \in \mathcal{D}_t$  do
24    bestimme Form:  $F = project(o)$ 
25    fuege  $F$  der  $\mathcal{G}_R$  hinzu:  $\mathcal{G}_R = \mathcal{G}_R \cup F$ 
26  bestimme SRS:  $S_R = convexHull(\mathcal{G}_R)$ 
27   $S_{in} = S_{in} \cup S_R$ 
28
29  // bestimme SRS  $S_i$  aller weiteren Objekte  $\hat{O}_i$ 
30  for each  $\hat{O}_i$  ( $i = 1 \dots n$ ) do
31    for each  $p \in \hat{O}_i$  do
32      bestimme Form:  $F = project(p)$ 
33      fuege  $F$  der  $\mathcal{G}_i$  hinzu:  $\mathcal{G}_i = \mathcal{G}_i \cup F$ 
34    bestimme SRS:  $S_i = convexHull(\mathcal{G}_i)$ 
35     $S_{in} = S_{in} \cup S_i$ 
36
37  // bei Ueberschneidung von SRS -> fusionieren
38   $S_{res} = fusion(S_{in})$ 
39
40  return  $S_{res}$ 

```

Abbildung 35: Algorithmus zur Bestimmung einer den Roboter minimal umschließenden SRS S_{res} .

Die resultierenden S_{res} stellen die Basis zur Bestimmung der Projektionsbilder ${}^L I$ dar, indem die Punkte $s_i \in S_{res}$ unter Anwendung der Projektionsmatrix \mathcal{M}_L (Gleichung (8)) in die Bildebene des Lichtmodulators abgebildet werden.

5.5 Ergebnisse

In diesem Abschnitt wird das konzipierte Sensorprinzip hinsichtlich der Erreichung der genannten Ziele in Abschnitt 5.1 bewertet und die Ergebnisse präsentiert.

5.5.1 Prinzipielle Zertifizierbarkeit

Das aktive 2D-Sensorprinzip (A2S) wurde auf Basis des etablierten Funktionsprinzips *Ruhestromprinzip* konzipiert. Dieses zeichnet sich dadurch aus, dass auftretende Fehler durch Bauteilversagen oder Einflüsse aus der Umgebung nicht zu einem Funktionsausfall führen, sondern das System in einem sicheren Zustand verbleibt. Dieses Prinzip wird im Bereich der Sicherheitstechnik bspw. von Lichtgittern oder Reflexlichtschranken umgesetzt (siehe Abschnitt 5.2). Letztere dienen schließlich für die Konzeption des A2S als Basis, welche hinsichtlich einer 3D-Überwachung weiterentwickelt und an geeignete Sensorkomponenten adaptiert wurde. Da das prinzipielle Funktionsprinzip *Ruhestromprinzip* dabei erhalten wurde, kann von einer prinzipiellen Eignung des A2S als zukünftige Sicherheitstechnik ausgegangen werden (siehe (Norm DIN EN ISO 13849-1)).

Zur Bestätigung dieser These wurde das konzipierte A2S dahingehend analysiert, inwieweit Einflüsse oder Fehler einzelner Komponenten zu einem Ausfall des A2S führen können. Dazu wurde das A2S mit Hilfe einer Strukturanalyse zunächst in seine grundlegenden Komponenten zergliedert und anschließend eine *Failure Mode and Effects Analysis* (FMEA) auf Komponentenebene durchgeführt.

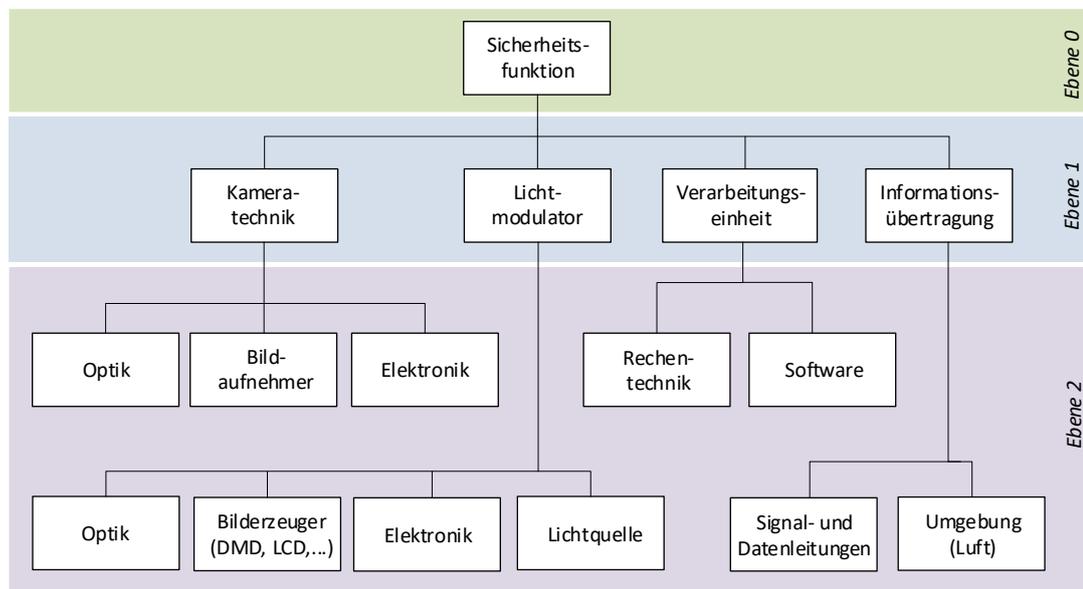


Abbildung 36: Strukturdiagramm zur hierarchischen Darstellung wesentlicher Komponenten.

Diese FMEA bildete die Grundlage für den Entwurf des sicherheitsbezogenen Blockdiagramms und für die Ableitung des erreichbaren Performance Level (PL) auf Basis einer qualitativen Einschätzung der entsprechenden Kenngrößen.

Strukturelle Analyse

In Abbildung 36 werden die wesentlichen Komponenten des A2S anhand eines Strukturdiagramms dargestellt. Ebene 1 bildet dazu die maßgeblichen übergeordneten Technologien ab, welche in Ebene 2 in einzelne Komponenten gegliedert werden. Eine weitere Unterteilung der Komponenten bis hin zu einzelnen Bauteilen ist für die Durchführung der FMEA nicht erforderlich.

Komponentenbasierte FME-Analyse

Auf Basis der analysierten Komponenten (Strukturdiagramm, Abbildung 36), die für die Umsetzung der Sicherheitsfunktion wesentlich sind, wurde eine FMEA durchgeführt. Diese gibt Aufschluss darüber, welchen Einfluss mögliche Fehler der Komponenten auf die Schutzeinrichtung bzw. der Aufrechterhaltung der Sicherheitsfunktion ausüben.

Gemäß der definierten Ziele (Abschnitt 5.1.1) liegt der Fokus hierbei auf:

- Bauteilversagen
- Einflüsse aus der Umgebung

In Tabelle 21 werden die Ergebnisse der FMEA zusammengefasst.

Tabelle 21: Analyse möglicher Fehler und Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion durch FMEA. Zusätzliche Nennung der Maßnahmen zur Fehleraufdeckung bzw. Verhinderung der Auswirkungen.

Komponente		Funktion	Fehler/ Ausfälle/ Einflüsse	Auswirkungen	Maßnahmen	
Sicherheitsfunktion	Lichtmodulator	Optik	Verschmutzung; Defekt (Risse); Dejustage	Fehlerhafte Abbildung des Schutzraumes (unvollständig, an veränderten Weltpositionen)	Fehleraufdeckung durch abweichende RI	
		Lichtquelle	Erzeugung der Lichtstrahlen	Defekt; Ausfall; Leistungsänderung (Helligkeit)	Fehlerhafte Abbildung des Schutzraumes (unvollständig, unzureichende Helligkeit)	Fehleraufdeckung durch abweichende RI
		Bilderzeuger	Selektion erforderlicher Bildpunkte (Lichtstrahlen) des Schutzraumes	Defekt; Ausfall	Fehlerhafte Abbildung des Schutzraumes (unvollständig, an veränderten Weltpositionen)	Fehleraufdeckung durch abweichende RI
		Elektronik	Empfang, Verarbeitung darzustellender Bilder des Schutzraumes; Ansteuerung des Bilderzeugers	Defekt; Ausfall	Fehlerhafte Abbildung des Schutzraumes (unvollständig, an veränderten Weltpositionen)	Fehleraufdeckung durch abweichende RI

	Kameratechnik	Optik	Abbildung der Sichtstrahlen auf Bildaufnehmer	Verschmutzung; Defekt (Risse); Dejustage	Fehlerhafte Abbildung des Schutzraumes (unvollständig, an veränderten Bildpositionen)	Fehlerrückmeldung durch abweichende RI
		Bildaufnehmer	Erfassung der Sichtstrahlen	Pixelfehler (stuck, dark, hot); Ausfall	Fehlerhafte Abbildung des Schutzraumes (unvollständig, an veränderten/ zusätzlichen Bildpositionen)	Fehlerrückmeldung durch abweichende RI
		Elektronik	Bildgenerierung, Bereitstellung	Defekt; Ausfall	Fehlerhaftes Kamerabild	Fehlerrückmeldung durch abweichende RI
	Informationsübertragung	Umgebung (Luft)	Lichttransmission	Rauch, Aerosole; Objekteindringung; Fremdlicht	Fehlerhafte Abbildung des Schutzraumes (unvollständig)	Fehlerrückmeldung durch abweichende RI
		Signal-, Datenleitungen	Signal- und Datenübertragung	Kabelbruch; Übertragungsfehler	Fehlerhafte Daten / Bildinformationen (unvollständig, verändert)	Sicherheitsprotokolle (Stand der Technik)
	Verarbeitungseinheit	Rechentechnik	Ausführung der Software	Defekt; Ausfall	Fehlerhafte Generierung der Projektionsbilder; Fehlerhafte Auswertung der Kamerabilder;	Diversitäre Redundanz (Stand der Technik)
		Software	Umsetzung von Algorithmen zur Datenverarbeitung und -auswertung	Programmfehler	Fehlerhafte Generierung der Projektionsbilder; Fehlerhafte Auswertung der Kamerabilder	Diversitäre Redundanz (Stand der Technik)

Schlussfolgerung Die FME-Analyse (Tabelle 21) zeigt deutlich, dass aufgrund des Funktionsprinzips die Komponenten hinsichtlich eines Defekts oder Ausfalls sowie gegenüber Einflüssen aus der Umgebung inhärent überwacht werden. Grund dafür stellt die Überprüfung der Kameradaten mit den Referenzinformationen (RI) auf Übereinstimmung dar. Eine Abweichung der Bildinformationen bzgl. des Schutzraumes zu den RI führt schließlich zur Ausgabe eines Fehler- bzw. Verletzungssignals und einer entsprechenden Reaktion des Roboters (z. B. Bewegungsstopp). Dadurch wird die Personensicherheit gewährleistet. Gemäß Tabelle 21 kann eine Abweichung auf vielfältige Ursachen zurückgeführt werden, was im Umkehrschluss dazu führt, dass eine Übereinstimmung der Bildinformationen mit den RI nur genau dann vorliegt, wenn alle Komponenten einwandfrei funktionieren und eine unterbrechungsfreie Transmission der Lichtstrahlen vorliegt. Damit wird eine permanente Selbstüberwachung der Komponenten bzw. des Systems umgesetzt, was im Bereich der Sicherheitstechnik ein etabliertes Verfahren zur Gewährleistung der funktionalen Sicherheit darstellt (Hauke et al. 2017; Neudörfer 2016).

Blockdiagramm

Auf Basis der FMEA und den daraus resultierenden Maßnahmen zur Fehleraufdeckung bzw. -vermeidung veranschaulicht das folgende Blockdiagramm in Abbildung 37 die grundlegende Architektur des A2S. Die gelb hinterlegten Komponenten müssen hierbei in funktional-sicherer Technik realisiert werden. Die aktuellen Gelenkstellungen des Roboters werden an die Auswerteeinheit sicher übertragen (z. B. per *FailSafe over EtherCAT* (EtherCAT Technology Group 2021)). Die Auswerteeinheit bestimmt auf deren Basis den erforderlichen Schutzraum und damit einhergehend die Projektionsbilder und Referenzinformationen. Da Fehler bei der Schutzraumbestimmung massive Auswirkungen auf die Sicherheit des Menschen haben können, findet diese redundant statt (z. B. diversitäre Redundanz mit unterschiedlichen Softwareimplementierungen auf unterschiedlicher Hardware).

Die Projektionsbilder werden schließlich an den Lichtmodulator übertragen und von diesem dargestellt. Die emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung des Schutzraumes werden von der Kamera wiederum empfangen und an die Auswerteeinheit übertragen. Die Komponenten Lichtmodulator und Kamera müssen hierbei nicht in funktional-sicherer Technik ausgeführt werden, da Defekte und Ausfälle der Komponenten oder Fehler bei der Lichttransmission in der anschließenden Prüfung mit den Referenzinformationen sicher detektiert werden. Die Auswertung des Schutzraumes findet wieder redundant in funktional-sicherer Technik statt. Das Ergebnis der Überprüfung mit den Referenzinformationen (positives/negatives Verletzungssignal) wird schließlich dem Roboter signalisiert.

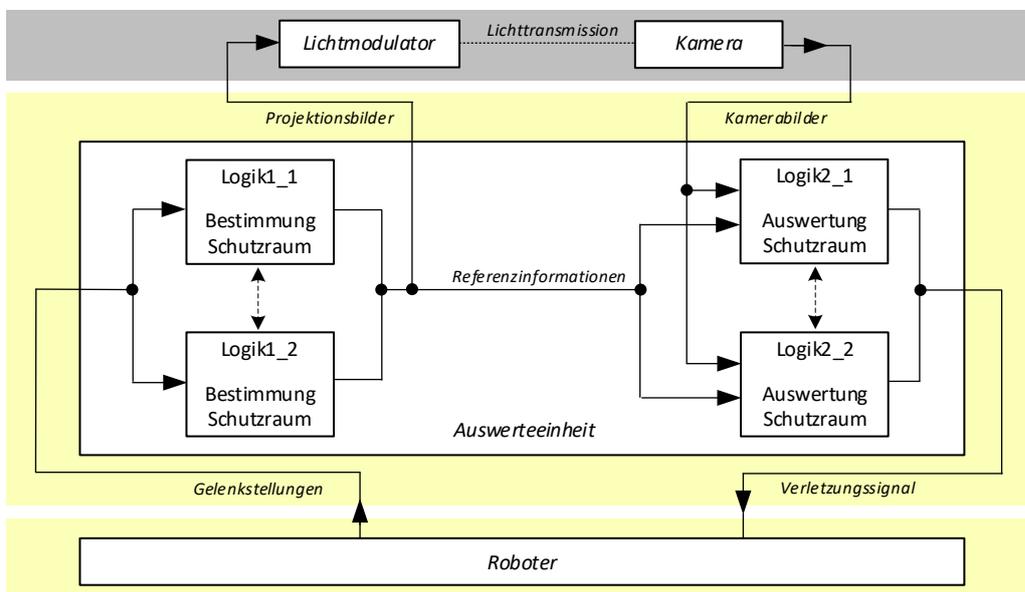


Abbildung 37: Blockdiagramm der sicherheitsgerichteten Architektur des A2S mit Unterscheidung zwischen funktional-sicheren Komponenten (gelb) und nicht-sicheren Komponenten (grau).

Performance Level

Eine gesicherte bzw. garantierte Bestimmung des Performance Level (PL) ist in der aktuellen Phase der Konzeption des A2S in dieser Arbeit nicht möglich. Da eine Abschätzung des PL

für eine zukünftige Realisierung des A2S jedoch von großer Bedeutung ist, wurde eine Einschätzung der Kenngrößen (siehe Abschnitt 2.3.2, Abbildung 83) sowie die Einordnung der Sicherheitsfunktion auf den vorliegenden Erkenntnissen bezüglich Architektur und zugrundeliegendem Funktionsprinzip durchgeführt. Dazu wurden entsprechende Kriterien aus den Sicherheitsnormen (Norm DIN EN ISO 13849-1; Norm DIN EN ISO 13849-2) herangezogen. Die Ergebnisse werden in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Qualitative Einschätzung der Kenngrößen zur Bestimmung des erreichbaren PL der Sicherheitsfunktion des A2S auf Basis der Kriterien aus den Sicherheitsnormen ISO 13849-1 und ISO 13849-2.

	Einschätzung	Kriterien / Bemerkungen
Diagnosedeckungsgrad DC	mittel (> 90%) bis hoch (> 99%)	<ul style="list-style-type: none"> - Kreuzvergleich von Signalen und Daten - Plausibilitätsprüfungen von Daten - Dynamisierung der Daten - Fehlererkennung durch den Prozess - Watchdog
Mean Time To Failure MTTF	mittel (≥ 10 Jahre) bis hoch (≥ 30 Jahre)	<ul style="list-style-type: none"> - Sicherheitssteuerung als Auswerteinheit - Bewährte Kommunikationsmittel (Stand der Technik)
Kategorie	Kat. 3 bis Kat. 4	<ul style="list-style-type: none"> - Bewährte Sicherheitsprinzipien: Fail-Safe, Redundanz - Einzelner Fehler führt nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion - Rechtzeitige Fehlererkennung - MTTF: mittel bis hoch - DC: mittel bis hoch
Common Cause Failure CCF	min. 75 Punkte	<ul style="list-style-type: none"> - Mindestpunktzahl von 65 erreicht - siehe Bewertungsbogen in Anhang C

Mit der in Tabelle 22 erfolgten Einschätzung der Kenngrößen wird der erreichbare Performance Level PL gemäß des *vereinfachten Verfahrens* (Norm DIN EN ISO 13849-1) unter Anwendung des Diagramms in Abbildung 83 bestimmt (siehe Abschnitt 2.3.2).

Somit ergibt sich folgende Einschätzung für den erreichten Performance Level:

- konservativ: \rightarrow PL = *d*
- bestenfalls: \rightarrow PL = *e*

Mit einem geforderten Performance Level $PL_r = d$ hinsichtlich Schutzeinrichtungen zur Gewährleistung der Personensicherheit an MRK-Arbeitsplätzen erfüllt die Sicherheitsfunktion des konzipierten A2S diese Anforderung in vollem Maße.

5.5.2 Dynamische Sicherheitsabstände

Die Evaluierung des entwickelten Verfahrens zur Bestimmung dynamischer Schutzräume in Abschnitt 5.4 bezieht sich auf die Anwendbarkeit und Flexibilität in verschiedenen Szenarien. Hierzu wurde ein Versuchsstand bestehend aus einem Arbeitstisch mit einem darauf montierten industriellen Leichtbauroboter KUKA LBR4+ aufgebaut (siehe Abbildung 38, linke Darstellung). Weiterführende Informationen zum Versuchsstand sowie zur Durchführung der Evaluierung werden in (Vogel et al. 2015) präsentiert.

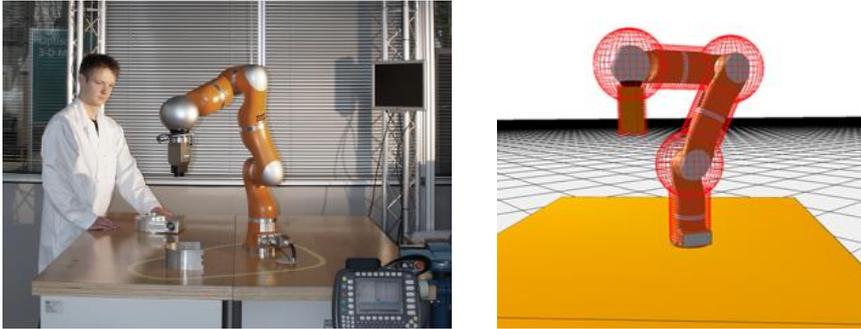


Abbildung 38: Links: Versuchsstand zur Evaluierung des entwickelten Verfahrens zur Bestimmung dynamischer Mindestabstände bzw. Schutzräume. Rechts: Interne Modellierung des Industrieroboters KUKA LBR4+ aus den geometrischen Primitiven „Kugel“ und „Zylinder“. Aus (Vogel et al. 2015). Copyright © 2015, IEEE.

Das interne Robotermodell wurde dabei entsprechend Abbildung 38 (rechte Darstellung) aus den Kollisionsprimitiven *Zylinder* und *Kugel* approximiert. Die Projektionsfläche entspricht der Tischoberfläche. Im Folgenden werden verschiedene Szenarien und deren Auswirkungen auf den Schutzraum respektive Schutzraumsequenz beschrieben.

Szenario 1: Statische Roboterkonfiguration

Das erste Szenario betrachtet die Größe, Form und Position der Schutzraumsequenz bei unterschiedlichen Gelenkstellungen des Roboters (Roboterkonfiguration). Der Roboter wurde dazu manuell an verschiedene Positionen innerhalb seines Arbeitsraumes bewegt.



Abbildung 39: Darstellung fünf spezifischer Roboterkonfigurationen mit resultierender Schutzraumsequenz. Schutzraumsequenz umschließt den Roboter als konvexe Hülle minimal.

In Abbildung 39 werden die Ergebnisse für fünf ausgewählte Roboterkonfigurationen dargestellt. Es ist gut erkennbar, dass die Schutzraumsequenz als konvexe Hülle (gemäß Gleichung (3)) den Roboter jeweils lückenlos und minimal umschließt.

Szenario 2: Freie Roboterbewegungen

In diesem Szenario wird die Bestimmung der Schutzräume während der Bewegung des Roboters betrachtet. Der Roboter bewegt sich dazu ausgehend von einer Startposition zu einer Zielposition. Die Änderung der SRS in Abhängigkeit der Roboterbewegung ist in Abbildung 40 dargestellt. Unabhängig von der Bewegungsart (obere Bildreihe: Point-to-Point - PTP, untere Bildreihe: Linear - LIN) vergrößert sich der Schutzraum in Richtung der Zielposition. Dies entspricht dem geforderten Verhalten der Abstandsformel (Gleichung (12)), welches u. a. die Bremszeiten und -geschwindigkeiten abhängig von den aktuellen Gelenkgeschwindigkeiten berücksichtigt und dadurch in einem vergrößerten Mindestabstand in Bewegungsrichtung resultiert. Die geschwindigkeitsabhängige Vergrößerung des Mindestabstandes ist in den

Bildern zwei bis drei der oberen und unteren Bildreihe (Abbildung 40) gut zu erkennen, da der Roboter darin die höchsten Geschwindigkeiten erreicht.

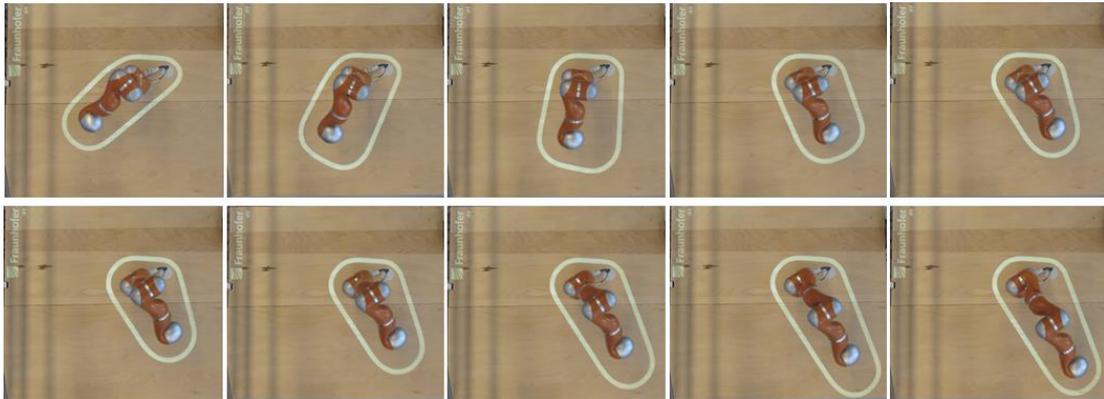


Abbildung 40: Darstellung zweier Bewegungsabläufe. Obere Bildreihe: PTP-Roboterbewegung von links nach rechts. Untere Bildreihe: Linear-Roboterbewegung aus Mittelstellung nach unten rechts.

Szenario 3: Transport von Objekten

Der *Transport von Objekten* steht stellvertretend für alle Szenarien bei denen ein Objekt vom Roboter in jeglicher Art manipuliert (bearbeitet, (de-)montiert, gefügt, etc.) wird. Basis für die Manipulation bzw. Transport stellt die Annäherung des Roboters an das Objekt dar, ohne dass dabei das Objekt eine Schutzraumverletzung hervorruft. In Abschnitt 5.4.3 wurde die hierfür entwickelte Methode auf Basis einer Fusion mehrerer Schutzräume präsentiert.

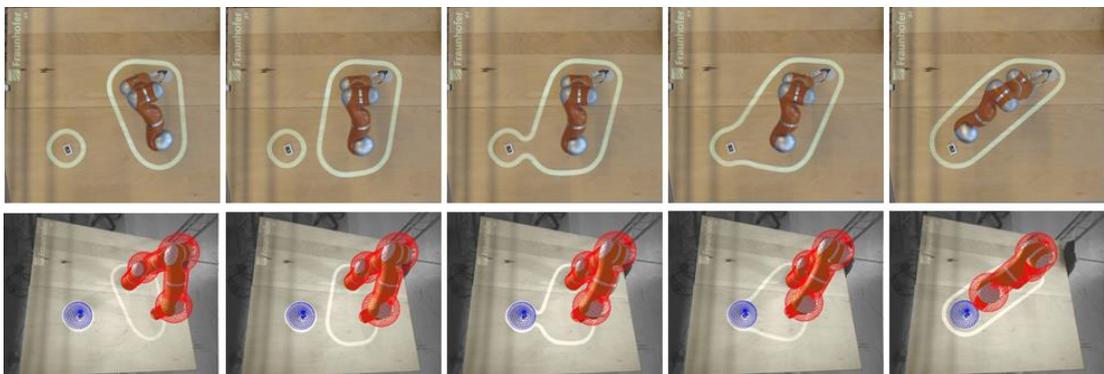


Abbildung 41: Bildreihe zur Fusion der Schutzräume von Roboter und Objekt. Die untere Bildreihe veranschaulicht die verwendeten Kollisionsprimitive zur Modellierung von Roboter und Objekt.

Die Annäherung des Roboters an ein Objekt und die damit einhergehende Fusion der Schutzräume wird in den Bilderreihen der Abbildung 41 veranschaulicht. Die untere Bilderreihe zeigt dabei die interne Modellierung von Roboter und Objekt durch geometrische Kollisionsprimitive. Bevor der Roboter seine Bewegung zum Objekt beginnt, wird an der bekannten Objektposition das entsprechende Primitiv (blaue Kugel) aktiviert und die zugehörige Schutzraumsequenz generiert. Ab diesem Zeitpunkt wird das Objekt durch den eigenen Objektschutzraum überwacht, so dass Eindringungen in diesen und daraus resultierende Änderungen am Objekt festgestellt werden können. Für den Menschen wird die Sicherheit während des gesamten Vorganges garantiert, da der Roboter permanent und lückenlos von der (eigenen oder fusionierten) Schutzraumsequenz eingeschlossen ist.

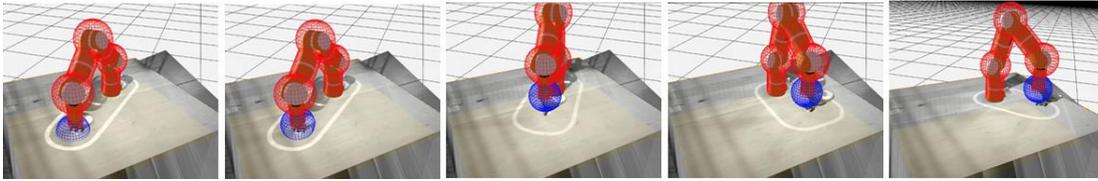


Abbildung 42: Transport eines Objektes durch Kopplung des Objekt-Primitives an die kinematische Kette (TCP) des Roboters. Der Fusionsalgorithmus generiert die lückenlose und minimal umschließende Schutzraumsequenz.

Das generelle Verhalten beim Transport des Objektes ist in Abbildung 42 dargestellt. Beim Greifvorgang wird das Primitiv des Objektes an die kinematische Kette (TCP) des Roboters gekoppelt, sodass sich dessen Position entsprechend der Bewegung des Roboters anpasst. Das Fusionsverfahren wird weiterhin auf beide Schutzräume (Roboter und Objekt) angewandt und resultiert in einem gemeinsamen fusionierten Schutzraum. Durch Ablage des Objektes und dem Entfernen des Roboters von der Ablageposition separieren sich die Schutzräume dann wieder (entsprechend umgekehrter Bilderreihenfolge in Abbildung 41).

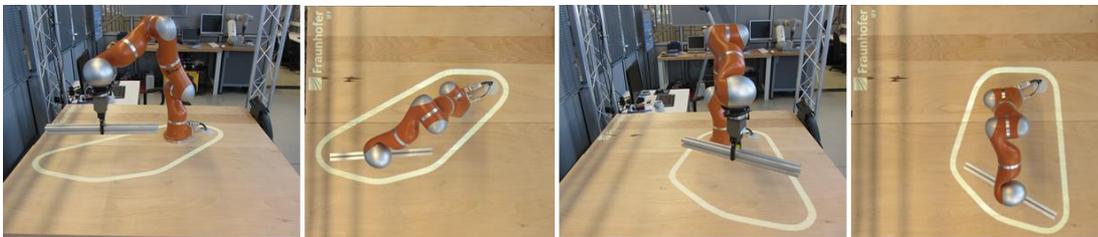


Abbildung 43: Transport eines länglichen Objektes. Der Fusionsalgorithmus bildet auf Basis der objektspezifischen Kollisionsprimitive eine minimale, den Roboter und Objekt umschließende Schutzraumsequenz. Aus (Vogel et al. 2015). Copyright © 2015, IEEE.

Die Flexibilität des Verfahrens wird insbesondere bei großen Objekten erkennbar (siehe Abbildung 43). Lediglich die Art und Anzahl der Primitive zur Modellierung des länglichen Objektes haben sich hierbei geändert.

Szenario 4: Spezifische Arbeitsstationen

MRK-Arbeitsplätze bestehen nicht nur aus Roboter und Objekt, sondern darüber hinaus aus Bearbeitungsstationen, Bauteilzuführungen, Werkzeugwechsler und vieles weitere mehr. In diese Bereiche muss sich der Roboter hineinbewegen können, was von der Schutzeinrichtung unter Aufrechterhaltung der Personensicherheit auch unterstützt bzw. erlaubt werden muss. Diese Anforderung wird durch das folgende Szenario exemplarisch evaluiert.

Wie in Abbildung 44 veranschaulicht, wurden dazu im Arbeitsraum des Roboters zwei Stationen bestehend aus einer Bauteilablage und einer Bauteilbearbeitung aufgebaut. Der Roboter muss zwischen den Stationen wechseln und jeweils Aufgaben an den Stationen durchführen. Die Schutzräume der Stationen können in Abhängigkeit des Arbeitsprozesses aktiviert oder deaktiviert werden, um dem Menschen den Zugriff zur Station zu erlauben. Benötigt der Roboter den Zugriff zu einer Station, wird der zugehörige Stations-Schutzraum aktiviert und bei Annäherung des Roboters mit dem Roboter-Schutzraum fusioniert. Währenddessen ist der Zugriff des Menschen nicht erlaubt und würde zu einem Stopp der Roboterbewegung führen.

Die Sicherheit des Menschen wird somit permanent gewährleistet wobei der Zugriff auf die jeweiligen Stationen zu bestimmten Zeiten erlaubt wird.

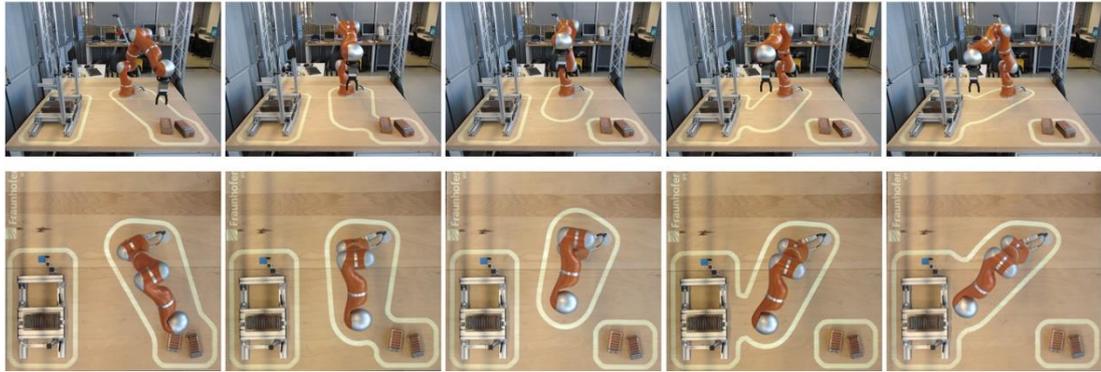


Abbildung 44: MRK-Arbeitsplatz bestehend aus den Stationen „Bauteilablage“ und „Bauteilbearbeitung“. Die Stationen werden durch separate Schutzräume abgesichert, um den Zugang des Roboters zu den Stationen zu erlauben. Bei Deaktivierung der Stations-Schutzräume wird der Zugriff des Menschen erlaubt währenddessen der Roboter weiter überwacht wird. Aus (Vogel et al. 2015). Copyright © 2015, IEEE.

5.6 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die Konzeption des aktiven 2D-Sensorprinzips präsentiert, wobei der Fokus auf den Anforderungen *Prinzipielle Zertifizierbarkeit* und *Dynamische Sicherheitsabstände* lag. Für die Erfüllung der *Zertifizierbarkeit* wurde der Ansatz umgesetzt das System auf Basis etablierter Funktionsprinzipien im Bereich der Sicherheitstechnik zu entwickeln. Das *Ruhestromprinzip* eignet sich hierfür in besonderer Weise, da es sich durch eine zuverlässige Aufdeckung von Bauteilausfällen und Störeinflüssen auszeichnet und dabei einen sicheren Systemzustand beibehält. Dieser Ansatz wurde hinsichtlich einer 3-dimensionalen Raumüberwachung durch Auswahl geeigneter Sensorkomponenten (Kameratechnik, Lichtmodulator) adaptiert und in Form eines neuartigen aktiven 2D-Sensorprinzips (A2S) umgesetzt.

Die Gewährleistung der Personensicherheit im Bereich der MRK wird schließlich derart realisiert, dass vom konzipierten Sensorsystem A2S ein dynamischer Lichtvorhang die Arbeitsbereiche von Mensch und Roboter trennt. Dazu wurde ein Verfahren entwickelt, welches die normativ erforderlichen Mindestabstände als geometrischen Schutzraum umsetzt und damit den Roboter als konvexe Hülle permanent, lückenlos und minimal umschließt. Darauf aufbauend wurde eine neuartige Methode entwickelt, die es dem Roboter erlaubt mit anderen Objekten (oder Stationen, Bereichen, etc.) zu interagieren. Grundlage dafür bildet ein entwickeltes Verfahren zur Fusion (und Separierung) mehrerer verteilter Schutzräume. Es wurde gezeigt, dass damit sowohl die Personensicherheit gewährleistet wird und gleichzeitig keinerlei Einschränkungen bei den durchzuführenden Arbeitsprozessen bestehen.

Zusammenfassend kann damit gesagt werden, dass die definierten Teilziele in Abschnitt 5.1.1 vollständig erreicht wurden.

6 Verfahren zur Schutzraumüberwachung

In Kapitel 5 wurde die Konzeption eines neuartigen aktiven 2D-Sensorprinzips auf Basis von 2D-Kameratechnik und einer eigenen aktiven Beleuchtung präsentiert. Zur Separierung der Arbeitsräume von Mensch und Roboter wird der Schutzraum in Form eines dynamischen Lichtvorhanges (in Abhängigkeit der aktuellen Roboterkonfiguration) direkt in den zu überwachenden Kollaborationsraum projiziert, wobei die korrespondierenden Lichtstrahlen hinsichtlich einer Unterbrechung von Kameratechnik überwacht werden (siehe Abschnitt 5.4.1). Das hierin umgesetzte *Ruhestromprinzip* bildet dabei die Grundlage zur Befähigung des A2S als zukünftige Schutzeinrichtung zur Gewährleistung der Personensicherheit.

Darauf aufbauend werden in diesem Kapitel die Verfahren zur Darstellung und Überwachung von Schutzräumen entwickelt. Der Fokus liegt dabei auf einer zuverlässigen Detektion in den Schutzraum eindringender Objekte. Die Objektdetektion soll dabei unabhängig von spezifischen Merkmalen und insbesondere bei verschiedensten und sich ändernden Umgebungsbedingungen (Fremdlicht) in Form einer Schutzraumverletzung signalisiert werden.

Der hierzu entwickelte Lösungsansatz basiert auf einer Bildfolgeauswertung in Kombination mit einer modellbasierten Referenzbilderstellung (Referenzinformationen) als Ground Truth Informationen. Dieser Ansatz wurde um eine raumzeitliche Codierung diskreter Schutzraumregionen erweitert, welche neben ambienten Lichtänderungen zusätzlich einen zuverlässigen Umgang mit hoch-dynamischen Fremdlicheinflüssen ermöglicht. Wesentliche Aspekte des entwickelten Verfahrens wurden in (Vogel et al. 2017) und (Vogel et al. 2021) präsentiert. Darüber hinaus wurden hierzu Patente im europäischen (EP3599411A1) und US-amerikanischen Raum (US10891487B2) erteilt.

6.1 Einführung

6.1.1 Zielstellung

Gemäß den Ausführungen in Abschnitt 4.2 liegt der Fokus in diesem Kapitel auf der Anforderung *Verfügbarkeit* mit den Teilzielen *Fremdlichtunabhängig* und *Robuste Objekterfassung*:

- **Fremdlichtunabhängig**

Kamerabasierte Sensorsysteme sind von den umgebenden Lichtverhältnissen direkt abhängig. Dunkelheit, Helligkeit und Änderungen der Lichtverhältnisse können die Aufnahme bzw. Auswertung der Kameradaten stören und derart beeinflussen, dass eine Überwachung der Szene nicht mehr möglich ist (z. B. Über-, Unterbelichtung). Die Kombination mit einer eigenen aktiven Beleuchtung in Form des Lichtmodulators eröffnet die Möglichkeit den Einfluss der umgebenden Lichtverhältnisse zu minimieren, wobei die Detektionsleistung nicht beeinträchtigt werden soll.

Das Teilziel gilt als erreicht, wenn auftretende Fremdlichtänderungen:

- das Systemverhalten des A2S nicht beeinflussen ODER
- vom A2S erkannt werden (und entsprechend reagiert wird).

- **Robuste Objekterfassung**

Für das Erreichen einer hohen Akzeptanz, flexiblen Einsatzmöglichkeiten und einer hohen Verfügbarkeit bedarf es als zukünftige Schutzeinrichtung einer robusten Erfassung von annähernden bzw. in den Schutzraum eindringenden Objekten. Beispielsweise sollte es hinsichtlich der Detektion einer menschlichen Hand unerheblich sein, ob diese bedeckt (z. B. texturierter, farbiger Handschuh) bzw. nicht bedeckt ist oder ob Objekte in der Hand getragen werden.

In Bezug auf das konzipierte A2S wird die Erfassung von Objekten implizit dadurch realisiert, dass emittierte Lichtstrahlen zur Darstellung des Schutzraumes vom eindringenden Objekt unterbrochen werden. Für die Umsetzung dieses Prinzips wurden folgende Annahmen getroffen (siehe *Verarbeitungskette*, Abschnitt 5.4.1):

1. Die emittierten Lichtstrahlen des Lichtmodulators zur Darstellung des Schutzraumes können in den Kamerabildern eindeutig extrahiert werden.
2. Es liegen Referenzinformationen (RI) zum aktuellen Schutzraum vor. Diese definieren die Bildpositionen im Kamerabild, an denen die entsprechenden emittierten Lichtstrahlen erwartet werden.

Das Teilziel *Robuste Objekterfassung* gilt als erreicht, wenn diese Annahmen von den zu entwickelnden Verfahren bestätigt werden.

Zusammenfassend stellt das übergeordnete Ziel in diesem Kapitel die Konzeption und Entwicklung eines Verfahrens zur Darstellung und zuverlässigen Überwachung von Schutzräumen dar. Unter *zuverlässig* wird in diesem Zusammenhang verstanden, dass eindringende Objekte unabhängig von deren Eigenschaften (Farbe, Textur, etc.) und unter allen zu erwartenden Umgebungsbedingungen (Rahmenbedingungen) detektiert werden. Eine Analyse der Rahmenbedingungen, die einen Einfluss auf die Detektionsleistung haben können, wird in Abschnitt 6.2 vorgenommen.

6.1.2 Vorgehen

Für die Erreichung des Ziels einer zuverlässigen Detektion von Schutzraumverletzungen wurden folgenden Fragen abgeleitet, deren Beantwortung das Fundament für die konzeptionelle Entwicklung des Verfahrens bilden:

1. Wie kann mit ambienten und hoch-dynamischen Fremdlichteinflüssen umgegangen werden, damit diese nicht zu einem Ausfall der Sicherheitsfunktion (keine Detektion eindringender Objekte) des A2S führen? (Abschnitt 6.3.1)

2. An welchen Bildpositionen werden im aktuellen Kamerabild emittierte Lichtstrahlen des Schutzraumes abgebildet? (Abschnitt 6.3.2)
3. An welchen Bildpositionen sollen sich die Lichtstrahlen des aktuellen Schutzraumes im fehler- und unterbrechungsfreien Fall befinden? (Abschnitt 6.3.3)

Hierbei ist anzumerken, dass die Beantwortung der Fragen nicht unabhängig voneinander erfolgen kann und die resultierenden Lösungsansätze sich untereinander bedingen.

Im folgenden Verlauf des Kapitels werden zunächst die Rahmenbedingungen zur Entwicklung der Verfahren analysiert und zu berücksichtigende Anforderungen abgeleitet. Anschließend werden die eigenen Methoden und entwickelten Verfahren zur Beantwortung der Fragen präsentiert und im Abschnitt 6.4 evaluiert.

6.2 Analyse der Rahmenbedingungen

Zur Beantwortung der Fragen in Abschnitt 6.1.2 war zunächst eine Analyse der Rahmenbedingungen und die Ableitung entsprechender Anforderungen an die Verfahren notwendig. Hierfür wurden potentielle Umgebungsbedingungen im Produktions- und Fertigungsbereich analysiert und wesentliche Merkmale identifiziert.



Abbildung 45: Kamera-Intensitätsbilder des Überwachungsbereiches mit darin befindlichen Objekten (Werkzeuge, Werkstücke) und Glanzlicht bzw. Schatten aufgrund von Fremdlicht. Die weiße Schutzraum-Linie trennt den Roboter-Arbeitsbereich/Gefahrenbereich (untere Bildhälfte) vom Arbeitsbereich des Menschen (obere Bildhälfte). Rechts: Die Position einzelner Objekte und die Beleuchtung ändern sich gegenüber dem linken Bild.

Abbildung 45 zeigt exemplarisch zwei Kamerabilder mit verschiedenen Objekten (Werkzeuge, Werkstücke, etc.), unterschiedlichen Beleuchtungssituationen und der projizierten Schutzraumlinie zur Arbeitsraumüberwachung durch das A2S. Es ist hier gut zu erkennen, dass das gesamte Kamerabild unabhängig von der darin abgebildeten Schutzraumlinie eine hohe Dynamik bezüglich der Intensitätswerte beinhaltet.

Die Gründe dafür bestehen unter anderem aus:

Lichtverhältnisse

Die umgebenden Lichtbedingungen spielen insbesondere bei kamerabasierten Sensorsystemen eine besondere Rolle, da diese die Abbildung der Umgebung auf die Intensitätswerte im Kamerabild direkt beeinflussen. Im industriellen Umfeld können Änderungen der Lichtverhältnisse (natürliche oder künstliche Lichtquellen) ebenfalls nicht ausgeschlossen werden. Im

Verlauf der Arbeit wird zwischen ambienten und hoch-dynamischen Lichtänderungen unterschieden:

- Änderungen der ambienten Lichtverhältnisse

Dies betrifft die umgebenden Lichtbedingungen, welche bspw. durch Änderungen des Sonnenstandes oder Sonnenverdeckung hervorgerufen werden. Diese Änderungen vollziehen sich in der Regel allmählich in Folge mehrerer Sekunden, Minuten oder Stunden.

- Hoch-dynamische Änderungen der Lichtverhältnisse

Im Gegensatz zu den ambienten Lichtverhältnissen beziehen sich diese Einflüsse auf kurzzeitige und gleichzeitig stark auswirkende Lichtänderungen wie Blitzlicht oder plötzlicher Schatten. Das Auftreten derartiger Lichtänderungen kann sich dabei sowohl auf lokale Bildbereiche als auch global auf das gesamte Kamerabild auswirken. Neben einzelner zufälliger Fremddichteinflüsse sind auch regelmäßige Fremddichtänderungen (z. B. stroboskopische Effekte) zu berücksichtigen. Diese Änderungen können mehrfach innerhalb einer Sekunde auftreten.

Objekte im Überwachungsbereich

Üblicherweise befinden sich im Arbeitsraum neben dem Roboter weitere Maschinen, Werkstücke, Werkzeuge oder andere Gegenstände (Kabel, Bauteile, Ladungsträger, etc.), die für die industrielle Anlage oder Applikation erforderlich sind. Diese können unterschiedlichste Formen, Größen und Oberflächen aufweisen. Statische oder auch ortsflexible Objekte können in Kombination mit der Positionierung der Kamera(s) zu Verdeckungen von bestimmten Bereichen des Arbeitsraumes führen. In Abhängigkeit dynamischer Objekte (z. B. Roboterbewegung, Maschineneinsatz) können aus Perspektive der Kamera(s) Bildbereiche auch temporär verdeckt sein bzw. sichtbar werden. Generell muss davon ausgegangen werden, dass Objekte jederzeit in den Arbeitsraum hinzukommen oder daraus entfernt werden.

Merkmale der Projektionsoberflächen

Im industriellen Bereich können die Flächen zur Darstellung des projizierten Schutzraumes (z. B. Fußboden, Werkbank, etc.) hinsichtlich ihrer Oberflächeneigenschaften sehr unterschiedlich ausgeprägt sein. Je nach Applikation können diese bspw. verschmutzt oder abgenutzt sein, was zu hellen/dunklen bzw. farbigen Unterschieden (Absorptions- und Reflexionseigenschaften) der Oberflächen führen kann. Das Material der Projektionsoberfläche kann sowohl eine regelmäßige als auch unregelmäßige Struktur/Textur aufweisen. Zusätzlich muss man berücksichtigen, dass diese Merkmale und Einflüsse nicht nur global sondern auch lokal auf einzelne Bereiche des Arbeitsraumes wirken und sich diese im laufenden Betrieb verändern können.

Dynamische Schutzräume

Zur Umsetzung einer möglichst engen Zusammenarbeit von Mensch und Roboter im gemeinsam genutzten Arbeitsraum sind Schutzräume erforderlich, die zu jedem Zeitpunkt den

Roboter möglichst minimal umschließen. Das konzipierte A2S ermöglicht dies durch die dynamische Änderung der SRK (Position, Form, Größe) unter Berücksichtigung der aktuellen Roboterkonfiguration (siehe Abschnitt 5.4.3). Die entsprechenden emittierten Lichtstrahlen können dadurch auf Projektionsoberflächen mit teils unterschiedlichsten Merkmalen/Eigenschaften abgebildet werden. Dazu kommt, dass die betroffenen Bereiche unter Umständen, bspw. aufgrund sensorgeführter Roboterbewegungen, vorher nicht bekannt oder zum aktuellen Zeitpunkt auch nicht bestimmbar sind.

6.2.1 Anforderungen zur Extraktion des Schutzraumes

Als Resultat der analysierten Rahmenbedingungen wurden folgende Merkmale in Bezug auf die Intensitätswerte der Kamerabilder abgeleitet, welche unmittelbar die Entwicklung eines Verfahrens zur Beantwortung der Frage 2 in Abschnitt 6.1.2 beeinflussen. Die Diagramme in Abbildung 46 veranschaulichen exemplarisch die Verteilung von Intensitätswerten der Bildpunkte im Kamerabild, wobei spezifische Bildpunkte die vom Lichtmodulator emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung eines Schutzraumes abbilden.

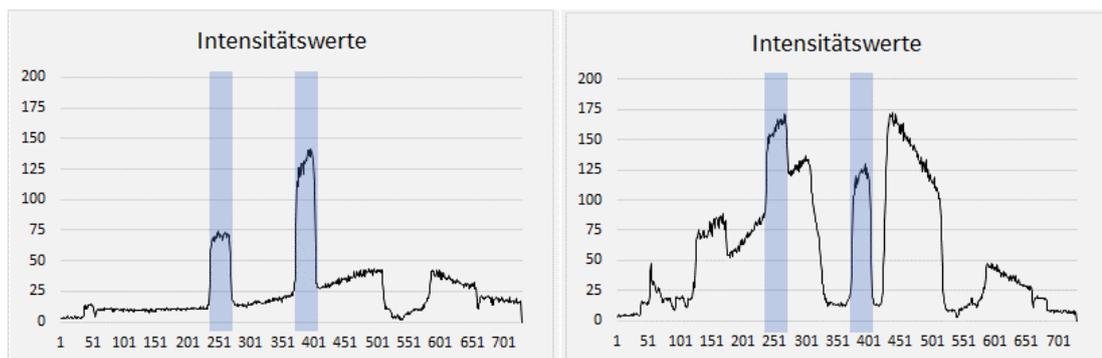


Abbildung 46: Intensitätswerte entlang der Zeile 300 (Bildmitte) der beiden Kamerabilder aus Abbildung 45. Blaue Markierungen kennzeichnen Bildpunkte mit abgebildeten Emissionsstrahlen des Schutzraumes. Links: Bildpunkte mit abgebildeten Emissionsstrahlen sind deutlich erkennbar (Idealfall). Rechts: Bildpunkte mit abgebildeten Emissionsstrahlen unterscheiden sich von anderen Bildpunkten nicht.

Die linke Darstellung in Abbildung 46 repräsentiert einen Idealfall der Intensitätsverteilung entlang einer Zeile im Kamerabild (Bildmitte des linken Kamerabildes in Abbildung 45). Die Erhöhung der Intensitätswerte von Bildpunkten an denen der Schutzraum durch emittierte Lichtstrahlen des Lichtmodulators abgebildet werden, ist deutlich erkennbar. In der rechten Darstellung ist der Einfluss der Rahmenbedingungen auf die Intensitätswerte (Bildmitte des rechten Kamerabildes in Abbildung 45) veranschaulicht. In diesem Fall kann auf Basis der Intensitätswerte eines Bildpunktes nicht direkt auf eine vorliegende Abbildung von emittierten Lichtstrahlen des Lichtmodulators geschlossen werden. Die Änderung der Intensitätsverteilung von linker zu rechter Darstellung (oder umgekehrt) kann während des Überwachungsprozesses jederzeit bspw. aufgrund von Beleuchtungsänderungen erfolgen.

Zusammenfassend können folgende Aussagen bezüglich der Intensitätswerte der Bildpunkte eines Kamerabildes getroffen werden, welche vom umzusetzenden Verfahren als Anforderungen zu berücksichtigen sind:

1. Generell können Bildpunkte sowohl niedrigere als auch höhere Intensitätswerte aufweisen als die zu extrahierenden Bildpunkte mit abgebildeten Emissionsstrahlen.
2. Die Struktur bzw. Merkmale der Bildbereiche (oder Bildpunkte) mit abgebildeten Emissionsstrahlen hängt von den Oberflächeneigenschaften (Reflexionsgrad, Absorptionsgrad, etc.) der beleuchteten Objekte bzw. Projektionsoberflächen ab.
3. Punkte 1 und 2 können sich aufgrund dynamischer Änderungen in der Umgebung (Verschmutzung der Projektionsoberflächen), Änderungen der Beleuchtungen (Sonnenlichteinfall, Fremdlichtänderungen, plötzlicher Schatten) und durch Änderungen des Schutzraumes (Größe, Form, Position) jederzeit ändern oder auch umkehren.

6.2.2 Anforderungen zur Bestimmung der Referenzinformationen

Zur Beantwortung der Frage 3 in Abschnitt 6.1.2 sind Referenzinformationen (RI) notwendig, welche zur Detektion von Abweichungen bezüglich der aktuellen Repräsentation der Umgebung herangezogen werden können. Die Referenzinformationen stellen dabei den idealen Soll-Zustand, die sogenannten Ground Truth Informationen des Schutzraumes dar. Auf Basis der RI sollen Änderungen bzw. Abweichungen in den aktuellen Kameradaten aufgrund von eindringenden Objekten, Umgebungs- und Sensoränderungen oder Systemfehler detektiert werden. Aus den beschriebenen Rahmenbedingungen in Abschnitt 6.2 wurden die in Tabelle 23 zusammengefassten Anforderungen an die Umsetzung der RI abgeleitet.

Tabelle 23: Qualitative Anforderungen an die Referenzinformationen.

Anforderung	Beschreibung
Dynamik	Änderungen des Schutzraumes (z. B. Position, Größe, Form), welche bspw. durch sensorgeführte Bewegungen entstehen und während des Betriebes dynamisch bestimmt werden, sind zu berücksichtigen.
Vollständigkeit	Die Referenzinformationen müssen den Schutzraum lückenlos repräsentieren, so dass auch Objekteindringungen in der Größe eines Fingers detektiert werden.
Sichtbarkeit/ Verdeckungen	Statische Verdeckungen des Überwachungsbereiches, aber insbesondere auch Verdeckungen, die situativ und temporär bestehen (dynamische Verdeckung aufgrund der Roboterbewegung), müssen in den RI berücksichtigt werden.
Robustheit	Die RI sollen unabhängig gegenüber Änderungen der Lichtverhältnisse (ambient, hoch-dynamisch) sein.

6.3 Systemarchitektur und Verfahren

In diesem Abschnitt werden die entwickelten Verfahren zur Erreichung der Ziele unter Berücksichtigung der definierten Anforderungen (siehe Abschnitte 6.1 und 6.2) präsentiert. Abbildung 47 zeigt schematisch die Gesamtarchitektur der Hard- und Softwaremodule und deren Beziehungen untereinander. Der Verfahrensablauf eines Auswertezyklus wird im Folgenden näher beschrieben.

Den Kern des Verfahrens bilden die drei implementierten Hauptkomponenten, deren Entwicklungen in den folgenden Abschnitten detailliert beschrieben werden:

- *Raumzeitliche Schutzraumcodierung* (Abschnitt 6.3.1),
- *Bildfolgeauswertung* (Abschnitt 6.3.2) und
- *Ground Truth Bestimmung* (Abschnitt 6.3.3).

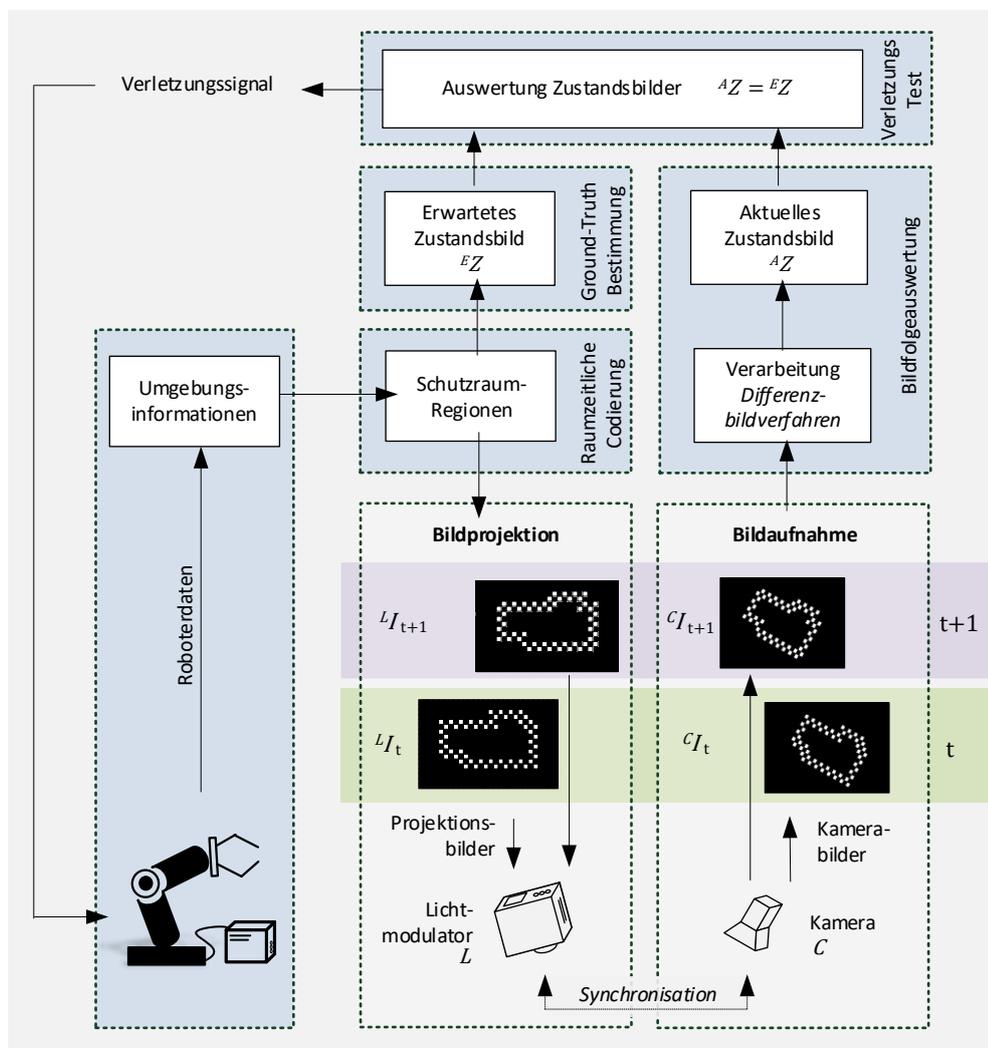


Abbildung 47: Schematische Darstellung der Systemarchitektur mit Hard- und Softwaremodulen sowie Datenflüssen. Kern des Verfahrens bilden die drei Hauptkomponenten „Raumzeitliche Codierung“, „Bildfolgeauswertung“ und „Ground Truth- Bestimmung“.

Verfahrensablauf

Der Ablauf zur Generierung und Überwachung von Schutzräumen gliedert sich in die folgenden Prozessschritte. Diese stellen einen vollständigen Auswertezyklus des A2S dar und werden pro Zyklus jeweils neu durchlaufen (siehe dazu Abbildung 47).

- **Bestimmung der erforderlichen Schutzraumsequenz**
Auf Basis der aktuellen *Umgebungsinformationen* wird die erforderliche SRK \mathcal{G}_t und daraus resultierende SRS S_t zum Zeitpunkt t generiert (siehe Abschnitt 5.4).
- **Generierung und Darstellung der Projektionsbilder**
Für die Überwachung des Schutzraumes \mathcal{V} hinsichtlich des Eindringens eines Objektes ist die Projektion von zwei aufeinanderfolgenden Projektionsbildern ${}^L I_t$ und ${}^L I_{t+1}$ zu den Zeitpunkten t und $t + 1$ durch L erforderlich.
- **Aufnahme und Verarbeitung der Kamerabilder**
Die entsprechenden Lichtstrahlen zur Darstellung der zwei Projektionsbilder zu den Zeitpunkten t und $t + 1$ werden von der Projektionsoberfläche reflektiert und von der Kamera C erfasst. Die Zeitpunkte der Bildprojektion und Bildaufnahme sind hierbei synchronisiert.

Aufgrund der geringen zeitlichen Dauer zwischen den Aufnahmezeitpunkten der beiden Kamerabilder ${}^C I_t$ und ${}^C I_{t+1}$ unterscheiden sich diese lediglich in den Bereichen signifikant, in denen emittierte Lichtstrahlen des Lichtmodulators abgebildet werden. Die Auswertung der Bilder resultiert im sogenannten *Aktuellen Zustandsbild* ${}^A Z$, welches all diejenigen Bildpositionen im Kamerabild repräsentiert, an denen Lichtstrahlen des Schutzraumes extrahiert wurden.

- **Bestimmung der Ground Truth Daten**
Parallel zur Verarbeitung der Kameradaten werden die Ground Truth Informationen auf Basis eines modellbasierten Referenzbildes bestimmt. Das sogenannte *Erwartete Zustandsbild* ${}^E Z$ repräsentiert all jene Bildpositionen, an denen die vom Lichtmodulator L emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung des Schutzraumes im Kamerabild ${}^C I$ erwartet werden.
- **Verletzungstest**
Der Verletzungstest besteht aus einer Überprüfung bzgl. der Übereinstimmung von ${}^E Z$ und ${}^A Z$. Eine Unterbrechung der emittierten Lichtstrahlen aufgrund eines eindringenden Objektes (z. B. menschliche Hand) führt zu einer Abweichung zwischen ${}^E Z$ und ${}^A Z$, was wiederum in einem positiven Verletzungssignal ϕ resultiert.
- **Roboterreaktion**
Das Verletzungssignal ϕ wird schließlich an den Roboter übermittelt, der als Reaktion darauf seine Bewegung oder auch die Ausführung eines Bearbeitungsprozesses (Werkzeugeinsatz) stoppt und damit die bestehenden Gefährdungen für den Menschen auf ein Minimum reduziert bzw. auflöst.

6.3.1 Raumzeitliche Codierung des Schutzraumes

Das Ziel der raumzeitlichen Codierung (RZC) des Schutzraumes besteht in der Aufrechterhaltung der Sicherheitsfunktion auch beim Vorliegen von ambienten oder hoch-dynamischen Fremdlichteinflüssen bzw. -änderungen. Dadurch werden fehlerhafte Systemzustände aufgrund dieser Einflüsse, welche zu einer Nicht-Detektion einer Schutzraumverletzung bei Objekteindringung führen können, verhindert.

Die RZC besteht aus einer zeitlichen und räumlichen Codierung der darzustellenden und zu überwachenden SRS S (siehe Abschnitt 5.4.3). Das hierfür entwickelte und umgesetzte Verfahren bestehend aus einer (i) *Diskretisierung*, (ii) *Quantisierung* und (iii) *Dynamisierung* des Schutzraumes wird in den folgenden Abschnitten präsentiert.

Zeitliche Codierung des Schutzraumes

Zur robusten Unterscheidung der emittierten Lichtstrahlen des Lichtmodulators gegenüber den ambienten Lichtverhältnissen wurde ein digitales Modulationsverfahren umgesetzt. Dabei handelt es sich um ein *On Off Keying* (OOK), welches einer Amplitudenumtastung (engl. *Amplitude Shift Keying* - ASK) entspricht (Johann 1992). Im Stand der Wissenschaft kommen OOK-Verfahren bspw. bei Systemen zur optischen drahtlosen Kommunikation (engl. *Optical Wireless Communication* – OWC) (O'Brien et al. 2008; Uysal und Nouri 2014) zum Einsatz. Unter Verwendung einer (oder mehrerer) LED werden Informationen OOK-codiert ausgesendet und von einer Kamera wieder empfangen und decodiert (*Optical Camera Communication* – OCC) (Roberts 2013; Nguyen et al. 2016). Daten können somit über Entfernungen von 100 m weit übertragen werden (Chow et al. 2018).

In Bezug auf den zu überwachenden Schutzraum wird OOK mit dem Ziel umgesetzt, dass den Schutzraum abbildende Emissionsstrahlen in den Kamerabildern zuverlässig extrahiert werden. Der Lösungsansatz besteht also darin, die emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung des Schutzraumes durch eine spezifische Folge \mathcal{J} von Projektion und Nicht-Projektion zu codieren. Dazu werden nacheinander $m \geq 2$ Projektionsbilder ${}^L I_k$ beginnend zum Zeitpunkt t vom Lichtmodulator L dargestellt:

$$\mathcal{J} = ({}^L I_t, {}^L I_{t+1}, {}^L I_{t+2}, \dots, {}^L I_{t+m-1}) \quad (36)$$

Die binäre Repräsentation $\varepsilon \in \{0,1\}$ definiert, ob ein Projektionsbild ${}^L I_k$ Lichtstrahlen zur Darstellung einer SRS emittiert *emit* (1) oder nicht emittiert $\overline{\text{emit}}$ (0):

$$\varepsilon_k = \begin{cases} 1, & \text{emit}({}^L I_k) \\ 0, & \overline{\text{emit}}({}^L I_k) \end{cases} \quad (37)$$

Der Code \mathbb{C} beinhaltet dann die binäre Repräsentation der Abfolge \mathcal{J} :

$$\mathbb{C} = (\varepsilon_t, \varepsilon_{t+1}, \varepsilon_{t+2}, \dots, \varepsilon_{t+m-1}) \quad (38)$$

Die bildpunktbasierte Extraktion des Codes \mathbb{C} in der Bildfolge mit m Kamerabildern ${}^c I_k$ lässt dann mit hoher Sicherheit darauf schließen, dass ein Bildpunkt die zu überwachende SRS abbildet.

Codelänge Die Codelänge $|\mathbb{C}|$ spielt für die Darstellung und Überwachung des Schutzraumes eine wesentliche Rolle, da mit der Codelänge auch die Anzahl der benötigten Projektionsbilder (und entsprechend Kamerabilder) definiert ist. Mit zunehmender Codelänge steigt die Anzahl der Projektionsbilder und äquivalent dazu die Auswertedauer innerhalb eines Auswertezyklus. Dadurch ergeben sich zwei wesentliche Nachteile: Erstens erhöht sich damit die Wahrscheinlichkeit, dass sich während dieser Zeitdauer die Lichtverhältnisse signifikant ändern und somit den Extraktionsprozess beeinflussen. Zweitens erhöht sich mit der Auswertedauer auch die Reaktionszeit des Systems, was wiederum in vergrößerten einzuhaltenen Mindestabständen zwischen Mensch und Roboter resultiert (siehe Abschnitt 5.4.3).

Zur Vermeidung dieser Nachteile wurde mit einem Code von genau zwei Zeichen $|\mathbb{C}| = 2$ die Codelänge minimiert. Daraus ergibt sich, dass innerhalb eines Auswertezyklus genau zwei Projektionsbilder ${}^L I_t$ und ${}^L I_{t+1}$ generiert und nacheinander zu den Zeitpunkten t und $t + 1$ projiziert werden. Die Minimierung der Codelänge kann jedoch im Zusammenhang mit hochdynamischen Lichtänderungen unter Umständen zu einem fehlerhaften Systemverhalten führen (siehe (Vogel et al. 2021)). Dieser Nachteil wurde durch eine Diskretisierung des Überwachungsbereiches in Kombination mit einer räumlichen Codierung kompensiert.

Diskretisierung des Überwachungsbereiches in Schutzraumregionen

Mit der räumlichen Schutzraumcodierung wird die zeitliche Codierung des Schutzraumes auf Basis einer Bildfolge (Gleichung (38)) derart erweitert, dass diese Codierung zusätzlich innerhalb von Bildregionen der Bildfolge stattfindet.

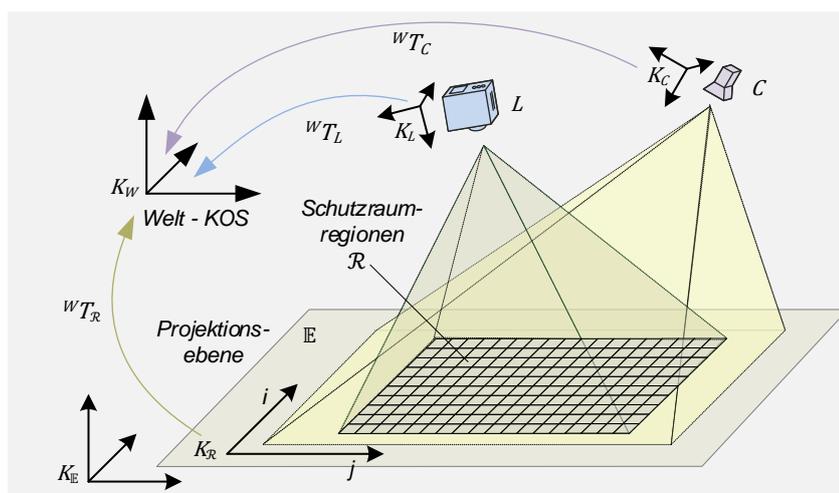


Abbildung 48: Diskretisierung des Überwachungsbereiches in quadratische Schutzraumregionen \mathcal{R} .

Voraussetzung für die resultierende raumzeitliche Codierung (RZC) stellt die gleichmäßige Diskretisierung des Überwachungsbereiches in eine Menge an Schutzraumregionen (SRR) \mathcal{R}

dar. Dazu wurden einzelne quadratische Regionen r mit ($r \in \mathcal{R}$) und einheitlicher Größe definiert, die den Überwachungsbereich in der Projektionsebene \mathbb{E} entsprechend Abbildung 48 lückenlos unterteilen. Hierbei gilt $r \in \mathbb{E}$ und $\mathcal{R} \subseteq \mathbb{E}$.

Jedes r ist mit den Koordinaten (i, j) bezüglich des SRR-KOS $K_{\mathcal{R}}$ eindeutig bestimmt. Darüber hinaus besitzt jedes r einen binären Zustand $\delta \in \{0,1\}$, welcher angibt ob eine Region zur Darstellung und Überwachung eines Schutzraumes erforderlich ist und demnach *aktiv* (1) oder ob diese nicht erforderlich ist und somit *inaktiv* (0). Weiterhin wird nun die Abfolge von Projektion und Nicht-Projektion für jede Region r separat als Code \mathbb{C} festgelegt (vgl. Gleichung (37) und (38)). Damit ergibt sich:

$$\mathbb{C}(r) = \begin{cases} 01, & \text{falls } \overline{\text{emit}}_t(r) \wedge \text{emit}_{t+1}(r) \\ 10, & \text{falls } \text{emit}_t(r) \wedge \overline{\text{emit}}_{t+1}(r) \end{cases} \quad (39)$$

Zusammenfassend besteht eine Region r aus folgendem Quadrupel:

$$r = (i, j, \delta, \mathbb{C}) \quad r \in \mathcal{R}, \mathcal{R} \subseteq \mathbb{E} \quad (40)$$

Zur Darstellung einer Region r mit den Koordinaten (i, j) werden die zugehörigen Eckpunkte $p_k \in \mathbb{R}^3$ ($k = 1,2,3,4$) von r bzgl. $K_{\mathcal{R}}$ unter Verwendung der Transformationsmatrix ${}^W T_{\mathcal{R}}$ sowie der Projektionsmatrix \mathcal{M} in die Bildebene von L transformiert und somit die Bildpunkte $(u, v) \in {}^L I$ des Projektionsbildes ${}^L I$ bestimmt und projiziert.

Definition der Regionen-Codes Auf Basis der Diskretisierung des Überwachungsbereiches in SRR \mathcal{R} werden nun für benachbarte Regionen jeweils voneinander verschiedene Codes definiert. Für eine Region r_0 gilt dann für die benachbarten Regionen r_k (4er Nachbarschaft):

$$\mathbb{C}(r_k) = \begin{cases} 01, & \text{falls } \mathbb{C}(r_0) = 10 \\ 10, & \text{falls } \mathbb{C}(r_0) = 01 \end{cases} \quad \text{mit } k = 1,2,3,4 \quad (41)$$

Innerhalb des gesamten Überwachungsbereiches existieren somit keine zusammenhängenden Regionen bzgl. 4er Nachbarschaft mit identischem Regionen-Code (siehe Abbildung 49).

Schutzraum-Quantisierung

Die Schutzraum-Quantisierung bestimmt auf Basis der aktuellen SRS S alle Regionen r , die zur Darstellung und Überwachung des entsprechenden Schutzraumes \mathcal{V} notwendig sind und somit *aktiv* sein müssen: $\delta(r) = 1$. Der Zustand δ aller Regionen \bar{r} die nicht erforderlich sind, ändert sich dann zu *inaktiv*: $\delta(\bar{r}) = 0$.

Für die zuverlässige Detektion von Schutzraumeindringungen auch beim Vorliegen von ambienten oder hoch-dynamischen Fremdlichtänderungen ist es erforderlich, dass mindestens zwei benachbarte Regionen von einer Objekteindringung betroffen sind. Diese Anforderung resultiert darin, dass bei einer Objekteindringung die Lichtstrahlen von mindestens zwei Regionen mit unterschiedlicher Codierung unterbrochen werden. Zur Erfüllung dieser Anforderung wurden sogenannte *quadratische Regionencluster* eingeführt.

Quadratische Regionencluster (RC) beinhalten jeweils vier Regionen, wobei die diagonal zueinander liegenden Regionen einen identischen Regionen-Code besitzen. Eine Region r mit den Koordinaten (i, j) bildet zusammen mit den Regionen an den Koordinaten $(i + 1, j)$, $(i + 1, j + 1)$ und $(i, j + 1)$ einen RC Q (siehe Abbildung 49).

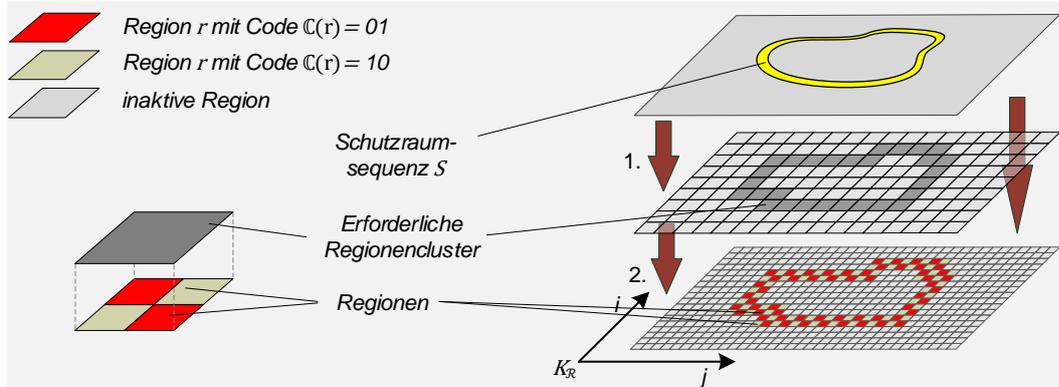


Abbildung 49: Quantisierung einer SRS S zur Bestimmung der erforderlichen SRR $\mathcal{R}(S)$ mit Hilfe von quadratischen Regionenclustern Q . Abbildung in Anlehnung an (Vogel et al. 2021).

Verfahrensablauf Die Schutzraum-Quantisierung wurde als 2-stufiger Prozess realisiert (siehe Abbildung 49). Im ersten Schritt werden unter Verwendung der aktuellen SRS S die erforderlichen RC Q bestimmt. Als Resultat liegt eine zusammenhängende Aneinanderreihung (bzgl. 4er Nachbarschaft) von Regionenclustern zur Repräsentation von S als $Q(S)$ vor.

Im 2. Schritt werden alle Regionen r mit $r \in Q(S)$ durch $\delta(r) = 1$ aktiviert, alle anderen Regionen \bar{r} mit $\bar{r} \notin Q(S)$ werden durch $\delta(\bar{r}) = 0$ deaktiviert. Nach Durchführung der Quantisierung sind alle Regionen aktiviert, welche zur Darstellung und Überwachung des aktuellen Schutzraumes erforderlich sind. Da $Q(S)$ bzgl. einer 4er Nachbarschaft eine zusammenhängende Menge darstellt, wird dadurch auch die Anforderung erfüllt, dass bei einer Objekteindringung mindestens zwei Regionen mit unterschiedlicher Codierung betroffen sind (siehe Abbildung 49).

Schutzraum-Dynamisierung

Die Dynamisierung des Schutzraumes bezieht sich auf die Zuordnung zwischen einer Region r und des zugehörigen Codes $\mathbb{C}(r)$. Nach jedem Auswertezyklus (siehe Abschnitt 6.3 *Verfahrensablauf*) ändert sich der Code zu $\bar{\mathbb{C}}(r)$ für alle Regionen, unabhängig davon ob diese *aktiv* oder *inaktiv* sind.

$$\bar{\mathbb{C}}(r) = \begin{cases} 01, & \text{falls } \mathbb{C}(r) = 10 \\ 10, & \text{falls } \mathbb{C}(r) = 01 \end{cases} \quad \forall r \in \mathcal{R} \quad (42)$$

Daraus resultiert eine Änderung der Abfolge von Projektion/Nicht-Projektion aller Regionen mit jedem neuen Auswertezyklus (siehe Gleichung (39)).

Der Hintergrund zur Umsetzung einer Schutzraum-Dynamisierung liegt in folgendem Umstand begründet: Insbesondere bei der Darstellung und Überwachung von statischen

Schutzräumen sind während aller Auswertezyklen hinweg dieselben Regionen betroffen. Sowohl bei der Darstellung des Schutzraumes (Projektion von zwei Bildern) als auch bei der Überwachung (Aufnahme von zwei Bildern) ändert sich innerhalb der Daten bei identischen Schutzräumen nichts. Dabei ist nicht eindeutig feststellbar, ob tatsächlich keine Änderungen stattgefunden haben, oder ob aufgrund von Fehlern weiterhin unveränderte Daten vorliegen.

Die Änderung der Zuordnung von Code und Region nach jedem Auswertezyklus dynamisiert nun den gesamten Datenfluss und erzwingt somit Änderungen auch bei statischen bzw. identischen Schutzräumen. Aufgrund dieser Schutzraum-Dynamisierung können bspw. Systemfehler mit folgenden Ursachen aufgedeckt werden:

- Fehler während der Generierung und Darstellung der Projektionsbilder führen zur permanenten Darstellung von zwei Projektionsbildern
- Kameradefekte führen zur permanenten Ausgabe derselben zwei Kamerabilder
- Fehler oder Defekte der Rechentechnik zur Verarbeitung der Kameradaten führen zu den selben Codes aller Regionen
- Fehler bei der Datenübertragung zwischen Kameratechnik und Rechentechnik
- Fehler bei der Bestimmung/Ausgabe des Verletzungssignals

Die Dynamisierung des Schutzraumes stellt somit eine wesentliche Maßnahme zur Aufdeckung von Fehlern innerhalb des A2S dar (siehe *Zertifizierbarkeit* Abschnitt 5.5.1).

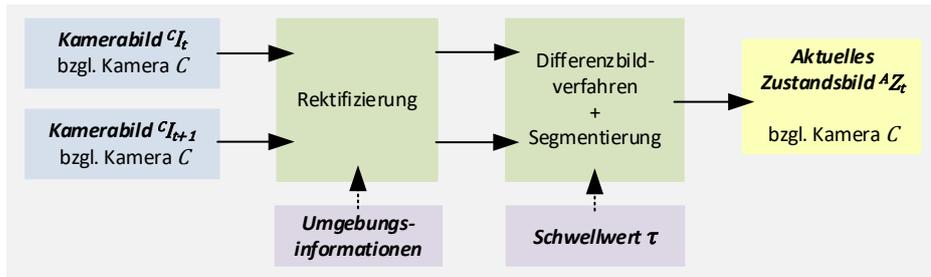
6.3.2 Bildfolgeauswertung – Aktuelles Zustandsbild

Ein wesentliches Teilziel stellt die Extraktion der Bildpunkte im Kamerabild dar, an denen die emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung der Schutzraumsequenz abgebildet werden. Interpretiert man diese SRS als das zu detektierende Objekt, kann das als Segmentierungsproblem zur Unterteilung des Bildes in Vordergrund und Hintergrund verallgemeinert werden.

In Abschnitt 6.3.1 wurde das entwickelte Verfahren zur RZC für die Darstellung der SRS präsentiert. Da dieses Verfahren zu Änderungen des Schutzraumes innerhalb einer Bildfolge führt, kommen im Stand der Wissenschaft insbesondere Verfahren der *Image Change Detection* (ICD) (Radke et al. 2005) als Lösungsansätze zur Detektion der SRS im Kamerabild in Frage. Ziel stellt die Segmentierung von Änderungen in Bildern einer Bildfolge (2 bis N Bilder) als Vordergrund dar. Das *aktuelle Zustandsbild* AZ repräsentiert das Ergebnis der Bildfolgeauswertung, welches für jeden Bildpunkt x den extrahierten Code $\mathbb{C}(x)$ beinhaltet.

Verarbeitungsprozess

Das Verfahren zur Bestimmung des AZ wird in Abbildung 50 schematisch dargestellt. Den Kern des Verfahrens bildet die Differenzbilderstellung und schwellwertbasierte Segmentierung auf Basis zweier aufeinanderfolgender Kamerabilder I_t und I_{t+1} zu den Zeitpunkten t und $t + 1$.

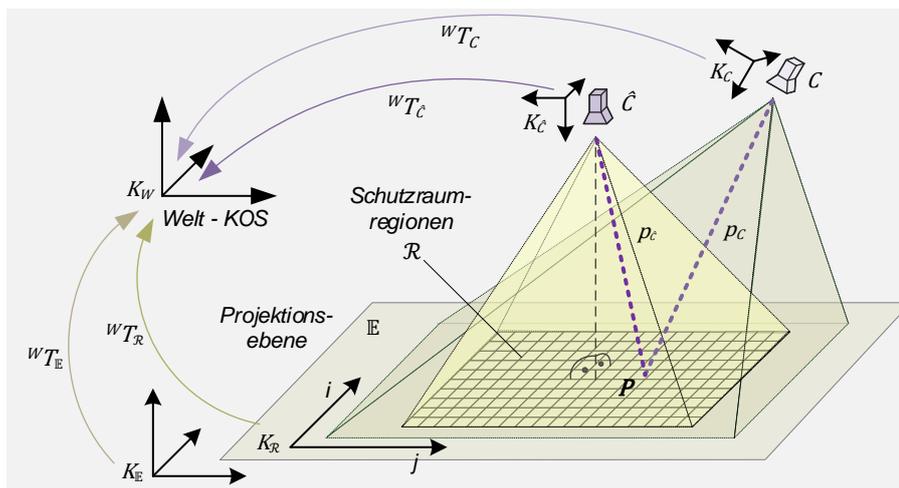
Abbildung 50: Verfahren zur Bestimmung des A^Z einer Kamera C .

Die einzelnen Verarbeitungsschritte werden in den nachfolgenden Abschnitten näher beschrieben.

Rektifizierung der Kamerabilder

Nach Aufnahme der Kamerabilder I_t und I_{t+1} werden diese in einem ersten Schritt entzerrt und rektifiziert. Die Rektifizierung beinhaltet eine geometrische Transformation (*Resampling*) der Kamerabilder aus Perspektive einer virtuellen Kamera \hat{C} , die orthogonal zur Projektionsoberfläche über dem Überwachungsbereich positioniert ist. Die Kamera \hat{C} stellt hierbei eine idealisierte Kamera ohne Verzerrungen dar und bildet den gesamten Überwachungsbereich (oder Teilbereiche bei mehreren Kameras) mit den Schutzraumregionen \mathcal{R} ab (siehe Abbildung 51). Bei Verwendung mehrerer Kameras C_i wird jeder C_i genau eine virtuelle Kamera \hat{C}_i zugeordnet.

Das Resampling wird schließlich unter Verwendung der intrinsischen/extrinsischen Parameter der realen Kamera C und virtuellen Kamera \hat{C} sowie der Projektionsebene \mathbb{E} durchgeführt (siehe auch *Geometrische Beziehungen*, Abschnitt 5.4.2).

Abbildung 51: Verwendung einer virtuellen Kamera \hat{C} zur Normalisierung der SRR im Kamerabild.

Das Ziel der Rektifizierung stellt zum einen die Normalisierung der Schutzraumregionen hinsichtlich perspektivischer Verzerrungen im Kamerabild dar. Schutzraumregionen, die aufgrund der Perspektive und Verzerrungseigenschaften von Kamera C im Kamerabild kleiner (weiter entfernt von der Kamera) oder größer (näher an der Kamera) abgebildet werden, weisen im Bild der virtuellen Kamera \hat{C} eine identische Größe bzw. Fläche auf. Zum anderen

bildet die virtuelle Kamera \hat{C} lediglich den relevanten und erforderlichen Bildbereich des Überwachungsbereiches ab, sodass die Datenmenge reduziert und der Aufwand nachgelagerter Verarbeitungsschritte minimiert wird.

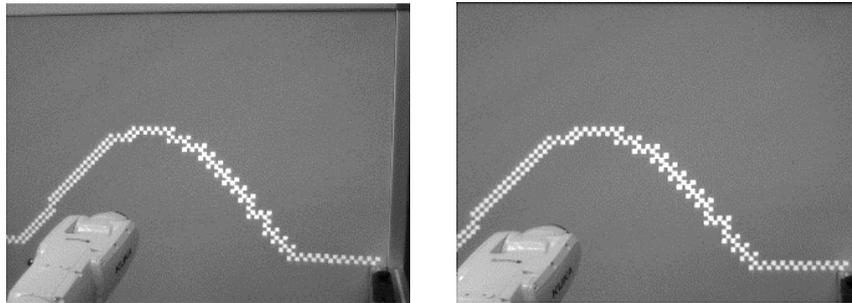


Abbildung 52: Resampling des Kamerabildes der realen Kamera C (links) aus Perspektive der virtuellen Kamera \hat{C} (rechts). Normalisierung der Schutzraumregionen und Reduzierung der Bildinformationen im virtuellen Kamerabild. (Zur Verbesserung der Sichtbarkeit wurde die Bildhelligkeit um 50 % erhöht.)

Der Unterschied zwischen originalem Kamerabild cI und rektifiziertem Kamerabild ${}^{\hat{c}}I$ ist exemplarisch in Abbildung 52 dargestellt.

Schwelwertbasiertes Differenzbildverfahren und Segmentierung

Den Kern des umgesetzten ICD-Verfahrens bildet eine *Background-Subtraction* (siehe (Distante und Distante 2020b)) auf Basis der zwei aufeinanderfolgenden Kamerabilder⁵ ${}^{\hat{c}}I_t$ und ${}^{\hat{c}}I_{t+1}$. Den Problemen des *Ghostings* und *Foreground Aperture* (Martínez-Martín 2012) wurde durch die RZC der SRS S begegnet. Auf Basis eines geringen Δt der Aufnahmezeitpunkte von I_t und I_{t+1} und dem Aspekt, dass die SRR aufgrund der RZC jeweils nur in einem der beiden aufeinanderfolgenden Kamerabilder dargestellt werden, konnten folgende vorteilhafte Eigenschaften erzielt werden:

- Änderungen des Hintergrundes durch ambiante Fremdlichteinflüsse wirken sich auf beide aufeinanderfolgende Kamerabilder aus
- Die emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung der SRS S erzeugen signifikante Änderungen zwischen den aufeinanderfolgenden Kamerabildern

Daraus resultierend wurde zur Detektion der emittierten Lichtstrahlen für die Darstellung und Überwachung des Schutzraumes eine Differenzbildung mit anschließender schwelwertbasierter Segmentierung umgesetzt. Dazu werden pixelweise die Intensitätswerte $I_t(x)$ des ersten Kamerabildes von den Intensitätswerten $I_{t+1}(x)$ des zweiten Kamerabildes subtrahiert:

$$\Delta I_t(x) = I_{t+1}(x) - I_t(x) \quad (43)$$

Im daraus resultierenden Differenzbild ΔI_t führt dies zu signifikanten positiven bzw. negativen Werten an den Bildpunkten, an denen emittierte Lichtstrahlen zur Darstellung einer Schutzraumregion abgebildet werden.

⁵ Kamerabilder repräsentieren die rektifizierten Bilder der virtuellen Kamera \hat{C} . Im Folgenden gilt ${}^{\hat{c}}I = I$.

Das Vorzeichen des Differenzwertes $\Delta I_t(x)$ spielt hier eine wesentliche Rolle, da dieses die Reihenfolge der Projektion/Nicht-Projektion repräsentiert:

$$\begin{aligned} \Delta I_t(x) > 0 &\Leftrightarrow I_t(x) < I_{t+1}(x) \Leftrightarrow \overline{emit}_t(x) \wedge emit_{t+1}(x) \\ \Delta I_t(x) < 0 &\Leftrightarrow I_t(x) > I_{t+1}(x) \Leftrightarrow emit_t(x) \wedge \overline{emit}_{t+1}(x) \end{aligned} \quad (44)$$

Aus dieser Abfolge kann schließlich der Code $\mathbb{C}(x)$ für einen Bildpunkt x bestimmt werden (siehe Gleichung (39), Abschnitt 6.3.1). Das aktuelle Zustandsbild AZ_t repräsentiert schließlich für jeden Bildpunkt x den zugehörigen extrahierten Code $\mathbb{C}(x)$:

$${}^AZ_t(x) = \begin{cases} 01, & \text{falls } |\Delta I_t(x)| > \tau \wedge \Delta I_t(x) > 0 \\ 10, & \text{falls } |\Delta I_t(x)| > \tau \wedge \Delta I_t(x) < 0 \\ 00, & \text{sonst} \end{cases} \quad (45)$$

Zur Minimierung des Einflusses von Bildrauschen und damit Erhöhung einer robusten Extraktion der Codes wurde in Gleichung (45) der Schwellwert τ eingeführt. Dieser beschreibt den erforderlichen Intensitätswertunterschied, der für den Extraktionsprozess mindestens erreicht sein muss. In Abbildung 53 werden zwei zeitlich aufeinanderfolgende Kamerabilder I_t und I_{t+1} , sowie das daraus resultierende AZ_t dargestellt.

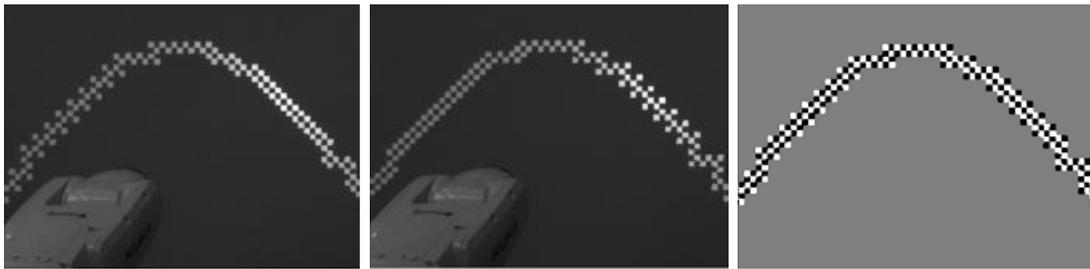


Abbildung 53: Generierung des AZ_t (rechtes Bild) auf Basis zweier zeitlich aufeinanderfolgender Kamerabilder I_t (linkes Bild) und I_{t+1} (mittleres Bild). Die drei verschiedenen Grautöne der Bildpunkte im AZ_t repräsentieren die extrahierten Codes: schwarz \rightarrow 01; weiß \rightarrow 10; grau \rightarrow 00

Aufgrund der Dynamisierung alterniert ein Bildpunkt x im AZ_t zwischen den Codes „01“ und „10“ nach jedem Auswertezyklus, wenn dieser Bildpunkt zur Darstellung und Überwachung eines Schutzraumes verwendet wird (siehe *Dynamisierung*, Gleichung (42), Abschnitt 6.3.1).

6.3.3 Ground Truth Bestimmung - Erwartetes Zustandsbild

Neben dem AZ , welches für jeden Bildpunkt den extrahierten Code beinhaltet und damit den aktuellen Zustand der Schutzraumregionen im Überwachungsbereich repräsentiert, benötigt es Referenzinformationen (RI) für eine Prüfung dahingehend, ob das AZ einen fehlerfreien (somit auch verletzungsfreien) Schutzraum abbildet oder nicht. Die RI müssen demnach den *Ground Truth* Zustand des aktuellen Schutzraumes (bestehend aus Schutzraumregionen mit Codes) beinhalten, sodass auf deren Basis Abweichungen (Objekteindringungen) oder Systemfehler (z. B. Dekalibrierung von Kamera oder Lichtmodulator) festgestellt werden können. Das Ziel stellt somit die Bestimmung des idealen Soll-Zustandes in Form eines sogenannten *erwarteten Zustandsbildes* EZ für jedes AZ dar.

Stand der Wissenschaft

Im Stand der Wissenschaft existieren im Bereich der MRK-Arbeitsraumüberwachung Ansätze, die auf Basis einer Folge realer Kamerabilder entsprechende RI extrahieren und diese zur Laufzeit mit den extrahierten Merkmalen der aktuellen Kamerabilder vergleichen (Henrich und Gecks 2008). Eine große Herausforderung bei der Verwendung realer Kamerabilder als RI besteht im Umgang mit Änderungen in der Umgebung hinsichtlich (i) Objekten (z. B. Positionsänderung eines Tisches) und (ii) Lichtverhältnissen. Zur Verringerung des Einflusses von Lichtänderungen hat (Ebert 2003) eine automatische Aktualisierung der RI während des Überwachungsprozesses zu regelmäßigen Zeitpunkten vorgeschlagen. Dabei muss jedoch speziell darauf geachtet werden, welche Objekte zum jeweiligen Zeitpunkt existieren und auch weiter als Vordergrund betrachtet werden müssen bzw. dürfen. Hierzu hat (Graf 2010) ein Hintergrundmodell entwickelt, welches sich kontinuierlich an die aktuelle Szene anpasst. Um zu verhindern, dass lange Zeit unveränderte Objekte (z. B. unbewegte Beine eines Menschen beim Stehen) dem Hintergrund zugeordnet werden, ist hierfür modellbasiertes Wissen notwendig. Von (Distant und Distant 2020b; Martínez-Martín 2012) werden zur Thematik der *Motion Analysis* im Zusammenhang mit *Background-Modeling* weitere Lösungsansätze beschrieben.

Einen zusätzlichen Aspekt stellen Roboter und zu manipulierende Objekte dar. Diese bewegen oder verändern sich während der Zeit und werden somit im Kamerabild als unbekannte Objekte detektiert. Damit der Roboter überhaupt in der Lage ist Objekte zu handhaben, kommen deshalb 3D-Modelle zur Anwendung (Schmidt und Wang 2014). Diese dienen zur Klassifikation der Bilddaten hinsichtlich bekannter (z. B. Roboter) und unbekannter Objekte.

Schlussfolgerung In Bezug auf das A2S ist gegenüber den Ansätzen im Stand der Wissenschaft ein grundsätzlicher Unterschied festzustellen. Während im Stand der Wissenschaft die zu detektierenden annähernden Objekte unbekannt sind, liegen die Informationen für den zu überwachenden Schutzraum in Form der aktuell aktiven SRR mit entsprechenden Codes beim A2S jedoch vor. Für die Bestimmung der RI können diese Modelle und Beschreibungen (siehe Abschnitt 5.4.2) somit direkt verwendet werden.

In Tabelle 24 werden die Lösungsansätze zur Bestimmung der RI auf Basis von realen Bilddaten *Bildbasierte Referenz* und auf Basis von Modellen *Modellbasierte Referenz* hinsichtlich der Anforderungen aus Abschnitt 6.2.2 bewertet.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass die Verwendung eines modellbasierten Referenzbildes gegenüber dem Verfahren basierend auf realen Kamerabildern deutliche Vorteile aufzeigt. Diese betreffen vor allem eine Unabhängigkeit gegenüber dynamischen Änderungen in der Umgebung und bzgl. dynamischer Schutzraumänderungen. Darüber hinaus können statische und insbesondere temporäre Verdeckungen berücksichtigt werden. Aus den genannten Gründen wurde ein modellbasierter Ansatz zur Bestimmung der RI entwickelt.

Tabelle 24: Einschätzung der Ansätze „Bildbasierte Referenz“ und „Modellbasierte Referenz“ zur Erfüllung der Anforderungen an die Referenzinformationen.

	Bildbasierte Referenz	Modellbasierte Referenz
Dynamik	Änderungen des Schutzraumes müssen vor Betrieb bekannt sein und z. B. während einer Referenzfahrt berücksichtigt werden.	- Keine Einschränkungen - Dynamische Änderungen des Schutzraumes während des Betriebs werden uneingeschränkt berücksichtigt.
Vollständigkeit	- Keine Einschränkungen - Referenzbilder basieren auf realen Kamerabildern.	Referenzbild basiert auf intrinsischen und extrinsischen Kameraparametern. Diese müssen bekannt und hinreichend genau sein.
Verdeckungen	Verdeckungen müssen schon während der Referenzfahrt berücksichtigt werden. Neue bekannte als auch unbekannte Objekte während des Überwachungsprozesses können nicht ohne zusätzliches Modellwissen berücksichtigt werden.	- Keine Einschränkungen - Verdeckungen können auf Basis eines aktuellen Umgebungsmodells permanent berücksichtigt werden.
Robustheit	Umgebungsänderungen können dazu führen, dass das Referenzbild nicht mehr mit dem aktuellen Ist-Kamerabild vergleichbar ist.	- Keine Einschränkungen - Unabhängig von Umgebungsänderungen.

Modellbasierte Generierung der Ground Truth Daten

Da das ${}^E Z$ ausschließlich auf Modellen und Beschreibungen basiert, werden zur Erstellung des ${}^E Z$ einer Kamera C die aktuellen *Umgebungsinformationen* (siehe Abschnitt 5.4.2) herangezogen. Dies betrifft in erster Linie die aktiven SRR und die intrinsischen/extrinsischen Parameter der zu Kamera C zugeordneten virtuellen Kamera \hat{C} . Weiterhin sind Informationen zu statischen und dynamischen Objekten notwendig, um Verdeckungen zu berücksichtigen. Der generelle Ablauf zur Bestimmung des ${}^E Z$ einer Kamera C ist in Abbildung 54 dargestellt.

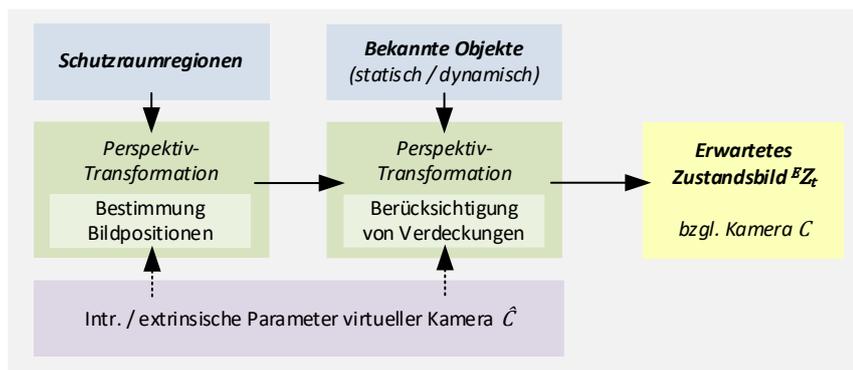


Abbildung 54: Verfahren zur Bestimmung des erwarteten Zustandsbildes ${}^E Z$ einer Kamera C .

Ein ${}^E Z$ korrespondiert jeweils mit genau einem ${}^A Z$ einer Kamera C und der zugehörigen virtuellen Kamera \hat{C} (siehe Abschnitt 6.3.2). Bei Verwendung mehrerer Kameras C_i (und resultierender ${}^A Z_i$) sind demzufolge entsprechende ${}^E Z_i$ erforderlich.

Bestimmung der Bildpositionen aller Schutzraumregionen

Das ${}^E Z$ beinhaltet die Bildpunkte mit den aktiven SRR und den zugehörigen Codes des aktuell zu überwachenden Schutzraumes. Hierzu werden die aktiven SRR r mit $r \in \mathcal{R} \wedge \delta(r) = 1$ unter Zuhilfenahme der intrinsischen und extrinsischen Parameter der virtuellen Kamera \hat{C} in die Bildebene von \hat{C} transformiert. Den resultierenden Bildpunkten $x(r)$, die eine aktive Schutzraumregion r abbilden, wird dann der Code $\mathbb{C}(r)$ zugeordnet.

Jeder Bildpunkt x im ${}^E Z$ bildet schließlich den zu erwartenden Code ab:

$${}^E Z(x) = \begin{cases} 01, & \text{falls } (r \rightarrow x) \wedge (\delta(r) = 1) \wedge (\mathbb{C}(r) = 01) \\ 10, & \text{falls } (r \rightarrow x) \wedge (\delta(r) = 1) \wedge (\mathbb{C}(r) = 10) \\ 00, & \text{sonst} \end{cases} \quad (46)$$

Abbildung 55 zeigt exemplarisch ein ${}^A Z$ mit zugehörigem ${}^E Z$. Die einzelnen Schutzraumregionen mit den entsprechenden Codes (dargestellt durch weiße (10), schwarze (01) und graue (00) Bildpunkte) sind gut zu erkennen.

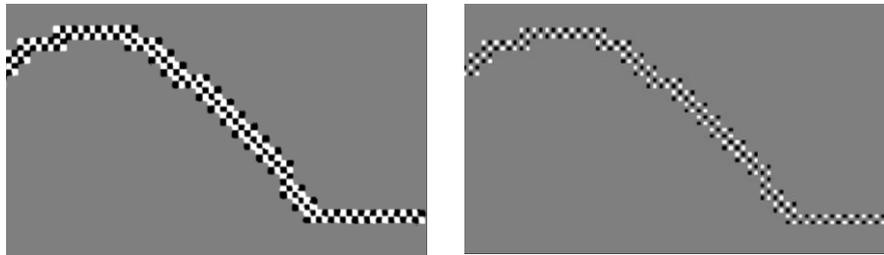


Abbildung 55: Erwartetes Zustandsbild ${}^E Z$ (rechts) bestehend aus Schutzraumregionen mit zwei unterschiedlichen Codes (weiße und schwarze SRR). ${}^E Z$ (rechts) korrespondiert mit dem ${}^A Z$ (links).

Berücksichtigung von Verdeckungen

Die Berücksichtigung von Verdeckungen bei der Generierung des ${}^E Z$ stellt einen wesentlichen Aspekt für die Anwendbarkeit des A2S dar. Aufgrund von räumlichen Gegebenheiten, der Positionierung von Kameras sowie statischen oder dynamischen Objekten im Überwachungsbereich können Situationen entstehen, die eine Überwachung von aktiven SRR des aktuellen Schutzraumes verhindern. Diese Verdeckungen können systematische Ursachen haben (ungünstige Kameraposition) oder situativ/prozessabhängig z. B. aufgrund einer temporären Bewegung des Roboters in den Kamerasichtbereich auftreten.

Damit derartige Situationen nicht zu einem Verletzungssignal und daraus resultierendem Bewegungsstopp des Roboters führen, müssen die Verdeckungsgebiete im ${}^E Z$ berücksichtigt werden. Dies setzt voraus, dass die ursächlichen Objekte in Form und Position bekannt sind (siehe *3D-Umgebungsmodelle*, Abschnitt 5.4.2).

Verdeckungsgebiete aufgrund eines Objektes \hat{O} werden im ${}^E Z$ ausgeblendet, indem die entsprechenden Primitive $\mathcal{O} \in \hat{O}$ in die Bildebene der virtuellen Kamera \hat{C} transformiert werden (siehe dazu Abschnitt 5.4.2). Die resultierenden Bildpunkte $x(\mathcal{O})$ im ${}^E Z$ werden dann mit dem Code $\mathbb{C}(x) = 00$ überschrieben:

$${}^E Z(x) = \begin{cases} 00, & \text{falls } \mathcal{O} \rightarrow x \\ \text{unverändert}, & \text{sonst} \end{cases} \quad (47)$$

Vollständigkeit Die Ausblendung von Verdeckungsbereichen darf nicht dazu führen, dass aktive SRR von keiner Kamera $c \in \{C_i\}$ mit $i = 1 \dots n$ überwacht werden. Das wiederum bedeutet, dass bei Verwendung lediglich einer Kamera demnach keine Bereiche im zugehörigen ${}^E Z$ ausgeblendet werden dürfen, da diese von keiner weiteren Kamera überwacht werden können. Die vollständige Überwachung aller aktiven SRR muss in jedem Auswertezyklus gewährleistet sein. Das heißt, für jede SRR $r \in \mathcal{R} \wedge \delta(r) = 1$ gibt es mindestens eine Kamera C_k mit $(1 \leq k \leq n)$ und zugehörigem ${}^E Z_k$, welches die Schutzraumregion r mit den Bildpunkten $x(r)$ abbildet und den Code $\mathbb{C}(x) = \mathbb{C}(r)$ beinhaltet. Ist dies nicht der Fall, findet keine vollständige Überwachung des Schutzraumes statt und Objekteindringungen werden an den ausgeblendeten Bereichen nicht detektiert. Zum Schutz des Menschen wird bei einer Nicht-Überwachung von aktiven SRR eine Schutzraumverletzung signalisiert.

Fazit Es bedarf somit eine vollständige Modellierung der Umgebung, insbesondere auch von Objekten, die dynamisch in den Überwachungsbereich eingeführt werden. Weiterhin muss die Übereinstimmung des Umgebungsmodells mit der Realität permanent gewährleistet werden. Änderungen in der Umgebung (z. B. Objekte werden dem Überwachungsbereich hinzugefügt/entnommen) müssen in Echtzeit dem Umgebungsmodell bekannt gemacht bzw. die entsprechenden Modellrepräsentationen aktualisiert werden.

Die genannten Voraussetzungen stellen hier keinen Nachteil dar, da für die Generierung und Überwachung des dynamischen Schutzraumes in Abhängigkeit (i) der Roboterbewegung und (ii) den zu manipulierenden Objekten ohnehin eine interne Repräsentation der Umgebung mit steter Aktualität vorhanden sein muss.

6.3.4 Detektion einer Schutzraumverletzung

Der Test auf Vorliegen einer Schutzraumverletzung (*Verletzungstest*) bestimmt auf Basis der aktuell vorliegenden Zustandsbilder ${}^A Z$ und ${}^E Z$ die Verletzung bzw. Verletzungsfreiheit der zu überwachenden Schutzräume. Als Ergebnis liegt ein binäres Verletzungssignal $\phi \in \{0,1\}$ vor, welches *positiv* (1 - Schutzraumverletzung) oder *negativ* (0 - keine Schutzraumverletzung) ausfällt. Dabei ist es unerheblich, ob das ${}^A Z$ lediglich an einem spezifischen Bildbereich oder insgesamt nicht mit dem ${}^E Z$ übereinstimmt. Die Gründe einer Abweichung von ${}^A Z$ und ${}^E Z$ können prinzipiell auf folgende Situationen zurückgeführt werden:

1. Störung der Lichttransmission aufgrund unbekannter Änderungen in der Umgebung, die zu einer Unterbrechung oder Strahländerung von Emissionsstrahl oder Reflexionsstrahl führen (z. B. eingedrungene Objekte, Änderung der Projektionsoberflächen, Rauch/Aerosole in der Luft, etc.)
2. Beeinträchtigte Funktionsfähigkeit der Systemkomponenten aufgrund von Ausfall / Fehler / Defekt / Verschleiß / Lebensdauer / etc. von Lichtmodulator, Kamera, Rechen-technik, Schnittstellen usw.

Die Ursache einer Abweichung zwischen AZ und EZ kann mit dem Verletzungstest nicht exakt bestimmt werden. Es kann bspw. sowohl eine Objekteindringung vorliegen als auch eine Dekalibrierung einer Kamera. Dies ist für die Systemfunktionalität jedoch auch unerheblich. Maßgeblich ist, dass bei einer Übereinstimmung des EZ mit dem korrespondierenden AZ ein verletzungsfreier Schutzraum vorliegt und gleichzeitig die einwandfreie Funktionsfähigkeit der Systemkomponenten gewährleistet wird. Aufgrund dieser Tatsache überwacht sich das System selbst (*Eigensicherheit*).

Methoden

Der Verletzungstest bezüglich einer Schutzraumsequenz S resultiert in einem binären Verletzungssignal $\phi(S)$. Dieses ist genau dann negativ, wenn das Verletzungssignal hinsichtlich aller zugehörigen aktiven Schutzraumregionen $r(S)$ mit $r \in \mathcal{R} \wedge \delta(r) = 1$ negativ ausfällt:

$$\phi(S) = 0 \Leftrightarrow \forall r \in r(S): \phi(r) = 0 \quad (48)$$

Bei der Durchführung des Verletzungstests für jede aktive SRR r mit $r \in r(S)$ wird nun geprüft, ob der erwartete Code $\mathbb{C}(r)$ für zumindest eine Kamera C_k mit $(1 \leq k \leq n)$ an den korrespondierenden Bildpunkten $x(r)$ sowohl im ${}^EZ_k(x)$ als auch im ${}^AZ_k(x)$ übereinstimmt. Die Prüfung hinsichtlich des EZ_k stellt sicher, dass die Region aufgrund von Verdeckungen im EZ_k nicht ausgeblendet wurde:

$$\phi(r) = 0 \Leftrightarrow \forall x \in x(r) : {}^AZ_k(x) = {}^EZ_k(x) = \mathbb{C}(r) \quad (49)$$

Die praktische Umsetzung dieses Ansatzes hat den Nachteil, dass die Bildpunkte an den Übergangsbereichen von benachbarten, aneinander angrenzenden SRR häufig fehlerhafte Codes repräsentieren. Die Ursache dafür liegt in den Kalibrierungenauigkeiten der intrinsischen und extrinsischen Parameter von Lichtmodulator und Kamera(s) sowie weiteren Abbildungsfehlern (Aberrationen).

Zur Vermeidung falsch positiver Verletzungssignale wurde der Test auf Übereinstimmung von AZ und EZ auf definierte Bildpunkte $\hat{x}(r)$ innerhalb einer SRR r beschränkt, wonach die Bildpunkte an Rand- bzw. Grenzbereichen von r nicht berücksichtigt werden (siehe EZ in Abbildung 55). Eine detaillierte Beschreibung zu diesem Lösungsansatz in Bezug auf die Detektionsauflösung wird in Abschnitt 7.3.1 gegeben.

Neben der Definition spezifischer Bildpunkte, die für den Verletzungstest einer Region herangezogen werden, kann eine Übereinstimmung auch dann vorliegen, wenn bspw. ein definierter Prozentsatz an Bildpunkten von AZ und EZ bzgl. der Codes korrespondiert.

6.4 Evaluierung - Analyse des Systemverhaltens

Die optischen Sensorlösungen im Stand der Wissenschaft basieren darauf, dass Objekte aufgrund von ihren Intensitäts-, Farb- oder Distanzinformationen im Überwachungsbereich detektiert werden. Die Detektion der Annäherung von Objekten an den Roboter hängt somit direkt von den sensorischen Eigenschaften der Überwachungslösungen ab. Die Defizite dieser Technologien wurden in Abschnitt 3.3 beschrieben.

Das entwickelte aktive 2D-Sensorprinzip unterscheidet sich von den optischen Technologien im Stand der Wissenschaft in hohem Maße. Denn der Kern des Funktionsprinzips liegt nicht darin die Objekte direkt sensorisch zu erfassen, sondern indirekt durch die Erfassung der emittierten Lichtstrahlen des Lichtmodulators zur Darstellung des Schutzraumes. Die Eindringung eines Objektes in den Schutzraum führt zu einer Unterbrechung und damit Nicht-Erfassung der emittierten Lichtstrahlen an den erwarteten Bildbereichen, resultierend in der Detektion des eingedrungenen Objektes.

Für die Evaluierung einer zuverlässigen Erfassung von Objekten stellt sich somit die Frage, unter welchen Voraussetzungen in den Schutzraum eindringende Objekte eventuell nicht zu einer Unterbrechung der entsprechenden Lichtstrahlen und damit nicht zu einer Objektdetektion führen. Im Zusammenhang mit den in Abschnitt 6.1 definierten Teilzielen und den abgeleiteten Anforderungen in Abschnitt 6.2 werden dazu die folgenden Aspekte im weiteren Verlauf evaluiert:

- Analyse einer Schutzraumverletzung durch Objekteindringung
- Einfluss optischer Merkmale der Objekte
- Einfluss ambienter und hoch-dynamischer Fremdlichtänderungen

Die Untersuchung dieser Aspekte bezüglich der Beeinflussung des Detektionsverhaltens sowie die gewonnenen Erkenntnisse und Ergebnisse werden in den folgenden Abschnitten näher beschrieben. Im Einzelnen wurden hierfür theoretische Betrachtungen als auch praktische Versuche durchgeführt.

6.4.1 Analyse einer Schutzraumverletzung durch Objekteindringung

In Abbildung 56 wird der Strahlengang bei der Darstellung und Überwachung einer rechteckigen Schutzraumsequenz S durch die entsprechenden SRR $r(S)$ veranschaulicht. Nach Emission der entsprechenden Lichtstrahlen durch den Lichtmodulator werden diese von der Projektionsfläche \mathbb{E} reflektiert. Die Reflexionsstrahlen werden anschließend von der Kamera an einem (oder mehreren) Bildpunkten erfasst.

Die Eindringung eines Objektes in den Schutzraum \mathcal{V} kann aus Sicht des Strahlenganges prinzipbedingt in zwei Varianten unterschieden werden (Abbildung 56):

- Unterbrechung des Reflexionsstrahls (Kamerasichtstrahl)
- Unterbrechung des Emissionsstrahls (Projektionsstrahl)

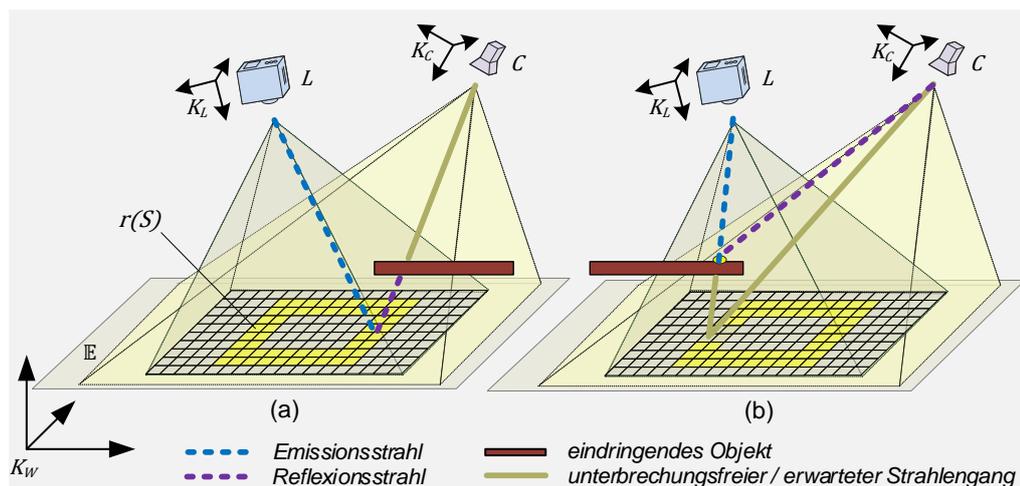


Abbildung 56: Schematische Darstellung der zwei Varianten bzgl. der Unterbrechung des Strahlenganges durch ein Objekt. Darstellung (a): Unterbrechung der Reflexionsstrahlen (Kamerasishtstrahlen). Darstellung (b): Unterbrechung der Emissionsstrahlen (Projektionsstrahlen).

Die folgenden Versuche wurden mit einem zylinderförmigen, opaken Testobjekt mit einem Durchmesser von 14 mm in einer Höhe von 150 mm über der Projektionsoberfläche durchgeführt.

Fall 1 - Unterbrechung des Reflexionsstrahls (siehe Darstellung (a), Abbildung 56) Alle SRR $r(S)$ zur Darstellung von S werden vollständig auf der Projektionsoberfläche \mathbb{E} durch die Emissionsstrahlen des Lichtmodulators L abgebildet. Aus Perspektive der Kamera werden jedoch einzelne SRR $r_b(S)$ mit $r_b(S) \subseteq r(S)$ vom eindringenden Objekt verdeckt und somit von der Kamera C nicht erfasst. Dies resultiert darin, dass im ${}^A Z$ die entsprechenden vom Objekt verdeckten Bereiche des Schutzraumes nicht extrahiert werden. Das ${}^A Z$ stimmt nicht mit dem ${}^E Z$ überein (siehe Abbildung 57).

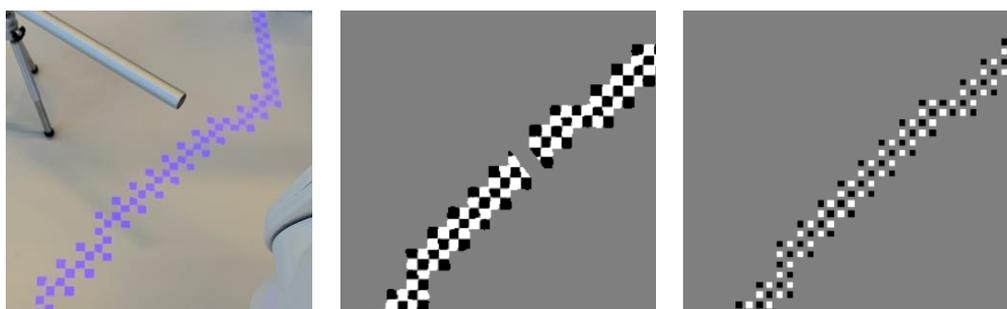


Abbildung 57: Links: Objekteindringung in den Schutzraum durch Unterbrechung der Reflexionsstrahlen (Kamerasishtstrahlen). Resultierendes ${}^A Z$ (Mitte) und entsprechendes ${}^E Z$ (rechts).

Fall 2 - Unterbrechung des Emissionsstrahls (siehe Darstellung (b), Abbildung 56) Die Unterbrechung der Emissionsstrahlen durch ein Objekt führt dazu, dass die SRR $r(S)$ nicht vollständig auf \mathbb{E} , sondern einzelne SRR $r_o(S)$ mit $r_o(S) \subseteq r(S)$ auf dem eindringenden Objekt abgebildet werden. Aufgrund des Basisabstandes zwischen L und C und deren unterschiedlichen Perspektiven werden die $r_o(S)$ abhängig von der Objektposition entweder an veränderten/abweichenden Bildpositionen im Kamerabild abgebildet oder gänzlich nicht von der Kamera C erfasst. Das ${}^A Z$ stimmt nicht mit dem ${}^E Z$ überein (siehe Abbildung 58).



Abbildung 58: Links: Objekteindringung in den Schutzraum durch Unterbrechung der Emissionsstrahlen (Projektionsstrahlen). Resultierendes AZ (Mitte) und entsprechendes EZ (rechts).

Geometrischer Sonderfall – Komplanarität Bezüglich des zweiten Falles kann eine besondere Situation unter den folgenden geometrischen Voraussetzungen auftreten:

1. Sowohl die Emissionsstrahlen der projizierten Linie als auch die korrespondierenden Reflexionsstrahlen und das eingedrungene Objekt liegen in einer Ebene e (Epipolarebene).
2. Das eingedrungene Objekt bildet mit der Projektionsoberfläche \mathbb{E} einen (kontinuierlichen) Übergang (Tiefensprung ist kleiner als Detektionsauflösung).

In Abbildung 59 sind verschiedene Situationen dargestellt, bei denen die genannten Voraussetzungen erfüllt werden.

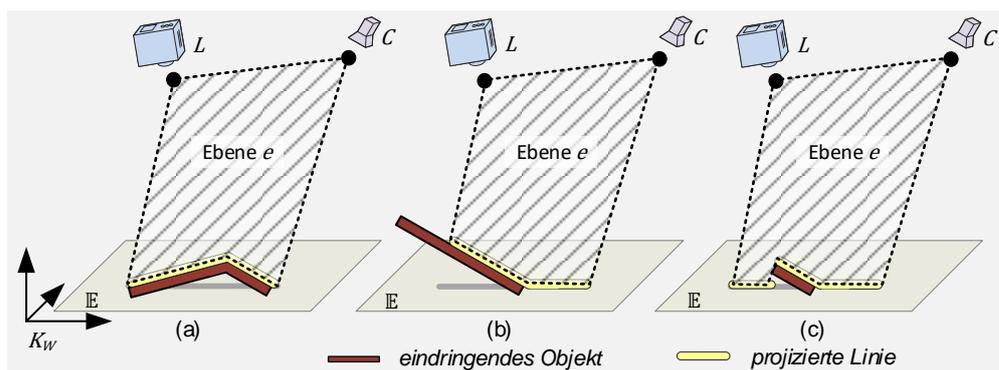


Abbildung 59: Komplanarität: Lichtmodulator, Kamera und Objekt liegen in einer Epipolarebene e .

Während bei den Varianten *Fall 1* und *Fall 2* eine Objekteindringung dazu führt, dass die Lichtstrahlen nicht an den erwarteten Bildpunkten im Kamerabild abgebildet und extrahiert werden, ist dies bei Vorliegen einer Komplanarität hingegen möglich. Die Lichtstrahlen können trotz Unterbrechung durch Objekteindringung an den Bildpositionen im Kamerabild extrahiert werden, an denen diese auch erwartet werden. Die alleinige Prüfung auf Anwesenheit von Lichtstrahlen kann unter den genannten Voraussetzungen zu einer Nicht-Detektion des eingedrungenen Objektes führen.

Mit Entwicklung und Umsetzung der RZC werden Objekteindringungen unter den genannten Voraussetzungen jedoch zuverlässig detektiert. Ursache dafür sind die Diskretisierung der Schutzraumsequenz S durch SRR $r(S)$ und die Einführung von Codes $\mathbb{C}(r)$. Die Abbildung von SRR $r_o(S)$ auf dem eingedrungenen Objekt führt aus Perspektive der Kamera zu einer Verschiebung der Bildpunkte $x(r_o)$, so dass die Codes von $^AZ_k(x)$ und $^EZ_k(x)$ nicht übereinstimmen (siehe Abbildung 60).

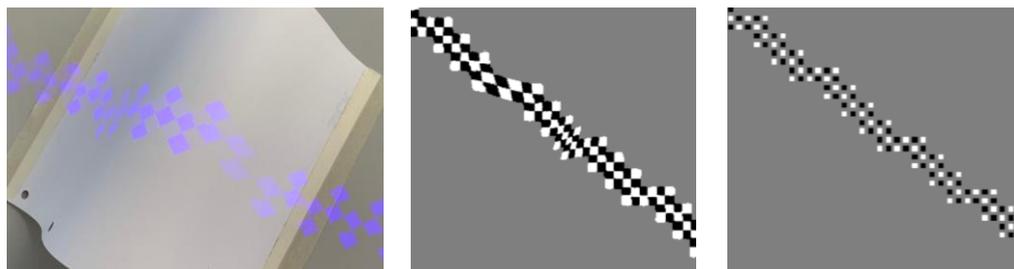


Abbildung 60: Eindringung eines Objektes (links) und resultierende Verschiebung von Bildpunkten x sowie deren extrahierter Code $C(x)$ im AZ (Mitte) gegenüber dem entsprechenden EZ (rechts).

Schlussfolgerung Unabhängig von der Art der Objekteindringung (*Fall 1* oder *Fall 2*) oder auch beim Vorliegen einer Komplanarität (*geometrischer Sonderfall*) werden die eindringenden Objekte aufgrund der RZC zuverlässig detektiert. Dies kann einerseits auf die Abwesenheit von Lichtstrahlen an den erwarteten Bildpunkten im Kamerabild zurückgeführt werden. Andererseits liegt eine Abweichung zwischen erwarteten Codes und den aktuell extrahierten Codes der Bildpunkte vor. Im Ergebnis stimmen AZ und EZ nicht überein, sodass ein positives Verletzungssignal generiert wird.

6.4.2 Einfluss optischer Merkmale der Objekte

Die Detektion eines in den Schutzraum eindringenden Objektes hängt davon ab, ob dieses den Strahlengang gemäß Abschnitt 6.4.1 unterbricht oder nicht. Inwieweit ein Objekt (physikalisch: Stoff) Lichtstrahlen tatsächlich unterbricht, hängt wiederum von seinen Eigenschaften bezüglich Transmission, Reflexion, Absorption und Diffusion ab (Gigahertz Optik GmbH 2022). Die Lichtdurchlässigkeit kann gemäß Abbildung 61 strukturiert werden:

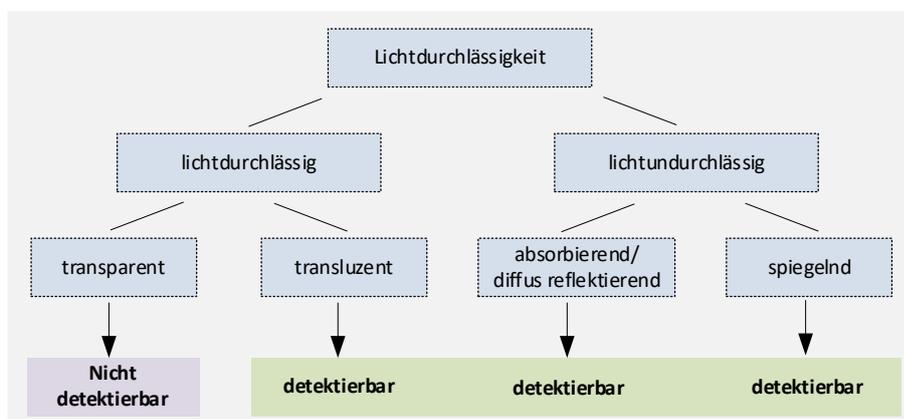


Abbildung 61: Lichtdurchlässigkeit von Objekten und der Einfluss auf die Detektierbarkeit des A2S.

Versuchsergebnisse

Die Ergebnisse bzgl. der Detektion von eindringenden Objekten mit unterschiedlichen Lichtdurchlässigkeitseigenschaften sind in Abbildung 61 veranschaulicht. Dazu wurden entsprechende Objekte in einen statischen Schutzraum eingeführt und die resultierenden Daten bestehend aus AZ , EZ und dem Verletzungssignal ϕ ausgewertet. Die erzielten Ergebnisse werden im Folgenden näher beschrieben.

Transparente Objekte (durchsichtig) weisen einen hohen Transmissionsgrad (direkte Transmission) auf (z. B. Klarglas mit einem Transmissionsgrad von 85% - 90%), sodass Lichtstrahlen derartige Objekte mit einem signifikant hohen Anteil durchdringen. Weder die Emissionsstrahlen noch die Reflexionsstrahlen zur Überwachung eines Schutzraumes werden von transparenten Objekten innerhalb des Strahlenganges unterbrochen (siehe Abbildung 62), so dass im Resultat die Schutzraumeindringung des transparenten Objektes vom A2S nicht detektiert wird.



Abbildung 62: In den Schutzraum eindringendes, transparentes Objekt (links) führt zu keiner Unterbrechung der Emissions- oder Reflexionsstrahlen im Kamerabild (Mitte). Das resultierende AZ (rechts) stimmt mit dem entsprechenden EZ überein.

Transluzente Objekte (durchscheinend) sind durch eine hohe Streuung des Lichtes (diffuse Transmission) gekennzeichnet (z. B. Milchglas). Dahinterliegende Objekte sind nur sehr undeutlich oder gar nicht erkennbar. Da für die Überwachung des Schutzraumes eine klar trennbare Unterscheidung zwischen den codierten aktiven SRR auf der Projektionsoberfläche unbedingt notwendig ist, werden eindringende transluzente Objekte vom A2S zuverlässig detektiert. In Abbildung 63 sind das Kamerabild und resultierende AZ bei der Unterbrechung der Reflexionsstrahlen durch ein transluzentes Objekt veranschaulicht. Das Objekt führt zu einer diffusen Streuung der Lichtstrahlen, so dass die verdeckten SRR unscharf im Kamerabild abgebildet werden. Die SRR und die entsprechenden Codes können somit nicht mehr extrahiert werden, was zu einer Abweichung zwischen AZ und EZ führt.

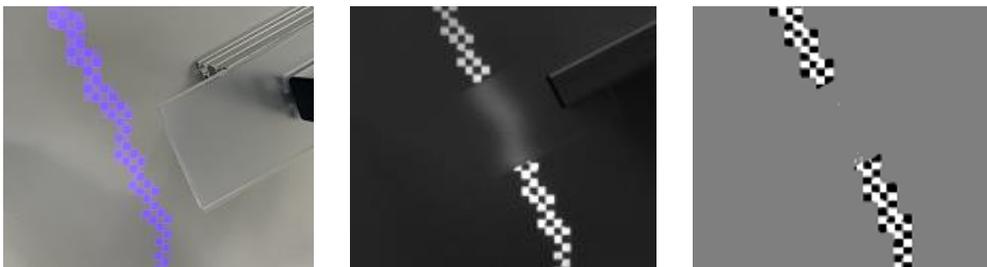


Abbildung 63: Die Unterbrechung der Reflexionsstrahlen durch ein transluzentes Objekt (links) führt zu einer diffus gestreuten und somit unscharfen Abbildung der codierten SRR im Kamerabild (Mitte). Somit ist keine eindeutige Extraktion der SRR und entsprechender Codes im AZ (rechts) möglich. Das AZ stimmt nicht mit dem EZ überein.

Absorbierende und diffus reflektierende Objekte (undurchsichtig) stellen den größten Anteil der möglichen eindringenden Objekte dar. Da auch der Mensch, Kleidung, Werkzeuge, etc. zu dieser Kategorie gehören, ist die uneingeschränkte Detektion dieser Objekte auch von besonderer Bedeutung. Die unterschiedlichen Ausprägungen von Absorption, Reflexion und Streuung (Farben und Texturen) haben dabei keinerlei Einfluss auf die Detektionsleistung des

A2S, da lediglich die Lichtundurchlässigkeit für die Unterbrechung der Lichtstrahlen maßgeblich ist. Dies wurde bereits in Abschnitt 6.4.1 detailliert beschrieben (siehe Abbildung 57 und Abbildung 58).

Spiegelnde Objekte stellen für optische Systeme oftmals eine Herausforderung dar, insbesondere dann, wenn Lichtquellen direkt in Kameras gerichtet werden (Überbelichtung, Sättigung). In Bezug auf das aktive 2D-Sensorprinzip zählen spiegelnde Objekte in erster Linie zu den lichtundurchlässigen Objekten. Somit werden die emittierten Lichtstrahlen des Lichtmodulators nicht oder an den falschen Bildpositionen im Kamerabild abgebildet (siehe Abbildung 64). Das resultierende AZ stimmt mit dem EZ nicht überein.



Abbildung 64: Spiegelnde Objekte unterscheiden sich bzgl. der Detektierbarkeit nicht von anderen opaken Objekten. Die Schutzraumeindringung (links) führt zu einer Unterbrechung der Emissions- oder Reflexionsstrahlen im Kamerabild (Mitte), was in einer Abweichung zwischen AZ (rechts) und zugehörigem EZ resultiert.

Schlussfolgerung

Für die zuverlässige Detektion eines eindringenden Objektes zählt allein die Nicht-Transparenz seiner Beschaffenheit (siehe Abbildung 61). Ausschließlich Objekte mit einem hohen Transmissionsgrad (ab 85%) werden vom A2S nicht detektiert, da die Emissionsstrahlen bzw. Reflexionsstrahlen nicht (signifikant) gestört werden.

Für die Gewährleistung der Sicherheit bei der MRK nimmt die zuverlässige Detektion von nicht-transparenten Objekten eine wesentliche und bedeutende Rolle ein. Hier bietet das Detektionsprinzip gegenüber anderen sensorischen Lösungen einen großen Vorteil aufgrund der Unabhängigkeit gegenüber den Merkmalen wie Reflexionsgrad, Absorptionsgrad und Diffusion. Dies gewährleistet eine sichere Detektion des Menschen.

Für den Umgang mit transparenten Objekten (keine Relevanz für die Personensicherheit) und deren Detektierbarkeit können applikationsspezifische Vorkehrungen getroffen werden, indem bspw. eine Schutzfolie oder temporäre Markierungen auf dem Objekt angebracht werden.

6.4.3 Einfluss von Fremdlichtänderungen

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse bezüglich des Einflusses von ambienten und hoch-dynamischen Fremdlichtänderungen auf die Detektionsleistung des A2S präsentiert. Eine Fremdlichtänderung kann sowohl durch eine Erhöhung der Helligkeit als auch durch eine Verringerung hervorgerufen werden.

Ambiente Fremdlichtänderungen liegen vor, wenn sich die umgebende Beleuchtungsstärke E_v innerhalb von Sekunden, Minuten oder auch Stunden kontinuierlich verändert. Demgegenüber treten bei hoch-dynamischen Fremdlichtänderungen signifikante Unterschiede der Beleuchtungsstärke innerhalb weniger Millisekunden auf (z. B. Blitzlicht).

Fragestellungen

- **Sicherheit:** Die Sicherheitsfunktion des A2S darf beim Auftreten einer Fremdlichtänderung nicht ausfallen (siehe Normenreihe IEC 61496-4). Ein Ausfall der Sicherheitsfunktion liegt dann vor, wenn die Eindringung eines Objektes in den Schutzraum aufgrund der Fremdlichtänderung nicht erkannt wird.

Gemessen wird der Anteil *falsch-negativer* Verletzungssignale $\phi_{fn}(S)$ in Prozent. *Falsch-negativ* heißt, es wird ein negatives Verletzungssignal ausgegeben, obwohl eine reale Schutzraumverletzung vorliegt.

- **Verfügbarkeit:** Darüber hinaus wird die Verfügbarkeit des A2S evaluiert, indem das Systemverhalten im unterbrechungsfreien Fall analysiert wird. Eine hohe Verfügbarkeit liegt vor, wenn das A2S auch beim Vorliegen von Fremdlichtänderungen ein negatives Verletzungssignal zuverlässig ausgibt.

Gemessen wird der Anteil *falsch-positiver* Verletzungssignale $\phi_{fp}(S)$ in Prozent. *Falsch-positiv* heißt, es wird ein positives Verletzungssignal ausgegeben, obwohl keine reale Schutzraumverletzung vorliegt.

Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau mit allen technischen Beschreibungen wird in Abschnitt 7.2 ausführlich vorgestellt. Da hier jedoch das systematische Verhalten des A2S evaluiert wird, spielen die technischen Voraussetzungen nur eine untergeordnete Rolle. Diese beeinflussen die Grenzen des Systems, jedoch nicht das grundsätzliche Verhalten.

Versuchsdurchführung

Sowohl für die ambienten als auch für die hoch-dynamischen Fremdlichtänderungen wurden jeweils die Verletzungssignale unter folgenden Bedingungen gemessen:

- Fremdlichtänderung ohne Objekteindringung (Abbildung 65, links).
- Fremdlichtänderung mit Objekteindringung (Abbildung 65, rechts). Hierzu wird ein zylinderförmiges Testobjekt mit 14 mm Durchmesser in den Schutzraum eingeführt, so dass dieses die SRR permanent unterbricht.

Das A2S wird dazu in Betrieb genommen und die kontinuierliche Überwachung eines statischen Schutzraumes aktiviert. Die Schutzraumüberwachung bleibt während der Fremdlichtänderungen permanent aktiv.



Abbildung 65: Überwachung eines statischen Schutzraumes ohne Objekteintrittung (links) und mit Eindringung (rechts) eines Objektes (14 mm Durchmesser). Die vorliegende Beleuchtungsstärke E_v wird mit dem Luxmeter eurolite® LM-200 unmittelbar neben dem Schutzraum gemessen.

- **Ambiente Fremdlichtänderungen** wurden derart umgesetzt, dass unter Verwendung einer Halogenlampe (Hedler Systemlicht GmbH 2022)(Abbildung 66, links) und einer Leuchtstoffröhre (OSRAM GmbH 2022)(Abbildung 66, Mitte) die Beleuchtungsstärke E_v am Versuchsstand manuell erhöht wurde. Die Erhöhung von E_v fand jeweils innerhalb von 2 Sekunden statt, wobei zwischen den Fremdlichtänderungen die Beleuchtung für 5 Sekunden konstant gehalten wurde. Folgende E_v (in lx) wurden damit umgesetzt:

≤ 100	500	1.000	5.000	10.000	20.000	50.000	75.000
------------	-----	-------	-------	--------	--------	--------	--------

Die Beleuchtungsstärke E_v wurde unmittelbar neben dem zu überwachenden Schutzraum mit einem Luxmeter (eurolite® LM-200) gemessen (siehe Abbildung 65).

- **Hoch-dynamische Fremdlichtänderungen** wurden mit einem LED-Stroboskop (Adam Hall GmbH 2022)(Abbildung 66, rechts) durchgeführt. Es wurden zu zufälligen Zeitpunkten Lichtblitze (blau-weiß) mit einer Dauer von < 100 ms generiert. Das LED-Stroboskop wurde während des Versuches in Entfernungen von 0.10 m bis 1.0 m zum Schutzraum positioniert.



Abbildung 66: Beleuchtungseinrichtungen zur Änderung der Beleuchtungsstärke in der Umgebung. Links: Halogenlampe (HEDLER® H25s), Mitte: Leuchtstoffröhre (OSRAM® Lumilux). Rechts: LED-Stroboskop (cameo® THUNDER).

Messungen

- **Ambiente Fremdlichtänderung**

Es wurden für jeden Fall (mit/ohne Objekteintrittung) 9.000 Verletzungssignale in 3 Minuten bestimmt. Während dieser Zeit wurden die definierten Beleuchtungsstärken E_v herbeigeführt. In Tabelle 25 werden die gemessenen Anteile der falsch-positiven $\phi_{fp}(S)$ bzw. falsch-negativen $\phi_{fn}(S)$ Verletzungssignale während der ambienten Fremdlichtänderungen präsentiert.

Tabelle 25: Anteil falsch-positiver $\phi_{fp}(S)$ und falsch-negativer $\phi_{fn}(S)$ Verletzungssignale bei ambienten Fremdlichtänderungen und vorliegender Objekteindringung bzw. keiner Objekteindringung.

Beleuchtungsstärke E_v	Keine Objekteindringung $\phi_{fp}(S)$	Objekteindringung $\phi_{fn}(S)$
$\leq 50.000 \text{ lx}$	0 %	0 %
$> 50.000 \text{ lx}$	43 %	0 %
$> 75.000 \text{ lx}$	100 %	0 %

- **Hoch-dynamische Fremdlichtänderung**

Es wurden für jeden Fall (mit/ohne Objekteindringung) 12.000 Verletzungssignale in 4 Minuten bestimmt. Während dieser Zeit wurden 246 Blitzlichter generiert, wobei das A2S zum Zeitpunkt der Blitzlichter auch ohne vorliegender Objekteindringung 183 Verletzungssignale ausgegeben hat. In Tabelle 26 werden die Anteile der falsch-positiven $\phi_{fp}(S)$ bzw. falsch-negativen $\phi_{fn}(S)$ Verletzungssignale während des Auftretens eines Blitzlichtes präsentiert.

Tabelle 26: Anteil falsch-positiver $\phi_{fp}(S)$ und falsch-negativer $\phi_{fn}(S)$ Verletzungssignale beim Auftreten eines Blitzlichtes und vorliegender Objekteindringung bzw. keiner Objekteindringung.

	Keine Objekteindringung $\phi_{fp}(S)$	Objekteindringung $\phi_{fn}(S)$
Verletzungssignale während Blitzlicht	74%	0 %

Auswertung

- **Ambiente Fremdlichtänderungen**

Zusammenfassend zeigen die Messungen einen zuverlässigen und störungsfreien Betrieb des A2S bei Beleuchtungsstärken von bis zu 50.000 lx. Dies beinhaltet auch einen direkten Sonnenlichteinfall mit gemessenen Beleuchtungsstärken von 20.000 lx bis 25.000 lx (siehe Abbildung 67).

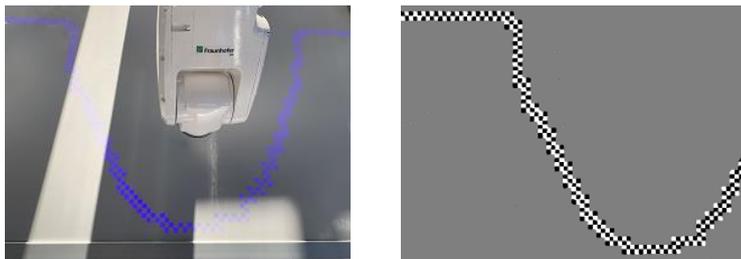


Abbildung 67: Überwachter Schutzraum (links) und das resultierende AZ (rechts) bei einfallendem Sonnenlicht (20.000 lx – 25.000 lx). Die codierten SRR werden zuverlässig extrahiert.

Ab einer Beleuchtungsstärke von 50.000 lx können Überbelichtungen im Kamerabild auftreten, die zu falschen extrahierten Codes an den betroffenen Bildpunkten x führen. Da die Überbelichtung in beiden Kamerabildern auftritt resultiert dies in dem Code $\mathbb{C}(x) = 00$. Mit ansteigender Beleuchtungsstärke nehmen die Störungen derart zu, sodass ab einer $E_v > 75.000 \text{ lx}$ ein permanentes positives Verletzungssignal ausgegeben wurde. In Abbildung 68 ist eine permanente Überbelichtung und daraus resultierende falsche Code-Extraktion im betroffenen Bereich (mittlerer unterer Bildrand in rechter Darstellung) bei einer Beleuchtungsstärke von etwa 75.000 lx veranschaulicht.

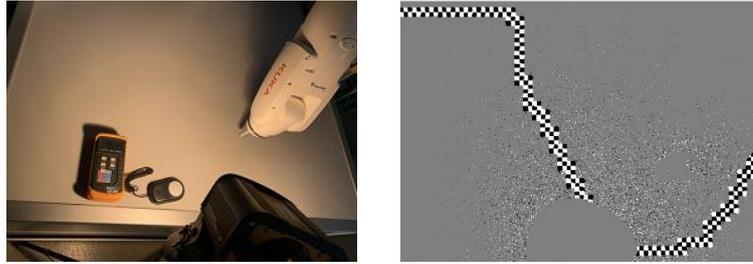


Abbildung 68: Überwachter Schutzraum (links) und das resultierende AZ (rechts) bei einer Beleuchtungsstärke über 75.000 lx. Die codierten SRR werden nicht mehr vollständig extrahiert.

Im Fall einer Objekteindringung wird unabhängig von der ambienten Fremdlichtänderung ein zuverlässiges positives Verletzungssignal ausgegeben (keine falsch-negativen Verletzungssignale). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Unterbrechung der codierten SRR aufgrund einer Objekteindringung nicht durch die Fremdlichtänderung „kompensiert“ werden kann (siehe Abschnitt *Schlussfolgerung*). Die ambienten Fremdlichtänderungen können lediglich zu weiteren Störungen bei der Code-Extraktion von SRR führen, was am resultierenden positiven Verletzungssignal nichts ändert.

- **Hoch-dynamische Fremdlichtänderungen**

Im Fall eines verletzungsfreien Schutzraumes (keine Objekteindringung) führt das Auftreten einer hoch-dynamischen Fremdlichtänderung mit einer hohen Wahrscheinlichkeit zur Ausgabe eines positiven Verletzungssignals. Eine Beeinflussung findet lediglich dann nicht statt, wenn die Blitzlicht-Störung außerhalb der Belichtungszeiten zur Aufnahme der Kamerabilder I_t und I_{t+1} eintritt. Andernfalls führt die Störung zu einer signifikanten Änderung der Intensitätswerte eines Kamerabildes und somit zur Extraktion falscher Codes der betroffenen Schutzraumregionen im AZ (siehe Abbildung 69).

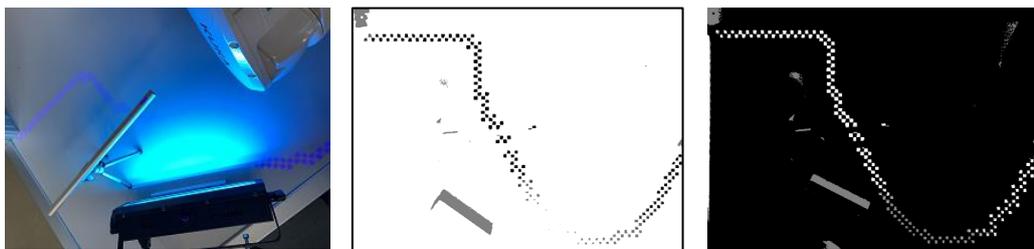


Abbildung 69: Überwachter Schutzraum (links) und das resultierende AZ (Mitte, rechts) bei einer hoch-dynamischen Fremdlichtänderung durch Blitzlicht. In Abhängigkeit des Zeitpunktes der Störung werden die Codes der betroffenen SRR falsch extrahiert.

Dies hat folgende Ursache: Im Gegensatz zur ambienten Fremdlichtänderung wirkt sich der Einfluss eines Blitzlichtes ausschließlich auf ein Kamerabild I_z der beiden zur Auswertung erforderlichen aufeinanderfolgenden Kamerabilder I_t und I_{t+1} aus. Für die vom Blitzlicht betroffenen Bildpunkte x_z kann dies die Extraktion der Codes $\mathbb{C}(x_z)$ zur Bestimmung des AZ_t (siehe Gleichung (45)) beeinflussen. Die Bildpunkte x_z im betroffenen Kamerabild I_z besitzen aufgrund des Blitzlichtes signifikant größere (hellere) Intensitätswerte als ohne Blitzlicht-Störung (Normalfall). Dies führt wiederum zu einem veränderten Differenzwert $\Delta I_t(x_z)$ (siehe Gleichung (43)).

In Abhängigkeit des Zeitpunktes t oder $t + 1$ der Störung hat $\Delta I_t(x_z)$ auf die Extraktion des Codes $\mathbb{C}(x_z)$ folgende Auswirkungen (vgl. Gleichung (45)):

- Störung während Kamerabildaufnahme zum Zeitpunkt t (Tabelle 27)

Tabelle 27: Einfluss einer Blitzlicht-Störung zum Zeitpunkt t auf die Code-Extraktion.

Erwarteter Code \mathbb{C}	Störung durch Blitzlicht während Zeitpunkt t			
	01	10	10	00
Erfüllung der Bedingungen	$ \Delta I_t(x_z) \leq \tau$	$ \Delta I_t(x_z) > \tau$ $\Delta I_t(x_z) < 0$	$ \Delta I_t(x_z) > \tau$ $\Delta I_t(x_z) < 0$	$ \Delta I_t(x_z) > \tau$ $\Delta I_t(x_z) < 0$
Resultierender Code \mathbb{C}	00	10	10	10

- Störung während Kamerabildaufnahme zum Zeitpunkt $t + 1$ (Tabelle 28)

Tabelle 28: Einfluss einer Blitzlicht-Störung zum Zeitpunkt $t + 1$ auf die Code-Extraktion.

Erwarteter Code \mathbb{C}	Störung durch Blitzlicht während Zeitpunkt $t + 1$			
	01	10	10	00
Erfüllung der Bedingungen	$ \Delta I_t(x_z) > \tau$ $\Delta I_t(x_z) > 0$	$ \Delta I_t(x_z) \leq \tau$	$ \Delta I_t(x_z) > \tau$ $\Delta I_t(x_z) > 0$	$ \Delta I_t(x_z) > \tau$ $\Delta I_t(x_z) > 0$
Resultierender Code \mathbb{C}	01	00	01	01

Zusammenfassend ergibt sich somit folgende Beeinflussung der Codes aufgrund einer hoch-dynamischen Störung durch Blitzlicht (Tabelle 29):

Tabelle 29: Zusammenfassung der Blitzlicht-Störungen auf die Code-Extraktion.

Erwarteter Code	Resultierender Code		
	01	Blitzlicht während t	
		Blitzlicht während $t + 1$	
		00 / 10	01
	10	10	00 / 01
	00	10	01

Da beim Auftreten einer Blitzlicht-Störung mehrere codierte SRR betroffen sind, führt dies entsprechend Tabelle 29 unabhängig vom Zeitpunkt in jedem Fall zu einer Code-Änderung einer SRR und somit zu einem positiven Verletzungssignal.

Im Fall einer Objekteindringung wird trotz Blitzlicht-Störung ein zuverlässiges positives Verletzungssignal ausgegeben (keine falsch-negativen Verletzungssignale). Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Unterbrechung der codierten SRR aufgrund einer Objekteindringung nicht durch die Fremdlichtänderung „kompensiert“ werden kann (siehe *Schlussfolgerung*). Die Fremdlichtänderungen können lediglich zu weiteren Störungen bei der Code-Extraktion von SRR führen, was am resultierenden positiven Verletzungssignal nichts ändert.

Schlussfolgerung

Das A2S weist bei ambienten und hoch-dynamischen Fremdlichtänderungen eine zuverlässige Sicherheit auf, so dass unabhängig von den Fremdlichteinflüssen eindringende Objekte sicher detektiert werden. Dies ist auf die Entwicklung der RZC und damit einhergehenden Implementierung von codierten SRR zurückzuführen. Die Ausgabe eines negativen Verletzungssignales wäre trotz Objekteindringung lediglich dann möglich, wenn die vom Objekt

unterbrochenen SRR durch die Fremdlichtänderung „kompensiert“ werden würden. Da ein Objekt bei einer Schutzraumeindringung mindestens zwei SRR mit unterschiedlichen Codes unterbricht, ist eine „Rekonstruktion“ der SRR durch eine Fremdlichtänderung prinzipiell nicht möglich. (Details dazu werden in (Vogel et al. 2021) präsentiert). Dadurch ist die Sicherheitsfunktion und die entsprechende zuverlässige Detektion von eindringenden Objekten jederzeit gewährleistet. Dieses Systemverhalten gilt auch bei hoch-dynamischen Fremdlichtänderungen aufgrund von Schattenbildung (siehe (Vogel et al. 2021)).

Das A2S ist somit gegenüber einem Ausfall der Sicherheit aufgrund hoch-dynamischer Fremdlichteinflüsse geschützt, allerdings wird die Verfügbarkeit beeinträchtigt. Für eine hohe Verfügbarkeit des A2S sollten demnach hoch-dynamische Fremdlichtänderungen im direkten Umfeld des A2S vermieden werden.

6.5 Zwischenfazit

Auf Basis des konzipierten Funktionsprinzips in Kapitel 5 fanden in diesem Kapitel die Erforschung und Entwicklung von Methoden zur Darstellung und zuverlässigen Überwachung von Schutzräumen statt. Mit den Teilzielen *Fremdlichtunabhängig* und *Robuste Objekterfassung* lag der Fokus auf der Anforderung *Verfügbarkeit*. Das Gesamtziel bestand darin, in den Schutzraum eindringende Objekte unabhängig von deren Beschaffenheit (Oberflächen-, Materialeigenschaften) sowie unter allen zu erwartenden Umgebungsbedingungen (Rahmenbedingungen) zuverlässig zu detektieren. Ambiente sowie hoch-dynamische Fremdlichtänderungen und deren Einfluss auf die Detektionsleistung waren dabei von besonderer Bedeutung.

Zu Erreichung der Teilziele wurde ein Verfahren zur raumzeitlichen Codierung (RZC) der emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung und Überwachung eines Schutzraumes entwickelt. Diese RZC beinhaltet eine Diskretisierung des Schutzraumes in quadratische Schutzraumregionen mit spezifischen Codes. In Kombination mit der umgesetzten Bildfolgeauswertung können die Schutzraumregionen und deren Codes auf Basis zweier aufeinanderfolgender Kamerabilder wiederum robust extrahiert werden (*aktuelles Zustandsbild*). Die Detektion einer Schutzraumverletzung (Objekteindringung) erfolgt schließlich unter Einbeziehung von modellbasierten Referenzinformationen (Ground Truth Daten), die in Form eines virtuellen Kamerabildes (*erwartetes Zustandsbild*) die zu erwartenden Schutzraumregionen und deren Codes repräsentieren. Die Eindringung eines Objektes in den Schutzraum resultiert schließlich in einer Codeabweichung zwischen extrahierten und erwarteten Schutzraumregionen (*aktuelles Zustandsbild* stimmt nicht mit dem erwarteten Zustandsbild überein) und damit einhergehend der Ausgabe eines positiven Verletzungssignals.

Der wesentliche Vorteil dieses Verfahren gegenüber anderen optischen Arbeitsraumüberwachungslösungen im Stand von Wissenschaft und Technik liegt darin, dass nicht das Objekt als solches, sondern die Unterbrechung bzw. Änderung der emittierten und reflektierten Lichtstrahlen des Lichtmodulators detektiert werden. Es wurde gezeigt, dass jedwede nicht-

transparenten Objekte somit unabhängig von deren Oberflächenbeschaffenheit (Absorptionsgrad, Reflexionsgrad) zuverlässig detektiert werden.

In Bezug auf dynamische Fremdlichteinflüsse konnten durch Umsetzung dieser Verfahren ebenfalls positive Ergebnisse erzielt werden. Das A2S detektiert bei ambienten Fremdlichtänderungen (selbst bei direktem Sonnenlichteinfall) eindringende Objekte weiterhin zuverlässig. Auch hoch-dynamische Lichtänderungen führen nicht zu einem gefahrbringenden Zustand bzw. Ausfall des Systems. Zusammenfassend kann damit festgestellt werden, dass gemäß der Zielstellung in Abschnitt 6.1.1 die entwickelten Verfahren eine zuverlässige Überwachung von Schutzräumen erlauben, wobei eindringende Objekte unabhängig von deren Eigenschaften (Farbe, Textur, etc.) und unter allen zu erwartenden Umgebungsbedingungen (Rahmenbedingungen) detektiert werden. Damit erfüllt das A2S wesentliche Voraussetzungen für einen zukünftigen Einsatz als Schutzeinrichtung für die Personensicherheit im industriellen Bereich.

7 Implementierung und Integration

In den Kapiteln 6 und 7 wurden grundlegende Konzepte und Methoden des A2S entwickelt und präsentiert. Diese werden nun an einem realen MRK-Versuchsstand implementiert und in diesen integriert. In diesem Kapitel werden zunächst die software- und hardwaretechnischen Umsetzungen zur Realisierung einer MRK-Applikation unter Verwendung des neuartigen A2S beschrieben. Auf Basis des umgesetzten MRK-Versuchsstandes werden die Kenngrößen *Reaktionszeit* und *Detektionsauflösung* ermittelt, um eine quantitative Einschätzung zur Erreichung der Anforderung *Minimale Mindestabstände* (siehe Abschnitt 2.4 und Abschnitt 4.2.1) durchführen zu können. Dies erlaubt fundierte Aussagen hinsichtlich der Erfüllung aller definierten Anforderungen durch das A2S, um abschließend das A2S in den aktuellen Stand der Wissenschaft einzuordnen (Kapitel 8).

7.1 Implementierung der Softwaremodule

In diesem Abschnitt werden die implementierten Software-Module zur Umsetzung der in Kapitel 5 und Kapitel 6 entwickelten Konzepte und Verfahren beschrieben. Die Software-Module und deren wesentlichen Datenflüsse und Verarbeitungsprozesse werden in Abbildung 70 dargestellt.

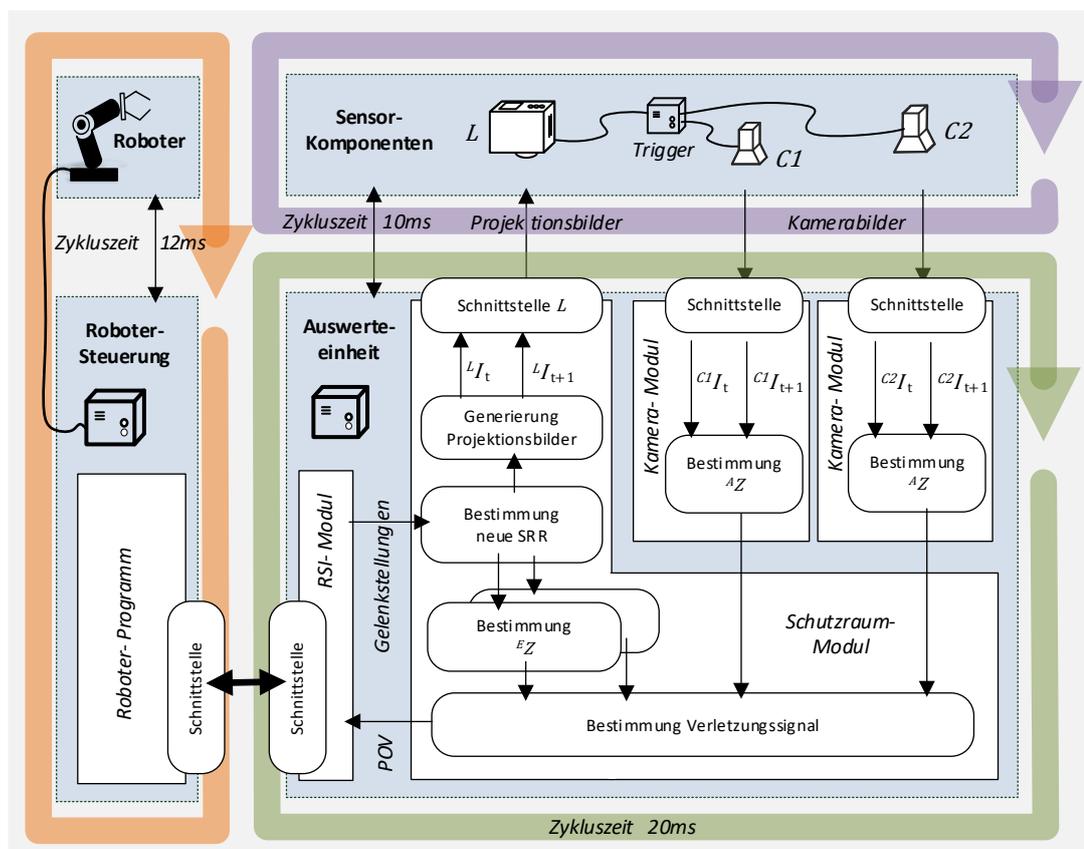


Abbildung 70: Überblick zu Datenübertragung und -verarbeitung sowie zu den Zykluszeiten des Robotersystems, der Sensorkomponenten und der Auswerteeinheit.

Verarbeitungszyklen Das Gesamtsystem ist entsprechend Abbildung 70 in drei Zyklen (Zykluspeile in orange, violett und grün) mit jeweils unterschiedlichen Zykluszeiten strukturiert. Die Zykluszeit des Robotersystems ist durch die festgelegte interne Kommunikationsrate zwischen Roboter-Steuerung und Roboter mit einer Zykluszeit von 12 ms spezifiziert. Die Abfrage bzw. die Übermittlung von Daten an das Robotersystem findet mit entsprechender Frequenz statt. Einen weiteren Zyklus stellen die Sensor-Komponenten dar, die jeweils mit einer Zykluszeit von 10 ms Bilder projizieren bzw. Bilder aufnehmen. Die Zeitpunkte zur Darstellung bzw. Aufnahme der Bilder durch Lichtmodulator bzw. Kameras werden von der Triggerelektronik zeitsynchron getaktet. Die internen Verarbeitungsprozesse zur Generierung und Überwachung von Schutzräumen findet dann mit einer Zykluszeit von 20 ms statt (halbe Zykluszeit der Sensor-Komponenten), da hier die Basis in jedem Zyklus das aktuelle Zustandsbild AZ (bestehend aus zwei Kamerabildern) bildet.

Im Folgenden werden die in Abbildung 70 präsentierten und implementierten Software-Module näher beschrieben. Die zeitliche Abfolge der einzelnen Verarbeitungsschritte wird im Sequenzdiagramm der Abbildung 71 dargestellt.

Kamera-Modul

Für jede Kamera ist ein separates Kamera-Modul zuständig. Dieses hat zwei wesentliche Aufgaben: Zum einen wird hierin die Ansteuerung, Konfiguration und Datenakquise ausgeführt. Die Kameras werden derart konfiguriert, so dass diese per Trigger-Signal (steigende Flanke, 100 Hz) mit einer Belichtungszeit von 1 ms Bilder aufnehmen. Zum anderen werden die Kamerabilder direkt weiterverarbeitet, indem diese entzerrt, rektifiziert und anschließend zur Bestimmung des aktuellen Zustandsbildes AZ herangezogen werden. Das resultierende AZ wird dann an das Schutzraum-Modul übermittelt.

Schutzraum-Modul

Das Schutzraum-Modul beinhaltet die gesamte Generierung und Auswertung von Schutzräumen mit einer Vielzahl an Verarbeitungsprozessen (siehe Abschnitte 5.4 und 6.3):

- Bestimmung der SRS S auf Basis der aktuellen Gelenkstellungen \hat{A}_t
- Bestimmung der aktiven SRR $\mathcal{R}(S)$
- Schutzraum-Dynamisierung
- Generierung der Projektionsbilder LI
- Bestimmung des erwarteten Zustandsbildes EZ für jede Kamera
- Bestimmung des Verletzungssignals ϕ
- Aktualisierung des *Programm Override* (POV) in Abhängigkeit des Verletzungssignals ϕ und Übermittlung an RSI-Modul

RSI-Modul

Die Kommunikation zum Roboter wird über das RSI-Modul mit Hilfe des *Robot Sensor Interface* (RSI) (KUKA AG 2021) hergestellt. Mit einer Zykluszeit von 12 ms werden einerseits die aktuellen Gelenkstellungen des Roboters an die Auswerteeinheit übermittelt und andererseits der geforderte POV von der Auswerteeinheit an den Roboter übertragen.

Roboter-Programm

Die Bewegungen des Roboters werden vom Roboter-Programm vorgegeben. Dieses enthält eine Abfolge definierter TCP-Positionen, welche vom Roboter per PTP- bzw. LIN- Bewegungen nacheinander angefahren werden. Alternativ sind an dieser Stelle auch sensorgeführte Bewegungen möglich.

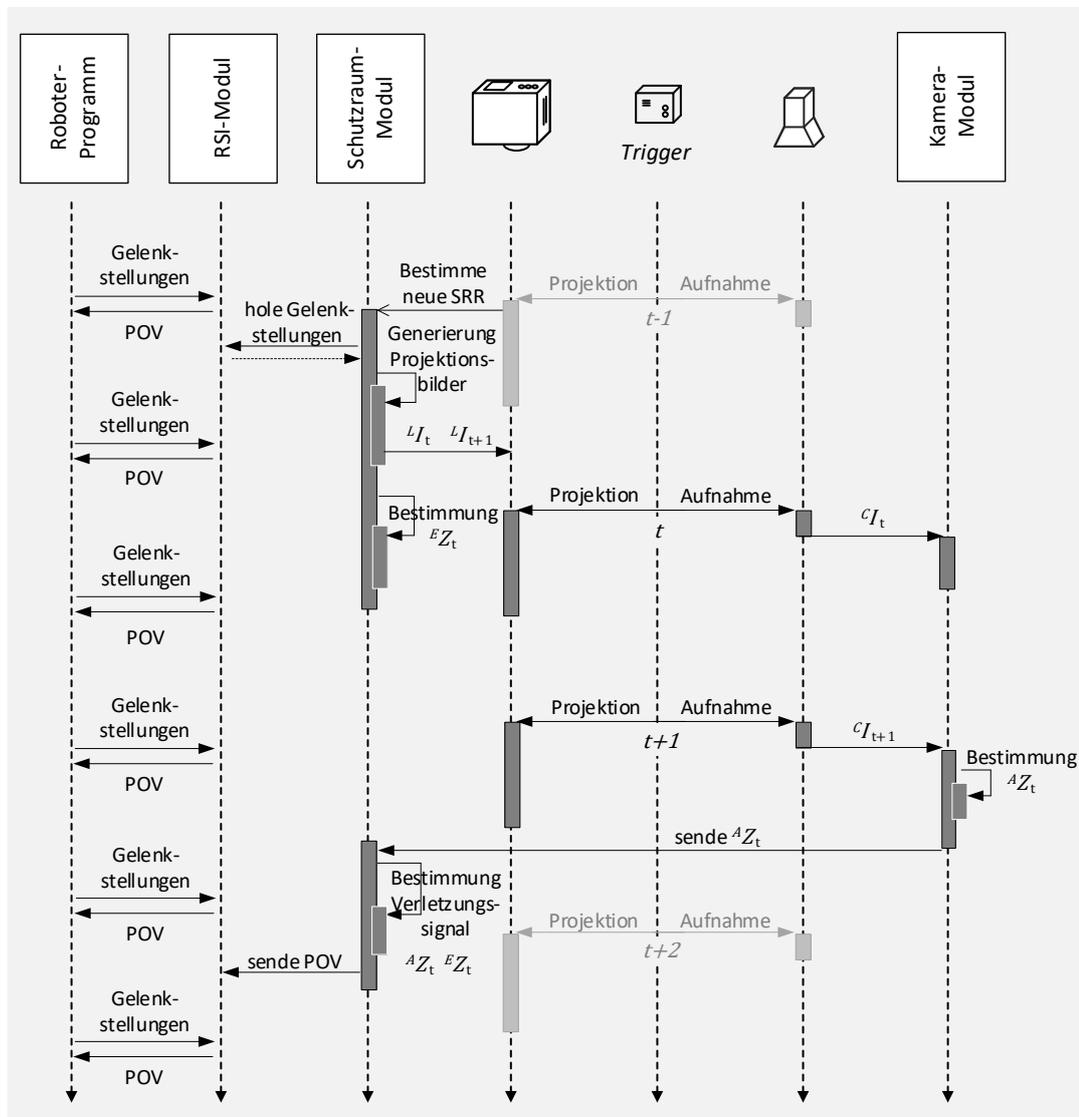


Abbildung 71: Sequenzdiagramm zur Veranschaulichung der zeitlichen Abfolge von Verarbeitungsprozessen innerhalb und zwischen den einzelnen Software-Modulen (vgl. Abbildung 70).

7.2 Aufbau und Integration eines MRK-Versuchsstandes

In Abbildung 72 wird der umgesetzte MRK-Versuchsstand veranschaulicht. Dieser besteht aus einem Roboter-Arbeitsraum und einem MRK-Interaktionsbereich. Der Roboter-Arbeitsraum wird von drei Seiten (links, rechts, hinten) durch Schutzwände von der Umgebung abgetrennt. Im vorderen Bereich befindet sich der MRK-Interaktionsbereich, welcher von Mensch und Roboter gleichzeitig genutzt werden kann und währenddessen vom A2S überwacht wird.

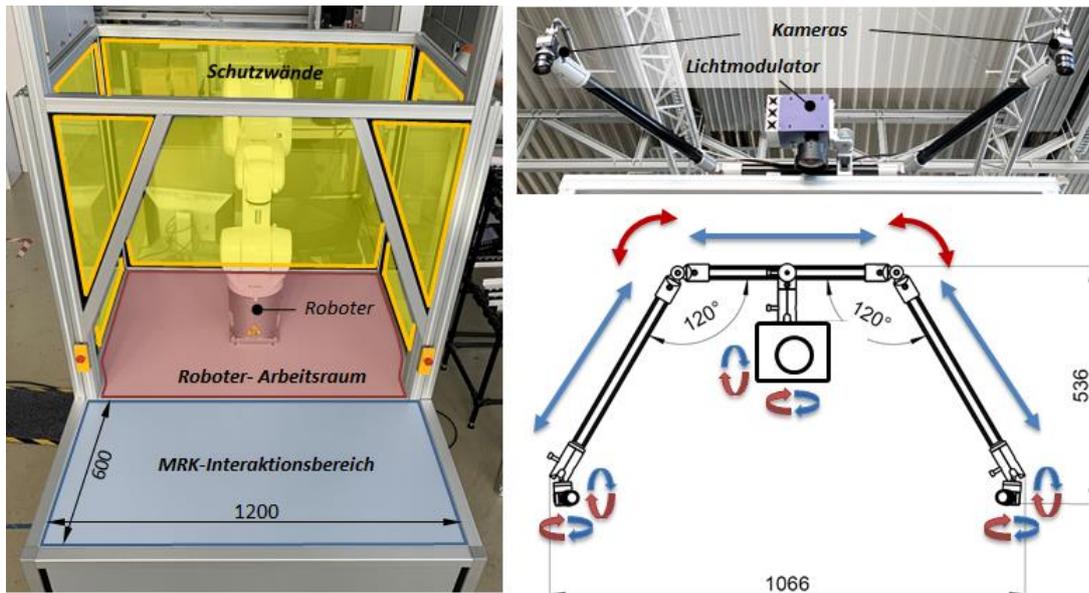


Abbildung 72: Links: MRK-Versuchsstand bestehend aus Roboter-Arbeitsraum mit Industrieroboter KUKA KR10, Schutzwänden an drei Seiten und einem von Mensch und Roboter gemeinsam nutzbaren MRK-Interaktionsbereich. Rechts: A2S-Sensorsystem, welches aus zwei Kameras und einem Lichtmodulator besteht und direkt über dem MRK-Interaktionsbereich angebracht wurde.

Über dem MRK-Interaktionsbereich befindet sich zur Gewährleistung der Personensicherheit das A2S-Sensorsystem bestehend aus zwei Kameras und einem Lichtmodulator (siehe Abbildung 72, rechte Darstellungen). Zwei Kameras sind hierbei notwendig, um den Schutzraum bei einem Roboteranwesenheit im MRK-Interaktionsbereich (1200 mm × 600 mm) vollständig und verdeckungsfrei überwachen zu können. Der Abstand zwischen den Sensorkomponenten und der Projektionsoberfläche des MRK-Interaktionsbereiches beträgt 1.60 m.

7.2.1 Hardware-Komponenten

Roboter

Als industrieller Roboter kommt im Versuchsstand ein KUKA Agilus (Modell KR 10 R1100 CR) (KUKA AG 2016b) in Kombination mit der Steuerung KUKA KR C4 compact (KUKA AG 2016a) zum Einsatz (siehe Abbildung 72, links). Der Roboter hat eine Reichweite von 1101 mm und eine Traglast von 10 kg. Die Kommunikation zwischen Robotersystem und Auswerteeinheit erfolgt per RSI. Diese erlaubt die Übertragung der aktuellen Gelenkstellungen des Roboters und die kommandierte Robotergeschwindigkeit mit einer Frequenz von 83.3 Hz.

Kameratechnik

An die Kameratechnik werden ganz besondere Voraussetzungen gestellt. Einerseits soll der Bildaufnehmer eine hohe räumliche Auflösung (Anzahl Bildpunkte) aufweisen, um auch kleinste Objekte und deren Eindringen in den Schutzraum robust detektieren zu können. Andererseits soll eine möglichst hohe Framerate erzielt werden, damit die Reaktionszeit des A2S und damit die einzuhaltenden Mindestabstände minimiert werden können. Hinzu kommt ein möglichst hoher Dynamikumfang sowie eine hohe Quanteneffizienz (QE), damit die Lichtstrahlen des Lichtmodulators zuverlässig von den umgebenden Fremdlichteinflüssen extrahiert werden können.

Unter diesen Randbedingungen wurde als Kameratechnik die *Blackfly S Mono 0.4 MP USB3 Vision* (Teledyne FLIR LLC) mit dem CMOS-Sensor *Sony IMX287* verwendet. Die Kameras wurden mit einem *Schneider Kreuznach Cinegon 1.4/8-0902* Objektiv und dem Bandpassfilter *MIDOPT BI 450* ausgestattet. Die im Vergleich zu anderen Sensoren große Pixelgröße von $6.9 \mu\text{m}$ resultiert in einer sehr guten QE.

Zusammenfassend besitzt die Kameratechnik somit folgende Eigenschaften (Tabelle 30):

Tabelle 30: Wesentliche Eigenschaften der verwendeten Kameratechnik.

Auflösung	720 × 540 pixel
Bildrate	100 Hz
Belichtungszeit	1 ms
Chroma	Monochrom
Sensorformat	1/2,9 Zoll
Anzeigemethode	Global Shutter
Pixelgröße	6,9 μm
Analog-Digital-Wandler	12 – bit
Quanteneffizienz bei 460 nm	62 %
Brennweite	8 mm
Blende	1.4
Bandpassfilter Range	445 – 465 nm
Bandpassfilter Transmission bei 460 nm	88.59 %

Lichtmodulator

Ähnlich zur Kameratechnik beeinflussen auch die Eigenschaften des Lichtmodulators direkt die Leistungsfähigkeit des A2S-Gesamtsystems. Gegenüber herkömmlicher Projektionstechnik unterscheidet sich der Lichtmodulator durch hohe Frameraten einhergehend mit einer präzisen Triggerfunktionalität zur zeitlichen Synchronisation der Bilddarstellung mit der Bildaufnahme durch die Kameratechnik. Der Lichtmodulator *STAR-07* (ViALUX GmbH 2022a) der Fa. *ViALUX Messtechnik + Bildverarbeitung GmbH* bringt diese Eigenschaften mit. Als Lichtquelle kommt hierin eine blaue LED *Luminus PT120TE* (Luminus, Inc. 2022) in Kombination mit einer *Wide Angle Lens* zum Einsatz. Die blaue LED eignet sich aufgrund der deutlich höheren Strahlungsleistung gegenüber einer roten LED (1.450 mW) oder grünen LED (1.550 mW) und wurde aus diesem Grund als Lichtquelle für den Lichtmodulator ausgewählt (ViALUX GmbH 2022b).

Damit ergeben sich für den Lichtmodulator folgende Eigenschaften (Tabelle 31):

Tabelle 31: Wesentliche Eigenschaften des verwendeten Lichtmodulators.

DMD Auflösung	1024 × 768 pixel
Bildrate	100 Hz
Throw Ratio	0.9
Wellenlänge (blau)	460 nm
Lichtstrom (STAR-07 output)	140 lm
Strahlungsleistung (STAR-07 output)	2.550 mW

Elektronik

Als zusätzliche Komponente wurde eine Triggerelektronik entwickelt, die zu definierten Zeitpunkten mit einer Frequenz von 100 Hz ein Triggersignal (steigende Flanke) zeitsynchron zur Bilddarstellung bzw. Bildaufnahme an die Kameras und den Lichtmodulator übermittelt.

Auswerteeinheit

Die Auswerteeinheit besteht aus einem Intel® Xeon® CPU E5-2460 v3 mit 2.60 GHz Prozessor sowie 64.0 GB Arbeitsspeicher und einem Windows 7 Professional Betriebssystem.

7.2.2 Einmessen aller Komponenten

Kamera

Die Bestimmung der intrinsischen und extrinsischen Parameter einer Kamera erfolgt durch Kalibrierprozeduren, wie sie beispielsweise von Zhang (Zhang 2000) vorgestellt wurde. Grundlage hierbei bildet ein ebenes Kalibriermuster, dessen Textur durch ein exakt vermessenes und bekanntes Schachbrettmuster (oder Punktmuster, etc.) charakterisiert ist. Auf Basis mehrerer Kamerabildaufnahmen, wobei das Kalibriermuster aus verschiedenen Perspektiven auf der Bildebene abgebildet wurde, können dann die intrinsischen und extrinsischen Parameter unter Anwendung von Optimierungsverfahren ermittelt werden. Eine detaillierte Beschreibung zum Verfahren von Zhang wurde von (Burger 2016) gegeben. Alternativ können auch andere Kalibriermethoden verwendet werden (Tsai 1987; Heikkila und Silven 1997; Weng et al. 1992; Faugeras et al. 1992).

Lichtmodulator

Für die Kalibrierung des Lichtmodulators können die Verfahren zur Bestimmung der Kameraparameter in ähnlicher Weise angewandt werden. Wesentlicher Unterschied besteht darin, dass das Kalibriermuster nun projiziert wird und von einer zusätzlichen Kamera zur Bestimmung der 3D-Objektpunkte des Musters erfasst werden muss. Hierzu gibt es wiederum verschiedene Ansätze. Einige Verfahren benötigen eine bereits intrinsisch und extrinsisch kalibrierte Kamera, die zur Erfassung des auf eine bekannte Ebene projizierten Musters verwendet wird (Kimura et al. 2007; Yamauchi et al. 2008; Ashdown und Sato 2005; Chang und Wu 2014). Andere Verfahren sind hingegen nicht auf eine vorherige Kalibrierung der Kamera angewiesen (Draréni et al. 2009, 2012; Audet und Okutomi 2009).

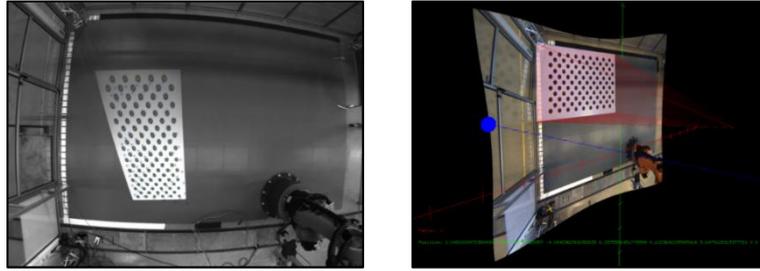


Abbildung 73: Kalibrierprozedur zur Bestimmung der intrinsischen Parameter des Lichtmodulators durch freie Positionierung mit Hilfe eines Industrieroboters. Links: Erfassung des projizierten Punktmusters aus Kamerasicht. Rechts: Virtuelle Ansicht zur Überprüfung der bestimmten intrinsischen Parameter.

Für die Kalibrierung des Lichtmodulators wurde das Verfahren von (Falcao et al. 2008) angewandt. Hierzu wurde ein Kalibrierstand unter Verwendung eines Industrieroboters *KUKA KR 60 L45*, einer Projektionsfläche (Bodenebene) und einer intrinsisch und extrinsisch zur Projektionsfläche kalibrierten Kamera eingerichtet. Der Lichtmodulator wurde am TCP des Roboters befestigt und an 25 verschiedene Positionen bewegt, um aus diesen Perspektiven das Kalibriermuster (Punktmuster) auf die Bodenebene zu projizieren (siehe Abbildung 73). Die Muster wurden jeweils von der Kamera erfasst und schließlich mit dem Kamerakalibrierverfahren nach Zhang die intrinsischen und extrinsischen Parameter des Lichtmodulators bestimmt.

Roboter

Die Basis des Roboters wurde mit der *3- Punkt Methode* bezüglich des Welt-KOS eingemessen. Außerdem wurde mit diesem Verfahren ein Test-Werkzeug am TCP des Roboters bestimmt.

7.2.3 Konfiguration der Schutzraumregionen

Der MRK-Interaktionsbereich (siehe Abbildung 72) mit einer Größe von $1200\text{ mm} \times 600\text{ mm}$ bildet den von Mensch und Roboter gemeinsam genutzten Arbeitsbereich und bedarf somit der Absicherung durch das A2S. Die entsprechende Projektionsoberfläche wurde gemäß Abschnitt 6.3.1 in quadratische SRR \mathcal{R} strukturiert. Die Größe einer einzelnen Region r mit ($r \in \mathcal{R}$) beträgt am Versuchsstand $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$, so dass die Projektionsoberfläche insgesamt in 120×60 SRR unterteilt wurde.

Abbildung 74 (linke Darstellung) zeigt exemplarisch einen Ausschnitt des aktuellen Zustandsbildes AZ der linken Kamera. Eine einzelne Region r wird darin mit etwa $9(\pm 1) \times 9(\pm 1)$ Bildpunkten abgebildet. Dabei besteht zwischen zwei benachbarten Regionen r_1 und r_2 mit einem Code $\mathbb{C}(r_1) = 01$ und $\mathbb{C}(r_2) = 10$ (oder Code $\mathbb{C}(r_1) = 10$ und $\mathbb{C}(r_2) = 01$) ein Totbereich $\psi_d = 1(\pm 1)$ Bildpunkten (graue Bildpunkte mit Code $\mathbb{C} = 00$), der auf monochromatische Aberrationen zurückzuführen ist (Distante und Distante 2020a). Bildpunkten in Totbereichen kann nicht eindeutig ein Code von $\mathbb{C} = 01$ oder $\mathbb{C} = 10$ zugeordnet werden, da an diesen Bildpunkten sowohl Lichtstrahlen der Region r_1 als auch die Lichtstrahlen der Region r_2 in den Kamerabildern I_t und I_{t+1} diffus abgebildet werden.



Abbildung 74: Links: Extraktion der SRR (Größe von $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$) im AZ mit einer Größe von $9(\pm 1) \times 9(\pm 1)$ Bildpunkten. Zwischen benachbarten Regionen existiert ein Totbereich $\psi_a = 1(\pm 1)$ Bildpunkten. Rechts: Die zugehörigen SRR im EZ mit einer Größe von $5(+1) \times 5(+1)$ Bildpunkten und einem Toleranzbereich $\psi_t = 3(+1)$ Bildpunkten zwischen benachbarten Regionen zur Steigerung der Robustheit.

In Abbildung 74 (rechte Darstellung) ist das zugehörige EZ mit den Bildpositionen der erwarteten SRR veranschaulicht, welches zur Bestimmung des Verletzungssignals herangezogen wird. Eine Region r besitzt dabei eine Größe von $5(+1) \times 5(+1)$ Bildpunkten. Zwischen zwei benachbarten Regionen r_1 und r_2 wurde ein Toleranzbereich $\psi_t = 3(+1)$ Bildpunkten definiert. Dieser Toleranzbereich erhöht die Robustheit des A2S gegenüber (i) monochromatischen Aberrationen innerhalb des AZ und (ii) Kalibrierungenauigkeiten mit den daraus resultierenden systematischen Abweichungen zwischen AZ und EZ . Aufgrund des Toleranzbereiches konnte die Verfügbarkeit des A2S signifikant erhöht werden.

7.3 Ergebnisse

Gemäß Abstandsformel (siehe Abschnitt 2.2.1 und Abschnitt 5.4.3, Gleichung (12)) bedingen die Reaktionszeit \mathcal{T}_r und die Detektionsauflösung d den einzuhaltenden Mindestabstand S in hohem Maße. Das A2S wurde diesbezüglich durch die beschriebenen Implementierungen von Hardware und Software (siehe Abschnitt 7.1 und Abschnitt 7.2) optimiert. Die erzielten Ergebnisse werden nun in den folgenden Abschnitten präsentiert.

7.3.1 Detektionsauflösung

Die Detektionsauflösung des A2S hängt allein davon ab, inwieweit die extrahierten Bildpositionen der SRR im AZ durch das Eindringen eines Objektes verändert werden. Die Abweichungen von SRR im AZ gegenüber ihren erwarteten Bildpositionen im EZ führen schließlich zur Objektdetektion.

Die am Versuchsstand umgesetzte Größe der SRR und die daraus resultierenden Bildpunkte im AZ und EZ wurden in Abschnitt 7.2.3 beschrieben. Bezüglich der Detektionsleistung stellen die Toleranzbereiche zwischen benachbarten Regionen im EZ einen entscheidenden Faktor dar. Da diese Toleranzbereiche nicht überwacht werden, könnten prinzipiell Objekte an genau diesen Bildpositionen in den Schutzraum unbemerkt eindringen. Die Größe des Toleranzbereiches ψ_t bedingt somit die Mindestgröße $\psi_{min} \geq 5$ Bildpunkte eines Objektes, damit dessen Schutzraumeindringung zuverlässig detektiert wird. Gemäß Abschnitt 6.4.1 (Abbildung 56) kann die Eindringung eines Objektes auf zwei Varianten erfolgen. Die vom A2S erreichte Detektionsauflösung wird daher im Folgenden für die beiden Fälle (i) *Unterbrechung der Reflexionsstrahlen* und (ii) *Unterbrechung der Emissionsstrahlen* separat betrachtet.

Unterbrechung der Reflexionsstrahlen

Das eindringende Objekt verdeckt die auf der Projektionsoberfläche abgebildeten SRR und verhindert somit deren Abbildung im Kamerabild (siehe Abbildung 56 (a)). Für die Detektionsleistung stellt sich hierbei die Frage, wie groß dieses Objekt mindestens sein muss, damit es im Resultat als Schutzraumeindringung (positives Verletzungssignal) detektiert wird.

Hierfür wurden unter Verwendung der ermittelten intrinsischen und extrinsischen Parameter (Abschnitt 7.2.2) und den verwendeten Abbildungsmodellen (Abschnitt 5.4.2) von Lichtmodulator und linker Kamera des Versuchsstandes, die Anzahl an Bildpunkten ψ eines Objektes im AZ berechnet. Die Berechnung erfolgte in Abhängigkeit (i) der Objektbreite und (ii) des Objektabstandes über der Projektionsoberfläche (siehe *Abbildungsmatrix* in Anhang D). Zur Berücksichtigung von Einflüssen wie Abbildungsfehler (monochromatische Aberration), Tiefenunschärfe, Grauwert-Interpolation bei der Berechnung des virtuellen Kamerabildes sowie der Wahl des Differenzschwellwertes τ (siehe Abschnitt 6.3.2), wurde ein Korrekturwert $\psi_b = 2$ Bildpunkte experimentell ermittelt. Die korrigierten Werte ψ_k (siehe Tabelle 32) ergeben sich dann durch:

$$\psi_k = \lfloor \psi \rfloor - \psi_b$$

Tabelle 32: Anzahl ψ_k verdeckter Bildpunkte im AZ in Abhängigkeit von Objektbreite und Objekthöhe über der Projektionsoberfläche. Die Hintergrundfarbe definiert die Detektionswahrscheinlichkeit des Objektes bei einer Schutzraumeindringung: Rot: $\psi_k < \psi_t$ keine/geringe Detektionswahrscheinlichkeit. Gelb: $\psi_k = \psi_t$; mittlere Detektionswahrscheinlichkeit. Grün: $\psi_k \geq \psi_{min}$ sichere Detektion des eindringenden Objektes.

ψ_k in [Bildpunkten]		Objektbreite in [mm]						
		2	4	6	8	10	12	14
Objekthöhe in [mm]	10	0	1	3	5	6	8	10
	50	0	1	3	5	7	9	10
	100	0	1	3	5	7	9	11
	250	0	2	4	6	8	10	12
	500	0	3	5	8	11	13	16
	750	1	4	8	11	15	18	21
	1000	2	7	12	17	22	27	32
	1250	6	15	24	32	41	50	59
	1500	37	77	117	157	197	237	277

Die Ergebnisse in Tabelle 32 zeigen, dass schon ab einer Objektbreite von 8 mm in den Schutzraum eindringende Objekte zu einer Verdeckung von 5 Bildpunkten führen. Dies entspricht der geforderten Mindestanzahl an Bildpunkten ψ_{min} , so dass ein eindringendes Objekt zuverlässig detektiert wird. Für Objekte mit einer Objektgröße $\psi_k = \psi_t$ besteht die Möglichkeit der Nicht-Detektion, falls diese Objekte im Toleranzbereich im AZ abgebildet werden. Bei Objekten mit Objektgrößen $\psi_k < \psi_t$ werden diese lediglich mit ein oder zwei Bildpunkten oder generell nicht im AZ abgebildet, so dass die Objekteindringung nicht detektiert wird.

In Abbildung 75 wird die praktische Validierung der berechneten Ergebnisse aus Tabelle 32 exemplarisch für ein Testobjekt in einer Höhe von 100 mm über der Projektionsoberfläche veranschaulicht. Das Objekt mit einem Durchmesser von 12 mm verdeckt dabei in der Breite 9 Bildpunkte (entspricht dem berechneten Wert in Tabelle 32).

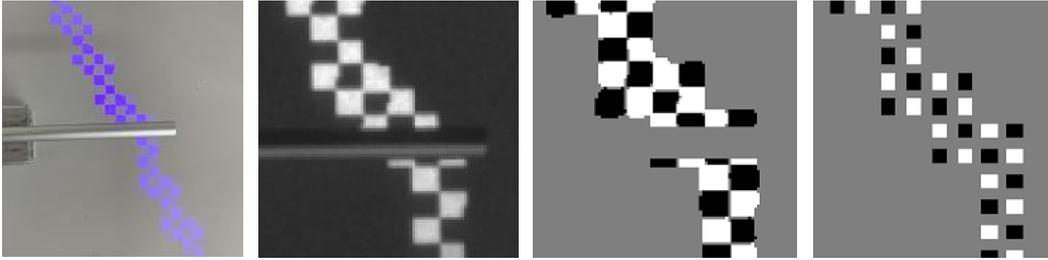


Abbildung 75: Bild 1: Testobjekt mit 12 mm Durchmesser wurde in einer Höhe von 100 mm über der Projektionsoberfläche in den Schutzraum zur Unterbrechung der Reflexionsstrahlen (keine Unterbrechung der Emissionsstrahlen) eingebracht. Bild 2: Graustufen-Kamerabild der linken Kamera. Bild 3: Entsprechendes aktuelles Zustandsbild AZ . Bild 4: Entsprechendes erwartetes Zustandsbild EZ .

Unterbrechung der Emissionsstrahlen

Bei der Unterbrechung der Emissionsstrahlen durch ein Objekt treffen die emittierten Lichtstrahlen zur Darstellung der SRR nicht mehr vollständig auf der Projektionsoberfläche auf, sondern werden teilweise (oder vollständig) auf dem eindringenden Objekt abgebildet. Dies führt im AZ zu veränderten Bildpositionen der extrahierten Codes, als sie gemäß EZ erwartet werden. Bezüglich der Detektionsleistung muss hierzu die Frage beantwortet werden, wie groß die Abweichung in Bildpositionen mindestens sein muss, damit das eindringende Objekt detektiert wird.

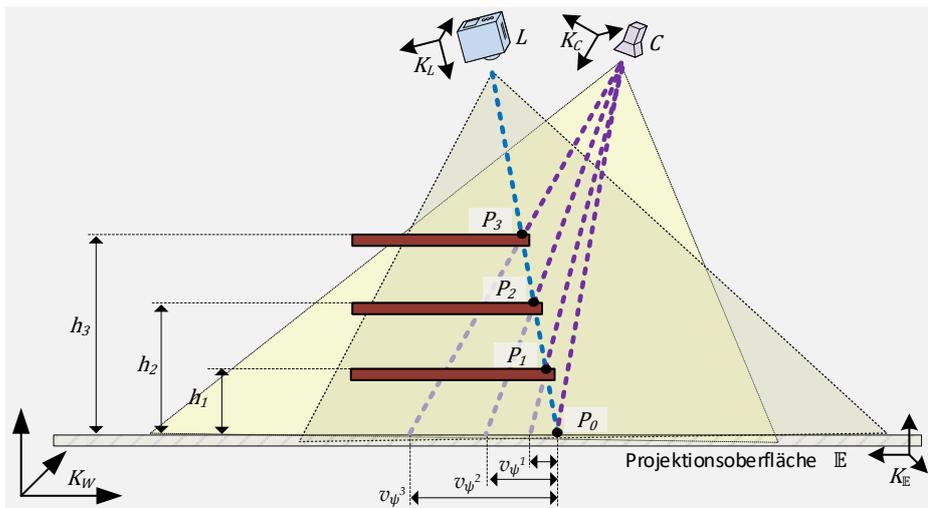


Abbildung 76: Auswirkungen auf den Strahlengang der Reflexionsstrahlen bei einer Unterbrechung der Emissionsstrahlen durch ein Objekt in unterschiedlichen Abständen zur Projektionsoberfläche.

Abbildung 76 stellt diesen Sachverhalt dar: Zur Darstellung einer Region r an der Position P_0 werden Lichtstrahlen (Emissionsstrahlen) emittiert (blau gestrichelte Linie) und die entsprechenden Reflexionsstrahlen von der Kamera an einer spezifischen Bildposition $(u_0, v_0)^T$ abgebildet. Bei der Eindringung eines Objektes in einer Höhe h_1, h_2, h_3 ändert sich die Weltposition des Auftreffpunktes der Emissionsstrahlen zu P_1, P_2, P_3 , was wiederum in veränderten Bildpositionen $(u_\psi, v_\psi)^T$ mit $\psi = 1, 2, 3$ und einem entsprechenden Abweichungsvektor $p_\psi = (x_\psi, y_\psi)^T$ im Kamerabild resultiert. Die Änderungen der Bildpositionen in Abhängigkeit der Objekthöhe (Bereich von 0 – 20 mm) wurden auf Basis der Einmessungen

(Abschnitt 7.2.2) und den verwendeten Abbildungsmodellen (siehe Abschnitt 5.4.2) von Lichtmodulator und linker Kamera am Versuchsstand in Form einer resultierenden Länge $|p_\psi|$ des Abweichungsvektors $p_\psi = (x_\psi, y_\psi)^T$ berechnet (siehe Tabelle 33).

Tabelle 33: Zusammenhang zwischen der Höhe des eindringenden Objektes und der veränderten Bildposition der abgebildeten Reflexionsstrahlen im Kamerabild.

Objekthöhe in [mm]	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$ p_\psi $ in [Bildpunkten]	0.86	1.72	2.58	3.45	4.32	5.19	6.06	6.94	7.82	8.70

Die Voraussetzungen für eine maximale Veränderung von Bildpunkten bei der Schutzraumeindringung werden in Abbildung 77 veranschaulicht. Dabei ist der Toleranzbereich zwischen den Regionen (r_0, r_1, r_2, r_3) maximal ausgelegt und entspricht damit $\psi_t = 4$ Bildpunkten. In der Darstellung (a) schließen die extrahierten Regionen aneinander an und besitzen die maximale Größe von 10 Bildpunkten. Bei der Schutzraumeindringung eines Objektes können die Regionen r_2 und r_3 um maximal 2 Bildpunkte verschoben werden, ohne dass dies als Verletzung detektiert wird (Darstellung (b)). In der Darstellung (c) besteht zusätzlich ein Totbereich ψ_d zwischen den Regionen, so dass hierin eine maximale Verschiebung von $x_\psi = y_\psi = 3$ Bildpunkten bei einer Schutzraumeindringung eines Objektes möglich wird (siehe Darstellung (d)). Das resultiert in einer maximalen Länge des Vektors p_ψ von:

$$|p_\psi| = \sqrt{x_\psi^2 + y_\psi^2} = \sqrt{3^2 + 3^2} \approx 4.24 \text{ Bildpunkte}$$

Dies korrespondiert mit einer Objekteindringung in einer Höhe von 10 mm (Tabelle 33) und einer berechneten Verschiebung von $x_\psi = y_\psi \approx 3.02$ Bildpunkten. Auch bei einer Objekthöhe von 12 mm und einer resultierenden Verschiebung von $x_\psi = y_\psi \approx 3.67$ Bildpunkten besteht die Möglichkeit einer Nicht-Detektion.

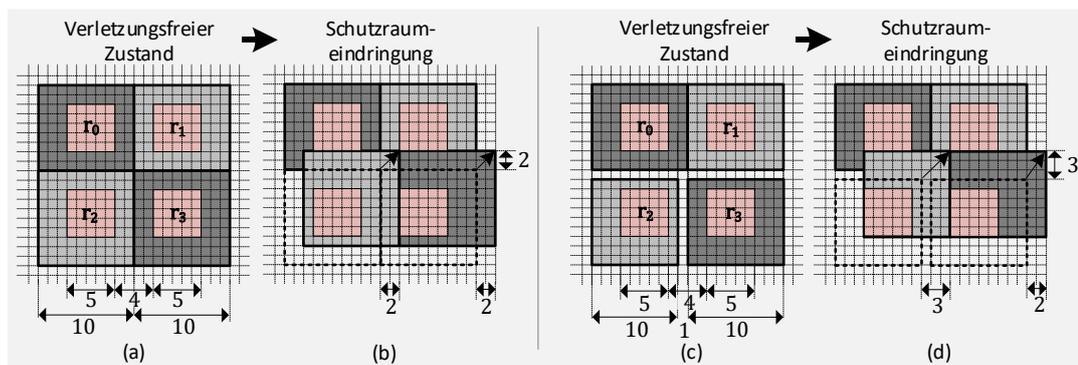


Abbildung 77: Pixelbasierte Veränderung (Worstcase) von Regionen bei der Objekteindringung und entsprechender Unterbrechung der Emissionsstrahlen. Zwischen den Regionen besteht ein maximaler Toleranzbereich von 4 Bildpunkten. Verschiebung der Regionen r_2 und r_3 ohne Totbereich (a), (b) und mit Totbereich (c), (d) zwischen den Regionen.

Ab einer Höhe von 14 mm führt die Objekteindringung zu Abweichungen von $x_\psi = y_\psi \approx 4.28$ Bildpunkten, so dass die betroffenen extrahierten Regionen im AZ die benachbarten Regionen im EZ überschneiden. In Abbildung 77 würde die extrahierte Region r_2 dann die Bildposition der erwarteten Region r_0 oder r_3 überschneiden und zu einem positiven Verletzungssignal führen.

Die berechneten Abweichungen wurden am Versuchsstand durch praktische Versuche bestätigt. Abbildung 78 zeigt exemplarisch eine Objekteindringung in einer Höhe von 14 mm . Die Verschiebung der Bildpunkte im AZ gegenüber dem EZ ist deutlich zu erkennen und beträgt $p_\psi = (5,4)^T$ Bildpunkte mit einer resultierenden (gerundeten) Länge von $|p_\psi| \approx 6$ Bildpunkten.

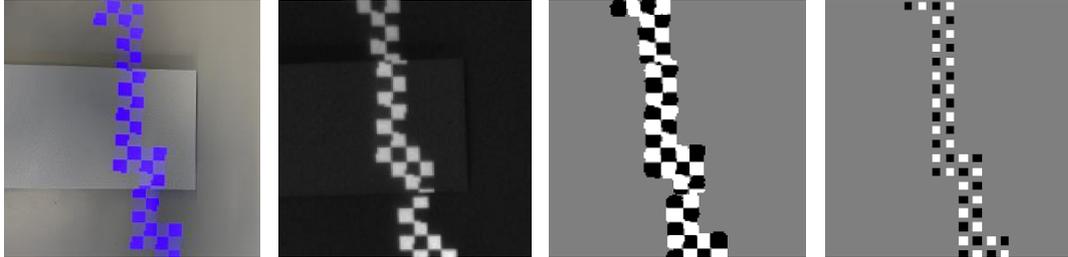


Abbildung 78: Bild 1: Unterbrechung der Emissionsstrahlen durch ein ebenes Objekt in einer Höhe von 14 mm über der Projektionsoberfläche. Bild 2: Graustufen-Kamerabild der linken Kamera. Bild 3: Entsprechendes aktuelles Zustandsbild AZ . Bild 4: Entsprechendes erwartetes Zustandsbild EZ .

Einfluss auf den Mindestabstand

In den vorangegangenen Abschnitten wurde die Detektionsleistung des A2S unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Möglichkeiten einer Schutzraumeindringungen analysiert. Zusammenfassend konnten dabei folgende Ergebnisse (Tabelle 34) erzielt werden:

Tabelle 34: Detektionsleistung des A2S in Abhängigkeit der Art einer Schutzraumeindringung.

Unterbrechung der Reflexionsstrahlen	Unterbrechung der Emissionsstrahlen
Objekte ab einer Breite von 8 mm werden zuverlässig detektiert	Objekte ab einer Höhe von 14 mm werden zuverlässig detektiert

Aus den Ergebnissen in Tabelle 34 kann abgeleitet werden, dass Objekte mit einem Durchmesser von 14 mm zuverlässig detektiert werden, unabhängig davon welche Art der Schutzraumeindringung vorliegt. Hinsichtlich des einzuhaltenden Mindestabstandes \mathcal{S} bedingt die Detektionsauflösung d den Zuschlag \mathcal{C} mit $\mathcal{C} = 8(d - 14\text{ mm})$ (siehe Abschnitt 2.2.2). Mit einer erzielten Detektionsauflösung des A2S von 14 mm kann damit der Zuschlag \mathcal{C} zu Null minimiert werden. Dies entspricht der Detektion eines einzelnen Fingers (Bestcase).

7.3.2 Reaktionszeit

Die Reaktionszeit \mathcal{T}_r beeinflusst den resultierenden einzuhaltenden Mindestabstand \mathcal{S} in hohem Maße (siehe Abschnitt 2.2.1, Abschnitt 5.4.3, Anhang A.4). In diesem Abschnitt wird die Reaktionszeit des A2S analysiert sowie deren Auswirkungen auf den einzuhaltenden Mindestabstand \mathcal{S} dargelegt. Darüber hinaus werden mögliche nicht-detektierbare Schutzraumeindringungen diskutiert.

In Abbildung 79 ist das resultierende Zeitverlaufdiagramm des A2S auf Basis der am Versuchsstand umgesetzten Software- und Hardwarekomponenten veranschaulicht. Dieses beinhaltet die einzelnen Zeitanteile (siehe Tabelle 35), aus denen sich die \mathcal{T}_r zusammensetzt.

Tabelle 35: Zusammensetzung der Reaktionszeit \mathcal{T}_r aus verschiedenen Zeitanteilen (siehe Abbildung 79).

Symbol	Dauer [ms]	Beschreibung
\mathcal{T}_C	1	Belichtungszeit der Kamerabildaufnahme
\mathcal{T}_L	10	Zeitdauer der Bildprojektion
\mathcal{T}_Z	10	Verarbeitungszeit zur Generierung des AZ
\mathcal{T}_V	3	Bestimmung Verletzungssignal ϕ (Verletzungstest)
Δt_0	10	Beginnt zum Zeitpunkt $t-1$: $\Delta t_0 = \mathcal{T}_L$
Δt_1	10	Beginnt zum Zeitpunkt t : $\Delta t_1 = \mathcal{T}_L$
Δt_V	14	$\Delta t_V = \mathcal{T}_C + \mathcal{T}_Z + \mathcal{T}_V$

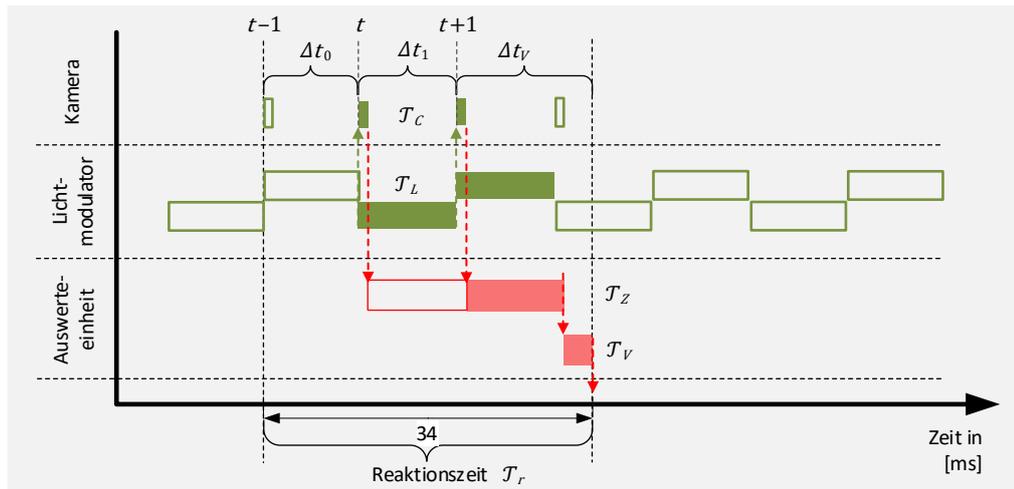


Abbildung 79: Darstellung des zeitlichen Ablaufes zur Detektion einer Schutzraumeindringung.

Die tatsächlich eintretende Reaktionszeit hängt maßgeblich davon ab, zu welchem Zeitpunkt die Objekteindringung bezüglich der Kamerabildaufnahme stattfindet. Denn lediglich während der Dauer der Kamerabildaufnahme \mathcal{T}_C können Schutzraumeindringungen auch abgebildet und anschließend während der Verarbeitung detektiert werden. Im Folgenden wird davon ausgegangen, dass für eine vollständige Abbildung einer Schutzraumeindringung im Kamerabild die Objekteindringung zu Beginn der Belichtungszeit vorliegen muss.

Unterscheidung hinsichtlich des Zeitpunktes der Schutzraumeindringung:

- **Schutzraumeindringung während Δt_0 :**

Das Objekt dringt vor der Aufnahme des ersten Kamerabildes I_t in den Schutzraum ein und wird somit in I_t abgebildet. Danach vergeht noch die Zeit Δt_1 bis zur Aufnahme des zweiten Kamerabildes I_{t+1} sowie die Verarbeitungszeit Δt_V zur Detektion und Signalisierung der Schutzraumverletzung.

- **Schutzraumeindringung während Δt_1 :**

Das Objekt dringt nach der Aufnahme des ersten Kamerabildes I_t und vor der Aufnahme des zweiten Kamerabildes I_{t+1} in den Schutzraum ein und wird somit in I_{t+1} abgebildet. Danach beginnt sofort die Verarbeitungszeit Δt_V zur Detektion und Signalisierung der Schutzraumverletzung.

Für die resultierende Reaktionszeit \mathcal{T}_r ergibt sich somit:

- im besten Fall: $\mathcal{T}_r = \Delta t_V = 14 \text{ ms}$
- im schlechtesten Fall: $\mathcal{T}_r = \Delta t_0 + \Delta t_1 + \Delta t_V = 34 \text{ ms}$

Dies wurde durch Messungen (20 Stichproben) von \mathcal{T}_r am Versuchsstand bestätigt.

Einfluss auf den Mindestabstand

Für die Bestimmung des einzuhaltenden Mindestabstands muss davon ausgegangen werden, dass \mathcal{T}_r maximal lang dauert (Worstcase): $\mathcal{T}_r = 34 \text{ ms}$.

In Abschnitt 5.4.3 wurde der Einfluss von \mathcal{T}_r auf den einzuhaltenden Mindestabstand \mathcal{S} beschrieben (siehe Gleichung (12)). Während \mathcal{T}_r können sich Mensch und Roboter weiter aufeinander zu bewegen, so dass der resultierende Mindestabstand \mathcal{S} durch die Terme $v_h * \mathcal{T}_r$ und $v_r * \mathcal{T}_r$ beeinflusst wird. In Bezug auf den Weg des Menschen wurde der konstante Anteil \mathcal{C}_H (siehe Gleichung (13)) definiert, welcher mit der vorliegenden Reaktionszeit \mathcal{T}_r nun den folgenden Wert annimmt:

$$\mathcal{C}_H = v_h * \mathcal{T}_r = 1.6 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 0.034 \text{ s} = 0.0544 \text{ m}$$

Hinsichtlich des zurückgelegten Roboterweges während \mathcal{T}_r wurden exemplarisch verschiedene (typische) Geschwindigkeiten v_r am TCP des Roboters angenommen und die entsprechenden Wege mit folgender Gleichung bestimmt (siehe Tabelle 36):

$$v_r * \mathcal{T}_r = v_r * 0.034 \text{ s}$$

Tabelle 36: Zurückgelegte Wege des Roboters (TCP) während \mathcal{T}_r bei verschiedenen Geschwindigkeiten v_r .

TCP-Geschwindigkeit v_r in [m/s]	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0
Zurückgelegter Weg in [m]	0.017	0.034	0.051	0.068	0.085	0.102

Schlussfolgerung Die geringe Reaktionszeit mit $\mathcal{T}_r = 0.034 \text{ s}$ (Worstcase) resultiert in entsprechend kleinen Wegen, die von Mensch und Roboter während dieser Zeit maximal zurückgelegt werden können. Bezüglich des Menschen ergibt sich hier lediglich ein konstanter Wert von $\mathcal{C}_H = 0.0545 \text{ m}$, welcher den einzuhaltenden Mindestabstand \mathcal{S} beeinflusst. In Bezug auf den Roboter wirkt sich \mathcal{T}_r ebenso positiv aus: selbst bei hohen Geschwindigkeiten von $v_r = 3.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ resultiert dies in einem zurückgelegten Weg bzw. anteiligen Abstand von lediglich 0.102 m .

Zum Vergleich: Das kamerabasierte Sicherheitssystem *SafetyEye* (Pilz GmbH & Co. KG 2022) besitzt eine Reaktionszeit von über 150 ms (entspricht Roboterweg von 0.45 m bei $v_r = 3.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$). Auch gegenüber aktuellen Sicherheits-Laserscannern mit Reaktionszeiten von 80 ms (Keyence Corporation AG 2022) reagiert das A2S mehr als doppelt so schnell.

Nicht-Detektion einer Schutzraumeindringung

Schutzraumendringungen, die nicht zum Zeitpunkt der Kamerabildaufnahme vorliegen, können dementsprechend vom A2S nicht detektiert werden. Zwischen den

Aufnahmezeitpunkten liegt eine Zeitdauer $\Delta t_b = 0.009 \text{ s}$ (siehe Abbildung 79), während derer prinzipiell Objekte in den Schutzraum eindringen können. Für eine unbemerkte Schutzraumeindringung muss das Objekt in dieser Zeitdauer Δt_b die Breite eines Regionenclusters bestehend aus zwei Regionen (siehe Abschnitt 6.3.1) überschritten haben. Im aktuellen Versuchsstand beträgt dieser Abstand 0.02 m (siehe Abschnitt 7.2.3). Zu diesem Abstand kommt noch die Größe bzw. Länge des eindringenden Objektes dazu, sodass schließlich die folgende Objektgeschwindigkeit v_o zur unbemerkten Schutzraumeindringung notwendig ist:

$$v_o = \frac{\text{Objektgröße} + \text{Clustergröße}}{\Delta t_b} = \frac{\text{Objektgröße} + 0.02 \text{ m}}{0.009 \text{ s}}$$

In Tabelle 37 werden die erforderlichen Objektgeschwindigkeiten für definierte Objektgrößen zur Schutzraumeindringung exemplarisch gegenübergestellt. Dabei ist zu beachten, dass diese Geschwindigkeiten lediglich dann ausreichen um unbemerkt in den Schutzraum einzudringen, wenn die gesamten 9 ms zur Schutzraumeindringung genutzt werden. Dies bedeutet, dass das Objekt unmittelbar nach Ende der Kamerabildaufnahme mit der erforderlichen Geschwindigkeit den benötigten Weg in 9 ms zurücklegen muss.

Tabelle 37: Erforderliche Objektgeschwindigkeiten, damit ein Objekt mit einer definierten Größe innerhalb $\Delta t_b = 0.009 \text{ s}$ unbemerkt in den Schutzraum eindringen kann.

Objektgröße in [m]	0.01	0.025	0.05	0.1	0.25	0.5
Geschwindigkeit v_o in [m/s]	3.33	5.0	7.78	13.3	30	57.7

Schlussfolgerung Generell besteht die Möglichkeit einer unbemerkten Schutzraumeindringung, wenn diese ausschließlich während der Zeitdauer $\Delta t_b = 0.009 \text{ s}$ stattfindet. Aufgrund der geringen Reaktionszeit \mathcal{T}_r sind für die Eindringung, selbst von kleinen Objekten, sehr hohe Geschwindigkeiten notwendig. In Bezug auf die Sicherheit des Menschen bei der MRK kann ein unbemerktes Eindringen ausgeschlossen werden: bei einer angenommen Körperdicke von 0.50 m müsste der Mensch mit einer Geschwindigkeit von $v_o = 57.7 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 207.72 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ während Δt_b in den Schutzraum eindringen. Für die Möglichkeit in den Schutzraum mit einer Hand hineinzugreifen und wieder herauszuziehen, stellt es sich ebenso unrealistisch dar: für eine Schutzraumeindringung mit einer Tiefe von 0.10 m und anschließendem Herausziehen der Hand, muss dies mit $v_o = 26.6 \frac{\text{m}}{\text{s}} = 95.76 \frac{\text{km}}{\text{h}}$ durchgeführt werden (max. Eindringgeschwindigkeit entspricht $2.0 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ gemäß (Norm DIN EN ISO 13855)).

7.4 Zwischenfazit

In diesem Kapitel wurde die konkrete Umsetzung der konzipierten Methoden und Verfahren aus den Kapiteln 5 und 6 in Form von Hard- und Softwarekomponenten an einem industrienahe MRK-Versuchsstand beschrieben. Als Ergebnis dieser Realisierungen lag der Fokus auf der Analyse der *Detektionsauflösung* und der *Reaktionszeit*, welche unmittelbar die Minimierung der einzuhaltenen Mindestabstände beeinflussen. Es wurde gezeigt, dass die Detektionsauflösung von der Art der Schutzraumeindringung abhängt, wobei als Ergebnis eine Fingerdetektion (Detektion von Objekten mit einer Größe von $\geq 14 \text{ mm}$) erreicht wurde.

Diese führt dazu, dass der Zuschlag \mathcal{C} den Wert Null annimmt und somit den einzuhaltenden Mindestabstand \mathcal{S} in keiner Weise beeinflusst (bestmögliche Umsetzung).

In Bezug auf die Reaktionszeit wurde zunächst deren Zusammensetzung aus verschiedenen Zeitanteilen des implementierten A2S am Versuchsstand präsentiert und hinsichtlich einer Schutzraumeindringung analysiert. Die resultierende Reaktionszeit wurde bestimmt und hinsichtlich des Einflusses auf den einzuhaltenden Mindestabstand \mathcal{S} diskutiert. Es konnte gezeigt werden, dass die geringe Reaktionszeit von 34 ms (um ein Vielfaches schneller als aktuelle Sicherheitstechnik) zu kurzen Wegen von Mensch und Roboter und damit einhergehenden minimalen Abständen im einzuhaltenden Mindestabstand führen. Darüber hinaus wurde die Möglichkeit der unbemerkten Objekteindringung während der Zeitdauer Δt_b zwischen den Kamerabildaufnahmen diskutiert und dargelegt, dass diese hinsichtlich der Personensicherheit bei der MRK keine Relevanz hat.

8 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit stellte die Konzeption eines aktiven 2D-Sensorprinzips (A2S) und Methode zur dynamischen Generierung und funktional-sicheren Überwachung von Schutzräumen bei der Mensch-Roboter-Kooperation dar. Das A2S sollte dabei in optimaler Weise die abgeleiteten Anforderungen an MRK-Schutzeinrichtungen zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* erfüllen (Kapitel 2). Die Analyse bestehender Lösungsansätze im Stand von Wissenschaft und Technik (Kapitel 3) ergab dabei, dass eine Kombination aus Kameratechnik mit einer eigenen Beleuchtung hierfür das größte Potential bot. Dies stellte die Basis zur Ableitung der Forschungsfrage in dieser Arbeit dar (Kapitel 4):

Können auf Basis passiver 2D-Kameratechnik ein aktives 2D-Sensorprinzip und Methode konzipiert werden, welche die Anforderungen an eine Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ per sicherer Schutzraumüberwachung erfüllen?

Als grundsätzliche Voraussetzung für den Einsatz als zukünftige Schutzeinrichtung zur Gewährleistung der Personensicherheit bei der MRK stellt die prinzipielle Zertifizierbarkeit des A2S als Sicherheitstechnik dar. Zur Erreichung dieses Ziels wurde die Konzeption des A2S auf Basis des etablierten Fail Safe Prinzips *Ruhestromprinzip* durchgeführt (Kapitel 5). Die Vorteile dieser Methode gegenüber Ausfällen aufgrund von (i) Bauteilversagen oder (ii) Umwelteinflüssen wurden ausführlich analysiert und dargelegt. Die Besonderheit des umgesetzten Funktionsprinzips liegt darin, dass ausschließlich dann ein verletzungsfreier Schutzraum signalisiert wird, wenn (i) alle Komponenten (Kamera, Lichtmodulator, Auswerteeinheit, etc.) einwandfrei funktionieren, (ii) Kamera und Lichtmodulator weiterhin korrekt zueinander ausgerichtet sind (kalibriert) und (iii) keine Störung der Lichttransmission vorliegt (aufgrund einer Objekteindringung oder Umwelteinflüssen wie Rauch usw.). Das A2S ist somit ein inhärent sicheres System (Eigensicherheit, Selbstüberwachung). Auf Basis dieses Konzeptes und einer realistischen Einschätzung der relevanten Kenngrößen konnte gezeigt werden, dass mit diesem Funktionsprinzip mindestens ein Performance Level $PL = d$ erreicht werden kann. Damit erfüllt das A2S die sicherheitstechnische Anforderung als Schutzeinrichtung zur Gewährleistung der Personensicherheit für die industrielle MRK.

Mit dem Fehlen von marktverfügbaren Technologien zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* und damit einhergehend dynamischer Sicherheitsabstände gemäß der Abstandsformel aus ISO/TS 15066, erhebt das konzipierte A2S den Anspruch diese Lücke zu schließen. Dazu wurde ein modellbasierter Ansatz entwickelt und präsentiert, welcher es ermöglicht die erforderlichen Sicherheitsabstände zum Roboter permanent und in Echtzeit in Form eines geometrischen Schutzraumes zu generieren. Dieser Schutzraum hüllt den abzusichernden Roboter als dynamische Hülle entsprechend der aktuellen Roboterkonfiguration (Gelenkstellungen, -geschwindigkeiten) jederzeit minimal ein, so dass ein maximaler Arbeitsbereich für den Menschen zur Verfügung steht. Darüber hinaus

wurde in diesem Zusammenhang ein neues Verfahren *Schutzraumfusion* entwickelt und präsentiert, wodurch zu manipulierende Objekte in den Roboter-Schutzraum einbezogen und wieder separiert werden können, ohne dass dabei die Möglichkeit eines unbemerkten Eindringens des Menschen (oder von Körperteilen) entsteht. Die Anwendbarkeit dieser Verfahren konnte durch Umsetzung vielfältiger Szenarien erfolgreich demonstriert werden.

Im Anschluss an die grundsätzliche Konzeption des Funktionsprinzips wurden im zweiten Teil der Arbeit die Methoden zur Darstellung und Überwachung der Schutzräume entwickelt (Kapitel 6). Der Fokus lag dabei zum einen auf der zuverlässigen Erfassung in den Schutzraum eindringender Objekte unabhängig von deren Art bzw. Beschaffenheit (Absorptions-, Reflexionseigenschaften). Zum anderen soll das A2S möglichst unabhängig von den vorherrschenden Beleuchtungsbedingungen und vor allem robust gegenüber Änderungen der Lichtverhältnisse die Schutzraumüberwachung aufrechterhalten. Dies betrifft sowohl ambiente als auch hoch-dynamische Fremdlichtänderungen. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Verfahren zur raumzeitlichen Codierung (RZC) diskreter Schutzraumregionen der darzustellenden und zu überwachenden Schutzräume entwickelt. In Kombination mit einer Bildfolgeauswertung konnte eine robuste Extraktion der emittierten Lichtstrahlen mit entsprechenden Codes in den Kamerabildern umgesetzt werden. Es konnte gezeigt werden, dass dieses Verfahren selbst bei direktem Sonnenlichteinfall eine zuverlässige Schutzraumüberwachung erlaubt. Darüber hinaus wird auch bei hoch-dynamischen Fremdlichtänderungen (z. B. Blitzlicht) die Sicherheitsfunktionalität gewährleistet, indem diese Störungen festgestellt und signalisiert werden. Hinsichtlich der Sicherheitsfunktionalität wurde abschließend nachgewiesen, dass Schutzraumeindringungen unabhängig vom Auftreten derartiger Fremdlichteinflüsse zuverlässig detektiert werden. Diese Detektion von eindringenden Objekten ist darüber hinaus unabhängig von deren Oberflächeneigenschaften (Farbe, Textur, etc.). Die Ursache liegt darin begründet, dass nicht das Objekt selbst, sondern die Unterbrechung bzw. Änderung der zur Darstellung des Schutzraumes emittierten Lichtstrahlen festgestellt werden. Im Ergebnis führt dies dazu, dass Eindringungen jeglicher nicht-transparenter Objekte in den Schutzraum vom A2S sicher detektiert werden.

Im dritten Teil der Arbeit wurden die entwickelten Konzepte und Verfahren in Form von Hard- und Softwarekomponenten implementiert und in einen industriellen MRK-Versuchsstand integriert (Kapitel 7). Die dafür notwendigen Komponenten, deren Schnittstellen, Zyklen und Datenflüsse wurden in Form verschiedener Diagramme und Beschreibungen ausführlich präsentiert. Mit der konkreten Realisierung des A2S wurden außerdem die Voraussetzungen zur Untersuchung der Kenngrößen *Detektionsauflösung* und *Reaktionszeit* geschaffen. Dabei konnte gezeigt werden, dass Objekte ab einem Durchmesser von 14 mm (Fingerauflösung) bei einer Schutzraumeindringung zuverlässig detektiert werden. Dies führt dazu, dass bei der Bestimmung des einzuhaltenden Mindestabstandes kein zusätzlicher Zuschlag berücksichtigt werden muss (Bestcase). Ein weiterer Vorteil besteht in der geringen Reaktionszeit des A2S von lediglich 34 ms, wodurch die entsprechend zu berücksichtigenden Wege bzw. Abstände von Mensch und Roboter ebenfalls signifikant

geringer als bei heutigen etablierten Schutzeinrichtungen (Laserscanner, Kamerasysteme) ausfallen. Die vorteilhafte Anwendbarkeit des A2S konnte mit Umsetzung des industrienahen MRK-Versuchsstandes erfolgreich demonstriert werden.

Zusammenfassend wurde somit ein neuartiges aktives 2D-Sensorprinzip auf Basis von Kameratechnik in Kombination mit einem Lichtmodulator konzipiert und entwickelt, welches die Anforderungen an eine zukünftige Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* in idealer Weise umgesetzt. Unter Betrachtung der präsentierten Konzepte, Entwicklungen und Implementierungen sowie den erzielten Ergebnissen in dieser Arbeit, kann abschließend die in Kapitel 4 abgeleitete Forschungsfrage als beantwortet angesehen werden.

8.1 Einordnung in den aktuellen Stand der Wissenschaft

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse und erzielten Ergebnisse wird das aktive 2D-Sensorprinzip hinsichtlich der anforderungsspezifischen Kriterien (siehe Abschnitt 3.3) bewertet.

Table 38: Einordnung des A2S als neuartige „Projektions- und kamerabasierte Technologie“ in den aktuellen Stand der Wissenschaft. Bewertung der Technologie anhand der anforderungsspezifischen Kriterien (siehe Abschnitt 3.3 und vgl. Abschnitt 4).

		Technologien							
		Aktiv					Passiv		
		Projektions- und kamerabasierte Technologie	Radarsysteme	Laserscanner horizontal	Structured Light-Kamera	Time-of-Flight-Kamera	Active Stereo-Kamera	Kameratechnik	Trittmatten
Anforderung	Kriterien	Bewertungsmatrix							
Anf. 1	Ganzheitlich	++	++	++	++	++	++	++	++
Anf. 2	Objektauflösung	++	-	-	+	+	++	++	-
	Reaktionszeit	++	-	+	+	+	+	++	++
Anf. 3	Zertifizierbarkeit	++	++	++	0	+	+	++	++
Anf. 4	Robustheit	++	+	+	-	-	-	++	++
	Fremdlichtunabhängig	+	++	+	+	+	+	-	++
	Sichtbarkeit	++	-	-	-	-	-	-	-
Anf. 5	Dynamik	++	+	+	++	++	++	++	++
Bewertungspunkte (max. 16)		15	5	6	5	6	7	10	10

Als neuartige *Projektions- und kamerabasierte Technologie* erweitert das A2S somit die bisherigen Technologien im aktuellen Stand von Wissenschaft und Technik. Die Ergebnisse der qualitativen und quantitativen Bewertung sowie deren Vergleich mit bestehenden Technologien sind in Tabelle 38 dargestellt. Gegenüber den bestehenden Technologien erreicht das A2S eine neue Höchstpunktzahl von 15 Punkten. Als kamerabasierte Technologie besteht trotz Verwendung einer eigenen Lichtquelle die Möglichkeit zur Beeinflussung aufgrund der umgebenden Beleuchtungsverhältnisse, wodurch in Bezug auf das A2S einzig die Verfügbarkeit durch hochdynamische Fremdlichtänderungen gestört werden kann.

Zum gegenwärtigen Zeitpunkt existiert keine vergleichbare Technologie, welche die Anforderungen in diesem Maße erfüllt und somit als zukünftige Schutzeinrichtung zur Umsetzung der MRK-Methode *Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung* in Frage kommt.

8.2 Ausblick

Das in dieser Arbeit konzipierte und umgesetzte aktive 2D-Sensorprinzip bildet das Fundament für weiterführende Entwicklungen sowie Optimierungen. Mit der aktuellen Lichtmodulatortechnik können Arbeitsplätze mit Kleinrobotern wie am umgesetzten MRK-Versuchsstand optimal sowohl hinsichtlich der Schutzraumüberwachung als auch hinsichtlich der Sichtbarkeit für den Menschen ausgeleuchtet werden. Für größere Kollaborationsbereiche bspw. bei der Zusammenarbeit mit Großraum- bzw. Schwerlastrobotern sind lichtstärkere Lichtmodulatoren erforderlich. In diesem Zusammenhang stellt sich auch die Frage nach der Möglichkeit zur Kopplung mehrerer Lichtmodulatoren, um derartige größere Bereiche abzudecken.

Weiteres Potential besteht in der Wahl einer optimalen Projektionsoberfläche. Diese sollte das Licht möglichst diffus und für die individuell positionierten Kameras optimalerweise reflektieren, wobei das Licht gleichzeitig für den Menschen gut sichtbar sein soll. Dazu könnten auch RGB-Lichtmodulatoren zum Einsatz kommen, wobei eine spezifische Wellenlänge (z. B. blau) weiterhin für die Sicherheitsfunktionalität des A2S eingesetzt wird. Die Möglichkeiten des verfügbaren Farbspektrums könnten für die Darstellung und Sichtbarmachung des Schutzraumes aber auch zur Einblendung weiterer Informationen, wie zukünftige Roboterbewegung oder Werkerassistenzfunktionen genutzt werden.

Das aktuelle A2S setzt bisher lediglich eine Schutzraum-Instanz um, welcher bei einer Schutzraumeindringung zum unmittelbaren Stopp des Roboters führt. Eine Kaskadierung mehrerer ineinander geschachtelter Schutzräume würde bei einer Objekteindringung eine differenzierte Reaktion, wie eine Geschwindigkeitsreduzierung oder Richtungsänderung der Roboterbewegung erlauben.

Weitere Anwendungsmöglichkeiten des A2S wären bspw. der Einsatz auf mobilen Plattformen zur Detektion von Objekten im Fahrweg (als Ersatz für Laserscanner) oder auch als

Interaktionssystem. Bei letzterem würden Schutzräume als virtuelle Schaltflächen interpretiert, deren Unterbrechung zur Ausführung einer definierten Funktionalität genutzt wird. Von den genannten zusätzlichen Möglichkeiten bezüglich Interaktion und Einblendung von Zusatzinformationen wurden bereits erste vielversprechende Untersuchungen und Machbarkeitsstudien durchgeführt. Insgesamt ergeben sich auf Basis des konzipierten aktiven 2D-Sensorprinzips neuartige Einsatzmöglichkeiten, deren Vielfältigkeit zum aktuellen Zeitpunkt kaum abgeschätzt werden kann und ein breit gefächertes Gebiet mit interessanten weiterführenden Forschungsarbeiten eröffnet.

A Anhang – Grundlagen der Industrierobotik

A.1 Richtlinien, Gesetze und Normen

Für die Verwendung von Industrierobotern und deren Integration in Applikationen sind die aktuell geltenden europäischen Richtlinien, deren Umsetzung in nationale Gesetze und entsprechende harmonisierte Normen einzuhalten. Diese bilden den rechtlichen Rahmen, um die Sicherheit und Gesundheit des Menschen beim Umgang mit Robotern zu gewährleisten.

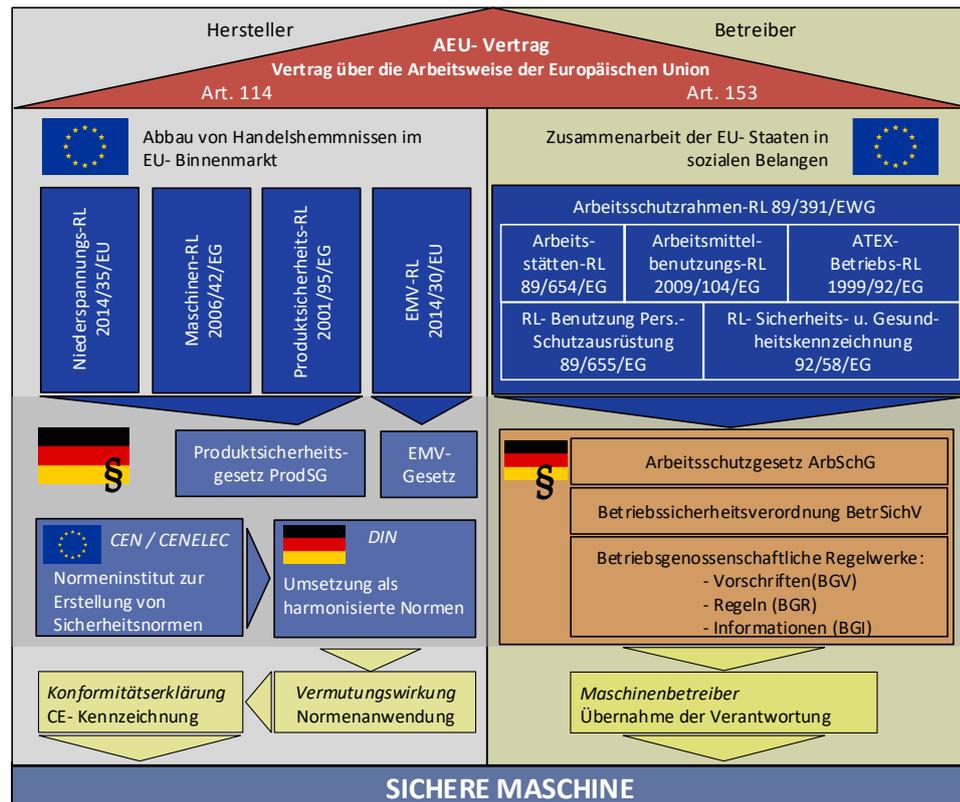


Abbildung 80: Zusammenhänge der EG- Richtlinien, Gesetze und Normen. In Anlehnung an (Sick AG 2017).

Innerhalb der Europäischen Union (EU) regeln die EU- Rechtsvorschriften den Inverkehrbringen und die Verwendung von Waren und Gütern im europäischen Binnenmarkt, dessen Grundlage der *Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union* (AEU-Vertrag) bildet. Die vom EU- Parlament verabschiedeten Richtlinien für die Europäische Gemeinschaft (EG) müssen von den Mitgliedsstaaten innerhalb einer bestimmten Frist in nationales Recht (Gesetze) umgewandelt werden, was zu einer Vereinheitlichung der Gesetze und Rechte innerhalb der EU führt. Dadurch kann ein freier Handel von Produkten, die nach den entsprechenden EG-Richtlinien gefertigt werden, zwischen den EU- Mitgliedsstaaten stattfinden. In Abbildung 80 werden die Zusammenhänge zwischen europäischem Recht und nationalem (deutschem) Recht dargestellt.

EG-Richtlinien

EG- Richtlinien legen die grundlegenden Anforderungen und Ziele an Gesundheit und Sicherheit für Produkte fest. In Bezug auf die Entwicklung und Verwendung von Industrierobotern stellt die EG- Maschinenrichtlinie (Maschinenrichtlinie 2006/42/EG) die Grundlage dar. Weitere Richtlinien in diesem Zusammenhang sind die Niederspannungsrichtlinie (Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU), EMV-Richtlinie (EMV-Richtlinie 2014/30/EU) oder auch ATEX-Richtlinie (ATEX-Richtlinie 2014/34/EU).

Harmonisierte EG-Normen

Da die EG-Richtlinien lediglich die Anforderungen jedoch keine technischen Umsetzungen definieren, werden auf europäischer Ebene sogenannte *harmonisierte Normen* erarbeitet. Normen stellen Regelwerke dar und legen Leitlinien fest, deren Berücksichtigung eine Standardlösung für bekannte Probleme darstellt. Sie repräsentieren die allgemein anerkannten Regeln der Technik bzw. den Stand der Technik.

Europäische Sicherheitsnormen werden in drei Typen (A, B, C- Normen) unterteilt, wobei diese hierarchisch vom Allgemeinen zum Speziellen aufgebaut sind. Zusätzlich existieren noch *technische Spezifikationen*, die üblicherweise einen fortgeschrittenen Stand zu Arbeiten repräsentieren, deren technische Entwicklungen jedoch noch nicht abgeschlossen sind (vgl. (ISO 2019)).

Konformitätsvermutung und CE-Kennzeichen (Communauté Européenne)

Bei Anwendung und Einhaltung der Regeln, Leitlinien und Anforderungen harmonisierter Normen zur Herstellung von Produkten kann von einer Berücksichtigung der entsprechenden Vorgaben durch die EG-Richtlinien ausgegangen werden. Siehe dazu auch „§ 4 *Harmonisierte Normen*“ im Produktsicherheitsgesetz (ProdSG). Für Produkte, die in den Anwendungsbereich der EG- Maschinenrichtlinie fallen, heißt es im Artikel 7, Absatz 2:

„Ist eine Maschine nach einer harmonisierten Norm hergestellt worden, [...], so wird davon ausgegangen, dass sie den von dieser harmonisierten Norm erfassten grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen entspricht.“

Die Erfüllung der Anforderungen gemäß relevanter, harmonisierter Norm(en) lässt somit die Konformität des Produktes bezüglich der EG-Richtlinien vermuten und wird mit einer Konformitätserklärung durch den Hersteller bescheinigt. Das Produkt erhält dann das CE-Kennzeichen.

EG-Maschinenrichtlinie

Die EG- Maschinenrichtlinie (Maschinenrichtlinie 2006/42/EG) gilt gemäß Artikel 1 *Anwendungsbereich* unter anderem für *Maschinen, Sicherheitsbauteile* und *Unvollständige Maschinen*. Sie beschreibt die Anforderungen an Sicherheit und Gesundheit bei der Interaktion von Mensch

und Maschine. Bemerkenswert dabei ist, dass Roboter zunächst zu den unvollständigen Maschinen zählen, da diese gemäß Artikel 2 *Begriffsbestimmungen* der EG- Maschinenrichtlinie definiert werden, als

„eine Gesamtheit, die fast eine Maschine bildet, für sich genommen aber keine bestimmte Funktion [im Sinne von Anwendung] erfüllen kann;“

Erst die Integration eines Industrieroboters in eine Applikation, wobei der Roboter bspw. in Verbindung mit Werkzeugen eine bestimmte Anwendung (z. B. Werkstücktransport oder Werkstückbearbeitung) erfüllt, führt schließlich zur Realisierung einer vollständigen Maschine. Mit der Umsetzung einer vollständigen Maschine müssen dann die Anforderungen an Sicherheit und Gesundheit der Maschinenrichtlinie berücksichtigt werden.

Übersicht wesentlicher Normen

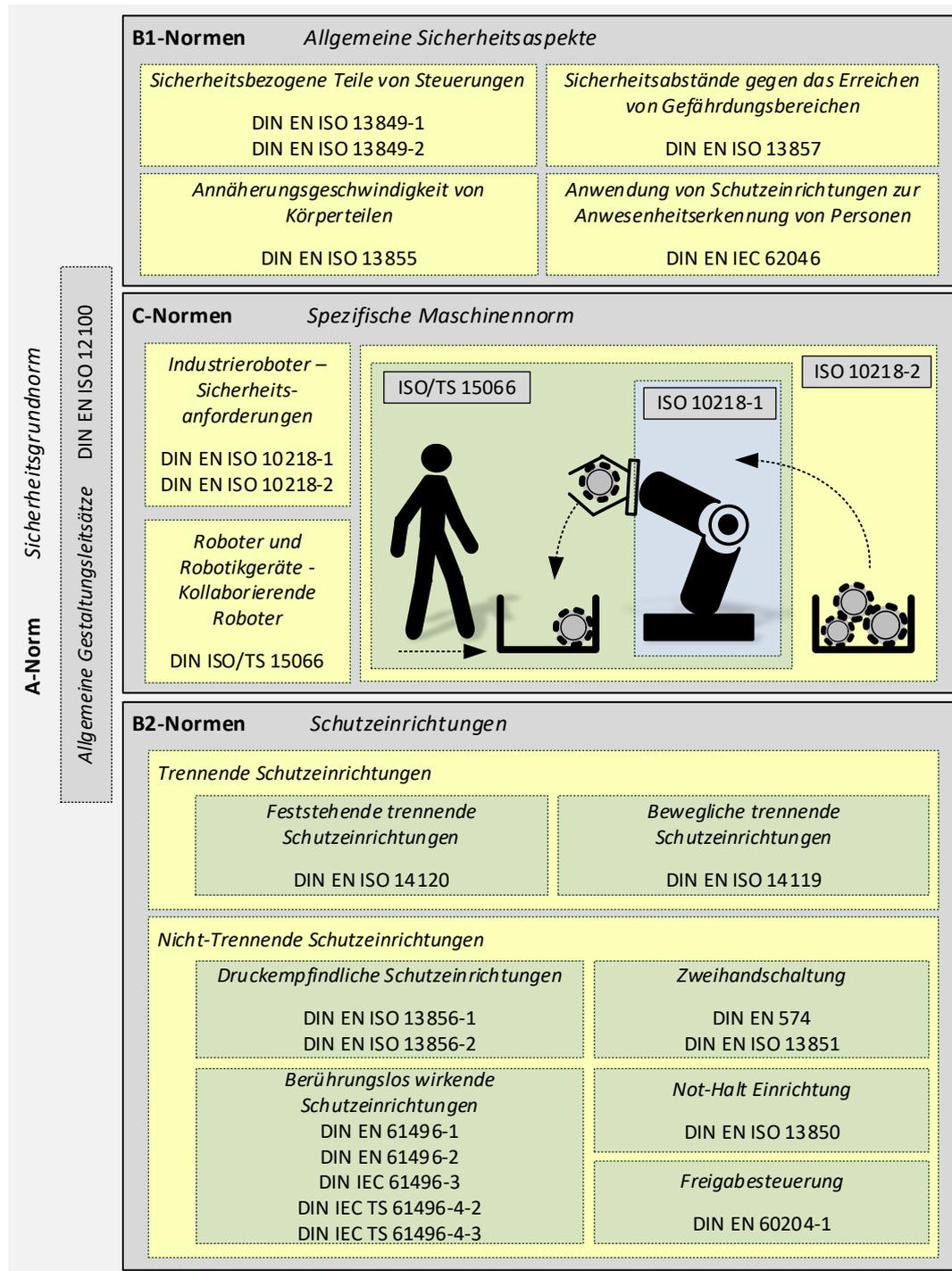


Abbildung 81: Wesentliche Normen für die Anwendung und Integration von Industrierobotern in MRK-Applikationen: B1-Normen definieren die allgemeinen Sicherheitsaspekte. Dies betrifft die Gestaltung und Evaluierung sicherheitsbezogener Steuerungen, die Bestimmung von einzuhaltenden Sicherheitsabständen, Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen und die Anwendung von Schutzeinrichtungen. Während die Norm ISO 10218-1 Anforderungen und Gestaltungsgrundsätze an einen Industrieroboter beschreibt, betrachtet die Norm ISO 10218-2 die gesamte Roboter-Applikation. Die technische Spezifikation ISO/TS 15066 widmet sich dabei der Nutzung eines gemeinsamen Arbeitsraumes von Mensch und Roboter beim kollaborierenden Roboterbetrieb. Die B2-Normen definieren die Anforderungen an Schutzeinrichtungen (trennend und nicht-trennend) zur Minderung potentieller Risiken in der Applikation.

A.2 Risikobeurteilung und Risikominderung

Gefährdungen und Risiken

Für die Umsetzung einer Applikation liegt der Fokus schließlich darauf, Gefährdungen bei der Herstellung einer Maschine durch Verwendung/Integration eines Roboters zu identifizieren, als Risiken zu bewerten und ggfs. durch entsprechende sicherheitstechnische Maßnahmen zu mindern. Gemäß Leitfaden §164 (Europäische Kommission 2020)) bezieht sich eine *Gefährdung* auf:

„[...] eine mögliche Quelle einer Schädigung. Das Vorhandensein einer Gefährdung ist eine inhärente Eigenschaft der Maschine und ist unabhängig davon, ob irgendeine Verletzung oder ein Gesundheitsschaden tatsächlich wahrscheinlich ist.“

Die Gefährdung bestimmt somit die Schwere der möglichen Verletzungen bzw. Gesundheitsschäden und bildet in Kombination mit der Wahrscheinlichkeit des Eintretens dieser Gefährdung schließlich das *Risiko*. Dazu steht unter anderem im Leitfaden (Europäische Kommission 2020) §168:

„An Maschinen können Gefährdungen bestehen, wenn aber keine Personen dieser Gefährdung ausgesetzt sind, besteht auch kein Risiko.“

Feststellung von Risiken - Risikobeurteilung

Zur Analyse und Einschätzung von Gefährdungen bzw. Risiken beschreibt die Maschinenrichtlinie entsprechende Grundsätze, die ein Hersteller einer Maschine unbedingt zu berücksichtigen hat. Dazu gehört die Durchführung einer *Risikobeurteilung* (gemäß Punkt 1),

„um die für die Maschine geltenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen zu ermitteln.“

Die Beurteilung der Risiken, sowie die Festlegung von Maßnahmen zur Minderung dieser Risiken stellen einen iterativen Prozess dar, wobei der Hersteller u. a. folgende Punkte zu berücksichtigen hat:

- *„die Gefährdungen, die von der Maschine ausgehen können, und die damit verbundenen Gefährdungssituationen zu ermitteln;“*
- *„die Risiken abzuschätzen unter Berücksichtigung der Schwere möglicher Verletzungen oder Gesundheitsschäden und der Wahrscheinlichkeit ihres Eintretens;“*
- *„die Risiken zu bewerten, um zu ermitteln, ob eine Risikominderung gemäß dem Ziel dieser Richtlinie erforderlich ist;“*
- *„die Gefährdungen auszuschalten oder durch Anwendung von Schutzmaßnahmen die mit diesen Gefährdungen verbundenen Risiken in der [...] festgelegten Rangfolge zu mindern.“*

Bei der Verwendung von Industrierobotern liegen üblicherweise Gefährdungen aufgrund der Roboterbewegung (z. B. Kollision) und durch den Einsatz von Werkzeugen (z. B. Fräsprozesse) vor. Abhängig von der Größe, Masse und Geschwindigkeit des Roboters, muss man von erheblichen schweren Verletzungen und Gesundheitsschäden beim Eintritt einer Kollision ausgehen. Die Eintrittswahrscheinlichkeit ist wiederum direkt vom Einsatzzweck des Roboters und der umgesetzten Applikation abhängig. Die Identifikation von Risiken ist somit vielschichtig und muss für jede Applikation individuell bewertet werden. Hierbei sind Applikationen, bei denen die Zusammenarbeit von Mensch und Roboter in einem gemeinsam genutzten Arbeitsbereich gefordert wird besonders betroffen, da die (meist geforderte) Anwesenheit des Menschen im Gefahrenbereich die Eintrittswahrscheinlichkeit erhöht.

Minderung der Risiken - 3-Stufen-Methode

Nach der Identifikation von Gefährdungen und deren Einschätzung hinsichtlich potentieller Risiken kann die Bewertung der Risiken zu dem Ergebnis kommen, dass Maßnahmen zur Risikominderung notwendig werden. In Abschnitt 1.1.2 der EG- Maschinenrichtlinie werden dazu die *Grundsätze für die Integration der Sicherheit* aufgeführt. Die unter *Punkt b)* festgelegten, risikomindernden Maßnahmen sind im Allgemeinen auch unter dem Begriff der *3-Stufen-Methode* bekannt, da die durchzuführenden Maßnahmen in der Reihenfolge ihrer Aufzählung abgearbeitet werden sollen. Die Grundsätze für die Integration der Sicherheit lauten:

- *„Beseitigung oder Minimierung der Risiken so weit wie möglich (Integration der Sicherheit in Konstruktion und Bau der Maschine);“*
→ **Unmittelbare Sicherheit** Durchführung aller konstruktiven und technischen Möglichkeiten, die eine Beseitigung der Gefährdung oder Minderung des Risikos an der Maschine nach sich ziehen. Diese unmittelbare Sicherheit ist damit fest in der Maschine integriert und somit unveränderbar.
- *„Ergreifen der notwendigen Schutzmaßnahmen gegen Risiken, die sich nicht beseitigen lassen;“*
→ **Mittelbare Sicherheit** Diese Maßnahmen vermindern das Risiko, indem die Wahrscheinlichkeit des Eintritts der Gefährdung verhindert oder reduziert wird (die Schwere der Verletzung bzw. Gesundheitsschäden beim Eintritt der Gefährdung bleibt bestehen).
- *„Unterrichtung der Benutzer über die Restrisiken aufgrund der nicht vollständigen Wirksamkeit der getroffenen Schutzmaßnahmen; Hinweis auf eine eventuell erforderliche spezielle Ausbildung oder Einarbeitung und persönliche Schutzausrüstung.“*
→ **Hinweisende Sicherheit** Weist nicht nur auf potentielle Gefährdungen hin, sondern beeinflusst auch die Verfügbarkeit der Anlage. Bspw. kann die Kenntlichmachung der Grenzen von einzuhaltenden Mindestabständen durch Markierungen eine zweckmäßige Maßnahme zur Verringerung von Stillstandzeiten von Anlagen darstellen.

A.3 Kenngrößen zur Bestimmung des Sicherheitsniveaus PL

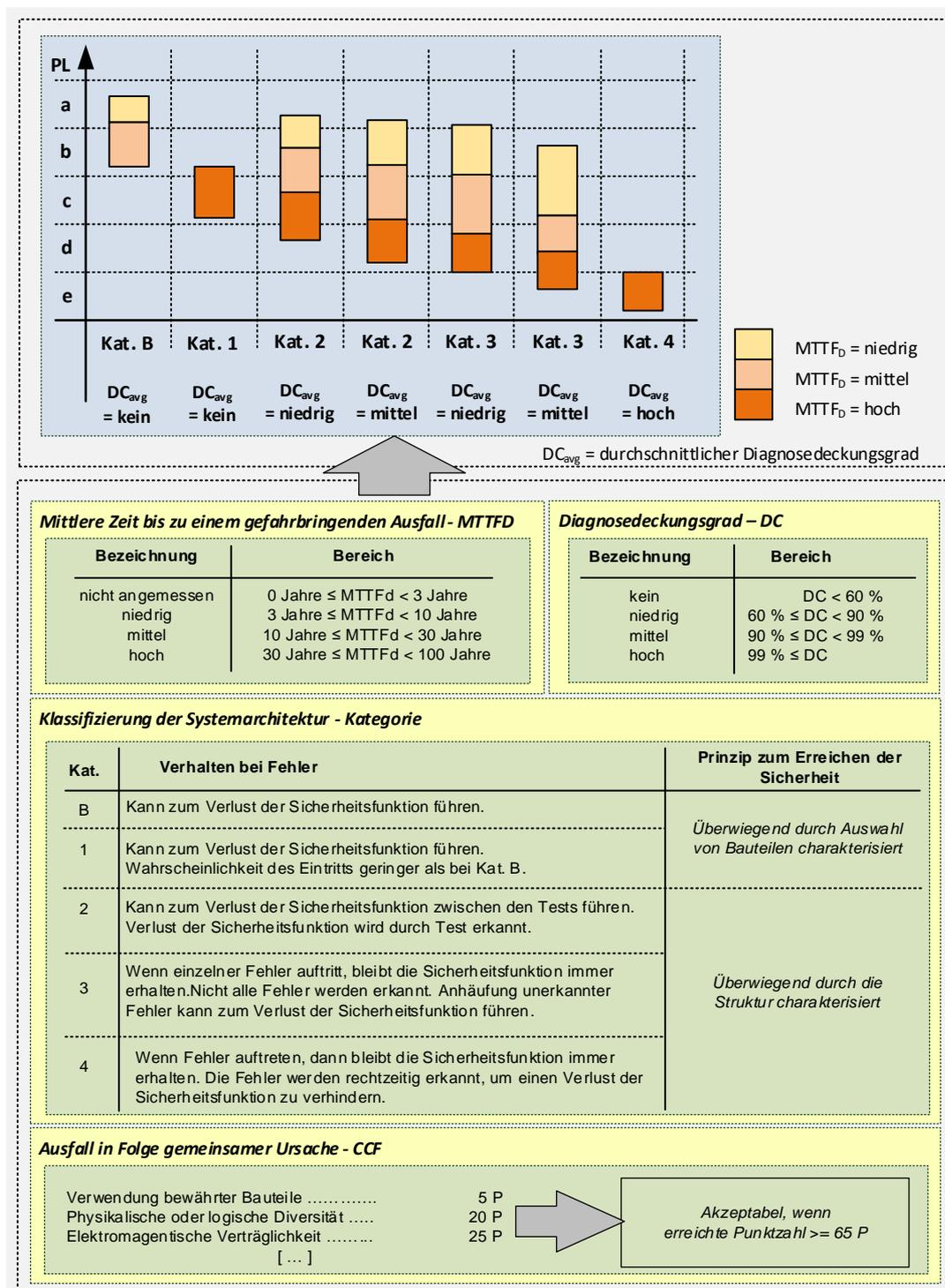


Abbildung 83: Die Bestimmung des erreichten Performance Levels (Sicherheitsniveau) einer Schutzeinrichtung basiert auf vier Kenngrößen bestehend aus CCF, DC_{avg}, MTTFD und Kategorie. Durch Anwendung des vereinfachten Verfahrens (Norm DIN EN ISO 13849-1) kann schließlich der erreichte PL anhand eines Diagrammes (oben) abgelesen werden.

A.4 Abstandsformel nach ISO/TS 15066

Beschreibung von Symbolen und deren Bedeutungen nach ISO/TS 15066.

Symbol	Beschreibung / Berechnung
$\mathcal{S}_p(t_0)$	Einzuhaltender Mindestabstand zum Zeitpunkt t_0
t_0	Aktueller Zeitpunkt
\mathcal{S}_h	<p>Weg, den der Mensch während der Reaktionszeit \mathcal{T}_r und Bremszeit \mathcal{T}_s des Robotersystems zurücklegt.</p> $\mathcal{S}_h = \int_{t_0}^{t_0+\mathcal{T}_r+\mathcal{T}_s} v_h(t) dt$ <p>Ist die Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit v_h des Menschen nicht messbar, kann dafür ein fester Wert von $1.6 \frac{m}{s}$ angenommen werden. \mathcal{S}_h wird dann wie folgt berechnet: $\mathcal{S}_h = 1.6 * (\mathcal{T}_r + \mathcal{T}_s)$</p>
\mathcal{S}_r	<p>Weg, den der Roboter während der Reaktionszeit \mathcal{T}_r zurücklegt.</p> $\mathcal{S}_r = \int_{t_0}^{t_0+\mathcal{T}_r} v_r(t) dt$ <p>Ist v_r während der Reaktionszeit nicht bestimmbar, kann die maximale Roboter- geschwindigkeit oder eine sicher überwachte Geschwindigkeit angenommen werden. Hierbei sind die Achsgeschwindigkeiten des Roboters zu berücksichtigen. \mathcal{S}_r kann dann wie folgt berechnet werden: $\mathcal{S}_r = v_r(t_0) * \mathcal{T}_r$</p>
\mathcal{S}_s	<p>Weg, den der Roboter während der Bremszeit \mathcal{T}_s zurücklegt.</p> $\mathcal{S}_s = \int_{t_0+\mathcal{T}_r}^{t_0+\mathcal{T}_r+\mathcal{T}_s} v_s(t) dt$ <p>Zu jedem Roboter müssen Informationen bzgl. der achsweisen Bremswege in Abhängigkeit der Ausladung, Traglast und Geschwindigkeit bereitgestellt werden (siehe (Norm DIN EN ISO 10218-1), Anhang B). Diese Werte können für \mathcal{S}_s verwendet werden.</p>
\mathcal{C}	Eindringabstand definiert das Eindringen eines Körperteils in den Gefahrenbereich vor Auslösen der Schutzeinrichtung
\mathcal{Z}_d	Positionsungenauigkeit des Menschen. Abhängig vom Detektionsvermögen des Überwachungssystems.
\mathcal{Z}_r	Positionsungenauigkeit des Robotersystems.
\mathcal{T}_r	Reaktionszeit des Robotersystems. Entspricht der Zeitdauer vom Zeitpunkt der Unterschreitung des Mindestabstandes bis zum Zeitpunkt der Aktivierung des Roboters- Stopps. Dies beinhaltet die Zeitdauer zur Detektion des Menschen durch das Überwachungssystem.
\mathcal{T}_s	Bremszeit des Roboters, ausgehend vom Zeitpunkt der Aktivierung des Stopps bis zum Zeitpunkt des Stillstands des Roboters. Die Bremszeit jeder einzelnen Roboterachse ist abhängig von der Ausladung, Traglast und deren Geschwindigkeit. Diese Informationen werden zu jedem Roboter bereitgestellt (siehe (Norm DIN EN ISO 10218-1), Anhang B).
v_h	Gerichtete Geschwindigkeit des Menschen in Richtung (eines gefahrbringenden Teils) des Roboters während \mathcal{T}_r und \mathcal{T}_s .
v_r	Gerichtete Geschwindigkeit (eines gefahrbringenden Teils) des Roboters in Richtung des Menschen während der Reaktionszeit \mathcal{T}_r .
v_s	Geschwindigkeit (eines gefahrbringenden Teils) des Roboters während \mathcal{T}_s
t	Integrations-Variable

B Anhang – Prüfungen an BWS

Überblick zu Maßnahmen und Prüfungen an eine BWS nach IEC 61496-4.

Anforderung	Beschreibung
Sicherheit BWS - Typ 3	<p>Detektion eines gefahrbringenden Ausfalls. Ein einzelner Fehler, der:</p> <ul style="list-style-type: none"> zum Verlust des Detektionsvermögens oder zu einem Anstieg der Reaktionszeit <p>führt, muss von dem VBPD innerhalb der festgelegten Reaktionszeit erkannt werden.</p>
Integrität des Detektions- vermögens	<p>Keine Verminderung des Detektionsvermögens durch Einflüsse, wie:</p> <ul style="list-style-type: none"> Position, Anzahl, Größe von Objekten im Überwachungsbereich Signalrauschen, Dynamikbereich, Dunkelstrom, etc. des Sensors Ungleichförmigkeit der Pixelempfindlichkeit des Sensors Alterung von Bauteilen Leistungsfähigkeit/ Einschränkungen optischer Bauteile Umgebungsbedingungen (Luftfeuchte, Licht, etc.) Oberflächenstrukturen auf dem Hintergrund
Funktions- prüfung	<ul style="list-style-type: none"> Reaktionszeit: Objekte mit $v = 1.6 \frac{m}{s}$ müssen innerhalb der Reaktionszeit detektiert werden Sensorfunktion: Anwendung von Funktionsprüfungen (A-, B-, C-Prüfung) unter üblichen und anomalen Umgebungsbedingungen
Objekt- erkennung	<p>Probekörper mit folgenden Eigenschaften:</p> <ul style="list-style-type: none"> maximales Detektionsvermögen (min. Durchmesser) Größe, Form (Kugel, Zylinder, Kegel), Farbe, Textur, Reflexionsgrad, etc. müssen derart gewählt werden, dass sie ungünstige Bedingungen darstellen
Lichtbeein- flussung	<p>VBPD muss im Normalbetrieb verbleiben, bei:</p> <ul style="list-style-type: none"> weiß strahlendem Licht Blitzleuchten Fluoreszenzlampen <p>VBPD darf nicht gefahrbringend ausfallen, bei:</p> <ul style="list-style-type: none"> Stroboskoplicht Laserstrahlen VBPD gleicher Bauart
Mechanische Einflüsse	<p>VBPD darf nicht gefahrbringend ausfallen, bei:</p> <ul style="list-style-type: none"> Schwingungen (Vibrationen), Schocken
Beeinflussung durch Ver- schmutzung	<p>VBPD darf nicht gefahrbringend ausfallen, bei Verschmutzung:</p> <ul style="list-style-type: none"> der optischen Frontscheibe resultierende Verschlechterung/ Verlust des Detektionsvermögens innerhalb des Überwachungsbereiches

C Anhang – Bewertungsergebnisse CCF

Checkliste zur Bewertung des A2S nach Norm ISO 13849-1, Anhang F.

Nr.	Maßnahme gegen CCF	A2S Punktzahl	Maximale Punktzahl
1	Trennung/Abtrennung		
	Physikalische Trennung zwischen den Signalpfaden	15	15
2	Diversität		
	Unterschiedliche Technologien/Gestaltung oder physikalische Prinzipien werden verwendet	20	20
3	Gestaltung/Anwendung/Erfahrung		
3.1	Schutz gegen Überspannung, Überdruck, Überstrom, Übertemperatur, usw.	kein	15
3.2	Verwendung bewährter Bauteile.	kein (teilweise erfüllt)	5
4	Beurteilung/Analyse		
	Für jedes Teil von sicherheitsbezogenen Teilen eines Steuerungssystems wurde eine Ausfallarten- und Effekt-Analyse durchgeführt und deren Ergebnisse berücksichtigt, um Ausfälle infolge gemeinsamer Ursache bei der Gestaltung zu vermeiden.	kein	5
5	Kompetenz/Ausbildung		
	Ausbildung der Konstrukteure, um die Gründe und Auswirkungen von Ausfällen infolge gemeinsamer Ursache zu verstehen.	5	5
6	Umgebung		
6.1	Für elektrische/elektronische Systeme, Verhindern von Verunreinigungen und elektromagnetischen Störungen (EMV) zum Schutz vor Ausfällen infolge gemeinsamer Ursache entspr. den einschlägigen Normen (z. B. IEC 61326-3-1)	25	25
6.2	Andere Einflüsse: Berücksichtigung der Anforderungen hinsichtlich Unempfindlichkeit gegenüber allen relevanten Umgebungsbedingungen wie Temperatur, Schock, Vibration, Feuchte (z. B. wie in den zutreffenden Normen festgelegt).	10	10
	Gesamt	75	Max. 100

D Anhang – Abbildungsmatrix

Berechnete Anzahl ψ verdeckter Bildpunkte im ^{AZ} in Abhängigkeit von Objektbreite und Objekthöhe über der Projektionsoberfläche.

		Objektbreite in [mm]						
		2	4	6	8	10	12	14
Objekthöhe in [mm]	ψ in [Bildpunkten]							
	10	1.79	3.57	5.36	7.15	8.94	10.73	12.52
	50	1.83	3.67	5.50	7.34	9.18	11.01	12.85
	100	1.89	3.79	5.69	7.59	9.49	11.39	13.29
	250	2.11	4.22	6.34	8.45	10.57	12.68	14.80
	500	2.60	5.21	7.82	10.43	13.04	15.65	18.26
	750	3.40	6.80	10.21	13.61	17.02	20.42	23.82
	1000	4.89	9.79	14.69	19.58	24.48	29.38	34.28
	1250	8.72	17.45	26.17	34.90	43.62	52.35	61.07
1500	39.94	79.89	119.83	159.78	199.73	239.67	279.62	

Verzeichnis der Abkürzungen

Abkürzung	Beschreibung
A2S	Aktives 2D-Sensorprinzip
ASK	Amplitude Shift Keying
AZ	Aktuelles Zustandsbild
BA	Bildfolgeauswertung
BS	Background Subtraction
CMOS	Complementary Metal-Oxide Semiconductor
CCD	Charge-coupled Device
CCF	Common Cause Failure (ISO 13849-1)
DC	Diagnostic Coverage (ISO 13849-1)
DOF	Degree of freedom
EZ	Erwartetes Zustandsbild
ICD	Image Change Detection
ISO	International Organization for Standardization
RI	Referenzinformationen
KOS	Koordinatensystem
LIN	Linear- Bewegung eines Roboters
MRK	Mensch-Roboter Kooperation
NIR	Nahinfrarot
OCC	Optical Camera Communication
OOK	On Off Keying
OWC	Optical Wireless Communication
PL	Performance Level (ISO 13849-1)
PTP	Point-to-Point- Bewegung eines Roboters
RC	Regionencluster
RZC	Raumzeitliche Codierung
SR	Schutzraum
SRK	Schutzraumkonfiguration
SRR	Schutzraumregionen
SRS	Schutzraumsequenz
SSM	Speed and separation monitoring (Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung)
TCP	Tool Center Point
ToF	Time-of-Flight (Lichtlaufzeit)
TS	Technische Spezifikation
QE	Quanteneffizienz

Symbolverzeichnis

Symbol	Beschreibung
A_i	Achse i eines Roboters
\hat{A}_t	Achsstellungen eines Roboters zum aktuellen Zeitpunkt t
\hat{A}_{t^*}	Achsstellungen eines Roboters zum zukünftigen Zeitpunkt t^*
\mathbb{C}	Code in Bezug auf Bildpunkten oder Regionen
C	Kamera
\mathcal{C}	Konstanter Zuschlag abhängig vom Sensor-Detektionsvermögen [m]
\mathcal{C}_H	Konstanter Weg des Menschen in [m]
c_x, c_y	Bildhauptpunkt bzgl. x- und y-Koordinate in [<i>Bildpunkten</i>]
\mathcal{D}_t	Geometrischer Kollisionsraum zum Zeitpunkt t
E	Entität (z. B. Kamera, Lichtmodulator, Projektionsfläche, Objekt)
\mathbb{E}	Ebene, Projektionsoberfläche
\mathcal{E}	Ausladung des Roboters
ε	Binäre Repräsentation eines Codezeichens
e	Epipolarebene
F	Geometrische Form
\mathcal{F}	Traglast des Roboters
f_x, f_y	Brennweite bzgl. x- und y-Koordinate in [<i>Bildpunkten</i>]
\mathcal{G}	Schutzraumkonfiguration
\mathcal{H}	Intrinsische Matrix, interne Projektionsmatrix
${}^c I$	Intensitätsbild einer Kamera
${}^c I_t$	Intensitätsbild einer Kamera zum Zeitpunkt t
${}^L I$	Intensitätsbild des Lichtmodulators
${}^L I_t$	Intensitätsbild des Lichtmodulators zum Zeitpunkt t
\mathcal{J}	Zeitliche Abfolge an Intensitätsbildern I
K_W	Weltkoordinatensystem (Basis-Koordinatensystem)
K_E	Koordinatensystem einer Entität
\mathcal{K}_H	Geschwindigkeit des Menschen in [m/s]
\mathcal{K}_R	Gelenkgeschwindigkeiten des Roboters in [rad/s]
k_i	Verzerrungskoeffizienten für die radiale Verzerrung
L	Lichtmodulator
\mathcal{M}	Projektionsmatrix, Kameramatrix
M_C	Bildbreite des Intensitätsbildes der Kamera ${}^c I$ in [<i>Bildpunkten</i>]
M_L	Bildbreite des Intensitätsbildes des Lichtmodulators ${}^L I$ in [<i>Bildpunkten</i>]
N_C	Bildhöhe des Intensitätsbildes der Kamera ${}^c I$ in [<i>Bildpunkten</i>]
N_L	Bildhöhe des Intensitätsbildes des Lichtmodulators ${}^L I$ in [<i>Bildpunkten</i>]
\mathcal{O}	Einzelnes Primitiv, Kollisionsprimitiv
\mathcal{O}^{A_i}	Einzelnes Primitiv einer Achse A_i

\hat{O}	Menge an Primitiven zur Modellierung eines Objektes
\hat{O}^{A_i}	Menge an Primitiven zur Modellierung einer Achse A_i
\hat{O}^R	Menge an Primitiven zur Modellierung eines Roboters R
\bar{O}^R	Menge an vergrößerten Primitiven von \hat{O}^R
\bar{O}_t^R	Menge an vergrößerten Primitiven von \hat{O}^R zum Zeitpunkt t
$\bar{O}_{t_\theta}^R$	Menge an vergrößerten Primitiven von \hat{O}^R zu den Zeitpunkten t_θ
P	3-dimensionaler Punkt
p_i	Verzerrungskoeffizienten für die tangentielle Verzerrung
\hat{p}^E	Vektor bzgl. E in homogenen Koordinaten
\hat{p}^W	Vektor bzgl. W in homogenen Koordinaten
\mathcal{Q}	Regionencluster bestehend aus 2×2 Schutzraumregionen r
R	Roboter
${}^W R_E$	Rotationsmatrix von E bzgl. W
\mathcal{R}	Schutzraumregionen
r	Spezifische Schutzraumregion, $r \in \mathcal{R}$
S	Schutzraum-Sequenz
$\mathcal{S}, \mathcal{S}_p$	Mindestabstand/ Sicherheitsabstand gemäß Abstandsformel aus ISO/TS 15066
\mathcal{S}_c	Konstanter Anteil von \mathcal{S}
\mathcal{S}_D	Dynamischer Anteil von \mathcal{S}
\mathcal{S}_R	Zurückgelegter Roboterweg während $\mathcal{T}_r + \mathcal{T}_s$ bis zum Stillstand
\mathcal{S}_H	Zurückgelegter Weg des Menschen während Bremszeit \mathcal{T}_s
\mathcal{S}_s	Bremsweg des Roboters
\mathcal{S}_h	Zurückgelegter Weg des Menschen während Reaktionszeit \mathcal{T}_r und Bremszeit \mathcal{T}_s
\mathcal{S}_r	Zurückgelegter Weg des Roboters während Reaktionszeit \mathcal{T}_r
s_i	3D-Punkte einer Schutzraum-Sequenz
T	Transformationsmatrix
${}^W T_E$	Transformationsmatrix von E bzgl. W
\mathcal{T}_s	Bremszeit des Roboters
\mathcal{T}_r	Reaktionszeit des Gesamtsystems in [s]
\mathcal{T}_c	Belichtungszeit der Kamerabildaufnahme
\mathcal{T}_L	Zeitdauer der Bildprojektion
\mathcal{T}_Z	Verarbeitungszeit zur Generierung des ${}^A Z$
\mathcal{T}_V	Bestimmung Verletzungssignal ϕ (Verletzungstest)
t	Aktueller Zeitpunkt
t^*	Zukünftiger Zeitpunkt
Δt	Zeitdauer
${}^W t_E$	Translationsvektor von E bzgl. W
\mathcal{V}	Schutzraum, durch Emissions- und Reflexionsstrahlen gebildet
W	Welt
${}^A Z$	Aktuelles Zustandsbild

${}^E Z$	Erwartetes Zustandsbild
δ	Binärer Zustand einer Schutzraumregion (aktiv/inaktiv) [0,1]
φ_i	Spezifischer Gelenkwinkel einer Roboterachse
ω_i	Spezifische Gelenkgeschwindigkeit einer Roboterachse
ϕ	Binäres Verletzungssignal (positiv/negativ) [0,1]
v_ψ	Abweichungsvektor von Regionen bei der Objekteindringung in [<i>Bildpunkten</i>]
τ	Segmentierungsschwellwert zur Bestimmung signifikanter Differenzen
ψ	Größe eines Objektes in [<i>Bildpunkten</i>] im Kamerabild
ψ_{min}	Minimale Größe eines Objektes in [<i>Bildpunkten</i>]
ψ_k	Korrigierte Größe eines Objektes in [<i>Bildpunkten</i>] aufgrund von Abbildungsfehlern, Grauwert-Interpolation, Tiefenunschärfe

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Piktografische Darstellung der Arten einer Zusammenarbeit von Mensch und Roboter nach (Behrens et al. 2015).	8
Abbildung 2: Piktografische Darstellung der vier Methoden einer Kollaboration von Mensch und Roboter gemäß (Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066): Von links nach rechts: „Sicherheitsbewerteter überwachter Halt“, „Handführung“, „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“, „Leistungs- und Kraftbegrenzung“	9
Abbildung 3: Abhängigkeit zwischen der Art der Zusammenarbeit und den vier Methoden der MRK gemäß (Behrens et al. 2015).	11
Abbildung 4: Schematische Darstellung der zurückgelegten Wege von Mensch und Roboter vom Zeitpunkt des Unterschreitens des Mindestabstandes bis zum Zeitpunkt des Roboter-Stillstandes.	14
Abbildung 5: Reaktionszeit-Weg-Diagramm. In Abhängigkeit der Reaktionszeit T_r werden die zurückgelegten Wege von Mensch und Roboter für verschiedene Geschwindigkeiten veranschaulicht.	15
Abbildung 6: Einzuhaltende Mindestabstände bei orthogonaler (links) und paralleler Annäherung (rechts) des Menschen bezüglich der Schutzfeldausrichtung einer BWS (z. B. Lichtgitter).	15
Abbildung 7: Darstellung des Zuschlages C in Abhängigkeit der Detektionsauflösung d der Schutzeinrichtung bei orthogonaler Annäherung.	16
Abbildung 8: Darstellung des Zuschlages C in Abhängigkeit der Höhe H der Schutzeinrichtung bei paralleler Annäherung.	17
Abbildung 9: Bei der Verwendung und Integration von Robotern müssen alle Risiken mit Hilfe der Risikobeurteilung und Risikominderung auf ein akzeptables Restrisiko reduziert wurden.	18
Abbildung 10: Venn-Diagramm: Kanalisierung des aktuellen Standes der Wissenschaft hinsichtlich globaler, nicht-trennender Schutzeinrichtungen mit dynamischen Sicherheitsabständen.	29
Abbildung 11: Verfahren zur Detektion von Kollisionen zwischen Roboter und unbekanntem Objekten aus Perspektive einer Kamera. Aus (Henrich und Gecks 2008). Copyright © 2008, IEEE.	30
Abbildung 12: Links: Spezifische Kleidung zur Detektion des Werkers. Mitte: MRK-Arbeitsplatz. Rechts: Detektion des Menschen am Arbeitsplatz. Aus (Tan und Arai 2011). Copyright © 2011, IEEE. 31	
Abbildung 13: Links: Bestimmung der minimalen Distanz von Objekten zu einem Kontrollpunkt (Control Point) auf Basis eines Tiefenbildes. Rechts: KUKA LBR wird durch mehrere Kontrollpunkte zur Distanzbestimmung repräsentiert. Aus (Flacco et al. 2012). Copyright © 2012, IEEE.	32
Abbildung 14: Links: Sensorsystem bestehend aus ToF- und Stereo-Kamera. Mitte: Sensorische Erfassung des Menschen. Rechts: Verletzung des Gefahrenraumes. Copyright © 2012, IFF. ..	33
Abbildung 15: Absicherung eines Kooperationsarbeitsplatzes mit Schwerlastroboter durch Verwendung ortsauflösender Trittmatten. Dynamische Bestimmung und Visualisierung der Schutzzonen (grün – begehbar, gelb – Geschwindigkeitsreduktion, rot – Bewegungsstopp). Aus (Vogel und Elkmann 2017), Copyright © 2017, ACM.	34
Abbildung 16: Links: System zur Absicherung der Koexistenz von Mensch und Roboter im gemeinsamen Arbeitsraum. Rechts: Verfahren zur Detektion von unbekanntem Objekten (z. B. Mensch) auf Basis der 3D-Punktwolken von zwei Microsoft Kinects. Aus (Wang 2012), Copyright © 2012, IEEE.	35

Abbildung 17: Strategien zur Einhaltung von Mindestabständen. Links: Bestimmung und Überprüfung von Distanzen/Abständen zwischen Mensch und Roboter. Rechts: Bestimmung und Überwachung eines Schutzraumes, welcher die einzuhaltenden Mindestabstände repräsentiert.	37
Abbildung 18: Schematische Darstellung des Verarbeitungsablaufes bei der Distanzüberwachung ...	39
Abbildung 19: Schematische Darstellung des Verarbeitungsablaufes bei der Schutzraumüberwachung.	39
Abbildung 20: Klassifikation der Sensortechnologien in aktive und passive Systeme.	40
Abbildung 21: Vorteile bestehender 2D-Kameratechnik erweitert um eine eigene aktive Beleuchtung zur Umsetzung eines neuartigen aktiven 2D-Sensorprinzips. Punkteverteilung gemäß Bewertungsmatrix in Tabelle 18.	50
Abbildung 22: Priorisierung der Anforderungen und Ableitung der Schwerpunkte in dieser Arbeit. Der Fokus der Arbeit liegt auf den Anforderungen „Funktionale Sicherheit“, „Dynamische Sicherheitsabstände“ und „Maximale Verfügbarkeit“.....	53
Abbildung 23: Erweiterung des Standes von Wissenschaft und Technik um ein optisches Sensorsystem auf Basis des Fail Safe Prinzips „Ruhestromprinzip“ zur 3D-Raumüberwachung.	60
Abbildung 24: Schematische Darstellung zur Adaption des Funktionsprinzips. (a) Einzelanordnung zur 1D-Strahlüberwachung. (b) parallele, eindimensionale Anordnung zur 2D-Flächenüberwachung. (c) parallele, zweidimensionale Anordnung zur 3D-Raumüberwachung.	61
Abbildung 25: Adaption des Prinzips eines Lichtschranken-Array auf ein 3D-Sensorprinzip. (a) Sensorprinzip besteht aus einem Lichtmodulator und Kameratechnik. (b) (De-)Aktivierung von Pixeln des Lichtmodulators zur Anpassung des abzusichernden Bereiches (c) Einzelpunktprojektion entspricht dem Prinzip einer einzelnen Reflexlichtschranke.....	63
Abbildung 26: Auswirkungen verschiedener Oberflächeneigenschaften auf die Streuung der reflektierten Strahlung und resultierender Kameraerfassung (nach (Beyerer et al. 2016), S.87). (a) Perfekt spiegelnde Reflexion. (b) Schwach spiegelnde Reflexion. (c) Lambert'sche Streuung.	64
Abbildung 27: Varianten eines Schutzraumes mit unterschiedlicher Schutzraumkonfiguration: (a) Punktförmig (b) Offener Polygonzug (c) Geschlossener Polygonzug. Der Strahlengang ausgehend vom Lichtmodulator bis zur Erfassung durch die Kamera wird zwischen Emissionsstrahl und Reflexionsstrahl unterschieden.	65
Abbildung 28: Links: Eine SRK G bestehend aus kreisrunden Formen F_i . Rechts: Konvexe Hülle über G bildet die Schutzraumsequenz S . Aus (Vogel et al. 2013), Copyright © 2013, IEEE.	66
Abbildung 29: Schematische Darstellung der Architektur des A2S bestehend aus Hardware- und Softwarekomponenten und deren Beziehungen zueinander. Abbildung in Anlehnung an (Vogel et al. 2013).	67
Abbildung 30: Schematische Darstellung des Verarbeitungsprozesses (am Roboter beginnend).	68
Abbildung 31: Schematische Darstellung der geometrischen Beziehungen mit Koordinatensystemen.	69
Abbildung 32: Repräsentation relevanter Objekte als 3D-Modelle in Form geometrischer Kollisionsprimitive. Kinematisches Robotermodell bestehend aus Kugeln und Zylindern (rotes Drahtgittermodell). Werkstück als Kugel (blaues Drahtgittermodell. Projektionsoberfläche als Ebene (gelb). Rechts: Überblendung der Szene mit realem Kamerabild. Aus (Vogel et al. 2015), Copyright © 2015, IEEE.....	71

Abbildung 33: Zentralprojektive Abbildung eines Primitives O auf die Projektionsfläche \mathbb{E} mit dem Projektionszentrum L und der resultierenden Form $F(O)$ auf \mathbb{E}	77
Abbildung 34: Ablauf zum Greifen eines Objektes per Schutzraumfusion. (a) Zusätzliche Darstellung und Überwachung eines objektspezifischen Schutzraumes \mathcal{VO} . (b) Annäherung des Roboter-Schutzraumes \mathcal{VR} an Objekt-Schutzraum \mathcal{VO} während der Roboterbewegung. (c) Fusion der Schutzräume \mathcal{VR} und \mathcal{VO} bei Überschneidung/ Überlagerung der Schutzräume. Eine Separierung der Schutzräume erfolgt in umgekehrter Reihenfolge.	78
Abbildung 35: Algorithmus zur Bestimmung einer den Roboter minimal umschließenden SRS S_{res} . ..	80
Abbildung 36: Strukturdiagramm zur hierarchischen Darstellung wesentlicher Komponenten.	81
Abbildung 37: Blockdiagramm der sicherheitsgerichteten Architektur des A2S mit Unterscheidung zwischen funktional-sicheren Komponenten (gelb) und nicht-sicheren Komponenten (grau). ..	84
Abbildung 38: Links: Versuchsstand zur Evaluierung des entwickelten Verfahrens zur Bestimmung dynamischer Mindestabstände bzw. Schutzräume. Rechts: Interne Modellierung des Industrieroboters KUKA LBR4+ aus den geometrischen Primitiven „Kugel“ und „Zylinder“. Aus (Vogel et al. 2015). Copyright © 2015, IEEE.	86
Abbildung 39: Darstellung fünf spezifischer Roboterkonfigurationen mit resultierender Schutzraumsequenz. Schutzraumsequenz umschließt den Roboter als konvexe Hülle minimal.	86
Abbildung 40: Darstellung zweier Bewegungsabläufe. Obere Bildreihe: PTP-Roboterbewegung von links nach rechts. Untere Bildreihe: Linear-Roboterbewegung aus Mittelstellung nach unten rechts.	87
Abbildung 41: Bildreihe zur Fusion der Schutzräume von Roboter und Objekt. Die untere Bildreihe veranschaulicht die verwendeten Kollisionsprimitive zur Modellierung von Roboter und Objekt.	87
Abbildung 42: Transport eines Objektes durch Kopplung des Objekt-Primitives an die kinematische Kette (TCP) des Roboters. Der Fusionsalgorithmus generiert die lückenlose und minimal umschließende Schutzraumsequenz.	88
Abbildung 43: Transport eines länglichen Objektes. Der Fusionsalgorithmus bildet auf Basis der objektspezifischen Kollisionsprimitive eine minimale, den Roboter und Objekt umschließende Schutzraumsequenz. Aus (Vogel et al. 2015). Copyright © 2015, IEEE.	88
Abbildung 44: MRK-Arbeitsplatz bestehend aus den Stationen „Bauteilablage“ und „Bauteilbearbeitung“. Die Stationen werden durch separate Schutzräume abgesichert, um den Zugang des Roboters zu den Stationen zu erlauben. Bei Deaktivierung der Stations-Schutzräume wird der Zugriff des Menschen erlaubt währenddessen der Roboter weiter überwacht wird. Aus (Vogel et al. 2015). Copyright © 2015, IEEE.	89
Abbildung 45: Kamera-Intensitätsbilder des Überwachungsbereiches mit darin befindlichen Objekten (Werkzeuge, Werkstücke) und Glanzlicht bzw. Schatten aufgrund von Fremdlicht. Die weiße Schutzraum-Linie trennt den Roboter-Arbeitsbereich/Gefahrenbereich (untere Bildhälfte) vom Arbeitsbereich des Menschen (obere Bildhälfte). Rechts: Die Position einzelner Objekte und die Beleuchtung ändern sich gegenüber dem linken Bild.	93
Abbildung 46: Intensitätswerte entlang der Zeile 300 (Bildmitte) der beiden Kamerabilder aus Abbildung 45. Blaue Markierungen kennzeichnen Bildpunkte mit abgebildeten Emissionsstrahlen des Schutzraumes. Links: Bildpunkte mit abgebildeten Emissionsstrahlen sind deutlich erkennbar (Idealfall). Rechts: Bildpunkte mit abgebildeten Emissionsstrahlen unterscheiden sich von anderen Bildpunkten nicht.	95

Abbildung 47: Schematische Darstellung der Systemarchitektur mit Hard- und Softwaremodulen sowie Datenflüssen. Kern des Verfahrens bilden die drei Hauptkomponenten „Raumzeitliche Codierung“, „Bildfolgeauswertung“ und „Ground Truth- Bestimmung“.	97
Abbildung 48: Diskretisierung des Überwachungsbereiches in quadratische Schutzraumregionen \mathcal{R} .	100
Abbildung 49: Quantisierung einer SRS S zur Bestimmung der erforderlichen SRR $\mathcal{R}(S)$ mit Hilfe von quadratischen Regionenclustern \mathcal{Q} . Abbildung in Anlehnung an (Vogel et al. 2021).	102
Abbildung 50: Verfahren zur Bestimmung des AZ einer Kamera C .	104
Abbildung 51: Verwendung einer virtuellen Kamera C zur Normalisierung der SRR im Kamerabild.	104
Abbildung 52: Resampling des Kamerabildes der realen Kamera C (links) aus Perspektive der virtuellen Kamera C (rechts). Normalisierung der Schutzraumregionen und Reduzierung der Bildinformationen im virtuellen Kamerabild. (Zur Verbesserung der Sichtbarkeit wurde die Bildhelligkeit um 50 % erhöht.)	105
Abbildung 53: Generierung des AZt (rechtes Bild) auf Basis zweier zeitlich aufeinanderfolgender Kamerabilder I_t (linkes Bild) und I_{t+1} (mittleres Bild). Die drei verschiedenen Grautöne der Bildpunkte im AZt repräsentieren die extrahierten Codes: schwarz \rightarrow 01; weiß \rightarrow 10; grau \rightarrow 00	106
Abbildung 54: Verfahren zur Bestimmung des erwarteten Zustandsbildes EZ einer Kamera C .	108
Abbildung 55: Erwartetes Zustandsbild EZ (rechts) bestehend aus Schutzraumregionen mit zwei unterschiedlichen Codes (weiße und schwarze SRR). EZ (rechts) korrespondiert mit dem AZ (links).	109
Abbildung 56: Schematische Darstellung der zwei Varianten bzgl. der Unterbrechung des Strahlenganges durch ein Objekt. Darstellung (a): Unterbrechung der Reflexionsstrahlen (Kamerasichtstrahlen). Darstellung (b): Unterbrechung der Emissionsstrahlen (Projektionsstrahlen).	113
Abbildung 57: Links: Objekteindringung in den Schutzraum durch Unterbrechung der Reflexionsstrahlen (Kamerasichtstrahlen). Resultierendes AZ (Mitte) und entsprechendes EZ (rechts).	113
Abbildung 58: Links: Objekteindringung in den Schutzraum durch Unterbrechung der Emissionsstrahlen (Projektionsstrahlen). Resultierendes AZ (Mitte) und entsprechendes EZ (rechts).	114
Abbildung 59: Komplanarität: Lichtmodulator, Kamera und Objekt liegen in einer Epipolarebene e .	114
Abbildung 60: Eindringung eines Objektes (links) und resultierende Verschiebung von Bildpunkten x sowie deren extrahierter Code \mathbb{C}_x im AZ (Mitte) gegenüber dem entsprechenden EZ (rechts).	115
Abbildung 61: Lichtdurchlässigkeit von Objekten und der Einfluss auf die Detektierbarkeit des A2S.	115
Abbildung 62: In den Schutzraum eindringendes, transparentes Objekt (links) führt zu keiner Unterbrechung der Emissions- oder Reflexionsstrahlen im Kamerabild (Mitte). Das resultierende AZ (rechts) stimmt mit dem entsprechenden EZ überein.	116
Abbildung 63: Die Unterbrechung der Reflexionsstrahlen durch ein transluzentes Objekt (links) führt zu einer diffus gestreuten und somit unscharfen Abbildung der codierten SRR im Kamerabild (Mitte). Somit ist keine eindeutige Extraktion der SRR und entsprechender Codes im AZ (rechts) möglich. Das AZ stimmt nicht mit dem EZ überein.	116

Abbildung 64: Spiegelnde Objekte unterscheiden sich bzgl. der Detektierbarkeit nicht von anderen opaken Objekten. Die Schutzraumeindringung (links) führt zu einer Unterbrechung der Emissions- oder Reflexionsstrahlen im Kamerabild (Mitte), was in einer Abweichung zwischen AZ (rechts) und zugehörigem EZ resultiert.	117
Abbildung 65: Überwachung eines statischen Schutzraumes ohne Objekteindringung (links) und mit Eindringung (rechts) eines Objektes (14 mm Durchmesser). Die vorliegende Beleuchtungsstärke E_v wird mit dem Luxmeter eurolite® LM-200 unmittelbar neben dem Schutzraum gemessen.	119
Abbildung 66: Beleuchtungseinrichtungen zur Änderung der Beleuchtungsstärke in der Umgebung. Links: Halogenlampe (HEDLER® H25s), Mitte: Leuchtstoffröhre (OSRAM® Lumilux). Rechts: LED-Stroboskop (cameo® THUNDER).	119
Abbildung 67: Überwachter Schutzraum (links) und das resultierende AZ (rechts) bei einfallendem Sonnenlicht (20.000 lx – 25.000 lx). Die codierten SRR werden zuverlässig extrahiert.	120
Abbildung 68: Überwachter Schutzraum (links) und das resultierende AZ (rechts) bei einer Beleuchtungsstärke über 75.000 lx. Die codierten SRR werden nicht mehr vollständig extrahiert.	121
Abbildung 69: Überwachter Schutzraum (links) und das resultierende AZ (Mitte, rechts) bei einer hoch-dynamischen Fremdlichtänderung durch Blitzlicht. In Abhängigkeit des Zeitpunktes der Störung werden die Codes der betroffenen SRR falsch extrahiert.	121
Abbildung 70: Überblick zu Datenübertragung und -verarbeitung sowie zu den Zykluszeiten des Robotersystems, der Sensorkomponenten und der Auswerteeinheit.	125
Abbildung 71: Sequenzdiagramm zur Veranschaulichung der zeitlichen Abfolge von Verarbeitungsprozessen innerhalb und zwischen den einzelnen Software-Modulen (vgl. Abbildung 70).	127
Abbildung 72: Links: MRK-Versuchsstand bestehend aus Roboter-Arbeitsraum mit Industrieroboter KUKA KR10, Schutzwänden an drei Seiten und einem von Mensch und Roboter gemeinsam nutzbaren MRK-Interaktionsbereich. Rechts: A2S-Sensorsystem, welches aus zwei Kameras und einem Lichtmodulator besteht und direkt über dem MRK-Interaktionsbereich angebracht wurde.	128
Abbildung 73: Kalibrierprozedur zur Bestimmung der intrinsischen Parameter des Lichtmodulators durch freie Positionierung mit Hilfe eines Industrieroboters. Links: Erfassung des projizierten Punktmusters aus Kamerasicht. Rechts: Virtuelle Ansicht zur Überprüfung der bestimmten intrinsischen Parameter.	131
Abbildung 74: Links: Extraktion der SRR (Größe von 10 mm × 10 mm) im AZ mit einer Größe von $9 \pm 1 \times 9 \pm 1$ Bildpunkten. Zwischen benachbarten Regionen existiert ein Totbereich $\psi d = 1 \pm 1$ Bildpunkten. Rechts: Die zugehörigen SRR im EZ mit einer Größe von $5(+1) \times 5(+1)$ Bildpunkten und einem Toleranzbereich $\psi t = 3(+1)$ Bildpunkten zwischen benachbarten Regionen zur Steigerung der Robustheit.	132
Abbildung 75: Bild 1: Testobjekt mit 12 mm Durchmesser wurde in einer Höhe von 100 mm über der Projektionsoberfläche in den Schutzraum zur Unterbrechung der Reflexionsstrahlen (keine Unterbrechung der Emissionsstrahlen) eingebracht. Bild 2: Graustufen-Kamerabild der linken Kamera. Bild 3: Entsprechendes aktuelles Zustandsbild AZ. Bild 4: Entsprechendes erwartetes Zustandsbild EZ.	134

Abbildung 76: Auswirkungen auf den Strahlengang der Reflexionsstrahlen bei einer Unterbrechung der Emissionsstrahlen durch ein Objekt in unterschiedlichen Abständen zur Projektionsoberfläche.	134
Abbildung 77: Pixelbasierte Veränderung (Worstcase) von Regionen bei der Objekteindringung und entsprechender Unterbrechung der Emissionsstrahlen. Zwischen den Regionen besteht ein maximaler Toleranzbereich von 4 Bildpunkten. Verschiebung der Regionen r2 und r3 ohne Totbereich (a), (b) und mit Totbereich (c), (d) zwischen den Regionen.	135
Abbildung 78: Bild 1: Unterbrechung der Emissionsstrahlen durch ein ebenes Objekt in einer Höhe von 14 mm über der Projektionsoberfläche. Bild 2: Graustufen-Kamerabild der linken Kamera. Bild 3: Entsprechendes aktuelles Zustandsbild AZ. Bild 4: Entsprechendes erwartetes Zustandsbild EZ.	136
Abbildung 79: Darstellung des zeitlichen Ablaufes zur Detektion einer Schutzraumeindringung.	137
Abbildung 80: Zusammenhänge der EG- Richtlinien, Gesetze und Normen. In Anlehnung an (Sick AG 2017).	147
Abbildung 81: Wesentliche Normen für die Anwendung und Integration von Industrierobotern in MRK-Applikationen: B1-Normen definieren die allgemeinen Sicherheitsaspekte. Dies betrifft die Gestaltung und Evaluierung sicherheitsbezogener Steuerungen, die Bestimmung von einzuhaltenden Sicherheitsabständen, Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen und die Anwendung von Schutzeinrichtungen. Während die Norm ISO 10218-1 Anforderungen und Gestaltungsleitsätze an einen Industrieroboter beschreibt, betrachtet die Norm ISO 10218-2 die gesamte Roboter-Applikation. Die technische Spezifikation ISO/TS 15066 widmet sich dabei der Nutzung eines gemeinsamen Arbeitsraumes von Mensch und Roboter beim kollaborierenden Roboterbetrieb. Die B2-Normen definieren die Anforderungen an Schutzeinrichtungen (trennend und nicht-trennend) zur Minderung potentieller Risiken in der Applikation.	150
Abbildung 82: Ablaufdiagramm: Schritte zur Durchführung einer Risikobeurteilung und Risikominderung nach Typ A- Norm ISO 12100.	153
Abbildung 83: Die Bestimmung des erreichten Performance Levels (Sicherheitsniveau) einer Schutzeinrichtung basiert auf vier Kenngrößen bestehend aus CCF, DCavg, MTTFD und Kategorie. Durch Anwendung des vereinfachten Verfahrens (Norm DIN EN ISO 13849-1) kann schließlich der erreichte PL anhand eines Diagrammes (oben) abgelesen werden.	154

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Schema zur Bewertung der MRK-Methoden: 0 - Merkmal nicht erfüllt; × - Merkmal erfüllt</i>	12
<i>Tabelle 2: Berechnung des Zuschlages C bei orthogonaler Annäherung des Menschen zur Schutzfeldausrichtung</i>	16
<i>Tabelle 3: Berechnung des Zuschlages C bei paralleler Annäherung des Menschen zur Schutzfeldausrichtung</i>	17
<i>Tabelle 4: Performance Level mit Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde gemäß ISO 13849-1</i>	19
<i>Tabelle 5: Schema zur qualitativen Bewertung trennender und nicht-trennender (lokaler/globaler) Schutzeinrichtungen. 0 – Kriterium nicht erfüllt; × – Kriterium erfüllt</i>	24
<i>Tabelle 6: Bewertungsschema für das Kriterium "Ganzheitlich"</i>	24
<i>Tabelle 7: Zuschlag C in [m] in Abhängigkeit der Annäherung des Menschen zur Schutzfeldausrichtung und Detektionsauflösung d in [mm] der Schutzeinrichtung</i>	25
<i>Tabelle 8: Bewertungsschema für das Kriterium "Detektionsauflösung"</i>	25
<i>Tabelle 9: Bewertungsschema für das Kriterium "Reaktionszeit"</i>	25
<i>Tabelle 10: Bewertungsschema für das Kriterium "Zertifizierbarkeit"</i>	26
<i>Tabelle 11: Bewertungsschema für das Kriterium "Robustheit"</i>	27
<i>Tabelle 12: Bewertungsschema für das Kriterium "Fremdlichtunabhängig"</i>	27
<i>Tabelle 13: Bewertungsschema für das Kriterium "Sichtbarkeit"</i>	28
<i>Tabelle 14: Bewertungsschema für das Kriterium "Dynamik"</i>	28
<i>Tabelle 15: Klassifikation der Ansätze und Entwicklungen im aktuellen Stand der Wissenschaft bezüglich der Erkennungsstrategie</i>	38
<i>Tabelle 16: Qualitative Bewertung der Erkennungsstrategie hinsichtlich der Anforderungserfüllung</i>	39
<i>Tabelle 17: Symbole und zugehörige Punktevergabe zur Technologiebewertung</i>	48
<i>Tabelle 18: Qualitative Bewertung der Technologien auf Basis der Beschreibungen in Abschnitt 3.3 und unter Berücksichtigung der Kriterien in Abschnitt 2.4. Vergabe der Bewertungspunkte entsprechend Tabelle 17</i>	48
<i>Tabelle 19: Einordnung der vorliegenden Arbeit in den aktuellen Stand der Wissenschaft</i>	51
<i>Tabelle 20: Zusammenfassung der qualitativen Bewertung zur Anwendung von Sicherheitsprinzipien für das zu konzipierende Sensorprinzip</i>	59
<i>Tabelle 21: Analyse möglicher Fehler und Auswirkungen auf die Sicherheitsfunktion durch FMEA. Zusätzliche Nennung der Maßnahmen zur Fehleraufdeckung bzw. Verhinderung der Auswirkungen</i>	82
<i>Tabelle 22: Qualitative Einschätzung der Kenngrößen zur Bestimmung des erreichbaren PL der Sicherheitsfunktion des A2S auf Basis der Kriterien aus den Sicherheitsnormen ISO 13849-1 und ISO 13849-2</i>	85
<i>Tabelle 23: Qualitative Anforderungen an die Referenzinformationen</i>	96
<i>Tabelle 24: Einschätzung der Ansätze „Bildbasierte Referenz“ und „Modellbasierte Referenz“ zur Erfüllung der Anforderungen an die Referenzinformationen</i>	108
<i>Tabelle 25: Anteil falsch-positiver ϕ_{fpS} und falsch-negativer ϕ_{fnS} Verletzungssignale bei ambienten Fremdlichtänderungen und vorliegender Objekteindringung bzw. keiner Objekteindringung</i>	120

<i>Tabelle 26: Anteil falsch-positiver ϕ_{fpS} und falsch-negativer ϕ_{fnS} Verletzungssignale beim Auftreten eines Blitzlichtes und vorliegender Objekteindringung bzw. keiner Objekteindringung.</i>	<i>120</i>
<i>Tabelle 27: Einfluss einer Blitzlicht-Störung zum Zeitpunkt t auf die Code-Extraktion.</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 28: Einfluss einer Blitzlicht-Störung zum Zeitpunkt $t + 1$ auf die Code-Extraktion.</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 29: Zusammenfassung der Blitzlicht-Störungen auf die Code-Extraktion.....</i>	<i>122</i>
<i>Tabelle 30: Wesentliche Eigenschaften der verwendeten Kameratechnik.....</i>	<i>129</i>
<i>Tabelle 31: Wesentliche Eigenschaften des verwendeten Lichtmodulators.....</i>	<i>130</i>
<i>Tabelle 32: Anzahl ψ_k verdeckter Bildpunkte im AZ in Abhängigkeit von Objektbreite und Objekthöhe über der Projektionsoberfläche. Die Hintergrundfarbe definiert die Detektionswahrscheinlichkeit des Objektes bei einer Schutzraumeindringung: Rot: $\psi_k < \psi_t$ keine/geringe Detektionswahrscheinlichkeit. Gelb: $\psi_k = \psi_t$; mittlere Detektionswahrscheinlichkeit. Grün: $\psi_k \geq \psi_{min}$ sichere Detektion des eindringenden Objektes.</i>	<i>133</i>
<i>Tabelle 33: Zusammenhang zwischen der Höhe des eindringenden Objektes und der veränderten Bildposition der abgebildeten Reflexionsstrahlen im Kamerabild.</i>	<i>135</i>
<i>Tabelle 34: Detektionsleistung des A2S in Abhängigkeit der Art einer Schutzraumeindringung.</i>	<i>136</i>
<i>Tabelle 35: Zusammensetzung der Reaktionszeit T_r aus verschiedenen Zeitanteilen (siehe Abbildung 79).</i>	<i>137</i>
<i>Tabelle 36: Zurückgelegte Wege des Roboters (TCP) während T_r bei verschiedenen Geschwindigkeiten v_r.</i>	<i>138</i>
<i>Tabelle 37: Erforderliche Objektgeschwindigkeiten, damit ein Objekt mit einer definierten Größe innerhalb $\Delta t_b = 0.009$ s unbemerkt in den Schutzraum eindringen kann.</i>	<i>139</i>
<i>Tabelle 38: Einordnung des A2S als neuartige „Projektions- und kamerabasierte Technologie“ in den aktuellen Stand der Wissenschaft. Bewertung der Technologie anhand der anforderungsspezifischen Kriterien (siehe Abschnitt 3.3 und vgl. Abschnitt 4).</i>	<i>143</i>

Literaturverzeichnis

ABB Ltd (2019): IRB 360 - FlexPicker. ABB Ltd. Online verfügbar unter <https://new.abb.com/products/robotics/de/industrieroboter/irb-360>, zuletzt geprüft am 03.01.2019.

Abdelawwad, Mohamed; Börcsök, Josef; Borowski, Torsten; Drabesch, Malte; Hägelen, Manfred; Schraml, Thomas et al. (2020): RoKoRa – Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration mit Hilfe hochauflösender Radare. In: Autonome Roboter für Assistenzfunktionen: Interaktive Grundfertigkeiten – Ergebnisse und Forschungsperspektiven des Förderprogramms ARA1, S. 158–171.

ABI (2021): Building Functional Safety into Industrial Robotics. Hg. v. ABIresearch. Online verfügbar unter www.abiresearch.com, zuletzt geprüft am 25.10.2022.

Adam Hall GmbH (2022): Cameo THUNDER® WASH 100 RGB | Flutter | Cameo. Cameo® | For Lumen Beings. Adam Hall GmbH. Online verfügbar unter <https://www.cameo-light.com/de/loesungen/dj-musiker/statisches-licht/flutter/2396/thunder-wash-100-rgb>, zuletzt aktualisiert am 12.08.2022, zuletzt geprüft am 12.08.2022.

Ashdown, M.; Sato, Y. (2005): Steerable Projector Calibration. In: Cordelia Schmid (Hg.): IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Diego, CA, USA, 20-26 June 2005. Los Alamitos, Calif. [u.a.]: IEEE Computer Society, S. 98.

ASUSTek Computer Inc: ASUS Xtion 2. Hg. v. ASUSTek Computer Inc. Online verfügbar unter <https://www.asus.com/3D-Sensor/Xtion-2/>, zuletzt geprüft am 11.12.2019.

Audet, Samuel; Okutomi, Masatoshi (2009): A user-friendly method to geometrically calibrate projector-camera systems. In: Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, IEEE Computer Society Conference on. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Miami, FL, 20-25 June 2009. [Piscataway, N.J.]: IEEE, S. 47–54.

Augustsson, Svante; Christiernin, Linn Gustavsson; Bolmsjö, Gunnar (2014): Human and robot interaction based on safety zones in a shared work environment. In: Gerhard Sagerer, Michita Imai, Tony Belpaeme und Andrea Thomaz (Hg.): Proceedings of the 2014 ACM/IEEE international conference on Human-robot interaction - HRI '14. Bielefeld, Germany, 03.03.2014 - 06.03.2014. New York, New York, USA: ACM Press, S. 118–119.

Bartenschlager, Jörg; Hebel, Hans; Schmidt, Georg (1998): Handhabungstechnik mit Robotertechnik. Funktion, Arbeitsweise, Programmierung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag (Springer eBook Collection Computer Science and Engineering).

Bauer, Wilhelm; Bender, Manfred; Braun, Martin; Rally, Peter; Scholtz, Oliver (2016): Leichtbauroboter in der manuellen Montage – einfach EINFACH anfangen. Erste Erfahrungen von Anwenderunternehmen.

Behrens, R.; Elkmann, N. (2014): Study on meaningful and verified Thresholds for minimizing the consequences of human-robot collisions. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Hong Kong, China, May 31 - June 7, 2014. Piscataway, NJ: IEEE, S. 3378–3383.

Behrens, Roland; Saenz, José; Elkmann, Norbert (2016): Formen der Mensch-Roboter-Kollaboration. In: *Arbeitssicherheit 4.0 Trends & Innovationen, 2016/17* 2016/17 (1), S. 15–17.

Behrens, Roland; Saenz, José; Vogel, Christian; Elkmann, Norbert (2015): Upcoming Technologies and Fundamentals for Safeguarding All Forms of Human-Robot Collaboration. In: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hg.): 8th International Conference Safety.

Bernd Beckert; Daniela Buschak; Birgit Graf; Martin Hägele; Angela Jäger; Cornelius Moll et al. (2016): Automatisierung und Robotik-Systeme. Studien zum deutschen Innovationssystem. Berlin (11-2016). Online verfügbar unter <http://hdl.handle.net/10419/156639>.

Berndt, Dirk; Bauer, Norbert (Hg.) (2003): Leitfaden zu Grundlagen und Anwendungen der optischen 3-D-Messtechnik. 1. Aufl. Erlangen: Fraunhofer-Allianz Vision (Vision, 6). Online verfügbar unter <http://www.vision.fraunhofer.de/de/publikationen/leitfaeden/band-6.html>.

Beyerer, Jürgen; Puente León, Fernando; Frese, Christian (2016): Automatische Sichtprüfung. Grundlagen, Methoden und Praxis der Bildgewinnung und Bildauswertung. Unter Mitarbeit von Johannes Meyer. 2., erweiterte und verbesserte Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.

Blue Danube Robotics GmbH (2018): Airskin. Blue Danube Robotics GmbH. Online verfügbar unter <https://www.bluedanuberobotics.com/airskin/>, zuletzt geprüft am 23.10.2018.

Brown, D. C. (1966): Decentering Distortion of Lenses. In: *Photometric Engineering* (Vol. 32, No. 3), S. 444–462.

Buizza Avanzini, Giovanni; Ceriani, Nicola Maria; Zanchettin, Andrea Maria; Rocco, Paolo; Bascetta, Luca (2014): Safety Control of Industrial Robots Based on a Distributed Distance Sensor. In: *IEEE Trans. Contr. Syst. Technol.* 22 (6), S. 2127–2140. DOI: 10.1109/TCST.2014.2300696.

Burger, Wilhelm (2016): Zhang's Camera Calibration Algorithm: In-Depth Tutorial and Implementation. University of Applied Sciences Upper Austria, School of Informatics, Communications and Media, Dept. of Digital Media. Hagenberg, Austria (HGB16-05). Online verfügbar unter <http://staff.fh-hagenberg.at/burger/>.

Chang, Wen-Chung; Wu, Chia-Hung (2014): Plane-based geometric calibration of a projector-camera reconstruction system. In: Mecatronics (MECATRONICS), 2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on. 2014 10th France-Japan/ 8th Europe-Asia Congress on Mecatronics (MECATRONICS). Tokyo, Japan: IEEE, S. 219–223.

Chow, Chi-Wai; Shiu, Rwei-Jie; Liu, Yen-Chun; Liu, Yang; Yeh, Chien-Hung (2018): Non-flickering 100 m RGB visible light communication transmission based on a CMOS image sensor. In: *Optics express* 26 (6), S. 7079–7084. DOI: 10.1364/OE.26.007079.

Comau S.p.A (2019): Rebel-S6-0.45. Comau S.p.A. Online verfügbar unter <https://www.comau.com/EN/our-competences/robotics/robot-team/rebel-s6-0-45>, zuletzt geprüft am 03.01.2019.

de Gea Fernández, José; Mronga, Dennis; Günther, Martin; Knobloch, Tobias; Wirkus, Malte; Schröer, Martin et al. (2017): Multimodal sensor-based whole-body control for human-robot collaboration in industrial settings. In: *Robotics and Autonomous Systems* 94, S. 102–119. DOI: 10.1016/j.robot.2017.04.007.

Degani, Alessio; Tartaro, Andrea (2019a): Radar Detection Methods and Systems for Identifying Moving Objects. Veröffentlichungsnr: US20190107613A1.

Degani, Alessio; Tartaro, Andrea (2019b): System and method for automatic motion detection. Veröffentlichungsnr: EP3537401B1.

Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung e.V. (Hg.) (2015): Industrieroboter. DGUV Information 209-074. Online verfügbar unter <https://publikationen.dguv.de/dguv/>, zuletzt geprüft am 25.03.2019.

Devol, George C.: Programmed article transfer. Veröffentlichungsnr: US2988237A.

Distante, Arcangelo; Distante, Cosimo (Hg.) (2020a): Handbook of Image Processing and Computer Vision. Volume 1: From Energy to Image. 1st ed. 2020. Cham: Springer, Cham; Springer International Publishing; Imprint Springer (Springer eBook Collection).

Distante, Arcangelo; Distante, Cosimo (2020b): Motion Analysis. In: Arcangelo Distante und Cosimo Distante (Hg.): Handbook of Image Processing and Computer Vision. Volume 1: From Energy to Image. 1st ed. 2020. Cham: Springer, Cham; Springer International Publishing; Imprint Springer (Springer eBook Collection), S. 479–598. Online verfügbar unter https://rd.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-42378-0_6.

Draréni, Jamil; Roy, Sébastien; Sturm, Peter (2009): Geometric video projector auto-calibration. In: Computer Vision and Pattern Recognition Workshops, IEEE Computer Society Conference on. IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Miami, FL, 20-25 June 2009. [Piscataway, N.J.]: IEEE, S. 39–46.

Draréni, Jamil; Roy, Sébastien; Sturm, Peter (2012): Methods for geometrical video projector calibration. In: *Machine Vision and Applications* 23 (1), S. 79–89. DOI: 10.1007/s00138-011-0322-3.

Ebert, D. M.; Henrich, D. D. (2002): Safe human-robot-cooperation. Image-based collision detection for industrial robots. In: Proceedings 2002 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Lausanne, Switzerland, 30 Sept.-5 Oct. 2002. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1826–1831.

Ebert, Dirk (2003): Bildbasierte Erzeugung kollisionsfreier Transferbewegungen für Industrieroboter. Dissertation. Als Ms. gedr. Kaiserslautern: Technische Universität (Schriftenreihe / Fachbereich Informatik, Universität Kaiserslautern, 12).

ECHORD++ (Hg.) (2016): SAPARO – Safe Human-Robot Cooperation with high payload robots in industrial applications. Online verfügbar unter <http://echord.eu/saparo/>, zuletzt geprüft am 26.01.2020.

e-con Systems, Inc: STEEReoCAM. 2MP Stereokamera für NVIDIA® Jetson Nano™/AGX Xavier™/TX2. Hg. v. Inc e-con Systems. Online verfügbar unter <https://www.e-consystems.com/nvidia-cameras/jetson-agx-xavier-cameras/stereo-kamera-de.asp>, zuletzt geprüft am 10.12.2019.

Elkmann, Norbert; Walter, Christoph; Schumann, Marco (2012): Mensch und Roboter: Gemeinsam auf Nummer sicher. In: *IFFOCUS Sonderausgabe*, S. 22–25. Online verfügbar unter <https://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/iffocus-2012-20-jahre-fraunhofer-iff.pdf>, zuletzt geprüft am 26.01.2020.

ETH3D (Hg.): ETH3D SLAM & Stereo Benchmarks. Online verfügbar unter <https://www.eth3d.net/>, zuletzt geprüft am 10.12.2019.

EtherCAT Technology Group (2021): EtherCAT Technology Group | Safety. Online verfügbar unter <https://www.ethercat.org/de/safety.html>, zuletzt aktualisiert am 04.03.2021, zuletzt geprüft am 03.08.2022.

Europäische Kommission (2020): Leitfaden für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG. Guide to application of the Machinery Directive 2006/42/EC. Edition 2.2. Auflage 2.2. Berlin, Wien, Zürich: Beuth (Beuth Praxis).

Falcao, Gabriel; Hurtos, Natalia; Massich, Joan (2008): Plane-based calibration of a projector-camera system. In: *VIBOT Master 9*.

Fanuc K.K. (2018): Kollaborierende Roboter. Fanuc K.K. Online verfügbar unter <https://www.fanuc.eu/de/de/roboter/roboterfilter-seite/kollaborierende-roboter>, zuletzt geprüft am 23.10.2018.

Fanuc K.K. (2019): M-2000iA/2300. Der größte Lastenheber im Programm. Fanuc K.K. Online verfügbar unter <https://www.fanuc.eu/de/de/roboter/roboterfilter-seite/m-2000-serie/m-2000ia-2000>, zuletzt geprüft am 03.01.2019.

Faugeras, O. D.; Luong, Q.-T.; Maybank, S. J. (1992): Camera self-calibration: Theory and experiments. In: Giulio Sandini (Hg.): *Computer vision - ECCV '92. Second European conference on computer vision, Santa Margherita Ligure, Italy, May 19-22, 1992*, Bd. 588. Berlin: Springer-Verlag (Lecture Notes in Computer Science, 588), S. 321–334.

Fischer, Markus; Henrich, Dominik (2009): 3D Collision Detection for Industrial Robots and Unknown Obstacles Using Multiple Depth Images. In: Torsten Krüger und Friedrich M. Wahl (Hg.): *Advances in Robotics Research. Theory, Implementation, Application*. 1. Aufl. s.l.: Springer-Verlag, S. 111–122.

Flacco, F.; Kroger, T.; Luca, A. de; Khatib, O. (2012): A depth space approach to human-robot collision avoidance. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Saint Paul, Minnesota, USA, 14 - 18 May 2012. Piscataway, NJ: IEEE, S. 338–345.

Flacco, Fabrizio; Kroeger, Torsten; Luca, Alessandro de; Khatib, Oussama (2015): A Depth Space Approach for Evaluating Distance to Objects. In: *Journal of Intelligent & Robotic Systems* 80 (S1), S. 7–22. DOI: 10.1007/s10846-014-0146-2.

Flacco, Fabrizio; Luca, Alessandro de (2017): Real-Time Computation of Distance to Dynamic Obstacles With Multiple Depth Sensors. In: *IEEE Robotics and Automation Letters* 2 (1), S. 56–63. DOI: 10.1109/LRA.2016.2535859.

Foix, Sergi; Alenya, Guillem; Torras, Carme (2011): Lock-in Time-of-Flight (ToF) Cameras: A Survey. In: *IEEE Sensors Journal* 11 (9), S. 1917–1926. DOI: 10.1109/JSEN.2010.2101060.

Fritzsche, Markus; Elkmann, Norbert; Schulenburg, Erik (2011): Tactile sensing. In: Aude Billard (Hg.): Proceedings of the 6th international conference on Human-robot interaction. the 6th international conference. Lausanne, Switzerland, 3/6/2011 - 3/9/2011. ACM Special Interest Group on Artificial Intelligence; ACM Special Interest Group on Computer-Human Interaction. New York, NY: ACM, S. 139.

Gecks, Thorsten; Henrich, Dominik (2006): Multi-Camera Collision Detection allowing for Object Occlusions. In: 37th International Symposium on Robotics (ISR 2006) / 4th German Conference on Robotics (Robotik 2006); München, Germany May 15th to 17th, 2006.

Giancola, Silvio; Valenti, Matteo; Sala, Remo (2018): A Survey on 3D Cameras: Metrological Comparison of Time-of-Flight, Structured-Light and Active Stereoscopy Technologies. Cham: Springer International Publishing (SpringerBriefs in Computer Science).

Gigahertz Optik GmbH (2022): Grundlagen der Lichtmesstechnik. 1.8 Reflexion, Transmission und Absorption. Gigahertz Optik GmbH, zuletzt aktualisiert am 16.08.2022, zuletzt geprüft am 16.08.2022.

Görnemann, Otto; Stubenrauch, Hans-Jörg (2013): Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen (BWS) für sichere Maschinen. Optoelektronische Schutzeinrichtungen. Whitepaper. Sick AG. Online verfügbar unter https://cdn.sick.com/media/docs/6/56/056/Whitepaper_Electro_sensitive_protective_devices_ESPE_for_safe_machines_de_IM0062056.PDF, zuletzt geprüft am 22.10.2018.

Graf, Jürgen (2010): Sichere Mensch-Roboter-Kooperation durch Auswertung von Bildfolgen. Dissertation. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Fakultät für Informatik – Institut für Prozessrechentchnik, Automation und Robotik (IPR).

Grzegorzec, Marcin; Theobalt, Christian; Koch, Reinhard; Kolb, Andreas (2013): Time-Of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms and Applications. Dagstuhl Seminar 2012 and GCPR Workshop on Imaging New Modalities. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg

(Lecture Notes in Computer Science / Image Processing, Computer Vision, Pattern Recognition, and Graphics, v.8200). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/gbv/detail.action?docID=3093340>.

Haake Technik GmbH (2019): Absicherung von Scher- und Quetschkanten. Bumper. Haake Technik GmbH. Online verfügbar unter https://www.haake-technik.com/index.php/Informationen_zu_Bumper-Absicherung-von-Scher-und-Quetschkanten.html, zuletzt geprüft am 11.06.2019.

Haddadin, S.; Albu-Schaffer, A.; Frommberger, M.; Rossmann, J.; Hirzinger, G. (2009a): The “DLR crash report”: Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - Part II: Discussions. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Kobe, Japan, 12 - 17 May 2009. Piscataway, NJ: IEEE, S. 280–287.

Haddadin, Sami; Albu-Schaffer, Alin; Frommberger, Mirko; Rossmann, Jurgen; Hirzinger, Gerd (2009b): The “DLR Crash Report”: Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - Part I: Results. In: IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Kobe, Japan, 12 - 17 May 2009. Piscataway, NJ: IEEE, S. 272–279.

Hahn, Markus (2010): Raum-zeitliche Objekt- und Aktionserkennung: ein statistischer Ansatz für reale Umgebungen. Dissertation. Universität Bielefeld. Online verfügbar unter <https://pub.uni-bielefeld.de/record/2320252>, zuletzt geprüft am 16.12.2019.

Halme, Roni-Jussi; Lanz, Minna; Kämäräinen, Joni; Pieters, Roel; Latokartano, Jyrki; Hietanen, Antti (2018): Review of vision-based safety systems for human-robot collaboration. In: *Procedia CIRP* 72, S. 111–116. DOI: 10.1016/j.procir.2018.03.043.

Hauke, Michael; Schaefer, Michael; Apfeld, Ralf (2017): Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen. - Anwendung der DIN EN ISO 13849 -. 4., geänderte Auflage, April 2017. St. Augustin: Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, Institut für Arbeitsschutz (IFA Report, 2/2017). Online verfügbar unter <https://edocs.tib.eu/files/e01fn18/1015724450.pdf>.

Hausmann, Joerg; Hader, Soeren (2007): Verfahren und Vorrichtung zum Überwachen eines dreidimensionalen Raumbereichs am 2007. Anmeldenr: 07819376.0. Veröffentlichungsnr: EP2095008B1.

Hedler Systemlicht GmbH (2022): HEDLER H25s. Hedler Systemlicht GmbH. Online verfügbar unter <https://www.hedler.com/HEDLER-H25s>, zuletzt aktualisiert am 11.08.2022, zuletzt geprüft am 12.08.2022.

Heikkila, J.; Silven, O. (1997): A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. In: 1997 IEEE Computer Society conference on computer vision and pattern recognition. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. San Juan, Puerto Rico, 17-19 June 1997: IEEE Computer Society, S. 1106–1112.

Heinke, Berthold; Bömer, Thomas (2009): Sehende Überwachungen. Erste geprüfte Kamerasysteme als Schutzeinrichtungen zur Überwachung von Schutzräumen an Maschinen und

Anlagen. In: *Technische Überwachung : TÜ ; Anlagensicherheit, Arbeits- und Gesundheitsschutz, Umweltschutz* (10), S. 21–25. Online verfügbar unter <https://www.tib.eu/de/suchen/id/olc%3A1827985666>.

Henrich, Dominik; Gecks, Thorsten (2008): Multi-camera collision detection between known and unknown objects. In: Second ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras (ICDSC). Stanford University, Palo Alto, CA, USA, 7 - 11 September 2008. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 1–10.

IFR (2018a): Robots and the Workplace of the Future. Positioning Paper. Hg. v. International Federation of Robotics Frankfurt, Germany. Online verfügbar unter <https://ifr.org/papers>, zuletzt geprüft am 21.10.2018.

IFR (2018b): The Impact of Robots on Productivity, Employment and Jobs. Positioning Paper. Hg. v. International Federation of Robotics Frankfurt, Germany. Online verfügbar unter <https://ifr.org/papers>, zuletzt geprüft am 21.10.2018.

IFR (2022a): World Robotics Report 2022. Executive Summary World Robotics 2022 Industrial Robots. Hg. v. International Federation of Robotics Frankfurt, Germany. Online verfügbar unter <https://ifr.org/free-downloads/>, zuletzt geprüft am 25.10.2022.

IFR (2022b): World Robotics Report 2022. IFR World Robotics Presentation. Hg. v. International Federation of Robotics Frankfurt, Germany. Online verfügbar unter <https://ifr.org/free-downloads/>, zuletzt geprüft am 25.10.2022.

Norm DIN EN ISO 10218-1, Januar 2012: Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter.

Norm DIN EN ISO 10218-2, Juni 2012: Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration.

Intel Corporation: Intel RealSense Depth Camera D435. Hg. v. Intel Corporation. Online verfügbar unter <https://www.intelrealsense.com/depth-camera-d435/>, zuletzt geprüft am 16.12.2019.

Intel Corporation: Intel RealSense Technik. Hg. v. Intel Corporation. Online verfügbar unter <https://www.intel.de/content/www/de/de/architecture-and-technology/realsense-overview.html>, zuletzt geprüft am 11.12.2019.

ipf electronic gmbh: Reflektoren. Hg. v. ipf electronic gmbh. Online verfügbar unter <https://www.ipf-electronic.de/de/online-shop/produktdetails/AO000004/Reflektor/>, zuletzt geprüft am 11.05.2020.

ISO (2019): International Organization for Standardization. Online verfügbar unter <https://www.iso.org/home.html>, zuletzt geprüft am 26.11.2019.

Johann, Jens (1992): Modulation eines sinusförmigen Trägers durch ein digitales Modulationssignal. In: Jens Johann (Hg.): Modulationsverfahren. Grundlagen analoger und digitaler

Übertragungssysteme, Bd. 22. Berlin, New York: Springer (Nachrichtentechnik, 22), S. 199–242.

Karagiannis, Panagiotis; Kousi, Niki; Michalos, George; Dimoulas, Konstantinos; Mparis, Konstantinos; Dimosthenopoulos, Dimosthenis et al. (2022): Adaptive speed and separation monitoring based on switching of safety zones for effective human robot collaboration. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing* 77, S. 102361. DOI: 10.1016/j.rcim.2022.102361.

Kersten, Wolfgang; Koller, Hans; Lödding, Hermann (Hg.) (2014): Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Tagung der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB). Berlin: Gito mbH Verlag (Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V. (HAB)). Online verfügbar unter http://www.industrie-management.de/sites/industrie-management.de/files/sonderdrucke/loedding_Industrie-4-0.pdf.

Keselman, Leonid; Woodfill, John Iselin; Grunnet-Jepsen, Anders; Bhowmik, Achintya (2017): Intel RealSense Stereoscopic Depth Cameras. Online verfügbar unter <http://arxiv.org/pdf/1705.05548v2>.

Keyence Corporation AG (2022): Sicherheits-Laserscanner. Keyence Corporation AG. Online verfügbar unter <https://www.keyence.de/products/safety/laser-scanner/>, zuletzt geprüft am 25.10.2022.

Kimura, Makoto; Mochimaru, Masaaki; Kanade, Takeo (2007): Projector Calibration using Arbitrary Planes and Calibrated Camera. In: 2007 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). Minneapolis, MN, USA, 6/17/2007 - 6/22/2007: IEEE, S. 1–2.

Klopot, Tomasz; Polakow, Grzegorz; Parysz, Ireneusz (2016): Optical PMD 3D sensor evaluation for motion detection and tracking application. In: 2016 21st International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR). Miedzyzdroje, Poland, Aug. 29 2016-Sept. 1 2016. Piscataway, New Jersey: IEEE, S. 140–145.

Kruger, J.; Nickolay, B.; Schulz, O. (2004): Image-based 3d-surveillance in man-robot-cooperation. In: Ronald Schoop (Hg.): 2004 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics, INDIN '04. Berlin, Germany, 24-26 June 2004. Piscataway, NJ: IEEE Operations Center, S. 411–415.

Kuhn, Stefan; Henrich, Dominik (2007): Fast vision-based minimum distance determination between known and unknown objects. In: 2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Diego, CA, USA, Oct. 29, 2007 - Nov. 2, 2007. Piscataway, NJ: IEEE Service Center, S. 2186–2191.

KUKA AG (2016a): KUKA KR C4: The Power of Control. Online verfügbar unter <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/robotersteuerungen/kr-c4>, zuletzt aktualisiert am 18.07.2016, zuletzt geprüft am 04.05.2022.

KUKA AG (2016b): KR AGILUS. Online verfügbar unter <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/kr-agilus>, zuletzt aktualisiert am 26.09.2016, zuletzt geprüft am 04.05.2022.

KUKA AG (2018): LBR iiwa. KUKA AG. Online verfügbar unter <https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/industrieroboter/lbr-iiwa>, zuletzt geprüft am 23.10.2018.

KUKA AG (2021): KUKA.RobotSensorInterface. KUKA AG. Online verfügbar unter https://www.kuka.com/de-de/produkte-leistungen/robotersysteme/software/applikationssoftware/kuka_robotensorinterface, zuletzt aktualisiert am 20.09.2021, zuletzt geprüft am 15.08.2022.

Lasota, Przemyslaw A.; Fong, Terrence; Shah, Julie A. (2017): A Survey of Methods for Safe Human-Robot Interaction. In: Foundations and Trends in Robotics 5 (3), S. 261–349. DOI: 10.1561/23000000052.

Lefloch, Damien; Nair, Rahul; Lenzen, Frank; Schäfer, Henrik; Streeter, Lee; Cree, Michael J. et al. (2013): Technical Foundation and Calibration Methods for Time-of-Flight Cameras. In: Marcin Grzegorzek, Christian Theobalt, Reinhard Koch und Andreas Kolb (Hg.): Time-Of-Flight and Depth Imaging. Sensors, Algorithms and Applications. Dagstuhl Seminar 2012 and GCPR Workshop on Imaging New Modalities. Berlin/Heidelberg: Springer (Lecture Notes in Computer Science / Image Processing, Computer Vision, Pattern Recognition, and Graphics, v.8200).

Luminus, Inc. (2022): Luminus : Color - Monochromatic High Power Chip-On-Board. Hg. v. Luminus, Inc. Online verfügbar unter <https://www.luminus.com/products/color/monochromatic-cob>, zuletzt aktualisiert am 04.05.2022, zuletzt geprüft am 04.05.2022.

Martínez-Martín, Ester (2012): Robust Motion Detection in Real-Life Scenarios. Unter Mitarbeit von Ángel P. Pobil. 1st ed. London: Springer London Limited (SpringerBriefs in Computer Science Ser). Online verfügbar unter <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=973482>.

Mayser GmbH & Co KG (2019a): Schalmatten und Trittschalter. Mayser GmbH & Co KG. Online verfügbar unter <https://www.mayser.com/de/sicherheitstechnik/flaechensensoren>, zuletzt geprüft am 11.06.2019.

Mayser GmbH & Co KG (2019b): Ultraschallsensoren. Mayser GmbH & Co KG. Online verfügbar unter <https://www.mayser.com/de/sicherheitstechnik/ultraschall-industriesensor>, zuletzt geprüft am 14.06.2019.

Merx, Joachim (2019): Vorrichtung und Verfahren zum Absichern einer automatisiert arbeitenden Maschine. Veröffentlichungsnr: WO 2014/173725.

Morato, Carlos; Kaipa, Krishnanand N.; Zhao, Boxuan; Gupta, Satyandra K. (2014): Toward Safe Human Robot Collaboration by Using Multiple Kinects Based Real-Time Human Tracking. In: Journal of Computing and Information Science in Engineering 14 (1), Artikel 011006, S. 22. DOI: 10.1115/1.4025810.

MRK-Systeme GmbH (2019): MRK-Systeme GmbH. Safe-Interaction. Hg. v. MRK-Systeme GmbH. Online verfügbar unter <https://www.mrk-systeme.de/produkt/safeinteraction>, zuletzt geprüft am 23.11.2019.

Najmaei, Nima; Kermani, Mehrdad R. (2011): Applications of artificial intelligence in safe human-robot interactions. In: IEEE transactions on systems, man, and cybernetics. 41 (2), S. 448–459. DOI: 10.1109/TSMCB.2010.2058103.

Nerian Vision GmbH: 3D-Tiefenwahrnehmung durch Stereovision mit 100 Fps | SceneScan von Nerian. Hg. v. Nerian Vision GmbH. Online verfügbar unter <https://nerian.de/products/scenescan-stereo-vision/>, zuletzt geprüft am 19.12.2019.

Neudörfer, Alfred (2016): Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte. Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-Maschinenrichtlinie. 7., aktualisierte Auflage 2016. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg (VDI-Buch). Online verfügbar unter <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-49819-4>.

Nguyen, Trang; Hossain, Mohammad Arif; Jang, Yeong Min (2016): Design and Implementation of a Novel Compatible Encoding Scheme in the Time Domain for Image Sensor Communication. In: Sensors 16 (5). DOI: 10.3390/s16050736.

O'Brien, Dominic C.; Zeng, Lubin; Le-Minh, Hoa; Faulkner, Grahame; Walewski, Joachim W.; Randel, Sebastian (2008): Visible light communications: Challenges and possibilities. In: 2008 IEEE 19th International Symposium on Personal, Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC). Cannes, France, 15.09.2008 - 18.09.2008: IEEE, S. 1–5.

OpenCV (2020). Online verfügbar unter <https://opencv.org/>, zuletzt aktualisiert am 2020, zuletzt geprüft am 14.05.2020.

OSRAM GmbH (2022): L 18 W/865 | OSRAM DS. OSRAM GmbH. Online verfügbar unter https://www.osram.de/ecat/LUMILUX%20T8-Leuchtstofflampen%20T8-Leuchtstofflampen-Lampen-Digital%20Systems/ch/de/GPS01_1027891/ZMP_60420/, zuletzt aktualisiert am 12.08.2022, zuletzt geprüft am 12.08.2022.

Ostermann, Björn (2014): Entwicklung eines Konzepts zur sicheren Personenerfassung als Schutzeinrichtung an kollaborierenden Robotern. Dissertation. Bergische Universität Wuppertal, Wuppertal. Online verfügbar unter <http://d-nb.info/1053772246>, zuletzt geprüft am 23.10.2018.

Peter, Tobias; Bexten, Simone; Muller, Veit; Hauffe, Viola; Elkmann, Norbert (2020): Object Classification on a High-Resolution Tactile Floor for Human-Robot Collaboration. In: 2020

25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, Austria - Hybrid,, 08 - 11 September 2020. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1255–1258.

Petersen, Hauke; Behrens, Roland; Saenz, José; Schulenburg, Erik; Vogel, Christian; Elkmann, Norbert (2018): Reliable Planning of Human-Robot-Collaboration featuring Speed and Separation Monitoring. In: 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems – SIAS 2018. Nance, Frankreich, 10.-12.10.2018, 55-61.

Pilz GmbH & Co. KG (2017): Das Sicherheitskompendium. Für den Umgang mit Normen zur funktionalen Sicherheit. Pilz GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.pilz.com/de-DE/knowhow>, zuletzt geprüft am 21.10.2018.

Pilz GmbH & Co. KG (2018): Sicherheitsschaltmatte PSENmat. Sichere Überwachung und neue Bedienkonzepte. Pilz GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.pilz.com/de-DE/eshop/00106002247124/PSENmat-Sicherheitsschaltmatte>, zuletzt geprüft am 06.06.2019.

Pilz GmbH & Co. KG (2022): Sichere Kamerasysteme. Sichere Raumüberwachung mit Pilz Kamerasystemen. Pilz GmbH & Co. KG. Online verfügbar unter <https://www.pilz.com/de-DE/produkte-loesungen/sensorik/sichere-kamerasysteme>, zuletzt geprüft am 25.10.2022.

PMD Technologies AG: CamBoard pico flexx. Hg. v. PMD Technologies AG. Online verfügbar unter <https://pmdtec.com/picofamily/>, zuletzt geprüft am 15.12.2019.

ProdSG: Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt - Produktsicherheitsgesetz. ProdSG. Bundesministerium der Justiz und für Verbraucherschutz, Bundesamt für Justiz. Online verfügbar unter https://www.gesetze-im-internet.de/prodsg_2011/index.html, zuletzt geprüft am 14.11.2019.

Radke, Richard J.; Andra, Srinivas; Al-Kofahi, Omar; Roysam, Badrinath (2005): Image change detection algorithms: a systematic survey. In: IEEE transactions on image processing : a publication of the IEEE Signal Processing Society 14 (3), S. 294–307. DOI: 10.1109/TIP.2004.838698.

Ramer, Christina (2019): Arbeitsraumüberwachung und autonome Bahnplanung für ein sicheres und flexibles Roboter-Assistenzsystem in der Fertigung. Dissertation. Friedrich-Alexander-Universität (FAU), Erlangen-Nürnberg. Technische Fakultät.

RAUSCHER GmbH: 3D Kameras. NERIAN KARMIN. Hg. v. RAUSCHER GmbH. Online verfügbar unter <https://www.rauscher.de/produkte/serien/detail/3D%20Kameras/Karmin2/>, zuletzt geprüft am 10.12.2019.

Produktsicherheitsrichtlinie 2001/95/EG, 03.12.2001: Richtlinie 2001/95/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 3. Dezember 2001 über die allgemeine Produktsicherheit.

Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, 17.05.2006: Richtlinie 2006/42/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG.

EMV-Richtlinie 2014/30/EU, 26.02.2014: Richtlinie 2014/30/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit.

ATEX-Richtlinie 2014/34/EU, 26.02.104: Richtlinie 2014/34/EU des europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen (Neufassung).

Niederspannungsrichtlinie 2014/35/EU, 26.02.2014: Richtlinie 2014/35/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 26. Februar 2014 zur Harmonisierung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Bereitstellung elektrischer Betriebsmittel zur Verwendung innerhalb bestimmter Spannungsgrenzen auf dem Markt (Neufassung).

Roberts, Richard D. (2013): Undersampled frequency shift ON-OFF keying (UFHOOK) for camera communications (CamCom). In: 2013 22nd Wireless and Optical Communication Conference (WOCC). Chongqing, China, 16.05.2013 - 18.05.2013: IEEE, S. 645–648.

Robla-Gomez, S.; Becerra, Victor M.; Llata, J. R.; Gonzalez-Sarabia, E.; Torre-Ferrero, C.; Perez-Oria, J. (2017): Working Together. A Review on Safe Human-Robot Collaboration in Industrial Environments. In: *IEEE Access* 5, S. 26754–26773. DOI: 10.1109/ACCESS.2017.2773127.

Roboception GmbH: rc_visard Stereosensor. Hg. v. Roboception GmbH. Online verfügbar unter https://roboception.com/de/rc_visard/, zuletzt geprüft am 10.12.2019.

Technische Spezifikation DIN ISO/TS 15066, 2017: Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter.

Robust Vision Challenge (Hg.): Robust Vision Challenge. Online verfügbar unter <http://www.robustvision.net/index.php>, zuletzt geprüft am 10.12.2019.

Rosenstrauch, Martin J.; Pannen, Tessa J.; Krüger, Jörg (2018): Human robot collaboration - using kinect v2 for ISO/TS 15066 speed and separation monitoring. In: *Procedia CIRP* 76, S. 183–186. DOI: 10.1016/j.procir.2018.01.026.

Rosin, Paul L.; Lai, Yu-Kun; Shao, Ling; Liu, Yonghuai (Hg.) (2019): RGB-D Image Analysis and Processing. 1st ed. 2019. Cham: Springer International Publishing; Springer (Advances in Computer Vision and Pattern Recognition).

Technischer Report IEC/TR 61496-4, 2007: Safety of machinery - Electro-sensitive protective equipment - Part 4: Particular requirements for equipment using vision based protective devices (VBPD).

Saleh, Joseph H.; Marais, Karen B.; Favaro, Francesca M. (2014): System safety principles: A multidisciplinary engineering perspective. In: *Journal of Loss Prevention in the Process Industries* 29, S. 283–294. DOI: 10.1016/j.jlp.2014.04.001.

Scharstein, D.; Szeliski, R.; Zabih, R. (2001): A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms. In: 2001 IEEE Workshop on Stereo and Multi-Baseline Vision (SMBV). Kauai, Hawaii, USA, 9-10 Dec. 2001. Los Alamitos, Calif: IEEE, S. 131–140.

Scharstein, Daniel; Szeliski, Richard; Hirschmüller, Heiko: Middlebury Stereo Vision Page. Online verfügbar unter <http://vision.middlebury.edu/stereo/>, zuletzt geprüft am 10.12.2019.

Schlegl, Thomas; Kroger, Torsten; Gaschler, Andre; Khatib, Oussama; Zangl, Hubert (2013): Virtual whiskers – Highly responsive robot collision avoidance. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan, 3 - 7 Nov. 2013. Piscataway, NJ: IEEE, S. 5373–5379.

Schmidt, Bernard; Wang, Lihui (2014): Depth camera based collision avoidance via active robot control. In: Journal of Manufacturing Systems 33 (4), S. 711–718. DOI: 10.1016/j.jmsy.2014.04.004.

Shackleford, William; Hong, Tsai; Chang, Tommy (2010): Inexpensive ground truth and performance evaluation for human tracking using multiple laser measurement sensors. In: Elena Messina (Hg.): Proceedings of the 10th Performance Metrics for Intelligent Systems Workshop. Baltimore, Maryland, 9/28/2010 - 9/30/2010. New York, NY: ACM, S. 201.

Shackleford, William; Norcross, Richard; Marvel, Jeremy; Szabo, Sandor (2012): Integrating occlusion monitoring into human tracking for robot speed and separation monitoring. In: E. R. Messina und Raj Madhavan (Hg.): 2012 Proceedings of the Workshop on Performance Metrics for Intelligent Systems (PERMIS). The Marriott Inn & Conference Center, College Park, Maryland, USA, March 20-22, 2012. New York: ACM, S. 168.

Shpunt, Alexander; Zalevsky, Zeev (2009): Three-dimensional sensing using speckle patterns. Veröffentlichungsnr: US8390821B2.

Norm DIN EN ISO 12100, März 2011: Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsgrundsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung.

Norm DIN EN ISO 13855, Oktober 2010: Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen.

Norm DIN EN 61496-1, Mai 2014: Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen.

Norm DIN EN 61496-2, Juni 2014: Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 2: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, welche nach dem aktiven opto-elektronischen Prinzip arbeiten.

Vornorm DIN EN IEC 61496-3, Oktober 2019: Sicherheit von Maschinen - Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 3: Besondere Anforderungen an aktive optoelektronische diffuse Reflektion nutzende Schutzeinrichtungen (AOPDDR).

Technische Spezifikation DIN IEC/TS 61496-4-2, Juni 2015: Sicherheit von Maschinen - Berührungsslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 4-2: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, die bildverarbeitende Schutzeinrichtungen (VBPD) verwenden - Zusätzliche Anforderungen bei Verwendung von Testmusterverfahren.

Technische Spezifikation DIN IEC/TS 61496-4-3, August 2016: Sicherheit von Maschinen - Berührungsslos wirkende Schutzeinrichtungen - Teil 4-3: Besondere Anforderungen an Einrichtungen, die bildverarbeitende Schutzeinrichtungen (VBPD) verwenden - Zusätzliche Anforderungen bei Verwendung von stereoskopischen Betrachtungsverfahren (VBPDST).

Norm DIN EN ISO 13856-1, August 2013: Sicherheit von Maschinen - Druckempfindliche Schutzeinrichtungen - Teil 1: Allgemeine Leitsätze für die Gestaltung und Prüfung von Schaltmatten und Schaltplatten.

Norm DIN EN ISO 13856-2, August 2013: Sicherheit von Maschinen - Druckempfindliche Schutzeinrichtungen - Teil 2: Allgemeine Leitsätze für die Gestaltung und Prüfung von Schaltleisten und Schaltstangen.

Norm DIN EN 60204-1, Juni 2007: Sicherheit von Maschinen - Elektrische Ausrüstung von Maschinen - Teil 1: Allgemeine Anforderungen.

Norm DIN EN ISO 13850, Mai 2016: Sicherheit von Maschinen - Not-Halt-Funktion - Gestaltungsleitsätze.

Norm DIN EN ISO 13857, Juni 2008: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsabstände gegen das Erreichen von Gefährdungsbereichen mit den oberen und unteren Gliedmaßen.

Norm DIN EN ISO 13849-1, Juni 2016: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze.

Norm DIN EN ISO 13849-2, Februar 2013: Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung.

Norm DIN EN ISO 14120, Mai 2016: Sicherheit von Maschinen - Trennende Schutzeinrichtungen - Allgemeine Anforderungen an Gestaltung und Bau von feststehenden und beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen.

Norm DIN EN 574, Dezember 2008: Sicherheit von Maschinen - Zweihandschaltungen - Funktionelle Aspekte - Gestaltungsleitsätze;

Siciliano, Bruno; Khatib, Oussama (Hg.) (2016): Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin, Heidelberg: Springer. Online verfügbar unter <http://www.springer.com/>.

Sick AG (2017): Leitfaden Sichere Maschinen. In 6 Schritten zur sicheren Maschine. Hg. v. Sick AG. Online verfügbar unter <https://www.sick.com/de/de/in-6-schritten-zur-sicheren-maschine/w/safety-know-how/>, zuletzt geprüft am 01.12.2019.

Sick AG (2018): Sichere Kamerasysteme. Schnelle und einfache Absicherung für Gefahrstellen und Gefahrenbereiche. Sick AG. Online verfügbar unter <https://www.sick.com/de/de/optoelektronische-schutzeinrichtungen/sichere-kamerasysteme/c/g192052>, zuletzt geprüft am 22.10.2018.

Spillner, Rüdiger (2014): Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion. Dissertation. Technische Universität, München. Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften: Forschungsberichte ; Bd. 296.

Spingler, J.; Thiemermann, S. (2002): Direkte Mensch-Roboter Kooperation in einer flexiblen Montagezelle. Tagung Robotik. Düsseldorf: VDI-Verl. (VDI-Berichte, 1679).

Sporrer, S.; Steiner, H.; Velte, M.; Jung, N. (2015): NIR Camera Based Person Detection in the Working Range of Industrial Robots. In: Proc. Int. Conf. Safety of Industrial Automated Systems (SIAS).

Süße, Herbert; Rodner, Erik (2014): Bildverarbeitung und Objekterkennung. Computer Vision in Industrie und Medizin. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden (Lehrbuch).

Szabo, Sandor; Shackleford, William; Norcross, Richard; Marvel, Jeremy (2012): A testbed for evaluation of speed and separation monitoring in a human robot collaborative environment. In: U.S DEPARTMENT OF COMMERCE, National Institute of Standards and Technology (NIST), Intelligent Systems Division. Gaithersburg, MD.

Tan, Jeffrey Too Chuan; Arai, Tamio (2011): Triple stereo vision system for safety monitoring of human-robot collaboration in cellular manufacturing. In: 2011 IEEE International Symposium on Assembly and Manufacturing (ISAM). Tampere, Finland, 25.-27.05.2011. Piscataway: IEEE, S. 1–6.

Teledyne FLIR LLC: BlackflyS USB3. Hg. v. Teledyne FLIR LLC. Online verfügbar unter <https://www.flir.de/products/blackfly-s-usb3/>, zuletzt geprüft am 04.05.2022.

The Boston Consulting Group (Hg.) (2019): Advanced Robotics in the Factory of the Future. Unter Mitarbeit von Daniel Küpper, Markus Lorenz, Claudio Knizek, Kristian Kuhlmann, Andreas Maue, Ralph Lässig und Tilman Buchner. Online verfügbar unter <https://www.bcg.com/publications/2019/advanced-robotics-factory-future.aspx>, zuletzt geprüft am 09.03.2020.

Thiemermann, Stefan (2003): team@work - Mensch-Roboter-Kooperation in der Montage. In: 2. Workshop für OTS-Systeme in der Robotik. Mensch und Roboter ohne trennende Schutzsysteme. Fraunhofer IPA Workshop F88. Stuttgart. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung.

Thiemermann, Stefan (2005): Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter. Dissertation. Universität Stuttgart. Fakultät Maschinenbau, zuletzt geprüft am 23.01.2020.

Tsai, R. (1987): A versatile camera calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses. In: IEEE Journal on Robotics and Automation 3 (4), S. 323–344. DOI: 10.1109/JRA.1987.1087109.

Universal Robots (2019): About Universal Robots. Our History. Hg. v. Universal Robots. Online verfügbar unter <https://www.universal-robots.com/about-universal-robots/our-history/>, zuletzt geprüft am 17.11.2019.

Uysal, Murat; Nouri, Hatef (2014): Optical wireless communications — An emerging technology. In: 2014 16th International Conference on Transparent Optical Networks (ICTON). Graz, Austria, 06.07.2014 - 10.07.2014: IEEE, S. 1–7.

VDI-Richtlinie VDI 2860, Mai 1990: VDI 2860 Montage- und Handhabungstechnik; Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen; Begriffe, Definitionen, Symbole.

VDMA; MHI e.V. (2016): Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Kollaboration. VDMA- Positionspapier. Hg. v. VDMA Robotik + Automation. Online verfügbar unter <https://www.vdma.org/v2viewer/-/v2article/render/16922076>, zuletzt geprüft am 25.03.2019.

Veo Robotics, Inc.: Veo Robotics - Transforming factories with responsive machines. Hg. v. Inc. Veo Robotics. Online verfügbar unter <https://www.veobot.com/>, zuletzt geprüft am 17.12.2019.

AEU-Vertrag: VERTRAG ÜBER DIE ARBEITSWEISE DER EUROPÄISCHEN UNION (KONSOLIDIERTE FASSUNG) (ABl. 2012/C 326/01).

ViALUX GmbH (2022a): STAR-07. ViALUX Messtechnik + Bildverarbeitung GmbH. Online verfügbar unter <https://www.vialux.de/de/star-07.html>, zuletzt aktualisiert am 25.01.2022, zuletzt geprüft am 04.05.2022.

ViALUX GmbH (2022b): STAR-07 Spezifikationen. Hg. v. ViALUX Messtechnik + Bildverarbeitung GmbH. Online verfügbar unter <https://www.vialux.de/de/star-07-spezifikationen.html>, zuletzt aktualisiert am 16.02.2022, zuletzt geprüft am 04.05.2022.

Villani, Valeria; Pini, Fabio; Leali, Francesco; Secchi, Cristian (2018): Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. In: Mechatronics 55, S. 248–266. DOI: 10.1016/j.mechatronics.2018.02.009.

Vogel, Christian; Elkmann, Norbert (2017): Novel Safety Concept for Safeguarding and Supporting Humans in Human-Robot Shared Workplaces with High-Payload Robots in Industrial Applications. In: Bilge Mutlu und Manfred Tscheligi (Hg.): Proceedings of the Companion of the 2017 ACM/IEEE International Conference on Human-Robot Interaction (HRI). Vienna, Austria, 3/6/2017 - 3/9/2017. New York: ACM, S. 315–316.

Vogel, Christian; Fritzsche, Markus; Elkmann, Norbert (2016): Safe human-robot cooperation with high-payload robots in industrial applications. In: The Eleventh ACM/IEEE International Conference on Human Robot Interaction (HRI). Christchurch, New Zealand, March 7-10, 2016. Piscataway, NJ: IEEE, S. 529–530.

- Vogel, Christian; Poggendorf, Maik; Walter, Christoph; Elkmann, Norbert (2011): Towards safe physical human-robot collaboration: A projection-based safety system. In: 2011 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). San Francisco, CA: IEEE, S. 3355–3360.
- Vogel, Christian; Schulenburg, Erik; Elkmann, Norbert (2020): Projective- AR Assistance System for shared Human-Robot Workplaces in Industrial Applications. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, Austria - Hybrid,, 08 - 11 September 2020. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1259–1262.
- Vogel, Christian; Walter, Christoph; Elkmann, Norbert (2013): A projection-based sensor system for safe physical human-robot collaboration. In: 2013 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Tokyo, Japan, 3 - 7 Nov. 2013. Piscataway, NJ: IEEE, S. 5359–5364.
- Vogel, Christian; Walter, Christoph; Elkmann, Norbert (2015): A projection-based sensor system for ensuring safety while grasping and transporting objects by an industrial robot. In: 2015 IEEE International Symposium on Robotics and Intelligent Sensors (IRIS). Berjaya Langkawi Resort, Langkawi, Malaysia, 18-20 October 2015. Piscataway, NJ: IEEE, S. 271–277.
- Vogel, Christian; Walter, Christoph; Elkmann, Norbert (2017): Safeguarding and Supporting Future Human-robot Cooperative Manufacturing Processes by a Projection- and Camera-based Technology. In: *Procedia Manufacturing* 11, S. 39–46. DOI: 10.1016/j.promfg.2017.07.127.
- Vogel, Christian; Walter, Christoph; Elkmann, Norbert (2021): Space-time extension of the projection and camera-based technology dealing with high-frequency light interference in HRC applications. In: 2021 IEEE 2nd International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS). Magdeburg, Germany, S. 1–6.
- Vu, Clara; Denenberg, Scott; Sobalvarro, Patrick; Barragan, Patrick; Moel, Alberto (2019): DETECTING AND CLASSIFYING WORKSPACE REGIONS FOR SAFETY MONITORING. Veröffentlichungsnr: WO2018148181A1.
- Walter, Christoph; Vogel, Christian; Behrens, Roland; Fritzsche, Markus (2011): Neue Technologien für sichere Mensch-Roboter-Interaktion. In: Fachtagung Sichere Mensch-Roboter-Interaktion. 14. IFF-Wissenschaftstage. Magdeburg, Germany, 30.06.2011. Fraunhofer IFF.
- Walter, Christoph; Vogel, Christian; Elkmann, Norbert (2010): A Stationary Sensor System to Support Manipulators for Safe Human-Robot Interaction. In: Proceedings for the joint conference of ISR 2010 (41st International Symposium on Robotics) und ROBOTIK 2010 (6th German Conference on Robotics). Munich, Germany, 7-9 June 2010, S. 1–6.
- Wang, Lihui (2012): Collaborations towards adaptive manufacturing. In: Liang Gao (Hg.): IEEE 16th International Conference on Computer Supported Cooperative Work in Design (CSCWD). Wuhan, China, 23-25 May 2012. Piscataway, NJ: IEEE, S. 14–21.

Wasenmüller, Oliver; Stricker, Didier (2016): Comparison of Kinect V1 and V2 Depth Images in Terms of Accuracy and Precision. In: Chu-Song Chen, Jiwen Lu und Kai-Kuang Ma (Hg.): Computer Vision - ACCV 2016 International Workshops. Taipei, Taiwan, November 20-24, 2016. Cham, s.l.: Springer International Publishing (Lecture Notes in Computer Science, 10117).

Weng, J.; Cohen, P.; Herniou, M. (1992): Camera calibration with distortion models and accuracy evaluation. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 14 (10), S. 965–980. DOI: 10.1109/34.159901.

Yamada, Y.; Hirasawa, Y.; Huang, S.; Umetani, Y.; Suita, K. (1997): Human-robot contact in the safeguarding space. In: IEEE/ASME Transactions on Mechatronics 2 (4), S. 230–236. DOI: 10.1109/3516.653047.

Yamauchi, Koichiro; Saito, Hideo; Sato, Yukio (2008): Calibration of a structured light system by observing planar object from unknown viewpoints. In: 19th International Conference on Pattern Recognition (ICPR). Tampa, Florida, USA, 8 - 11 December 2008. Piscataway, NJ: IEEE, S. 1–4.

Zanuttigh, Pietro; Marin, Giulio; Dal Mutto, Carlo; Dominio, Fabio; Minto, Ludovico; Cortelazzo, Guido Maria (2016): Time-of-Flight and Structured Light Depth Cameras. Technology and Applications. Cham, s.l.: Springer International Publishing. Online verfügbar unter <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=4532435>.

Zhang, Z. (2000): A flexible new technique for camera calibration. In: IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence 22 (11), S. 1330–1334. DOI: 10.1109/34.888718.

Zimmer Group GmbH: MRK Komponenten. Kollaborative Greifer. Zimmer Group GmbH. Online verfügbar unter <http://www.zimmer-group.de/de/mainmenu/megamenu/col1/mrk-greifer>, zuletzt geprüft am 23.10.2018.

Eigene Publikationen, Fachvorträge und Patente

Peer-reviewed Artikel:

- Walter, C.; Vogel, C.; Elkmann, N.: „A Stationary Sensor-System supporting Manipulators at Safe Human-Robot interaction.“ Joint 41st International Symposium on Robotics and 6th German Conference on Robotics (ISR/Robotik), Munich, Germany, 2010
- Vogel, C.; Poggendorf, M.; Walter, C.; Elkmann, N.: „Towards safe Physical Human-Robot Collaboration: A Projection-based Safety System“, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2011 IEEE/RSJ International Conference on, San Francisco, USA, 25-30. Sept. 2011
- Elkmann, N.; Fritzsche, M.; Vogel, C.; Walter, C.; Behrens, R.: „Neue Technologien für die sichere Mensch-Roboter-Interaktion in der Produktion und Medizintechnik.“ In: Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg: 10. Magdeburger Maschinenbau-Tage, Magdeburg, Germany, Sept. 2011
- Vogel, C.; Walter, C.; Elkmann, N.: „Exploring the possibilities of supporting robot-assisted work places using a projection-based sensor system“; Robotic and Sensors Environments (ROSE), IEEE International Symposium on, Magdeburg, Germany, 16.-18. Nov. 2012
- Vogel, C.; Walter, C.; Elkmann, N.: „A Projection-based Sensor System for Safe Physical Human-Robot Collaboration“, Intelligent Robots and Systems (IROS), 2013 IEEE/RSJ International Conference on, Tokyo, Japan, 03.-07. Nov. 2013
- Vogel, C.; Walter, C.; Elkmann, N.: „A Projection-based Sensor System for Ensuring Safety While Grasping and Transporting Objects by an Industrial Robot“, 2015 IEEE International Symposium in Robotics and Intelligent Sensors (IRIS), Langkawi, Malaysia, 18.-20. Oct. 2015
- Behrens, R.; Saenz, J.; Vogel, C.; Elkmann, N.: „Upcoming Technologies and Fundamentals for Safeguarding All Forms of Human-Robot Collaboration“, 8th International Conference Safety of Industrial Automated Systems (SIAS 2015), Königswinter, Germany 18.-20. November, 2015. ISBN 987-3-86423-163-6
- Vogel, C.; Fritzsche, M.; Elkmann, N.: „Safe Human-Robot Cooperation with high payload robots in industrial applications“, Human-Robot Interaction (HRI), 11th International Conference on, New Zealand, 07.-10. March, 2016
- Vogel, C.; Saenz, J.: „Optical Workspace Monitoring System for Safeguarding Tools on the Mobile Manipulator VALERI“, 47th International Symposium on Robotics - ISR 2016, Munich, Germany, 21.-22. June, 2016.

- Maurtua, I.; Pedrocchi, N.; Orlandini, A.; de Gea Fernández, J.; Vogel, C.; Geenen, A.; Althoefer, K.; Shafti, A.: „FourByThree: Imagine humans and robots working hand in hand”, 21st IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation, Berlin, Germany, 06.-09. September, 2016
- Saenz, J.; Penzlin, F.; Vogel, C.; Fritzsche, M.: „VALERI - A collaborative mobile manipulator for aerospace production”, 19th International Conference on Climbing and Walking Robots and Support Technologies for Mobile Machines (CLAWAR 2016) - Workshop on Collaborative Robots for Industrial Applications, London, United Kingdom, 12.-14. September, 2016.
- Vogel, C.; Elkmann, N.: „Novel Safety Concept for Safeguarding and Supporting Humans in Human-Robot Shared Workplaces with High-Payload Robots in Industrial Applications”, Human-Robot Interaction (HRI), 12th International Conference on, Vienna, Austria, 06.-09. March, 2017
- Vogel, C.; Walter, C.; Elkmann, N.: „Safeguarding and supporting future human-robot cooperative manufacturing processes by a projection- and camera-based technology”, Conference on Flexible Automation and Intelligent Manufacturing, FAIM2017, Modena, Italy, 27.-30. June, 2017
- Petersen H.; Behrens R.; Saenz J.; Schulenburg E.; Vogel C.; Elkmann N.: „Reliable Planning of Human-Robot-Collaboration featuring Speed and Separation Monitoring”, 9th International Conference on Safety of Industrial Automated Systems – SIAS 2018. Nancy, France, 10.-12. October, 2018
- Vogel, C.; Schulenburg, E.; Elkmann, N.: „Projective- AR Assistance System for shared Human-Robot Workplaces in Industrial Applications”. In: 2020 25th IEEE International Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (ETFA). Vienna, Austria - hybrid, 08.-11. September, 2020.
- Vogel, C.; Walter, C.; Elkmann, N.: „Space-time extension of the projection and camera-based technology dealing with high-frequency light interference in HRC applications”. In: 2021 IEEE 2nd International Conference on Human-Machine Systems (ICHMS). Magdeburg, Germany, 08.-10. September 2021

Buchartikel:

- Vogel C.; Walter C.; Elkmann N.: „Experimental Evaluation of Advanced Sensor-Based Supervision and Work Cell Integration Strategies - EXECCELL -“. In: Florian Röhrbein, Germano Veiga, and Ciro Natale, editors, „Gearing Up and Accelerating - Cross-fertilization between Academic and Industrial Robotics Research in Europe: Technology transfer experiments from the ECHORD project”, Springer Tracts in Advanced Robotics (STAR), Vol 94, pages 29-45. Springer International Publishing, 2014, ISBN 978-3-319-03837-7

Fachvorträge:

- Walter, C.; Vogel, C.; Behrens, R.; Fritzsche, M.: „Neue Technologien für sichere Mensch-Roboter-Interaktion“, Fachtagung „Sichere Mensch-Roboter-Interaktion“, Fraunhofer IFF, Magdeburg, Germany, June 2011
- Vogel, Christian: „Projection-based sensor system for providing safety and interaction capabilities in human-robot cooperative applications“; on Workshop „3rd Workshop on Hybrid Production Systems“, european Robotics Forum 2016, Ljubljana, Slovenia, March 2016
- Vogel, Christian: „Safe Human-Robot Cooperation with high payload robots in industrial applications “; on Workshop „4th Workshop on Hybrid Production Systems“, european Robotics Forum 2017, Edinburgh, Scotland, March 2017
- Vogel, Christian: „Projection and camera-based technology for workspace surveillance in human-robot cooperation scenarios“; on Workshop „Next Generation Robots for the Factory of the Future“, Advanced Robotics Centre QMUL (ARQ), The Royal Society, London, United Kingdom, November 2017

Patente:

- US9596451B: Walter, C.; Vogel, C.; Elkmann, N.: „Device for monitoring at least one three-dimensional safety area“; Erteilt am 14.03.2017
- EP2558886B1: Walter, C.; Vogel, C.; Elkmann, N.: „Device for monitoring at least one three-dimensional safety area“; Erteilt am 05.03.2014
- US20190018382A1: Elkmann, N.; Vogel, C.; Fritzsche, M.: „Device for securing a safety area around at least one automatically operating machine“; Erteilt am 19.04.2021
- EP3334972B1: Elkmann, N.; Vogel, C.; Fritzsche, M.: „Device for securing a safety area around at least one automatically operating machine“; Erteilt am 20.10.2021
- US10891487B2: Elkmann, N.; Walter, C.; Vogel, C.: „Device and method for generating and monitoring a safety area in a work space“; Erteilt am 12.01.2021
- EP3599411A1: Elkmann, N.; Walter, C.; Vogel, C.: „Device and method for generating and monitoring a safety area in a work space“; Erteilt am 16.11.2022