

# **Entwicklung eines Konzepts zur sicheren Personenerfassung als Schutzeinrichtung an kollaborierenden Robotern**

**Dissertation  
zur Erlangung eines Doktorgrades**

im  
**Fachbereich D – Architektur, Bauingenieurwesen, Maschinenbau,  
Sicherheitstechnik**  
der  
**Bergischen Universität Wuppertal**

**- Abteilung Sicherheitstechnik -**

vorgelegt von  
**Björn Ostermann**  
aus Köln

Wuppertal, im Juni 2014

Die Dissertation kann wie folgt zitiert werden:

urn:nbn:de:hbz:468-20140702-113540-2

[<http://nbn-resolving.de/urn/resolver.pl?urn=urn%3Anbn%3Ade%3Ahbz%3A468-20140702-113540-2>]

## Danksagung

Zum Gelingen dieser Arbeit haben viele Personen beigetragen, denen ich an dieser Stelle danken möchte.

Ganz besonders möchte ich mich bei Dirk Kurras, Benjamin Heisel und Alexander Kirfel bedanken, die im Rahmen ihres Studiums an der im Rahmen dieser Arbeit entstandenen Schutzzeirichtung mitgewirkt haben.

Im Institut für Arbeitsschutz der DGUV bedanke ich mich bei:

- Prof. Dr. Dietmar Reinert, für die Möglichkeit die Anstellung beim IFA mit dem Durchführen einer Promotion kombinieren zu können. Besonders möchte ich mich für das gründliche Durchsehen der Arbeit und seine Anregungen bedanken.
- Dr. Michael Schaefer, für die unermüdliche Unterstützung mit Material und Manpower, die das Projekt zum Erfolg geführt haben und für den Ratschlag, nicht gleich die erste Idee umsetzen zu wollen. Ich bedanke mich auch für die Durchsicht der Arbeit und seine Anregungen.
- Dr. Michael Huelke, für die sehr gute Betreuung in der Projektarbeit und dafür, dass er jederzeit als Gesprächspartner zur Verfügung stand. Weiterhin bedanke ich mich für das Korrekturlesen und seine Anregungen.
- Torsten Borowski für die Unterstützung mit seiner großen Expertise im Bereich Ultraschallsensoren und für das Aufspüren von immer neuen Lieferanten für Hardware und das Überreden dieser Lieferanten, ihr Insiderwissen zur Hardware weiterzugeben.
- Dieter Kamin und allen anderen Kollegen der Elektronikwerkstatt für die Unterstützung bei den selbstgebauten Platinen und deren Installation. Vielen Dank auch für die Unterstützung bei der Betreuung meiner Studenten in allen elektrischen Fragen und dafür, dass ich für eine längere Zeit ihr Programmiergerät entführen durfte.
- Wilfried Olbert und allen Kollegen der mechanischen Werkstatt für die vielen guten Ideen zur Befestigung der Sensoren und der Steuerung und die liebevolle und bis ins Detail perfekte Umsetzung, sowie dafür, dass ich für alle mechanischen Fragen immer einen Ansprechpartner fand.
- Dr. Daniel Förster, Dr. Andrea Wolff und alle anderen Kollegen aus dem Referat 4.1: Lärm, für die Messung und Auswertung der Ultraschallemissionen der Schutzzeirichtung, für die Erläuterung der theoretischen Hintergründe und für die fachliche Diskussion der entsprechenden Kapitel.
- Alle anderen Mitarbeiter für die vielen Kleinigkeiten, vom Verleihen von Werkzeugen, sündhaft teuren Netzteilen, bis hin zum „Verleihen“ von Kabelbindern, die diese Arbeit erst möglich gemacht haben.

Weiterhin bedanke ich mich bei Willi Standke von der Abteilung „Statistik - Makrodaten, Arbeits- und Schülerunfälle“ der Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung, für die immer schnelle Lieferung aktueller Daten zu Unfällen mit Robotern.

Ich bedanke mich bei meiner betreuenden Professorin Dr.-Ing. habil. Anke Kahl für die Unterstützung bei der Bewerbung als externer Promovend. Ich bedanke mich ebenso für die sehr gute Betreuung. Zu keiner Zeit war es ihr zu viel, meine Fragen zu beantworten. Die Möglichkeiten mich regelmäßig als externer Promovend mit meinen Mitpromovenden austauschen zu können, besonders bei den Promotionstagen, hat mir viel für meine Arbeit gebracht. Weiterhin bedanke ich mich für die Möglichkeit mein Wissen an die Studenten der Bergischen Universität Wuppertal weitergeben zu dürfen.

Ich bedanke mich bei Professor Dr.-Ing. Olaf Stursberg, dass er ohne zu zögern bereit war, zum Ende des Projekts EsIMiP für den zu dieser Zeit ausscheidenden Professor, Dr.-Ing. Frank Schiller, einzuspringen. Weiterhin bedanke ich mich für die gute konstruktive Zusammenarbeit im Projekt EsIMiP. Außerdem bedanke ich mich für das gründliche Durchsehen der Arbeit und seine Anregungen.

Professor Dr. rer. pol. Ralf Pieper danke ich für das Korrekturlesen der rechtlichen Teile dieser Arbeit und die immer wieder aufmunternden Emails, die mich gerade während der Schreibearbeit immer wieder motiviert haben.

Neben Professor Stursberg bedanke ich mich auch bei allen anderen Mitwirkenden im Projekt EsIMiP. Ich danke:

- Dr.-Ing. Frank Schiller, der das Projekt EsIMiP ins Leben gerufen und lange Zeit geleitet hat. Bis zu seinem Ausscheiden hat er sich gerne als Zweitprofessor für diese Arbeit zur Verfügung gestellt.
- Franz Som und seinen Kollegen bei Reis Robotics, die immer bereit waren Anforderungen, die im Rahmen dieser Arbeit an die Roboterschnittstelle aufkamen, direkt und unproblematisch umzusetzen. Alle Fragen zum Roboter und seiner Steuerung wurden hier schnell und kompetent beantwortet.
- Werner Düpjohnann und seinen Kollegen bei Baumüller, die mich mit demselben Engagement und derselben Kompetenz wie die Mitarbeiter von Reis bei der Schnittstelle der sicheren Bewegungsüberwachung unterstützt haben.
- Allen anderen am Projekt Beteiligten, die bei unseren Arbeitstreffen immer wieder gute Ideen ausgetauscht haben.

Weiterhin möchte ich mich bei den Firmen bedanken, die diese Arbeit mit der Lieferung von Hardware und Insiderinformationen unterstützt haben:

- Johannes Schulte und seinem Team von microsonic GmbH danke ich nicht nur für die Bereitstellung der Sensoren, sondern auch für die gute Beratung zur Machbarkeit verschiedener in dieser Arbeit dargestellter Ansätze.
- Oliver El Bezi von der Bosch Engineering GmbH und Matthias Strobel von der InMach Intelligente Maschinen GmbH danke ich für die Versorgung mit Sensoren und Beschreibungen der Protokolle der Schnittstellen.

Ebenfalls bedanke ich mich bei denjenigen, die mich über alternative Ansätze und Technologien austauschen konnte:

- Luer Luetkens von Luetkens Automation, für die vielen guten Informationen zu kapazitiven Sensoren.
- Daniel Podgórski vom Central Institute for Labour Protection – National research institute aus Polen für die Zusendung seiner Doktorarbeit und der Lieferung weiterer Informationen zum von ihm in 1991 genutzten System.

Last, but not least:

Ich danke meiner Familie für die Unterstützung während meiner gesamten Studiendauer, die es mir erst ermöglicht hat, diese Arbeit durchzuführen und abzuschließen.

Ich danke meiner Frau für ihre Geduld, die besonders zum Ende auf eine harte Probe gestellt wurde.

Ich danke meiner Schwester für die grammatikalische Prüfung der Arbeit, ohne die sie um einige hundert Kommas ärmer gewesen wäre.

Besonders möchte ich mich bei meinem Vater bedanken, dessen unermüdliches „*versteh ich nicht*“ beim Korrekturlesen mich gezwungen hat, die Arbeit in der Form abzugeben, in der sie heute vorliegt.

Dissertation: Björn Ostermann, Juni 2014

## Kurzfassung

Der Einsatz von kollaborierenden Robotern, also die Zusammenarbeit von Mensch und Maschine, wird zunehmend interessanter für den industriellen Einsatz. Das prozesstechnisch vorteilhafte direkte Zusammenarbeiten von Mensch und Maschine ist nicht ungefährlich und muss deshalb mit der notwendigen Sicherheitstechnik begleitet werden.

In der Praxis existieren jedoch nur wenige kollaborierende Roboter, die den rechtlich vorgegebenen Sicherheit- und Gesundheitsschutzanforderungen entsprechen. Diese Systeme basieren auf reduzierten Kräften des Roboters und Kollisionserkennungen. Es wird mit weiteren Lösungsansätzen geforscht, die unterschiedliche Technologien verwenden. Der Nachweis, dass diese am Ende den rechtlichen Anforderungen entsprechen, wurde allerdings noch nicht geführt.

Die vorliegende Arbeit entwickelt ein Konzept einer Schutzeinrichtung für kollaborierende Roboter, die ein sicheres Anhalten des Roboters vor der Kollision mit dem Menschen ermöglicht.

Hierzu werden die rechtlichen Grundlagen des Produktrechts und des Arbeitsschutzrechts aufgezeigt, die Anforderungen an solche Schutzeinrichtung stellen. Für die konkreten sicherheitstechnischen Anforderungen werden die Inhalte der einschlägigen Normen herangezogen, die für die Schutzeinrichtung die allgemein anerkannten Regeln der Technik darstellen.

Der Stand der Technik und der Stand von Wissenschaft und Technik von Sensorsystemen im Bereich kollaborierende Roboter werden gezeigt und ein mögliches Sensorsystem für die Schutzeinrichtung wird entwickelt. Zu diesem Sensorsystem werden passende Algorithmen entwickelt, die eine für die praktische Anwendung ausreichend schnelle Reaktion des Systems in Echtzeit ermöglichen.

Die gesamte Entwicklung der Schutzeinrichtung zielt dabei auf die Erfüllung der rechtlichen und normativen Vorgaben, so dass am Ende der vorliegenden Arbeit sowohl die praktische, wie auch die rechtliche Machbarkeit nachgewiesen werden.

## Abstract

The use of collaborative robots that is the cooperation of man and machine is becoming increasingly attractive for industrial use. The procedural advantageous collaboration between man and machine is not without danger and must be accompanied by the necessary safety features and equipment.

In practice, however, there are few collaborative robots that meet the legally binding safety and health requirements. These systems are based on the reduced strength of the robot and collision detections. Research is being conducted on other approaches using different technologies. The verification that they meet the legal requirements has not yet been done.

This paper develops a concept of a protective device for collaborative robots, enabling a safe stop of the robot before a collision with a human occurs.

To this end, the legal basis of product legislation and labour protection laws are shown, which provide requirements on such protection devices. For specific safety requirements, the contents of the relevant standards are consulted, which represent the sound engineering practice for protective devices.

The state of the art and the state of science and technology of sensor systems in the field of collaborative robots are shown and a feasible sensor system for a protective device is developed. For this sensor system matching algorithms are developed that, for practical applications, allow a sufficiently fast system response in real time.

The entire development of the protective device in this work aims to meet the legal and technical standards, so that at the end of the present study both the practical and legal feasibility is demonstrated.

## Inhalt

1	Einleitung.....	11
1.1	Problemstellung – Thema der Arbeit .....	11
1.2	Aufgabenstellung .....	12
1.3	Motivation.....	13
1.3.1	Allgemein – Ziele der kollaborierenden Robotik.....	13
1.3.2	Speziell – Unfallgeschichte mit industriellen Robotern.....	13
1.4	Einordnung der Arbeit .....	16
1.4.1	Effiziente und sichere Interaktion von Menschen und intelligenten Produktionsanlagen – EsIMiP .....	16
1.4.2	Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung – IFA .....	16
1.5	Thesen.....	17
1.6	Vorgehensweise.....	17
2	Rechtliche Grundlagen für die Sicherheit von Schutzeinrichtungen an Maschinen .....	19
2.1	Europäischer Binnenmarkt .....	19
2.2	Richtlinien – Inverkehrbringen.....	20
2.2.1	Europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG .....	20
2.2.2	Sonstiges Binnenmarktrecht.....	22
2.3	Richtlinien – Arbeitsschutz .....	22
2.3.1	Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie 89/391/EWG .....	23
2.3.2	Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie 2009/104/EG .....	23
2.4	Nationales Recht als Umsetzung des EG-Rechts.....	24
2.4.1	Produktsicherheitsgesetz - ProdSG - .....	25
2.4.2	Maschinenverordnung - 9. ProdSV - .....	26
2.4.3	Arbeitsschutzgesetz .....	27
2.4.4	Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV - .....	28
2.4.5	Bezugnahmen auf technische Regeln in Rechtsvorschriften .....	29
2.4.5.1	Allgemein anerkannte Regeln der Technik .....	30
2.4.5.2	Stand der Technik .....	30
2.4.5.3	Stand der / von Wissenschaft und Technik.....	30
2.5	Zusammenfassung: Rechtliche Einordnung des Robotersystems .....	31
3	Technische Anforderungen an Schutzeinrichtungen für Robotersysteme .....	33
3.1	Sicherheitstechnische Anforderungen aus der MRL .....	33
3.1.1	Auswahl von Schutzeinrichtungen.....	34
3.1.2	Anforderungen an Schutzeinrichtungen.....	35
3.1.3	MRL - Steuerungen und Befehlseinrichtungen .....	35
3.1.4	Strahlung von außen .....	36
3.1.5	Lärmanforderungen.....	36
3.2	Sicherheitstechnische Anforderungen aus Normen.....	37
3.2.1	Angewandte Normen.....	37
3.2.2	EN ISO 10218 Teil 1 und 2 „Industrielle Roboter“ .....	37
3.2.2.1	Benötigter Performance Level für kollaborierende Roboter .....	37
3.2.2.2	Sicher begrenzte Geschwindigkeit.....	39
3.2.2.3	Anforderungen an den Arbeitsraum / Kollaborationsraum .....	39

3.2.3	EN ISO 13849-1 „Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“ .....	40
3.2.3.1	Anforderungen an die Programmierung.....	40
3.2.3.2	Anforderung an die Sicherheit der Steuerung.....	41
3.2.3.2.1	Kategorie.....	41
3.2.3.2.2	Performance Level .....	42
3.2.3.2.3	Ausfälle aufgrund gemeinsamer Ursache - CCF.....	44
3.2.3.3	Fehlerbetrachtung nach EN ISO 13849-1.....	44
3.2.4	EN ISO 13855 „Anordnung von Schutzeinrichtungen“ .....	44
3.2.4.1	Eindringabstand .....	45
3.2.4.2	Nachlauf des gesamten Robotersystems .....	45
3.2.4.3	Mindestabstand .....	46
3.2.4.4	Bewegungsgeschwindigkeit.....	47
3.2.5	EN 61496-1 „Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen“.....	48
3.2.6	VDI 2058-2 und VDI 3766 „Am Arbeitsplatz erlaubter Ultraschallpegel“ .....	49
4	Arbeitssystem .....	51
4.1	Arbeitssystem des Demonstrators im Projekt EsIMiP .....	52
4.2	Arbeitsmittel .....	53
4.3	Arbeitsgegenstand .....	54
5	Übersicht über kollaborierende Roboter.....	55
5.1	Stand der Technik in der Robotik .....	55
5.1.1	Sicher begrenzter Arbeitsraum.....	55
5.1.2	Schutzeinrichtungen.....	56
5.1.3	Handgeführte Roboter .....	56
5.1.4	Einzelplatzlösungen .....	57
5.2	Stand von Wissenschaft und Technik in der Robotik.....	58
5.2.1	Untersuchung und Vergleich von eingesetzten Sensorsysteme an kollaborierenden Robotern .....	58
5.2.1.1	Platzierung der Sensoren im Arbeitsplatz.....	59
5.2.1.2	Aktive und passive Sensorsysteme .....	61
5.2.2	Untersuchung und Vergleich von eingesetzten Sensortypen an kollaborierenden Robotern .....	62
5.2.2.1	Taktile / Momenten-Sensoren.....	62
5.2.2.2	Optoelektronische Sensoren (Kameras).....	62
5.2.2.3	Optoelektronische Sensoren (Laserscanner).....	63
5.2.2.4	Ultraschallsensoren.....	64
5.2.2.5	Kapazitive Sensoren.....	65
5.2.2.6	Radar (Mikrowellen) .....	66
5.2.3	Fazit.....	66
6	Entwicklung eines Sensorkonzeptes.....	69
6.1	Mögliche Sensorkonzepte .....	69
6.1.1	Egozentrischen Platzierung.....	70
6.1.1.1	Im Kreis um den Arm platziert .....	70
6.1.1.2	Am oberen Ende des Arms platziert, zum Tool Center Point messend .....	71
6.1.1.3	Mittig platziert, in verschiedenen Winkeln nach allen Seiten messend .....	71

6.1.1.4	Flächendeckend platziert.....	72
6.1.1.5	Senkrecht zum Tool Center Point messend.....	73
6.1.1.6	In verschiedenen Winkeln in Bewegungsrichtung des Tool Center Point messend .....	74
6.1.1.7	Bewegliche Anbringung.....	75
6.1.2	Messung mit mehreren Ultraschallsensoren.....	76
6.2	Auswahl des Sensorkonzepts .....	77
6.2.1	Egozentrischen Platzierung.....	77
6.2.2	Messung mit mehreren Ultraschallsensoren.....	80
7	Entwicklung eines Algorithmus zur Robotersteuerung .....	85
7.1	Bestimmung des freien Raums .....	85
7.1.1	Erfassung aller Sensoren als ein Messwert.....	86
7.1.2	Geometrische Formen der Ultraschallkeulen als Oberfläche vereinen.....	87
7.1.3	Kombination aller Sensorwerte in Voxeln .....	88
7.1.4	Kombination aller Sensorwerte in einem Octree.....	89
7.1.5	Kombination aller Sensorwerte zu einer Außenfläche des freien Raums.....	92
7.1.5.1	Geometrische Vereinfachung der Sensorkeulen.....	92
7.1.5.2	Vereinigung der Oberflächen der Kugelausschnitte zu einer gemeinsamen Oberfläche .....	94
7.1.5.2.1	Verlustfreie Vereinigung der Oberflächen .....	94
7.1.5.2.2	Rasternetz zur Vereinigung der Oberflächen .....	94
7.1.5.2.3	Algorithmus zur einkanaligen Vereinigung der Oberflächen mittels Rasternetz.....	96
7.1.5.2.4	Erweiterung des Algorithmus auf zweikanalige Vereinigung der Oberflächen mittels Rasternetz.....	98
7.1.5.2.5	Vorbereiten der Oberfläche für Kollisionsberechnung .....	99
7.1.5.2.6	Anpassen der Oberfläche an den erforderlichen Mindestabstand .....	100
7.1.5.2.7	Anpassen der Oberfläche an die Möglichkeit der waagerechten Eindringung .....	100
7.1.5.2.8	Fazit zur Methode der Vereinigung der Oberflächen mittels Rasternetz.....	101
7.2	Bestimmung der zulässigen Geschwindigkeit.....	102
7.2.1	Bekannte Ansätze zur Bestimmung der maximal zulässigen Geschwindigkeit.....	102
7.2.2	Entwickelter Ansatz zur Bestimmung der maximal zulässigen Geschwindigkeit.....	103
7.2.2.1	Bestimmung der geplanten Roboterbewegung .....	104
7.2.2.2	Bestimmung der Kollision mit der Oberfläche des freien Raums .....	106
7.2.3	Berechnung der Kollision mit dem angezeigten freien Raum auf der vorgegebenen Bewegungsbahn.....	107
7.3	Dynamisierung des Sicherheitsabstands.....	109
7.4	Bekannte statische Objekte im Arbeitsraum .....	110
7.4.1	Reales und virtuelles Einlernen der Umgebung .....	111
7.4.2	Karte der statischen Umgebung .....	112
7.4.3	Unterscheidung der statischen und dynamischen Objekte .....	112
8	Aufbau der Programme .....	115
8.1	Kalibrierung der Position der Sensoren am Roboterarm – 2D .....	115



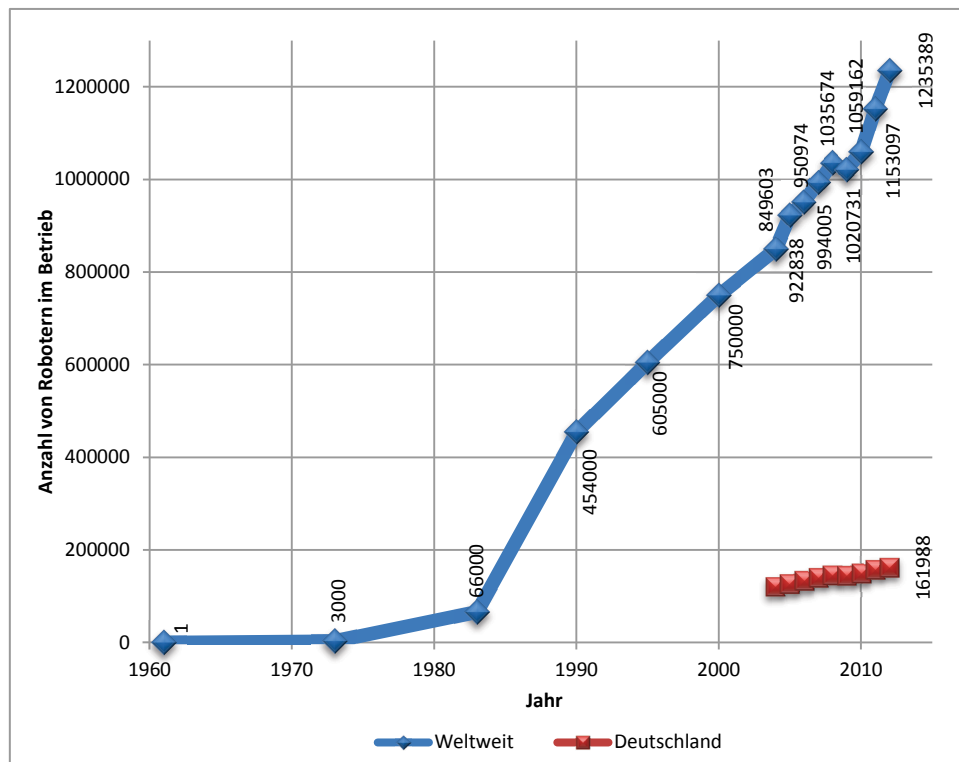
8.2	Kalibrierung der Position der Sensoren am Roboterarm – 3D .....	115
8.3	Erfassung der Umgebung mit Ultraschallsensoren – erster Demonstrator.....	116
8.4	Ansteuerung der Schnittstellen mittels EtherCAT .....	117
8.5	Erfassung der Umgebung mit Ultraschallsensoren – zweiter Demonstrator .....	118
8.5.1	Für die Demonstratorschiene ohne Roboter.....	118
8.5.2	Erweiterung um Roboterschnittstelle und Position.....	119
9	Untersuchung der Qualität und Sicherheit der Schutzeinrichtung .....	121
9.1	Rechenaufwand der Berechnung der maximal zulässigen Geschwindigkeit.....	121
9.2	Fehlerbetrachtung nach EN ISO 13849-1 .....	122
9.2.1	Nachweis des erreichten Performance Levels - PL - .....	122
9.2.1.1	Erreichte Kategorie.....	122
9.2.1.2	Erreichte mittlere Zeit jedes Kanals bis zum gefahrbringenden Ausfall - $MTTF_d$ .....	125
9.2.1.3	Erreichter Diagnosedeckungsgrad - DC .....	125
9.2.1.4	Erreichter Performance Level - PL - Ergebnis.....	126
9.2.2	Erreichter Schutz gegen Ausfälle durch gemeinsame Ursachen - CCF.....	127
9.3	Einteilung des Typs der Berührungslos wirkenden Schutzeinrichtung nach EN 61496-1 .....	127
9.4	Messung und Beurteilung der Ultraschallbelastung durch das Sensorarray .....	127
9.5	Umsetzung der signifikanten grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen.....	129
9.5.1	Steuerungen und Befehlseinrichtungen.....	130
9.5.2	Anforderungen an Schutzeinrichtungen.....	131
9.5.3	Risiken durch sonstige Gefährdungen.....	133
10	Zusammenfassung und Ausblick .....	135
10.1	Zusammenfassung.....	135
10.2	Thesen Betrachtung.....	135
10.3	Praktischer Nutzen.....	136
10.4	Ausblick .....	137
11	Verzeichnisse .....	139
11.1	Abbildungsverzeichnis.....	139
11.2	Tabellenverzeichnis .....	142
11.3	Abkürzungsverzeichnis .....	142
11.4	Literaturverzeichnis .....	143
11.4.1	Europäische Verträge, Richtlinien sowie nationale Gesetze und Verordnungen .....	145
11.4.2	Normen und Technische Regeln .....	147
11.4.3	Veröffentlichungen zu kollaborierende Roboter – allgemein.....	148
11.4.4	Veröffentlichungen zu kollaborierende Roboter – existierende Produkte.....	151
11.4.5	Veröffentlichungen zu kollaborierende Roboter – aus EsMiP, ohne eigene Beteiligung.....	152
11.4.6	DGUV Artikel und Paper .....	152
11.4.7	Eigene Werke.....	153
12	Anhang I: Maximale Geschwindigkeit des Reis RV 30-16.....	155
13	Anhang II: Beschreibung der gewählten Hard- und Software.....	157
13.1	Hardware .....	157

13.1.1	microsonic Ultraschallsensor .....	157
13.1.2	BOSCH Ultraschallsensor .....	157
13.1.3	Beckhoff EtherCAT-Koppler und Klemmen .....	158
13.1.4	EtherCAT-Slavekarte.....	158
13.1.5	Sensorbefestigung .....	159
13.1.6	Knickarmroboter – Reis RV 30-16 .....	159
13.2	Software.....	159
13.2.1	TwinCAT I/O.....	159
13.2.2	Microsoft Visual Studio 2008 / 2010 Express.....	159
14	Anhang III: Mathematische Formeln zur Berechnung der Kollision .....	161
14.1	Bestimmung der Oberfläche des freien Raums .....	161
14.1.1	Berechnung der Rasterlinienlänge über den Sinussatz .....	162
14.1.2	Berechnung der Rasterlinienlänge über den Satz des Pythagoras .....	163
14.1.3	Rechenaufwand zur Bestimmung der Oberfläche des freien Raums.....	163
14.2	Kollision mit der Oberfläche des freien Raums.....	164
14.2.1	Berechnung des Durchstoßpunkts in der Oberfläche des freien Raums.....	164
14.2.2	Optimierung der Rechenzeit.....	166
14.3	Rechenaufwand zur Bestimmung der Lage des Roboterarms im dreidimensionalen Raum.....	169

# 1 Einleitung

## 1.1 Problemstellung – Thema der Arbeit

Erfunden in 1954 [3] und erstmals eingesetzt in 1961 bei General Motors, übernehmen industrielle Roboterarme mehr und mehr Aufgaben in modernen Industrieunternehmen. Ende 2012 waren weltweit bereits mehr als 1,2 Millionen Roboter in der Industrie im Einsatz, hiervon etwa 381.000 in Europa und ca. 162.000 in Deutschland [4]. Abbildung 1 zeigt die globale Entwicklung der industriellen Roboter sowie die Entwicklung in Deutschland seit 2004.



**Abbildung 1: Anzahl von Robotern im Betrieb, 1961 – 2012**  
 Datenquelle: IFR Statistical Department [4]

Roboter sind durch ihre Präzision, Wiederholungsgenauigkeit und Ausdauer menschlichen Mitarbeitern in bestimmten Aufgabenbereichen überlegen. Durch die Große Varianz an Roboterarmen, Traglasten reichen von wenigen Gramm [5] bis zu über einer Tonne [6], kann ein Roboterarm auch ganze Maschinen ersetzen. Er bleibt dabei aber flexibel genug, um ohne Umbau an neue Produktlinien angepasst werden zu können.

Diese Flexibilität ist auf sicherheitstechnischer Seite eine Herausforderung. Während die Gefahrstellen anderer Maschinen erkennbar eingegrenzt werden können, gilt für Roboter durch den Schwenkbereich des Roboterarms in der Regel eine größere, nicht direkt erkennbare Gefahrenzone „an und nahe der Roboterzelle“ [30].

Neben dem Einhausen des Roboterarbeitsraums mit Sicherheitszäunen oder berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen (Laserscanner, Lichtschranke, Kamera) kann auch der Arbeitsraum des Roboterarms über Hardware- und Softwareschranken eingeschränkt werden, um Risiken zu minimieren. Der Einsatz von Schranken erlaubt es, den Platzbedarf des Roboters zu reduzieren, ohne die Flexibilität für neue, unbekannte Aufgaben durch die Wahl eines kleineren Modells einzuschränken. Es bleibt bei diesen Lösungen aber immer bestehen, dass ein Roboter seinen zugewiesenen Arbeitsraum nur mit anderen Maschinen teilen kann.

Eine sichere Zusammenarbeit von Mensch und Roboter (normativ: Kollaboration [57]) ist mit den oben angegebenen Methoden nur über zusätzliche Einrichtungen, die Schnittstellen im Arbeitsraum bilden, oder das zeitweise Stillsetzen des Roboters möglich.

Neue Ansätze verfolgen kollaborierende Roboter. Diese können

- mechanisch so gestaltet sein, dass die von ihnen aufgebrauchten Kräfte nur gering und für Menschen grundsätzlich ungefährlich sind;
- mit Sensoren ausgestattet sein, die Kollisionen erkennen und Kräfte nur im Bedarfsfall reduzieren;
- mit Sensoren in ihrer Umgebung verknüpft sein, die den Arbeitsraum überwachen und nur solche Bereiche freigeben, die als frei von Menschen erkannt wurden. Diese Sensoren können
  - am Roboter selbst befestigt sein oder
  - in der Umgebung des Roboters fest oder flexibel angebracht sein.

Die eingesetzte Sensortechnik, wie auch die Steuerung des Roboters, müssen in den letzteren Fällen in sicherer Technik ausgeführt sein, da ein Fehlverhalten Menschen gefährden kann.

Die Lösung mit geringen mechanischen Kräften hat nur ein geringes Anwendungsfeld. Aus diesem Grund wird seit Beginn der 80er Jahre [73] an Lösungen mit Sensortechnik geforscht. Es existieren bereits Einzelplatzlösungen, die von Prüfstellen für bestimmte konkrete Anwendungen abgenommen sind. [129] Der Vorteil der Flexibilität geht hierbei allerdings verloren. (siehe Kapitel 5.1.4) Allgemeingültige, grundsätzliche Lösungen für kollaborierende Roboter existieren zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht.

Diese Arbeit befasst sich mit Sensoren, die am Roboterarm angebracht, dessen Umgebung wahrnehmen und Algorithmen, die daraufhin Bereiche um den Roboter als frei von Hindernissen bzw. belegt klassifizieren. Die Sensoren und Algorithmen sind für sicherheitstechnische Anwendungen konzipiert und das Konzept der Sicherheit wird dargestellt.

## 1.2 Aufgabenstellung

Aufgabe im vorliegenden Promotionsvorhaben ist es, ein Konzept eines sicheren Personenerfassungssystems als Schutzeinrichtung an kollaborierenden Robotern zu entwickeln. Diese soll eine sichere Mensch-Roboter Kollaboration in der Art zulassen, dass sich ein Mensch möglichst nah an den Roboter begeben kann, ohne dass der Roboter still stehen muss.

Zur Erfüllung dieses Ziels muss:

- ein Konzept einer sicheren Sensorik entwickelt werden;
- ein Demonstrator dieser sicheren Sensorik gebaut werden;
- ein möglichst schneller, verifizierbarer Algorithmus zur Abstandsberechnung und / oder Kollisionsvorhersage entwickelt werden;
- eine möglichst schnelle Bestimmung der für den Roboter zulässigen Geschwindigkeit im 6-dimensionalen Bewegungsraum des Roboters entwickelt werden;
- die theoretische Rechtskonformität der Schutzeinrichtung nachgewiesen werden;
- die theoretische Sicherheit der Schutzeinrichtung nachgewiesen werden.

Diese Aufgabenstellung war ein Arbeitspaket innerhalb des Projekts „Effiziente und sichere Interaktion von Menschen und intelligenten Produktionsanlagen“ – EsIMiP – (siehe Kapitel 1.4.1) welches zum Ende 2012 abgeschlossen wurde. Dieses Arbeitspaket wurde im Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherungen – IFA – unter alleiniger Verantwortung des Promovenden durchgeführt.

In Bezug auf die Schnittstellen mit anderen Arbeitspaketen des Projektes sind weitere Anforderungen an die in dieser Arbeit zu entwickelnde Schutzeinrichtung gestellt worden:

- Bei der Entwicklung der Schutzeinrichtung musste die Aufgabenstellung, aus dem von allen Projektpartnern gemeinsam entwickelten Arbeitssystem, beachtet werden.

- Die Schnittstellen zu anderen Arbeitspaketen des Projekts EsIMiP (Robotersteuerung von Reis Robotics, Sicherheitssteuerung von Baumüller), die im Projekt von den Projektpartnern entwickelt wurden, mussten mit den Projektpartnern abgestimmt werden.
- Die abgestimmten Schnittstellen mussten in die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung integriert werden.

## 1.3 Motivation

### 1.3.1 Allgemein – Ziele der kollaborierenden Robotik

Die Forschung nach Möglichkeiten kollaborierend zu arbeiten, wird angetrieben, von der Idee neue Arbeitsplätze zu schaffen, die die Vorteile des Menschen mit den Vorteilen des Roboters vereinen. Die Stärken des Roboters, Präzision, Wiederholungsgenauigkeit und Unermüdlichkeit, und die Stärken des Menschen, Anpassungsfähigkeit und Innovativität, sollen sich durch diese Arbeitsweise ergänzen. Muss zum Beispiel nur der Mensch seine Arbeitsweise ändern, um ein neues Produkt zu produzieren, führt dies zu kürzeren Umrüstzeiten.

Ein weiterer Aspekt, der durch kollaborierendes Arbeiten erreicht werden kann, sind schnellere Taktzeiten. An Arbeitsplätzen, an denen Menschen lediglich die Arbeit von Robotern überwachen um bei Fehlern korrigierend einzugreifen, muss bei Korrekturen in der Regel der Roboter stillgesetzt werden, womit auch die Arbeiten während dieser Zeit zum Stillstand kommen. Der Stillstand des Roboters ist nötig, um den Arbeiter zu schützen, während er den Fehler des Roboters in dessen Arbeitsraum korrigiert. Kollaborierende Roboter können diesen Stillstand auf ein Minimum reduzieren, indem sie nur dann anhalten, wenn sie ansonsten mit dem Menschen kollidieren würden.

Auch in Fällen, in denen eine Kollaboration nicht nötig ist, kann ein kollaborierender Roboter Vorteile haben. Durch seine Sensoren ist sein Platzbedarf nicht mehr statisch auf seinen gesamten möglichen Arbeitsraum auszuweiten, sondern kann dynamisch angepasst werden, wenn Personen in einem gemeinsamen Arbeitsraum, von der Robotertätigkeit losgelöste, Aufgaben erfüllen.

Zusätzlich zu diesen Faktoren, deren Vorteile betriebswirtschaftlich direkt bestimmt werden können, kommt noch die Reduktion von Arbeitsunfällen. Ein Roboter, der nur dann abbremsst bzw. seine Arbeit unterbricht, wenn dies durch eine erkannte Gefährdung notwendig ist, gibt gegenüber einem konventionellen Roboterarbeitsplatz einen geringeren Anlass zur Manipulation seiner Schutzeinrichtungen. Zusätzlich sind die Sensoren eines sensorüberwachten kollaborierenden Roboters in ihrer Einbindung in die Sicherheitssteuerung des Roboters komplexer als solche, die zur starren Trennung von Arbeitsräumen eingesetzt werden. Dadurch wird es deutlich schwerer, diese Sensoren zu manipulieren. Neben dem Bedürfnis wird als quasi „Abfallprodukt“ somit auch die Möglichkeit zur Manipulation gesenkt.

Ein letzter wichtiger Aspekt der Motivation sind die Unfälle mit aktuell in der Industrie eingesetzten Robotern. Diese geschehen häufig in der Lebensphase „Einrichten“, einem Vorgang, in dem der Mensch sich bisher nur selbst schützen konnte, indem er einen Zustimmenschalter gedrückt hält um eine bestimmte Funktion auszuführen (sog. „Totmannschalter“). Auch hier können am kollaborierenden Roboter angebrachte Sensoren einen besseren und vor allem zwangsläufig wirkenden Schutz bieten.

### 1.3.2 Speziell – Unfallgeschichte mit industriellen Robotern

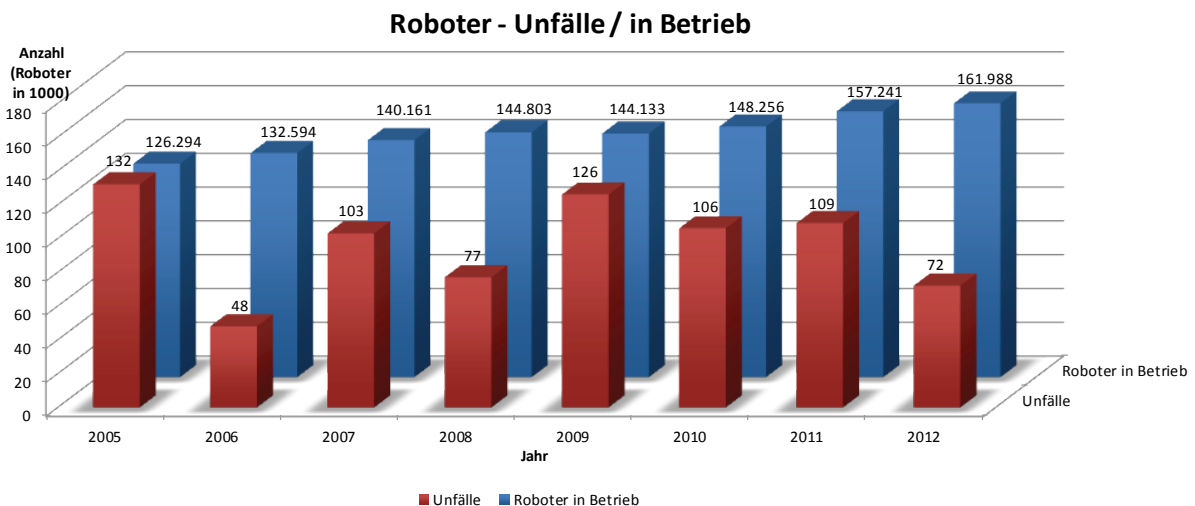
Ein Schwerpunkt des IFA, an dem diese Arbeit durchgeführt wurde, ist es, zu erforschen wie Arbeitsunfälle durch die Gestaltung sicherer Maschinen verhindert werden können. Dies erfordert eine besondere Betrachtung der letzten im Kapitel 1.3.1 genannten Aspekte:

Minimierung der Manipulationsanreize bzw. Verhinderung von Manipulationen und Weiterentwicklung der Maschinensicherheit.

In 1979 war Robert Williams wahrscheinlich das erste Todesopfer eines Arbeitsunfalls mit Roboterbeteiligung, als dieser seinem nicht kollaborierenden "Kollegen Roboter" bei der Arbeit zu nahe kam [1]. Weitere tragische Unfälle kamen im Laufe der Zeit hinzu [2]. Gleichzeitig kam der Wunsch der Industrie nach einer „Hand-in-Hand Arbeit“ des Menschen mit dem Roboter. Durch diesen Wunsch und die tragischen Unfälle bedingt wurde deshalb die sichere Kollaboration von Mensch und Roboter ein Forschungsgebiet, in dem bereits seit den 80er Jahren gearbeitet wird [73].

In den Jahren 2005 bis 2012 hat es in Deutschland laut Hochrechnungen der Deutschen gesetzlichen Unfallversicherung - DGUV - 773 meldepflichtige Unfälle mit Robotern gegeben. Darunter 15 neue Unfallrenten, die von den Trägern der gesetzlichen Unfallversicherung gezahlt werden sowie 3 Unfälle mit Todesfolge. [138]

Diesen Zahlen gegenüber steht die Anzahl der im Betrieb befindlichen Roboter in Deutschland, welche laut IFR Statistical Department [4] in den Jahren 2005 bis 2012 zwischen 126.294 und 161.988 lag.



**Abbildung 2: Vergleich von Robotern im Betrieb (in 1000) zu Unfällen im Betrieb, Datenquellen: IFR Statistical Department [4] und DGUV Referat "Statistik - Arbeitsunfälle, Prävention" [138]**

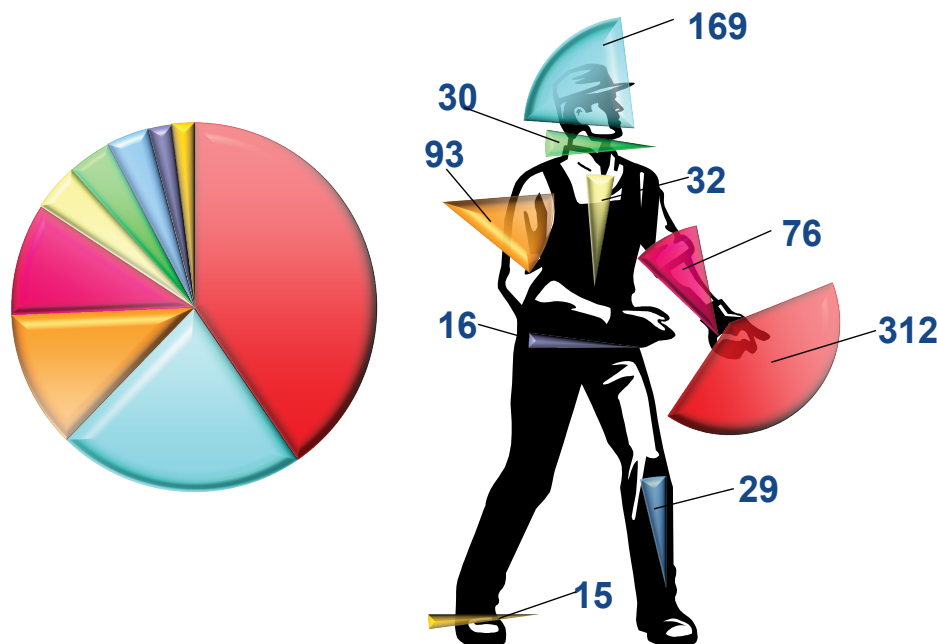
Wie in Abbildung 2 zu sehen ist, kann für diesen Zeitraum kein direkter Zusammenhang zwischen der Anzahl im Betrieb befindlicher Roboter und der Anzahl an Unfällen an diesen Robotern abgeleitet werden. Während in 2006 auf ca. 2.750 Roboter ein Unfall kam, war es 2009 ein Unfall pro ca. 1.150 und 2005 ein Unfall pro ca. 950 Roboter.

2005 und 2009, die Jahre mit den meisten Unfällen, waren - wohl eher zufälliger Weise - auch die Jahre, mit den tödlichen Unfällen.

Mehr Erkenntnisse lassen sich aus der Verletzungsstelle schließen. Abbildung 3 zeigt diese anhand eines verteilten Tortendiagramms. Die dargestellten Werte (gerundet auf ganze Prozentangaben) sind:

Hand	40 %
Kopf	22 %
Schulter, Oberarm, Elle	12 %
Unterarm, Handgelenk,-wurzel	10 %
Brustkorb, -organe, Rücken	4 %
Hals, Wirbelsäule	4 %

Kniegelenk, Unterschenkel	4 %
Knöchel, Fuß	2 %
Bauch, -organe, Becken	2 %



**Abbildung 3: Tortendiagramm der Verletzungen verteilt auf ihre Orte  
Zahlenwerte: Gesamtzahl der Verletzungen 2005 – 2012 [138]**

Die in Abbildung 3 dargestellte Verteilung zeigt, dass der obere Bereich und vor allem die Hände häufig bei Unfällen verletzt werden. Während eine Verletzung an der Hand auch die häufigste Ursache für eine Unfallrente ist, werden in der Statistik bei tödlichen Unfällen Verletzungen am Kopf oder dem gesamten Körper angegeben.

Aus den Statistiken der DGUV geht hervor, dass tödliche Verletzungen mit Robotern in Deutschland aufgetreten sind, weil beim Bedienen des Roboters (inklusive Einrichten) die Kontrolle über den Roboter verloren ging. Hierbei wurden die Bediener eingeklemmt, bzw. zer-/gequetscht, was Verletzungen im Bereich des Kopfes bzw. des „ganzen Menschen“ zur Folge hatte.

Die dargestellten Zahlen scheinen im Vergleich zu anderen Unfallzahlen mit Maschinen in Deutschland auf den ersten Blick eher gering. Ziel des Arbeitsschutzes ist es allerdings, alle vermeidbaren Unfälle zu verhindern. In diesem speziellen Fall kommt hinzu, dass die Anzahl an Robotern in industriellen Betrieben erkennbar ansteigt und somit statistisch gesehen die Unfallzahlen zwangsläufig steigen werden, wenn man hier nicht gegensteuert. Weiterhin sind dies Unfälle, die auf der Interaktion des Menschen mit nicht kollaborierenden Robotern basieren. Diese sind jedoch die meiste Zeit ihres Einsatzes vom Menschen physikalisch getrennt, so dass Risiken für den Bediener nur in wenigen Lebensphasen des Roboters bestehen.

Der Einsatz von kollaborierenden Robotern in der Industrie, der schon heute begonnen hat und der in naher Zukunft stark ansteigen wird, schafft allerdings eine völlig neue Situation, da der Mensch hier in nahezu allen Lebensphasen des Roboters mit der Maschine interagiert. Eine frühzeitige Beschäftigung mit den Gefahren, die von kollaborierenden Robotern ausgehen und den Möglichkeiten die dadurch entstehenden Risiken für den Menschen gering zu halten, ist somit dringend erforderlich.

## 1.4 Einordnung der Arbeit

### 1.4.1 Effiziente und sichere Interaktion von Menschen und intelligenten Produktionsanlagen – EsMiP

Die vorliegende Arbeit war Teil eines Gemeinschaftsprojekts (siehe Kapitel 1.2) der Universität München, der Universität Kassel, der Firmen Reis GmbH & Co. KG Maschinenfabrik - Reis Robotics - und Baumüller Nürnberg GmbH – Baumüller - und des IFA. [154] Das Projekt EsMiP wurde im Rahmen der Bayrischen Forschungsförderung (Projekt Nummer AZ-852-08) unterstützt.

Ziel des von 2009 bis 2012 durchgeführten Projektes war es, neue Techniken und Technologien zu erforschen, die es erlauben, dass Maschinen sich in ihrer Arbeit auf die menschlichen Kollegen einstellen. Dazu ist es zum einen notwendig, dass der Roboter seinem Arbeitsauftrag effizient nachkommen kann, und zum anderen, dass der Mensch vor dem sich im gemeinsamen Arbeitsraum bewegenden Roboter sicher ist. Beide Vorgaben waren im Projekt zu berücksichtigen und optimal aufeinander abzustimmen.

Außerhalb des Rahmens der vorliegenden Arbeit wurde zur effizienten Interaktion ein Kamerasystem zum Erfassen des Menschen [162] und eine Bahnplanung im Roboter realisiert. Die Bahnplanung kann auf die wahrscheinlichen Bewegungen von Menschen reagieren [132]. Weiterhin wurden die verschiedenen Reaktionen des Menschen bei der Zusammenarbeit mit dem Roboter untersucht [133][134]. Zusammen mit der Erkennung des Menschen erlaubten es diese psychologischen Untersuchungen ein sinnvolles Steuerungskonzept zu entwickeln, das die Geschwindigkeit des Roboters bei Annäherung an verschiedene Körperteile des Menschen unterschiedlich stark reduziert [135].

Da diese Planung von Trajektorie und Geschwindigkeit nicht mit der notwendigen Sicherheit für den Schutz des Menschen durchgeführt wird, muss dieses prozesstechnische Gesamtsystem durch weitere Technologien abgesichert werden. Diese weiteren Technologien sind nicht für die eigentliche Steuerung des Systems verantwortlich, sondern dienen als Sicherheitsnetz, das sich aufspannt, wenn das Risiko einer Kollision des Roboters mit dem Menschen zu groß wird. Hierzu gehören die im Rahmen der vorliegenden Arbeit durchgeführte sichere Erfassung von Umgebungsparametern und die Verarbeitung dieser Parameter in sichere Steuersignale (siehe Kapitel 1.2). Diese Steuersignale mussten dann in eine sichere Ansteuerung der Motoren des Roboters [162] übergeben werden. Dieses Sicherheitsnetz muss vom funktionalen, prozesstechnischen Teil der Steuerung lediglich aus Gründen der Systemverfügbarkeit beachtet werden, um unnötige Stillstandzeiten im Arbeitsprozess zu reduzieren. Die Vorgaben für die Robotergeschwindigkeit, die dieses Sicherheitsnetz erzeugt, sind den Vorgaben der Prozesssteuerung vorrangig.

Die vorliegende Arbeit befasst sich mit der sicheren Erfassung von Umgebungsparametern des Roboters, der sicheren Verarbeitung dieser Signale zu einer Kollisionsvorhersage und der Vorgabe einer Geschwindigkeitsreduktion zur Vermeidung dieser Kollision [157] (siehe auch Kapitel 1.2).

### 1.4.2 Institut für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung – IFA

Das IFA ist eine Forschungseinrichtung der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung. Ein wichtiges Ziel des IFA ist die Verhinderung von Arbeitsunfällen. Zur Verwirklichung dieses Zieles wird laufend auch daran geforscht, Arbeitsmittel sicherer zu gestalten. Die praxisnahen Forschungen werden häufig gemeinsam mit Industriepartnern durchgeführt. Die Ergebnisse sollen in den industriellen Prozess Eingang finden und helfen sicherere Produkte zu entwickeln.

Seit 2008 forscht das IFA an kollaborierenden Robotern [152], um in diesem noch jungen Aufgabengebiet Expertise zu gewinnen, zu erhalten und weiterzugeben. [136] Neben dem Forschungsauftrag hat das IFA weiterhin die Aufgabe, Produkte aus der Industrie zu prüfen



um deren Sicherheit zu verifizieren. Für spezifische kollaborierende Roboterarbeitsplätze sind im IFA bereits Teilaspekte erfolgreich getestet und verifiziert worden. [128]

Das IFA beteiligte sich am Projekt EsMiP im Rahmen der psychologischen Untersuchungen der Mensch-Roboter Kollaboration [134] und mit der eigenverantwortlichen Durchführung der vorliegenden Forschungsarbeit.

## 1.5 Thesen

Aus den in Kapitel 1.3 dargestellten Gründen besteht in der Industrie ein Bedarf an effizienten kollaborierenden Robotersystemen. Diese Systeme dürfen in der Arbeitswelt jedoch nur eingesetzt werden, wenn sie neben der gewünschten Effizienz auch die vorgeschriebene Sicherheit gewährleisten. In dieser Arbeit werden dazu folgende Thesen aufgestellt:

- Eine sicherheitsgerichtete Überwachung eines Roboters in einem Arbeitsbereich mit bekannten Ausmaßen kleiner 5x5m ist mit markerloser Sensortechnik möglich.
- Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend schnell möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.
- Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend genau möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.
- Mehrere aktive Sensoren lassen sich zu einem redundanten Array zusammenschalten um eine sichere, zweikanalige Auswertung zu ermöglichen. Hierbei wird die notwendige Kategorie 3 und der notwendige Performance Level „d“ nach EN ISO 13849-1:2008 [61] erreicht.
- Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung kann die rechtlichen Anforderungen an das Inverkehrbringen erfüllen und damit eine Grundlage zur Erfüllung der Arbeitsschutzanforderungen an ein kollaborierendes Robotersystem bilden.

## 1.6 Vorgehensweise

Zur Bearbeitung der gestellten Aufgabe wurde zur Ermittlung der rechtlichen Lage hinsichtlich der Sicherheitsanforderungen an kollaborierende Roboter eine Literaturstudie in den einschlägigen europäischen Binnenmarkt- und Arbeitsschutzrichtlinien und den entsprechenden deutschen Rechtsvorschriften durchgeführt. Die Ergebnisse liegen in Kapitel 2 vor.

Aus diesen Rechtsvorschriften wurden, die für die vorliegende Arbeit relevanten, Anforderungen an Sicherheit und Gesundheitsschutz extrahiert und in Kapitel 3.1 zusammengefasst.

Weiterhin wurden die relevanten Normen und technischen Richtlinien recherchiert, die die Anforderungen an Sicherheit und Gesundheitsschutz konkretisieren. Die Anforderungen aus diesen werden in Kapitel 3.2 dargestellt.

Neben diesen Anforderungen muss für die vorliegende Arbeit das im Projekt EsMiP gewählte Arbeitssystem (siehe Kapitel 4) beachtet werden. Dieses Arbeitssystem wurde von allen Projektpartnern gemeinsam entwickelt und wird innerhalb dieser Arbeit dargestellt. Es bildet die Basis für die Auswahl eines geeigneten Sensorsystems zur Lösung des im Arbeitssystem präsentierten konkreten Problems.

Gestützt auf Ergebnissen, die bereits aus einer früheren Arbeit bekannt waren [153], wurde eine Literaturstudie zu kollaborierenden Robotern in der Industrie und der Wissenschaft durchgeführt. Hieraus wurden die unterschiedlichen Sensorprinzipien ermittelt, die in verschiedenen Studien im Bereich kollaborierende Roboter bisher eingesetzt wurden. Dieser „Stand der Technik“ und „Stand von Wissenschaft und Forschung“ ist in Kapitel 5 dargestellt.

Unter Einbeziehung dieser Ergebnisse wurde ermittelt, welche verschiedenen Sensoren und deren Platzierungen im Arbeitsbereich eines kollaborierenden Roboters möglich sind, um einen Roboter sicher zu überwachen. Mit den Ergebnissen aus Kapitel 5 wurde der Sensortyp (Ultraschallsensor – siehe Kapitel 5.2.3) und dessen konkrete Platzierung (egozentrisch – siehe Kapitel 5.2.1.1) abgeleitet.

Basierend auf der Wahl des Sensortyps und dem gegebenen Arbeitssystem wurden mögliche Platzierungen von Ultraschallsensoren am Arm des Roboters untersucht. Zu diesen möglichen Platzierungen wurde eine weitere Literaturstudie durchgeführt (siehe Kapitel 6.1). Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse wurde ein Konzept für die Platzierung der Sensoren ausgewählt und ein erster Demonstrator gebaut (siehe Kapitel 6.2).

Mit dem Aufbau des ersten Demonstrators begann die Entwicklung von Algorithmen zur Steuerung der Geschwindigkeit (siehe Kapitel 7.1.1 bis 7.1.4.). Diese Algorithmen wurden am ersten Demonstrator evaluiert, mit dem Ergebnis, dass der gewählte Sensortyp grundsätzlich geeignet ist. Es stellte sich allerdings heraus, dass sowohl die zunächst gewählten Sensoren ausgetauscht werden mussten, als auch neue Algorithmen entwickelt werden mussten.

Ein zweiter Demonstrator mit neuen Sensoren wurde geplant (siehe Kapitel 6.2). Die Platzierung der Sensoren wurde leicht verändert. Hierbei wurde die zweikanalige Abdeckung des Schutzraumes, durch überschneidende Erfassungsbereiche der Sensoren, stärker in Betracht gezogen (siehe Kapitel 7.1.5.1). Jeder Punkt im Schutzbereich wird nun durch mindestens zwei Sensoren redundant überwacht.

Auch die Algorithmen zur Schutzraumüberwachung wurden neu entwickelt. Hierbei wurde stärker auf die Geschwindigkeit der Signalauswertung geachtet. Die maximale Auflösung des Raums wurde erst in zweiter Linie betrachtet. Auch die Auswertung zweikanaliger Sensorwerte wurde nun stärker berücksichtigt. (siehe Kapitel 7.1.5, 7.2, 7.3 und 7.4)

Am zweiten Demonstrator wurden die Algorithmen verifiziert (siehe Kapitel 8.5) und deren Performanz evaluiert (siehe Kapitel 9.1).

Am Ende der vorliegenden Arbeit steht die Verifizierung der Sicherheit des Gesamtsystems, bestehend aus Sensor und Algorithmus. (siehe Kapitel 9.2, 9.3 und 9.5)

Die während der Arbeit gesammelten Ideen zu weiterführenden Projekten und die aus der Arbeit gewonnenen Erkenntnisse finden sich in Kapitel 10.

## 2 Rechtliche Grundlagen für die Sicherheit von Schutz einrichtungen an Maschinen

### 2.1 Europäischer Binnenmarkt

Das Inverkehrbringen von Produkten ist weltweit geregelt. Die Regelungstiefe obliegt grundsätzlich den einzelnen souveränen Staaten. Im europäischen Binnenmarkt haben die zurzeit 28 Mitgliedstaaten der Europäischen Union, zu der auch Deutschland gehört, dieses „Monopol“ zugunsten einer gemeinsamen einheitlichen Regelung weitgehend aufgegeben. Gemeinsam mit drei der zurzeit noch vier verbliebenen Staaten der europäischen Freihandelsassoziation - EFTA - Island, Lichtenstein und Norwegen bilden Sie den europäischen Wirtschaftsraum, den EWR. Das vierte EFTA-Mitglied, die Schweiz, ist allerdings durch Verträge so eng an den EWR gekoppelt, dass es im Bereich des Warenverkehrs quasi als Mitgliedstaat fungiert. Diese Entwicklung geht zurück bis in das Jahr 1957, in dem von sechs europäischen Staaten die sog. „Römischen Verträge“ zur Gründung der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (EWG) geschlossen wurden.

Die Grundlage des europäischen Binnenmarktes bildet heute der „Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union“ (AEU-Vertrag). [30]

Titel I des dritten Teils des AEU-Vertrags mit der Überschrift „Der Binnenmarkt“ formuliert die Grundsätze des Binnenmarktes und bildet die Basis für einheitliche europäische Regelungen zum freien Warenverkehr, eine von vier Freiheiten des Binnenmarktes. In diesen Teil fällt auch Artikel 26 des Vertrages. Danach „erlässt die Union die erforderlichen Maßnahmen, um nach Maßgabe der einschlägigen Bestimmungen der Verträge den Binnenmarkt zu verwirklichen beziehungsweise dessen Funktionieren zu gewährleisten.“ [30]

Den Zusammenhang zwischen dem AEU-Vertrag, den darauf basierenden EG-Richtlinien mit Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen an Maschinen und deren Umsetzung in nationales deutsches Recht zeigt die nachfolgende Abbildung 4.

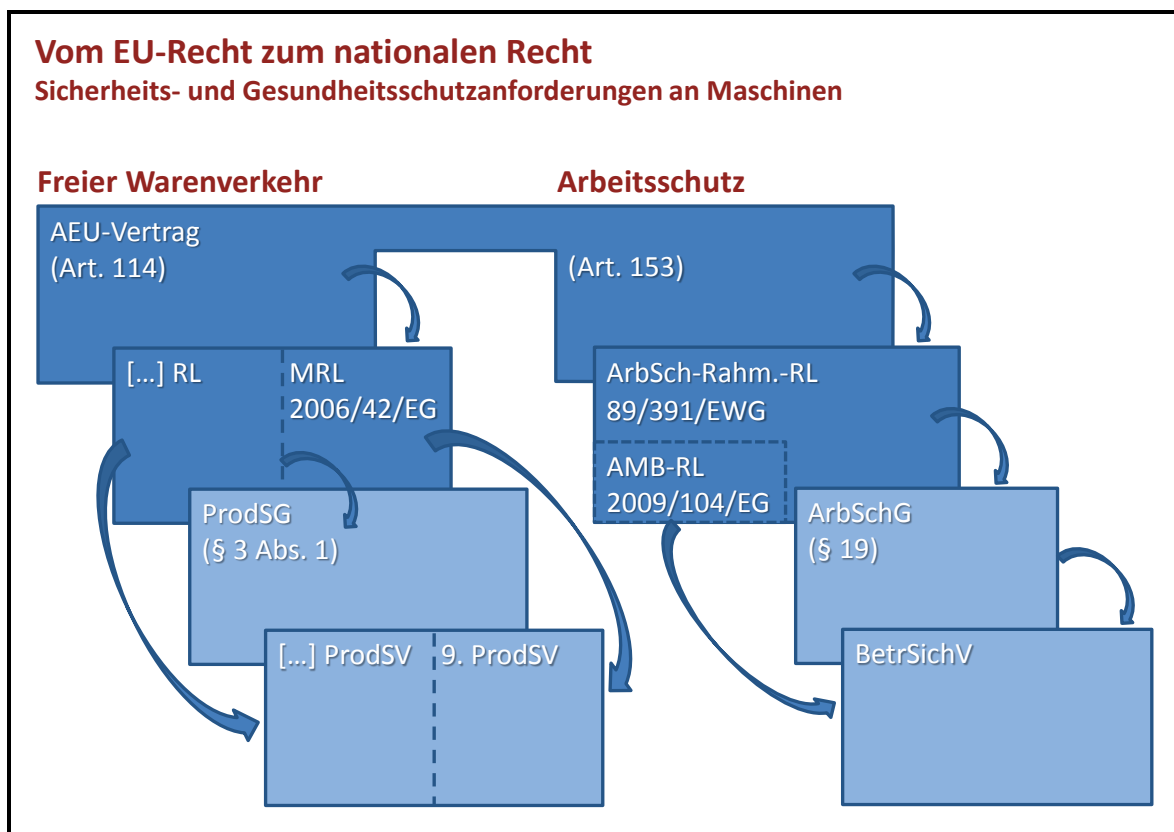


Abbildung 4: Vom EU-Recht zum nationalen Recht

## 2.2 Richtlinien – Inverkehrbringen

Der AEU-Vertrag enthält in Titel VII, Kapitel 3 „*Angleichung der Rechtsvorschriften*“ eine Regelung, die es dem Europäischen Parlament und dem Rat unter anderem ermöglicht, Maßnahmen zur Harmonisierung des Binnenmarktes im Bereich „Sicherheits- und Gesundheitsschutz bei Produkten“ zu treffen. Basis für ein einheitliches Inverkehrbringensrecht in der Europäischen Union ist hier der Artikel 114:

„(1) [...] Das Europäische Parlament und der Rat erlassen gemäß dem ordentlichen Gesetzgebungsverfahren und nach Anhörung des Wirtschafts- und Sozialausschusses die Maßnahmen zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten, welche die Errichtung und das Funktionieren des Binnenmarkts zum Gegenstand haben.

(2) [...]

(3) Die Kommission geht in ihren Vorschlägen nach Absatz 1 in den Bereichen Gesundheit, Sicherheit, Umweltschutz und Verbraucherschutz von einem hohen Schutzniveau aus und berücksichtigt dabei insbesondere alle auf wissenschaftliche Ergebnisse gestützten neuen Entwicklungen. Im Rahmen ihrer jeweiligen Befugnisse streben das Europäische Parlament und der Rat dieses Ziel ebenfalls an.

[...]“ [30]

Gestützt auf Artikel 114 des AEU-Vertrages werden auf Vorschlag der europäischen Kommission Richtlinien erlassen, die von den Mitgliedstaaten einheitlich in nationale Vorschriften umgesetzt werden müssen sowie Verordnungen, die direkt wirken und nicht umgesetzt werden müssen. Diese bilden somit eine Basis für einen freien Warenverkehr in der EU.

### 2.2.1 Europäische Maschinenrichtlinie 2006/42/EG

Wichtigste europäische Vorschrift für das Inverkehrbringen von Maschinen und unvollständigen Maschinen, wozu auch Roboter zählen, im europäischen Binnenmarkt ist heute die „Maschinenrichtlinie“ 2006/42/EG – MRL –. [33] Sie ist nach ihrer Eingangsklausel auf Artikel 95 des EG-Vertrags (Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft) gestützt, der aber inzwischen von Artikel 114 des AEU-Vertrags abgelöst wurde.

Unter Inverkehrbringen versteht die MRL nach ihrem Artikel 2h)

„die entgeltliche oder unentgeltliche erstmalige Bereitstellung einer Maschine oder einer unvollständigen Maschine in der Gemeinschaft im Hinblick auf ihren Vertrieb oder ihre Benutzung“. [33]

Die jeweilige nationale Umsetzungsvorschrift der Mitgliedstaaten für die MRL ist seit dem 29.12.2009 anzuwenden. In Deutschland ist es zurzeit das Produktsicherheitsgesetz - ProdSG - [47] und die darauf gestützte Maschinenverordnung - 9. ProdSV - [48].

Maschinen im Sinne der MRL sind nach Artikel 2 Buchstabe a, erster Spiegelstrich:

*"eine mit einem anderen Antriebssystem als der unmittelbar eingesetzten menschlichen oder tierischen Kraft ausgestattete oder dafür vorgesehene Gesamtheit miteinander verbundener Teile oder Vorrichtungen, von denen mindestens eines bzw. eine beweglich ist und die für eine bestimmte Anwendung zusammengefügt sind;"*

Diese Definition trifft auf den im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Demonstrator zu. Er fällt damit grundsätzlich in den Anwendungsbereich der MRL. Beachtet werden muss allerdings in diesem Zusammenhang die Ausnahme in Artikel 1 Absatz 2 Buchstabe h. Ausgenommen sind danach

„Maschinen, die speziell für Forschungszwecke konstruiert und gebaut wurden und zur vorübergehenden Verwendung in Laboratorien bestimmt sind;“

Der Demonstrator hat im Rahmen des Projektes diesen Status nicht verlassen, so dass er während des gesamten Projektes vom Anwendungsbereich der MRL ausgenommen ist. Ein solches Robotersystem wird aber, wenn es eines Tages verwendungsfähig ist und in

Verkehr gebracht bzw. in Betrieb genommen werden soll, unter den Anwendungsbereich der MRL fallen. Aus diesem Grund werden die Bestimmungen der MRL schon im laufenden Forschungsprojekt zu Grunde gelegt und so weit wie möglich beachtet.

Die MRL legt in ihrem Anhang I einheitliche, rechtlich bindende Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für Maschinen fest, die allerdings in der Regel Schutzziele darstellen. Konkrete konstruktive Maßnahmen zum Erreichen dieser Schutzziele bleiben dem Hersteller überlassen. Dazu muss der Hersteller nach den Allgemeine Grundsätze Nr. 1 dieses Anhangs, im Rahmen einer Risikobeurteilung *„die für die Maschine geltenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen ermitteln“*. Er muss *„die Maschine dann unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Risikobeurteilung konstruieren und bauen.“* [32]

Im Rahmen der sicherheitstechnischen Lösungen muss der Hersteller eine gesetzlich vorgegebene Rangfolge einhalten, die in Anhang I, Nr. 1.1.2 *„Grundsätze der Integration der Sicherheit“* und hier speziell unter Buchstabe b) spezifiziert ist:

1. Beseitigung / Minimierung der Risiken  
*„Integration der Sicherheit in Konstruktion und Bau der Maschine“*

Dies sind z.B. eine mechanisch reduzierte Geschwindigkeit oder eine mechanisch begrenzte Kraft des Roboters.

2. Ergreifen der notwendigen Schutzmaßnahmen gegen „restliche“ Risiken.

Hierunter fallen z.B. trennende oder nichttrennende Schutzeinrichtungen, im Fall dieser Arbeit die Erkennung von Hindernissen durch sichere Sensorik. Die begrenzte Geschwindigkeit, die durch die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung softwaretechnisch vorgegeben und steuerungstechnisch umgesetzt wird, gehört ebenfalls in die Stufe 2.

3. Unterrichtung der Benutzer über Restrisiken nach Durchführung der Stufen 1 und 2.

Hierunter fallen z.B. Hinweisschilder an der Maschine oder auch Angaben in der Betriebsanleitung, spezielle Schulungen oder auch Hinweise auf die Benutzung spezieller persönlicher Schutzeinrichtungen und auf die Einstellung sicherheitskritischer Parameter der in dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung.

Die MRL erwartet grundsätzlich die Einhaltung des Standes der Technik. Sie verweist für konkrete technische Lösungen im Einzelfall auf freiwillig anzuwendende harmonisierte Normen. Deren Anwendung löst eine sogenannte Konformitätsvermutung gegenüber der Marktüberwachungsbehörde aus. Das bedeutet, bei Anwendung einer solchen Norm durch den Hersteller kommt es im Zweifel zu einer Umkehr der Beweislast. Die Behörde muss bei einer Beanstandung dann den Mangel der Konformität einer Maschine mit der MRL, und somit auch die Nichteinhaltung vom Stand der Technik, nachweisen und nicht der Hersteller, der sich auf die Norm beruft, deren Konformität.

Die Richtlinie selbst definiert den Begriff „Stand der Technik“ allerdings nicht. Hinweise, was hierunter zu verstehen ist, finden sich aber im europäischen Leitfaden zu der MRL [37] in dessen § 161:

*„[...] Um dem Stand der Technik zu entsprechen, müssen die angewandten technischen Lösungen, mit denen die grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen erfüllt werden sollen, die wirksamsten technischen Mittel anwenden, die zu dem betreffenden Zeitpunkt zur Verfügung stehen, zu Kosten, die unter Berücksichtigung der Gesamtkosten der betreffenden Maschinenkategorie und der erforderlichen Risikominimierung angemessenen sind.*

*[...]“*

Weitere, nationale Bestimmungen zum Stand der Technik sind in Kapitel 2.4.5.2 beschrieben.

Dieses Konzept der MRL erlaubt es dem Hersteller seine Maschine entweder nach harmonisierten Normen zu bauen, mit dem Vorteil der Konformitätsvermutung oder aber von

solchen Normen abzuweichen und andere sichere Lösungen zu wählen, deren Sicherheit er ggf. gegenüber der Marktüberwachung nachweisen muss. Auf diese Weise sind Innovationen in der Sicherheitstechnik von Maschinen, wie in dem in dieser Arbeit behandelten Fall, flexibel und schnell durch den Hersteller in eigener Verantwortung möglich. Sie werden nicht durch ein starres gesetzliches Regelwerk, wie man es z.B. im Bereich der europäischen Fahrzeugregelungen kennt, behindert.

Verantwortlich im Rahmen der MRL ist grundsätzlich der Hersteller einer Maschine. Er kann seine Aufgaben an einen sogenannten Bevollmächtigten delegieren, der dann allerdings in seinem Namen handelt.

## 2.2.2 Sonstiges Binnenmarktrecht

Neben der MRL sind in der Regel beim Inverkehrbringen von Maschinen weitere EG Richtlinien zu beachten. Dies sind zum Beispiel:

- ATEX-Richtlinie 94/9/EG [33]
- Druckgeräte-Richtlinie 97/23/EG [34]
- EMV-Richtlinie 2004/108/EG [35]
- Richtlinie einfache Druckbehälter 2009/105/EG [41]
- Oekodesign-Richtlinie 2009/125/EG [42]

Für das verwendungsfertige Robotersystem beim Inverkehrbringen bzw. der Inbetriebnahme im Rahmen der „Eigenherstellung“ relevant ist insbesondere die EMV-Richtlinie. Je nach Einsatzgebiet kann auch die ATEX-Richtlinie zu beachten sein. Die Oekodesign-Richtlinie und die o.a. Druckrichtlinien können insbesondere beim Einkauf von Komponenten für das Robotersystem eine Rolle spielen.

## 2.3 Richtlinien – Arbeitsschutz

In Titel X des AEU-Vertrages werden im Rahmen der Sozialpolitik die Aufgaben der Union in Bezug auf den Schutz der Gesundheit und Sicherheit der Arbeitnehmer (Arbeitsschutz) angesprochen. Basis für ein einheitliches Mindestschutzniveau in der Europäischen Union ist hier der Artikel 153:

*„(1) Zur Verwirklichung der Ziele des Artikels 151 unterstützt und ergänzt die Union die Tätigkeit der Mitgliedstaaten auf folgenden Gebieten:*

*a) Verbesserung insbesondere der Arbeitsumwelt zum Schutz der Gesundheit und der Sicherheit der Arbeitnehmer*

*b) [...]*

*(2) Zu diesem Zweck können das Europäische Parlament und der Rat*

*b) in den in Absatz 1 Buchstaben a bis i genannten Bereichen unter Berücksichtigung der in den einzelnen Mitgliedstaaten bestehenden Bedingungen und technischen Regelungen durch Richtlinien Mindestvorschriften erlassen, die schrittweise anzuwenden sind. Diese Richtlinien sollen keine verwaltungsmäßigen, finanziellen oder rechtlichen Auflagen vorschreiben, die der Gründung und Entwicklung von kleinen und mittleren Unternehmen entgegenstehen.“ [30]*

Gestützt auf Artikel 153 des AEU-Vertrages werden auf Vorschlag der europäischen Kommission Richtlinien zum Arbeitsschutz erlassen, die von den Mitgliedstaaten in nationale Vorschriften umgesetzt werden müssen. Allerdings enthalten diese Richtlinien, im Gegensatz zu den Inverkehrbringensbestimmungen, lediglich Mindestvorschriften, über die die Mitgliedstaaten in ihren nationalen Umsetzungen hinausgehen können. Diese Richtlinien bilden somit eine Basis für einheitliche Mindestbestimmungen im Arbeitsschutz in der EU.

### 2.3.1 Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie 89/391/EWG

Zentrale Vorschrift des Arbeitsschutzes in der Gemeinschaft ist die „Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie“ 89/391/EWG [32], die seit ihrer Verabschiedung drei Mal geändert wurde. Sie ist nach ihrer Eingangsklausel noch auf Artikel 118a des EG-Vertrags gestützt, der aber inzwischen von Artikel 153 des AEU-Vertrags abgelöst wurde. Diese EWG-Richtlinie bindet den Arbeitgeber nicht direkt, sondern erst über den Umweg nationaler Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten. Die nationale deutsche Umsetzungsvorschrift ist das Arbeitsschutzgesetz, das vom Arbeitgeber seit dem 21.8.1996 angewendet werden muss. [43]

Die Arbeitsschutzrahmenrichtlinie dient auf der einen Seite dazu einen einheitlichen „Grundrahmen“ für den Arbeitsschutz in der Gemeinschaft zu schaffen, in dem sie diverse Bestimmungen zur Verbesserung des Arbeitsschutzes in der Gemeinschaft enthält. Siehe hierzu Artikel 1 „Ziel der Richtlinie“ Absatz 2:

*„Sie enthält zu diesem Zweck allgemeine Grundsätze für die Verhütung berufsbedingter Gefahren, für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz, die Ausschaltung von Risiko- und Unfallfaktoren, die Information, die Anhörung, die ausgewogene Beteiligung nach den nationalen Rechtsvorschriften bzw. Praktiken, die Unterweisung der Arbeitnehmer und ihrer Vertreter sowie allgemeine Regeln für die Durchführung dieser Grundsätze.“ [32]*

Auf der anderen Seite bietet sie mit Ihrem Artikel 16 und der Auflistung der erfassten Bereiche im Anhang die Basis für weitere Einzelrichtlinien, die sich mit bestimmten Aspekten des Arbeitsschutzes befassen, wie z.B. die nachfolgend angesprochene Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie 2009/104/EG [38]. Nach den Erwägungsgründen der Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie ist es das Ziel, *„alle Risiken betreffend den Bereich Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz abzudecken“*. [32]

Verantwortlich für die Sicherheit und den Gesundheitsschutz der Arbeitnehmer ist nach der Richtlinie der Arbeitgeber. Er hat nach Artikel 6 Absatz 2 u.a. die Aufgabe

- *„Vermeidung von Risiken;*
- *Abschätzung nichtvermeidbarer Risiken;*
- *Gefahrenbekämpfung an der Quelle;*
- *Berücksichtigung des Faktors „Mensch“ [...];*
- *Berücksichtigung des Stands der Technik;*
- *[...]*
- *Planung der Gefahrenverhütung mit dem Ziel einer kohärenten Verknüpfung von Technik, Arbeitsorganisation, Arbeitsbedingungen, sozialen Beziehungen und Einfluss der Umwelt auf den Arbeitsplatz;*
- *Vorrang des kollektiven Gefahrenschutzes vor individuellem Gefahrenschutz;*
- *[...]“ [32]*

Weiterhin verpflichtet ihn Artikel 6 Absatz 3 Buchstabe a) zur

- *„Beurteilung von Gefahren für Sicherheit und Gesundheit der Arbeitnehmer, unter anderem bei der Auswahl von Arbeitsmitteln, [...] und bei der Gestaltung der Arbeitsplätze. [...]“*

### 2.3.2 Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie 2009/104/EG

Wichtigste europäische Vorschrift für die Bereitstellung von Arbeitsmitteln durch den Arbeitgeber für seine Arbeitnehmer ist die Richtlinie 2009/104/EG - Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie - [38]. Sie ist gestützt auf die Arbeitsschutzrahmenrichtlinie und ergänzt die Bestimmungen dieser Rahmenrichtlinie um spezielle Aspekte des Bereitstellens von Arbeitsmitteln. D.h. sie tritt nicht an die Stelle der Rahmenrichtlinie, sondern sie ist in Bezug auf das Bereitstellen von Arbeitsmitteln daneben anzuwenden.

Die Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie, die inzwischen zwei Mal geändert wurde, musste von den Mitgliedstaaten so in nationales Recht umgesetzt werden, dass sie spätestens am 31. Dezember 1992 von den Arbeitgebern anzuwenden war. Sie ist heute durch die Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV – [44] umgesetzt, die am 3. Oktober 2002 die bis dahin geltende Arbeitsmittelbenutzungsverordnung – AMBV – [45] abgelöst hatte.

Nach Artikel 2 der Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie sind:

- a. *„Arbeitsmittel: alle Maschinen, Apparate, Werkzeuge oder Anlagen, die bei der Arbeit benutzt werden;“* [38]

Insofern ist der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Demonstrator ein Arbeitsmittel im Sinne dieser Richtlinie.

Die Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie bestimmt, worauf der Arbeitgeber achten muss, wenn er Arbeitsmittel beschafft, damit er diese seinen Arbeitnehmern zur Verfügung stellen darf. Arbeitsmittel müssen danach

- soweit vorhanden, dem europäischen Inverkehrbringensrecht entsprechen.
- soweit kein europäisches Inverkehrbringensrecht vorliegt, mindestens die Vorschriften des Anhang 1 dieser Richtlinie einhalten.
- so gewartet werden, dass sie dieses beim erstmaligen zur Verfügung stellen verlangte Niveau nie unterschreiten.
- *„für die jeweilige Arbeit geeignet“* sein *„oder zweckentsprechend angepasst werden, so dass bei der Benutzung die Sicherheit und der Gesundheitsschutz der Arbeitnehmer gewährleistet sind“*. [38]

Der Arbeitgeber muss nach Artikel 3 Absatz 1 dieser Richtlinie weiterhin:

*„Bei der Auswahl der einzusetzenden Arbeitsmittel [...] die besonderen Bedingungen und Eigenschaften der Arbeit sowie die insbesondere am Arbeitsplatz bestehenden Gefahren für die Sicherheit und die Gesundheit der Arbeitnehmer im Unternehmen bzw. im Betrieb und/oder die Gefahren, die aus der Benutzung der betreffenden Arbeitsmittel zusätzlich erwachsen“* [38], berücksichtigen.

Das bedeutet, dass der Arbeitgeber sich nicht alleine darauf berufen kann, dass ein zur Verfügung gestelltes Arbeitsmittel, wie z.B. der in dieser Arbeit behandelte Demonstrator, dem europäischen Inverkehrbringensrecht oder dem Anhang 1 dieser Richtlinie entspricht. Er muss daneben auch darauf achten, dass das Arbeitsmittel für die vorgesehene Arbeit geeignet ist. Dazu muss er neben den Gefährdungen durch das Arbeitsmittel selbst, die grundsätzlich schon vom Hersteller des Arbeitsmittels betrachtet werden, auch die Gefährdungen berücksichtigen, die durch die Einbindung des Arbeitsmittels in sein konkretes Arbeitssystem (siehe Kapitel 4) entstehen.

## 2.4 Nationales Recht als Umsetzung des EG-Rechts

Wie bereits oben angeführt, müssen die europäischen Rechtsvorschriften, mit Ausnahme der EU-Verordnungen, die direkt Rechtswirkung entfalten, in nationales Recht umgesetzt werden. Erst damit entfalten Sie für den Bürger bzw. für das Unternehmen ihre Rechtswirkung.

In Deutschland ist die nationale Umsetzungsvorschrift für die Bestimmungen der MRL (siehe Kapitel 2.2.1), unter deren Anwendungsbereich der in dieser Arbeit behandelte Demonstrator grundsätzlich fällt, das Produktsicherheitsgesetz – ProdSG - [47] und die darauf gestützte Maschinenverordnung - 9. ProdSV - [48].

Die nationale deutsche Umsetzungsvorschrift für die Arbeitsschutzrahmenrichtlinie (siehe Kapitel 2.3.1) ist das Arbeitsschutzgesetz - ArbSchG - [43]. Die entsprechende Umsetzungsvorschrift für die Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie (siehe Kapitel 2.3.2) ist die auf das ArbSchG gestützte Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV - [44].



## 2.4.1 Produktsicherheitsgesetz - ProdSG -

Das ProdSG hat am 1. Dezember 2011 das bis dahin geltende Geräte- und Produktsicherheitsgesetz - GPSG - [49] abgelöst. Das ProdSG enthält in seinem Abschnitt 2 „Voraussetzungen für die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt sowie für das Ausstellen von Produkten“ [47]. Nach § 2 Nr. 4 des ProdSG ist:

*„Bereitstellung auf dem Markt jede entgeltliche oder unentgeltliche Abgabe eines Produkts zum Vertrieb, Verbrauch oder zur Verwendung auf dem Markt der Europäischen Union im Rahmen einer Geschäftstätigkeit,“ [47]*

Damit regelt das ProdSG die gesamte Handelskette und nicht nur wie z.B. die MRL das Inverkehrbringen, d.h. die erste Handelsstufe in der Gemeinschaft (siehe Kapitel 2.2.1). Die MRL verknüpft in ihrem Artikel 5, die Erfüllung der Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen lediglich mit dem Zeitpunkt des „Inverkehrbringens“ bzw. im Rahmen der Eigenherstellung mit dem Zeitpunkt der „Inbetriebnahme“. Den Begriff „Inverkehrbringen“ kennt auch das ProdSG.

Nach § 2 Nr. 15 ist

*„Inverkehrbringen die erstmalige Bereitstellung eines Produkts auf dem Markt; die Einfuhr in den Europäischen Wirtschaftsraum steht dem Inverkehrbringen eines neuen Produkts gleich“ [47]*

Die „Inbetriebnahme“ ist im ProdSG nicht definiert. Allerdings übernimmt die auf diesem Gesetz gestützte 9. ProdSV die entsprechende Definition analog aus Artikel 2k) der MRL in ihrem § 2 Nr. 9:

*„Inbetriebnahme ist die erstmalige bestimmungsgemäße Verwendung einer von dieser Verordnung erfassten Maschine in der Europäischen Gemeinschaft.“ [48]*

Für den in dieser Arbeit behandelten Demonstrator und auch für spätere auf dieser Basis gebaute Robotersysteme sind hinsichtlich der Anforderungen an Sicherheit- und Gesundheitsschutz folgende Regelungen relevant:

- § 3: Allgemeine Anforderungen an die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt
  - Absatz 1: Produkte, die europäisch basierten Regelungen unterliegen
- § 4: Harmonisierte Normen
- § 7: CE-Kennzeichnung
- § 8: Ermächtigung zum Erlass von Rechtsvorschriften

§ 8 enthält die Ermächtigung des Bundesministeriums für Arbeit und Soziales - BMAS - und anderer hier aufgeführter Ministerien zum Erlass von „Rechtsverordnungen zum Schutz der Sicherheit und Gesundheit von Personen [...] vor Risiken, die von Produkten ausgehen, zu erlassen, [...] um die von der Europäischen Union erlassenen Rechtsvorschriften umzusetzen oder durchzuführen“ [47]. Geregelt werden können hierin u.a.

- „a) Die Beschaffenheit von Produkten
- [...]
- d) die erstmalige Verwendung von Produkten
- [...]“ [47]

§ 3 Absatz 1 des ProdSG bestimmt: „Soweit ein Produkt einer oder mehreren Rechtsverordnungen nach § 8 Absatz 1 unterliegt, darf es nur auf dem Markt bereitgestellt werden, wenn es“ [47] den Anforderungen dieser / diesen Verordnung(en) genügt. Begriffe wurden soweit dies möglich ist, als „Querschnittsregelungen“ zentral im ProdSG definiert und damit quasi vor die Klammer gezogen. Dies sind Begriffe wie „Inverkehrbringen“, „Hersteller“, „Bevollmächtigter“, „notifizierte Stelle“, „Harmonisierte Norm“ und „CE-Kennzeichnung“. Diese Querschnittsregelungen entstammen dem EG-Beschluss 768/2008/EG „Gemeinsamer Rechtsrahmen für Binnenmarkttrichtlinien“ [39], der seit 2008 als Muster für neue Binnenmarktregelungen dient. Davor bestehende Binnenmarktregelungen, wie zum Beispiel die MRL, sollen nach dem Erwägungsgrund Nr. 2 des o.a. Beschlusses an diesen angepasst

werden. Diese Querschnittsregelungen des ProdSG gelten allerdings nur, soweit in den o.a. Verordnungen keine anderen Regelungen getroffen sind. Somit gehen zurzeit die „alten“ Definitionen der MRL den allgemeinen des ProdSG vor. Eine wesentliche Abweichung der MRL findet sich in der Definition des Herstellers in Artikel 2, Buchstabe i, die im Gegensatz zur Definition des Herstellers im ProdSG auch den sogenannten „Eigenhersteller“ als Hersteller im Sinne der Richtlinie ansieht.

Mit diesen Rechtsinstrumenten hat das BMAS die MRL über die Maschinenverordnung - 9. ProdSV - [48], als Verordnung nach § 8 Absatz 1 ProdSG, in nationales Recht umgesetzt. Damit sind die nationalen Hersteller von Maschinen verpflichtet, die europäisch vorgegebenen Bestimmungen der MRL anzuwenden.

Die im Kapitel 2.2.2 „Sonstige EG-Richtlinien“ angesprochene ATEX-Richtlinie sowie die beiden hier aufgeführten Druck-Richtlinien sind ebenfalls als Verordnung zum ProdSG in nationales deutsches Recht umgesetzt.

Die im Kapitel 2.2.2 weiterhin angesprochene EMV-Richtlinie ist über das EMV-Gesetz [50] umgesetzt und die Oekodesign-Richtlinie ist über das Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz - EVPG - [51] umgesetzt. Beide Gesetze ergänzen die Produkthanforderungen des ProdSG und sind zusätzlich zu beachten, da in ihnen „entsprechende oder weitergehende Vorschriften vorgesehen sind“, siehe § 1 Absatz 4 des ProdSG. Da diese Richtlinien, für die Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen des in dieser Arbeit behandelten Demonstrators unerheblich sind, werden sie hier nur der Vollständigkeit wegen erwähnt. Es wird aber nicht weiter darauf eingegangen.

Die Einhaltung der Produkthanforderungen wird von den Marktüberwachungsbehörden kontrolliert, die zur Durchsetzung des Gesetzes verschiedene, abgestufte Möglichkeiten haben. Soweit Produkte des europäisch harmonisierten Bereiches betroffen sind, wie z.B. das in dieser Arbeit behandelte Robotersystem, wenn es später einmal verwendungsfähig ist, greift hierfür die Verordnung (EG) Nr. 765/2008 „Akkreditierung und Marktüberwachung“ [38].

Nicht europäisch geregelt und damit den einzelnen Mitgliedstaaten überlassen, sind die Bußgeldvorschriften und die Strafvorschriften, die bei Verstößen gegen das Inverkehrbringensrecht greifen. Diese finden sich im Abschnitt 10 des ProdSG.

## 2.4.2 Maschinenverordnung - 9. ProdSV -

Die 9. ProdSV setzt, wie in Kapitel 2.4.1 beschrieben, die in Kapitel 2.2.1 beschriebene MRL in nationales Recht um. Sie übernimmt dazu inhaltsgleich die umzusetzenden Bestimmungen des sogenannten „verfügenden Teils“ der MRL. Die Bestimmungen der Anhänge der MRL werden durch entsprechende Verweise in der Verordnung rechtsverbindlich. So regelt z.B. § 3 Absatz 2 der 9. ProdSV:

*„(2) Der Hersteller oder sein Bevollmächtigter muss vor dem Inverkehrbringen oder vor der Inbetriebnahme einer Maschine*

*1. sicherstellen, dass die Maschine den in **Anhang I** der Richtlinie 2006/42/EG aufgeführten, für sie geltenden grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen entspricht,*

*2. [...]“ [48]*

Insofern muss der nationale deutsche Hersteller eines verwendungsfähigen Robotersystems, wie es in dieser Arbeit im Rahmen des Demonstrators behandelt wird, über die Bestimmungen des ProdSG und die darauf gestützte 9. ProdSV die Bestimmungen der MRL einhalten. Dies gilt nach §1 Absatz 1 in Verbindung mit §2 Nr. 8 des ProdSG auch für den Einführer, der ein solches System aus dem „nicht EWR“ nach Deutschland verbringt.

Weiterhin geregelt werden in § 8 der 9. ProdSV die Ordnungswidrigkeiten. Sie setzen dabei entweder einen Vorsatz oder ein Fahrlässigkeit voraus. Zu dem hier aufgeführten 9-Punkte-Katalog gehören z.B.

- Technische Unterlagen nicht verfügbar,

- Betriebsanleitung nicht erstellt,
- Konformitätsbewertungsverfahren nicht durchgeführt,

Ein Verstoß gegen einen der aufgeführten Punkte kann nach § 39 Absatz 1 Nr. 7 a) ProdSG in Verbindung mit § 39 Absatz 2 mit einem Bußgeld von bis zu 100.000 € belegt werden. Nach § 40 ProdSG kann das auch zu einer Freiheitsstrafe von bis zu einem Jahr führen, z.B. wer „durch eine solche vorsätzliche Handlung Leben oder Gesundheit eines anderen oder fremde Sachen von bedeutendem Wert gefährdet.“ [47]

### 2.4.3 Arbeitsschutzgesetz

Das Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG - [43] setzt u.a. die in Kapitel 2.3.1 dieser Arbeit behandelte europäische Arbeitsschutzrahmenrichtlinie 89/391/EWG in nationales deutsches Recht um. Dabei nimmt sie nicht die Möglichkeit in Anspruch, über die europäischen Mindestvorgaben hinauszugehen. Das Ziel des ArbSchG wird in ihrem § 1 Absatz 1 formuliert:

*„(1) Dieses Gesetz dient dazu, Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten bei der Arbeit durch Maßnahmen des Arbeitsschutzes zu sichern und zu verbessern. Es gilt in allen Tätigkeitsbereichen [...].“ [43]*

Adressat des Gesetzes ist auf der einen Seite der Arbeitgeber. Dieser ist nach § 3 ArbSchG verpflichtet,

*„die erforderlichen Maßnahmen des Arbeitsschutzes unter Berücksichtigung der Umstände zu treffen, die Sicherheit und Gesundheit der Beschäftigten bei der Arbeit beeinflussen. Er hat die Maßnahmen auf ihre Wirksamkeit zu überprüfen und erforderlichenfalls sich ändernden Gegebenheiten anzupassen. Dabei hat er eine Verbesserung von Sicherheit und Gesundheitsschutz der Beschäftigten anzustreben.“ [43]*

Auf der anderen Seite sind aber auch die Beschäftigten durch den dritten Abschnitt des Gesetzes in den Arbeitsschutz eingebunden. So regelt § 15 des ArbSchG:

*„(1) Die Beschäftigten sind verpflichtet, nach ihren Möglichkeiten sowie gemäß der Unterweisung und Weisung des Arbeitgebers für ihre Sicherheit und Gesundheit bei der Arbeit Sorge zu tragen. [...]*

*(2) Im Rahmen des Absatzes 1 haben die Beschäftigten insbesondere Maschinen, Geräte, Werkzeuge, Arbeitsstoffe, Transportmittel und sonstige Arbeitsmittel sowie Schutzvorrichtungen und die ihnen zur Verfügung gestellte persönliche Schutzausrüstung bestimmungsgemäß zu verwenden.“ [43]*

Maßnahmen des Arbeitsschutzes sind nach § 2 dieses Gesetzes *„Maßnahmen zur Verhütung von Unfällen bei der Arbeit und arbeitsbedingten Gesundheitsgefahren einschließlich Maßnahmen der menschengerechten Gestaltung der Arbeit.“ [43]*

Zu diesen Maßnahmen gehört insofern auch die Beschaffung sicherer Arbeitsmittel durch den Arbeitgeber, wie z.B. das in dieser Arbeit behandelte sichere Robotersystem.

Nach § 4 ArbSchG muss der Arbeitgeber bei den Maßnahmen von hier aufgeführten allgemeinen Grundsätzen ausgehen. Diese sind u.a.

1. *„Die Arbeit ist so zu gestalten, dass [...] die verbleibende Gefährdung möglichst gering gehalten wird;*
2. *Gefahren sind an ihrer Quelle zu bekämpfen;*
3. *bei den Maßnahmen sind der Stand von Technik, [...] zu berücksichtigen;*
4. *Maßnahmen sind mit dem Ziel zu planen, Technik, Arbeitsorganisation, sonstige Arbeitsbedingungen, soziale Beziehungen und Einfluss der Umwelt auf den Arbeitsplatz sachgerecht zu verknüpfen;*
5. *individuelle Schutzmaßnahmen sind nachrangig zu anderen Maßnahmen;*
6. *[...]“ [43]*

Eine Ähnlichkeit mit der in Anhang I, Nr. 1.2.1 der MRL geforderten „Integration der Sicherheit“ ist nicht zu übersehen. Auch wird, wie in den allgemeinen Grundsätzen Nr. 3 des Anhang I der MRL, der Stand der Technik gefordert.

Weiterhin muss der Arbeitgeber nach § 5 des ArbSchG eine „Gefährdungsbeurteilung“ vornehmen, um die erforderlichen Arbeitsschutzmaßnahmen zu ermitteln. Dabei wird in § 5 Absatz 1 darauf hingewiesen, dass sich eine Gefährdung u.a. insbesondere ergeben kann durch *„die Gestaltung, die Auswahl und den Einsatz von Arbeitsmitteln, insbesondere von Arbeitsstoffen, Maschinen, Geräten und Anlagen sowie den Umgang damit“* [43]. D.h. auch an dieser Stelle erfolgt ein Hinweis im Gesetz auf die Auswahl sicherer Maschinen, wie z.B. das in dieser Arbeit behandelte sichere Robotersystem.

Das ArbSchG enthält in § 19 die Ermächtigung der Bundesregierung auf das ArbSchG gestützte Verordnungen zu erlassen *„soweit dies zur Durchführung von Rechtsakten des Rates oder der Kommission der Europäischen Gemeinschaften [...] die Sachbereiche dieses Gesetzes betreffen, erforderlich ist, [...]“* [43]. Eine solche Verordnung ist die nachfolgend beschriebene BetrSichV [44], die bei der Bereitstellung von Maschinen, wie z.B. das in dieser Arbeit behandelte Robotersystem, zusätzlich zum ArbSchG durch den Arbeitgeber beachtet werden muss.

Bereits im Kapitel 2.2.1 wurde festgestellt, dass der in dieser Arbeit behandelte Demonstrator nicht in den Anwendungsbereich der MRL fällt, da er das „Forschungsstadium“ bis zum Ende nicht verlässt. Da das ProdSG im Bereich der nicht europäisch harmonisierten Regelungen den „Eigenhersteller“ nicht kennt, greift auch dieses Gesetz nicht für den Demonstrator. Einschlägig ist allerdings hierfür das Arbeitsschutzgesetz. Somit musste die Sicherheit des Demonstrators während dieser Arbeit unter Arbeitsschutzgesichtspunkten gewährleistet werden.

#### 2.4.4 Betriebssicherheitsverordnung - BetrSichV -

Die Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV - [44] setzt in ihrem Abschnitt 2 u.a. die in Kapitel 2.3.2 dieser Arbeit behandelte europäische Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie 2009/104/EG [40] in nationales deutsches Recht um. § 1 Absatz 1 der BetrSichV beschreibt ihren Anwendungsbereich in Bezug auf die Arbeitsmittel:

*„(1) Diese Verordnung gilt für die Bereitstellung von Arbeitsmitteln durch Arbeitgeber sowie für die Benutzung von Arbeitsmitteln durch Beschäftigte bei der Arbeit.“* [44]

Dabei sind die hier verwendeten maßgeblichen Begriffe in § 2 der BetrSichV wie folgt definiert:

*„(1) **Arbeitsmittel** im Sinne dieser Verordnung sind Werkzeuge, Geräte, Maschinen oder Anlagen. Anlagen im Sinne von Satz 1 setzen sich aus mehreren Funktionseinheiten zusammen, die zueinander in Wechselwirkung stehen und deren sicherer Betrieb wesentlich von diesen Wechselwirkungen bestimmt wird; [...]*

*(2) **Bereitstellung** im Sinne dieser Verordnung umfasst alle Maßnahmen, die der Arbeitgeber zu treffen hat, damit den Beschäftigten nur der Verordnung entsprechende Arbeitsmittel zur Verfügung gestellt werden können. Bereitstellung im Sinne von Satz 1 umfasst auch Montagearbeiten wie den Zusammenbau eines Arbeitsmittels einschließlich der für die sichere Benutzung erforderlichen Installationsarbeiten.*

*(3) **Benutzung** im Sinne dieser Verordnung umfasst alle ein Arbeitsmittel betreffenden Maßnahmen wie Erprobung, Ingangsetzen, Stillsetzen, Gebrauch, Instandsetzung und Wartung, Prüfung, Sicherheitsmaßnahmen bei Betriebsstörung, Um- und Abbau und Transport.“* [44]

Ziel dieses Teil der Verordnung ist es, in Umsetzung der Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie [40] ein Regelwerk zu schaffen, damit Arbeitgeber den Beschäftigten sichere Arbeitsmittel, d.h. auch Maschinen, wie das in dieser Arbeit behandelte Robotersystem, zur Verfügung stellen. Siehe hierzu auch die Aussage in § 4 Absatz 1 *„damit den Beschäftigten nur Arbeitsmittel bereitgestellt werden, die für die am Arbeitsplatz gegebenen Bedingungen*

*geeignet sind und bei deren bestimmungsgemäßer Benutzung Sicherheit und Gesundheitsschutz gewährleistet sind“ [44].*

Die BetrSichV verzahnt in § 7 Absatz 1 den Arbeitsschutz mit den Inverkehrbringensvorschriften. Hier ist formuliert:

*„(1) Der Arbeitgeber darf den Beschäftigten erstmalig nur Arbeitsmittel bereitstellen, die*  
*1. solchen Rechtsvorschriften entsprechen, durch die Gemeinschaftsrichtlinien in deutsches Recht umgesetzt werden, oder,*  
*2. [...]“*

Insofern darf der Arbeitgeber neue Maschinen nur zur Benutzung durch seine Beschäftigten bereitstellen, wenn diese dem Binnenmarktrecht, wie der MRL [36] entsprechen. Allerdings ist dies nicht die alleinige Anforderung, die die BetrSichV an Arbeitsmittel stellt.

Der Arbeitgeber muss weiterhin nach § 3 eine Gefährdungsbeurteilung durchführen. Nach Absatz 1 des § 3 hat *„er insbesondere die Gefährdungen zu berücksichtigen, die mit der Benutzung des Arbeitsmittels selbst verbunden sind und die am Arbeitsplatz durch Wechselwirkungen der Arbeitsmittel untereinander oder mit Arbeitsstoffen oder der Arbeitsumgebung hervorgerufen werden“*. [44] Die Gefährdungsbeurteilung schließt damit faktisch an die Risikobeurteilung des Herstellers einer Maschine an. In ihr werden die spezifischen Gefährdungen, die durch den Einsatz einer Maschine an ihrem konkreten Arbeitsplatz entstehen, ermittelt. Der Arbeitgeber hat dann nach § 3 Absatz 1 BetrSichV auf dieser Basis *„die notwendigen Maßnahmen für die sichere Bereitstellung und Benutzung der Arbeitsmittel zu ermitteln“* [44].

Hinsichtlich der auf Basis der Gefährdungsbeurteilung zu treffenden Maßnahmen verweist § 4 Absatz 1 der BetrSichV auf die allgemeinen Grundsätze des § 4 ArbSchG. Siehe hierzu das vorhergehende Kapitel 2.4.3. Weiterhin hat der Arbeitgeber *„die vom Ausschuss für Betriebssicherheit ermittelten und vom Bundesministerium für Arbeit und Soziales im Bundesarbeitsblatt oder im Gemeinsamen Ministerialblatt veröffentlichten Regeln und Erkenntnisse zu berücksichtigen“*.

Auch muss der Arbeitgeber nach § 4 Absatz 4 ergonomische Gesichtspunkte berücksichtigen:

*„Bei der Festlegung der Maßnahmen nach den Absätzen 1 und 2 sind für die Bereitstellung und Benutzung von Arbeitsmitteln auch die ergonomischen Zusammenhänge zwischen Arbeitsplatz, Arbeitsmittel, Arbeitsorganisation, Arbeitsablauf und Arbeitsaufgabe zu berücksichtigen; dies gilt insbesondere für die Körperhaltung, die Beschäftigte bei der Benutzung der Arbeitsmittel einnehmen müssen.“* [44]

Die BetrSichV ist allerdings auf den in dieser Arbeit behandelten Demonstrator nicht anwendbar, da der Demonstrator als „Forschungsgegenstand“ kein Arbeitsmittel im Sinne der BetrSichV ist. Siehe hierzu auch [10] Kapitel 2.2.1, dritter Absatz: *„[...] Nicht hierzu gehören danach Maschinen und Anlagen während ihrer Herstellung. [...]“* Die hier vorgenommene Forschung gehört zur Entwicklung eines sicheren Robotersystems und ist damit Teil der Herstellung. Das verwendungsfertige Robotersystem auf Basis des Demonstrators hingegen ist ein Arbeitsmittel im Sinne der BetrSichV, so dass für dieses die Bestimmungen der Verordnung einzuhalten sind.

## 2.4.5 Bezugnahmen auf technische Regeln in Rechtsvorschriften

Verschiedene der hier aufgeführten Rechtsvorschriften verweisen hinsichtlich ihrer sicherheitstechnischen Anforderungen auf:

- Allgemein anerkannte Regeln der Technik,
- Stand der Technik

Dazu kommt aus der Produkthaftungsrichtlinie 85/374/EWG [31] bzw. deren nationaler Umsetzung, dem Produkthaftungsgesetz – ProdHaftG - [52] der

- Stand der Wissenschaft und Technik.

Diese Begriffe werden in diesen Rechtsvorschriften allerdings nicht definiert. Die Bundesministerien stützen sich bei der Formulierung ihrer Rechtsvorschriften auf das Handbuch der Rechtsförmlichkeit - HdR - des Bundesministeriums der Justiz - BMJ -, welches bei der Überprüfung der Rechtsvorschriften durch das BMJ als Basis genommen wird. [52]

#### 2.4.5.1 Allgemein anerkannte Regeln der Technik

In den europäischen Binnenmarktvorschriften sowie in § 4 ProdSG wird auf harmonisierte Normen verwiesen, deren Einhaltung eine sogenannte „Vermutungswirkung“ auslöst (siehe Kapitel 2.2.1). Diese Normen gelten als „allgemein anerkannte Regeln der Technik“.

Eine Erläuterung dieses Begriffes findet sich zwar nicht in diesen Rechtsvorschriften. Eine Definition findet sich allerdings in Kapitel 4.5.1 Rd.-Nr. 255 des HdR:

*„Allgemein anerkannte Regeln der Technik sind schriftlich fixierte oder mündlich überlieferte technische Festlegungen für Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach herrschender Auffassung der beteiligten Kreise (Fachleute, Anwender, Verbraucherinnen und Verbraucher und öffentliche Hand) geeignet sind, das gesetzlich vorgegebene Ziel zu erreichen und die sich in der Praxis allgemein bewährt haben oder deren Bewährung nach herrschender Auffassung in überschaubarer Zeit bevorsteht.“* [52]

#### 2.4.5.2 Stand der Technik

Der Stand der Technik wird in verschiedenen Rechtsvorschriften vom Gesetzgeber in Bezug auf die Produktbeschaffenheit eingefordert. Auch die für das Inverkehrbringen von Robotern maßgebliche MRL verlangt dies im Rahmen der Anforderungen an Sicherheit und Gesundheitsschutz. (siehe Kapitel 2.2.1)

Die Erläuterung im Leitfaden der MRL (siehe Kapitel 2.2.1) deckt sich inhaltlich weitgehend mit der Definition des Standes der Technik im HdR, Kapitel 4.5.1 Rd.-Nr. 256:

*„Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, der nach herrschender Auffassung führender Fachleute das Erreichen des gesetzlich vorgegebenen Ziels gesichert erscheinen lässt. Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen oder vergleichbare Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen müssen sich in der Praxis bewährt haben oder sollten – wenn dies noch nicht der Fall ist – möglichst im Betrieb mit Erfolg erprobt worden sein.“* [52]

Allerdings ist der Verweis auf die Wirtschaftlichkeit der Lösung,

*„Im Rahmen der gesetzlichen Zielvorgaben sind, als Teil der Verhältnismäßigkeitsabwägungen, wirtschaftliche Gesichtspunkte zu berücksichtigen, in Teilbereichen, je nach gesetzlicher Zielvorgabe, allerdings nur nachrangig.“*

der in einer früheren Ausgabe des HdR noch vorhanden war, mittlerweile entfallen. [8]

Auch der im Juni 2013 vom Bundesministerium für Arbeit und Sozialordnung auf seiner Website veröffentlichte Referentenentwurf einer „Arbeitsmittel- und Anlagensicherheitsverordnung - ArbmittV“- [46] enthält in § 2 Absatz 9 eine Definition des Standes der Technik, die sich inhaltlich mit den beiden vorgenannten Definitionen deckt:

*„Stand der Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, der die praktische Eignung einer Maßnahme oder Vorgehensweise zum Schutz der Gesundheit und zur Sicherheit der Beschäftigten gesichert erscheinen lässt. Bei der Bestimmung des Stands der Technik sind insbesondere vergleichbare Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen heranzuziehen, die mit Erfolg in der Praxis erprobt worden sind.“* [46]

#### 2.4.5.3 Stand der / von Wissenschaft und Technik

Der Begriff „Stand der Wissenschaft und Technik“ findet sich im Produkthaftungsrecht, dessen europäische Basis die Produkthaftungsrichtlinie 85/374/EWG [31] ist. Diese macht

eine Haftung des Herstellers davon abhängig, ob dieser den Stand der Wissenschaft und Technik eingehalten hat, indem sie in Artikel 7 formuliert:

*„Der Hersteller haftet aufgrund dieser Richtlinie nicht, wenn er beweist,*

*[...]*

*e) dass der vorhandene Fehler nach dem Stand der Wissenschaft und Technik zu dem Zeitpunkt, zu dem er das betreffende Produkt in den Verkehr brachte, nicht erkannt werden konnte;*

*[...]“*

Im Rahmen dieser Arbeit spielt der Stand der Wissenschaft und Technik nur im Rahmen dieser Produkthaftung eine Rolle. Der Begriff ist allerdings in der Produkthaftungsrichtlinie nicht definiert.

Der Stand von Wissenschaft und Technik ist im HdR, in Kapitel 4.5.1 Rd.-Nr. 257, wie folgt erläutert:

*„Stand von Wissenschaft und Technik ist der Entwicklungsstand fortschrittlichster Verfahren, Einrichtungen und Betriebsweisen, die nach Auffassung führender Fachleute aus Wissenschaft und Technik auf der Grundlage neuester wissenschaftlich vertretbarer Erkenntnisse im Hinblick auf das gesetzlich vorgegebene Ziel für erforderlich gehalten werden und das Erreichen dieses Ziels gesichert erscheinen lassen.“ [52]*

Wie schon beim Stand der Technik (siehe Kapitel 2.4.5.2) ist in der dritten Auflage des HdR der Verweis auf die Wirtschaftlichkeit der Lösung nicht mehr enthalten:

*„Dabei können im Bereich der Gefahrenabwehr wirtschaftliche Gesichtspunkte – als Teil der Verhältnismäßigkeitserwägungen – keine Rolle spielen. Im Bereich der Vorsorge hat dies Vorrang vor wirtschaftlichen Gesichtspunkten.“ [8]*

Ein Produkt, das dem Stand von Wissenschaft und Technik entsprechen muss, und somit *„neueste wissenschaftlich vertretbare Erkenntnisse“* [52] erfüllen muss, unterliegt erheblich strengeren Anforderungen an die erforderliche Sicherheit als ein Produkt, das *„nur“* dem Stand der Technik entsprechen muss.

Insofern kann die im Inverkehrbringensrecht geforderte Einhaltung des Standes der Technik im Produkthaftungsfall zu wenig sein.

## 2.5 Zusammenfassung: Rechtliche Einordnung des Robotersystems

In Kapitel 2 wird das öffentliche europäische und nationale Recht vorgestellt, soweit es Anforderungen an die Sicherheit und den Gesundheitsschutz in Bezug auf das in dieser Arbeit behandelte Robotersystem enthält. Dabei wird deutlich, dass der in dieser Arbeit behandelte Demonstrator eines solchen Robotersystems im öffentlichen Recht anders behandelt wird, als ein darauf basierendes verwendungsfertiges Robotersystem. Dies ist dadurch begründet, dass die MRL in ihrem Artikel 1 Absatz 2, Buchstabe h bestimmte *„Forschungsmaschinen“* aus ihrem Anwendungsbereich ausnimmt. Siehe hierzu Kapitel 2.2.1. Dazu enthält das ProdSG in seinem *„nicht harmonisierten Teil“* keine Eigenherstellerregelung. Siehe hierzu Kapitel 2.4.1. Insofern sind für den in dieser Arbeit behandelten Demonstrator nur die Arbeitsschutzvorschriften einschlägig. Siehe Kapitel 2.3 sowie Kapitel 2.4.3 in Verbindung mit Kapitel 2.4.4.

Die nachfolgende Tabelle gibt einen Überblick über die Anwendung des *„sicherheitstechnischen“* öffentlichen Rechts auf den Demonstrator sowie auf ein verwendungsfertiges Robotersystem nach diesem Muster.

Tabelle 1: Sicherheitstechnische Anforderungen

Sicherheitstechnische Anforderungen „In Verkehr bringen“ / „Bereitstellen“			
Produkt in Verkehr bringen (Hersteller)	Sicherheitstechnische Anforderungen		Arbeitsmittel bereitstellen (Arbeitgeber)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• MRL 2006/42/EG</li> <li>• eDB-RL 2009/105/EG</li> <li>• ATEX-RL 94/9/EG</li> <li>• DG-RL 97/23/EG</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Risiko- beurteilung / Gefahrenanalyse</li> <li>• Stand der Technik</li> <li>• Integration der Sicherheit (Rangfolge der Maßnahmen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Gefährdungs- beurteilung</li> <li>• Stand der Technik</li> <li>• Grundsätze für Maßnahmen (Rangfolge der Maßnahmen)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Arbeitsschutzrahmen- richtlinie 2006/42/EG</li> <li>• Arbeitsmittelbenutzungs- richtlinie 2009/104/EG</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• ProdSG</li> <li>• 9. ProdSV</li> <li>• 6. ProdSV</li> <li>• 11. ProdSV</li> <li>• 14. ProdSV</li> </ul>			<ul style="list-style-type: none"> <li>• ArbSchG</li> <li>• BetrSichV</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Produkthaftungs- richtlinie 85/374/EG</li> <li>• Produkthaftungs- gesetz</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Stand der Wissenschaft und Technik</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• entfällt</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• entfällt</li> </ul>

Tabelle 2: Übersicht über die Anwendung des „sicherheitstechnischen“ öffentlichen Rechts

Rechtsvorschrift	Verantwortlich	Kapitel	Demonst- rator	Verwendungsfertiges Robotersystem
MRL	Hersteller	2.2.1	-	X
ATEX-RL	Hersteller	2.2.2	-	(X) Nur wenn zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosibler Atmosphäre vorgesehen
Druckgeräte-RL	Hersteller	2.2.2	-	(X) Ggf. auf entsprechende unter Druck stehende, eingebaute Bauteile
RL einfache Druckbehälter	Hersteller	2.2.2	-	(X) Ggf. auf eingebaute einfache Druckbehälter
Arbeitsschutz- Rahmen-RL	Arbeitgeber	2.3.1	X	X
Arbeitsmittelbenut- zungsrichtlinie	Arbeitgeber	2.3.2	X	X
ProdSG	Hersteller	2.4.1	-	X
9. ProdSV	Hersteller	2.4.2	-	X
ArbSchG	Arbeitgeber	2.4.3	X	X
BetrSichV	Arbeitgeber	2.4.4	-	X



### 3 Technische Anforderungen an Schutzeinrichtungen für Robotersysteme

Wie in Kapitel 2.2.1 aufgeführt, fällt ein verwendungsfertiges Robotersystem auf Basis des in dieser Arbeit behandelten Demonstrators unter den Anwendungsbereich der MRL. Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung für das behandelte Robotersystem fällt für sich allein genommen ebenfalls unter den Anwendungsbereich der MRL, wenn sie gesondert in Verkehr gebracht wird. Sie gilt dann als Sicherheitsbauteil im Sinne von Artikel 2 Buchstabe c) der MRL. [36]

Grundlegende, rechtlich bindende technische Vorgaben für Sicherheitsbauteile finden sich in der MRL im Anhang I „*Grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen für Konstruktion und Bau von Maschinen*“ [36]. Die Einhaltung der in Anhang I geforderten Vorgaben ist durch den Hersteller zu gewährleisten.

Allerdings muss der Hersteller einer in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung beachten, dass diese Schutzeinrichtung ein Sicherheitsbauteil im Sinne von Anhang IV Nr. 19 „*Schutzeinrichtungen zur Personendetektion*“ [36] der MRL ist. Insofern muss er hierfür das Konformitätsbewertungsverfahren nach Artikel 12 Absatz 3 bzw. 4 durchführen, was bedeutet, dass ggf. eine notifizierte Stelle in Rahmen einer Baumusterprüfung oder eines Qualitätssicherungssystems eingeschaltet werden muss.

Konkretisierungen zu den Anforderungen in Anhang I der MRL findet der Hersteller in freiwillig anzuwendenden harmonisierten Normen. Diese lösen bei ihrer Anwendung eine sogenannte Konformitätsvermutung aus (siehe Kapitel 2.2.1).

Bei der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung kann die Anwendung harmonisierter Normen ggf. dazu führen, dass der Hersteller auf die Beteiligung einer notifizierte Stelle verzichten kann. Nach Artikel 12 Absatz 3 MRL ist dies möglich, wenn die Schutzeinrichtung komplett nach „*harmonisierten Normen hergestellt [ist, B.O.] und diese Normen alle relevanten grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen [berücksichtigen, B.O.]*“ [36]. Da es sich im Rahmen dieser Arbeit um eine Neuentwicklung einer in dieser Form noch nicht existenten Schutzeinrichtung handelt, liegen solche Normen zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht vor.

Nachfolgend wird auf die Anforderungen aus den Bereichen Anhang I MRL (Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen) und Normen in Bezug auf die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung eingegangen.

#### 3.1 Sicherheitstechnische Anforderungen aus der MRL

Die einschlägigen Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen - GSA - der MRL müssen auf Basis einer Risikobeurteilung ermittelt werden. Siehe hierzu Nr. 1 der „*Allgemeinen Grundsätze*“ des Anhang I der MRL. Hier heißt es:

„*Der Hersteller einer Maschine oder sein Bevollmächtigter hat dafür zu sorgen, dass eine Risikobeurteilung vorgenommen wird, um die für die Maschine geltenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen zu ermitteln. [...]*“ [36]

Weiter heißt es in Nr. 2 der „*Allgemeinen Grundsätze*“, dass die mit den GSA verbundenen Verpflichtungen nur dann gelten, „*wenn an der betreffenden Maschine bei Verwendung unter [...] vorgesehenen Bedingungen oder unter vorhersehbaren ungewöhnlichen Bedingungen die entsprechende Gefährdung auftritt*“ [36]. Beachtet werden müssen allerdings u.a. immer die „*Grundsätze für die Integration der Sicherheit*“, die sich in Anhang I Nr. 1.1.2. finden. Diese spielen bei der Betrachtung der hier behandelten Schutzeinrichtung allerdings keine Rolle, da es bei der Integration der Sicherheit um das Schutzkonzept der Maschine selbst geht und nicht um das Konzept der Schutzeinrichtung als Bestandteil eines solchen Konzeptes.

Nach Nr. 3 der „Allgemeinen Grundsätze“ wird als Maßstab der Umsetzung der Anforderungen der GSA der „Stand der Technik“ festgelegt. Zum Stand der Technik siehe Kapitel 2.4.5.2.

Der Anhang I der MRL ist in sechs Teile gegliedert. Neben dem Teil 1, der für alle Maschinen gilt, gibt es weitere fünf Teile, die nur für bestimmte Maschinen anwendbar sind. Für die hier behandelte Schutzeinrichtung ist nur der Teil 1 des Anhang I der MRL maßgebend. Die konkreten Anforderungen, die sich hieraus für die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung ergeben, werden in den nachfolgenden Kapiteln beschrieben.

### 3.1.1 Auswahl von Schutzeinrichtungen

Nach Anhang I, Nr. 1.1.1.g handelt es sich bei dieser Schutzeinrichtung um eine „nichttrennende Schutzeinrichtung“, die wie folgt definiert ist:

*„eine Einrichtung ohne trennende Funktion, die allein oder in Verbindung mit einer trennenden Schutzeinrichtung das Risiko vermindert“ [36]*

In Nr. 1.3.8. „Wahl der Schutzeinrichtungen gegen Risiken durch bewegliche Teile“ des Anhang I der MRL werden Kriterien vorgegeben, nach denen Schutzeinrichtungen zum Schutz gegen Risiken durch bewegliche Teile von Maschinen auszuwählen sind. Für das hier behandelte Robotersystem ist der Unterpunkt 1.3.8.2. „Bewegliche Teile, die am Arbeitsprozess beteiligt sind“ maßgebend. Hier ist festgelegt:

*„Zum Schutz von Personen gegen Gefährdungen durch bewegliche Teile, die am Arbeitsprozess beteiligt sind, sind zu verwenden:*

- [...]
  - nichttrennende Schutzeinrichtungen gemäß Nummer 1.4.3 oder
  - [...].

*Können jedoch bestimmte direkt am Arbeitsprozess beteiligte bewegliche Teile während ihres Betriebes aufgrund von Arbeiten, die das Eingreifen des Bedienungspersonals erfordern, nicht vollständig unzugänglich gemacht werden, so müssen diese Teile versehen sein mit*

- *feststehenden trennenden Schutzeinrichtungen oder beweglichen trennenden Schutzeinrichtungen mit Verriegelung, die die für den Arbeitsgang nicht benutzten Teile unzugänglich machen, und*
- *verstellbaren trennenden Schutzeinrichtungen gemäß Nummer 1.4.2.3, die den Zugang zu den beweglichen Teilen auf die Abschnitte beschränken, zu denen ein Zugang erforderlich ist.“ [36]*

Folgt man diesen Vorgaben scheint ein kollaborierendes Robotersystem nicht möglich. Zwar ist die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung „eine nichttrennende Schutzeinrichtungen gemäß Nummer 1.4.3“ im Sinne der o.a. Anforderung. Allerdings fordert die Richtlinie hier weiterhin, dass bewegliche Teile, die nicht vollständig unzugänglich gemacht werden können, zusätzlich mit bestimmten trennenden Schutzeinrichtungen versehen werden müssen. Dies wäre aufgrund der bestimmungsgemäßen Verwendung des Robotersystems nicht möglich, da ja der Bediener gerade „Hand in Hand“ mit dem Roboter arbeiten soll. Insofern scheint die gewählte Schutzeinrichtung diese Bestimmung auf den ersten Blick nicht erfüllen zu können. Diese Anforderung kommt aber gar nicht zum Tragen, weil die hier behandelte nichttrennende Schutzeinrichtung alle „am Arbeitsprozess beteiligten bewegliche Teile“ quasi vollständig unzugänglich macht, indem sie diese abschaltet, bevor der Bediener sie erreichen kann. Zusätzlich ist die Bestimmung in den „Allgemeinen Grundsätzen“ des Anhang I Nr. 3 an dieser Stelle hilfreich, wenn hier verlangt wird, dass, wenn die Ziele der Richtlinie nicht mit dem „Stand der Technik“ erreicht werden können, „die Maschine so weit wie möglich auf diese Ziele hin konstruiert und gebaut werden muss.“

### 3.1.2 Anforderungen an Schutzeinrichtungen

Konkrete Anforderungen an die verschiedenen in der MRL behandelten Schutzeinrichtungen sind in Nr. 1.4. „Anforderungen an Schutzeinrichtungen“ des Anhang I der MRL festgelegt.

#### „1.4.1. Allgemeine Anforderungen

*Trennende und nichttrennende Schutzeinrichtungen*

- *müssen stabil gebaut sein,*
- *müssen sicher in Position gehalten werden,*
- *dürfen keine zusätzlichen Gefährdungen verursachen,*
- *dürfen nicht auf einfache Weise umgangen oder unwirksam gemacht werden können,*
- *müssen ausreichend Abstand zum Gefahrenbereich haben,*
- *dürfen die Beobachtung des Arbeitsvorgangs nicht mehr als unvermeidbar einschränken und*
- *müssen die für das Einsetzen und/oder den Wechsel der Werkzeuge und zu Wartungszwecken erforderlichen Eingriffe möglichst ohne Abnahme oder Außerbetriebnahme der Schutzeinrichtungen zulassen, wobei der Zugang ausschließlich auf den für die Arbeit notwendigen Bereich beschränkt sein muss.*

[...].“ [36]

Spezielle, zusätzlich zu beachtende Anforderungen an die hier behandelte Schutzeinrichtungen sind in Nr. 1.4.3 festgelegt:

#### „1.4.3. Besondere Anforderungen an nichttrennende Schutzeinrichtungen

*Nichttrennende Schutzeinrichtungen müssen so konstruiert und in die Steuerung der Maschine integriert sein, dass*

- *die beweglichen Teile nicht in Gang gesetzt werden können, solange sie vom Bedienungspersonal erreicht werden können,*
- *Personen die beweglichen Teile nicht erreichen können, solange diese Teile in Bewegung sind, und*
- *bei Fehlen oder Störung eines ihrer Bestandteile das Ingangsetzen der beweglichen Teile verhindert wird oder die beweglichen Teile stillgesetzt werden.*

*Ihre Einstellung darf nur durch eine absichtliche Handlung möglich sein.“ [36]*

Damit die hier behandelte Schutzeinrichtung diese Punkte erfüllt, müssen insbesondere die im nachfolgenden Kapitel 3.1.3 beschriebenen Anforderungen an eine Steuerung in Nr. 1.2. des Anhang I der MRL beachtet werden.

### 3.1.3 MRL - Steuerungen und Befehlseinrichtungen

Die konkreten Anforderungen des Anhang I der MRL an die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung finden sich in Nr. 1.2. „Steuerungen und Befehlseinrichtungen“. In Nr. 1.2.1. „Sicherheit und Zuverlässigkeit von Steuerungen“ ist hier mit Bezug auf die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung festgelegt:

*„Steuerungen sind so zu konzipieren und zu bauen, dass es nicht zu Gefährdungssituationen kommt. Insbesondere müssen sie so ausgelegt und beschaffen sein, dass*

- *sie den zu erwartenden Betriebsbeanspruchungen und Fremdeinflüssen standhalten;*
- *ein Defekt der Hardware oder der Software der Steuerung nicht zu Gefährdungssituationen führt;*
- *Fehler in der Logik des Steuerkreises nicht zu Gefährdungssituationen führen;*
- *[...].*

*Insbesondere ist Folgendes zu beachten:*

- *Die Maschine darf nicht unbeabsichtigt in Gang gesetzt werden können;*

- *die Parameter der Maschine dürfen sich nicht unkontrolliert ändern können, wenn eine derartige unkontrollierte Änderung zu Gefährdungssituationen führen kann;*
- *[...];*
- *automatisches oder manuelles Stillsetzen von beweglichen Teilen jeglicher Art darf nicht verhindert werden;*
- *nichttrennende Schutzeinrichtungen müssen uneingeschränkt funktionsfähig bleiben oder aber einen Befehl zum Stillsetzen auslösen;*

*[...].“ [36]*

Nach den in Nr. 1.2.3. festgelegten Anforderungen für das „Ingangsetzen“ muss bei der hier behandelten Schutzeinrichtung weiterhin beachtet werden:

*„Das Ingangsetzen einer Maschine darf nur durch absichtliches Betätigen einer hierfür vorgesehenen Befehlseinrichtung möglich sein.*

*Dies gilt auch*

- *für das Wiedereingangsetzen nach einem Stillstand, ungeachtet der Ursache für diesen Stillstand;*
- *[...].*

*[...]*

*Bei Maschinen, die im Automatikbetrieb arbeiten, darf das Ingangsetzen oder Wiedereingangsetzen nach einer Abschaltung [...] ohne Bedieneringriff möglich sein, sofern dies nicht zu einer Gefährdungssituation führt.“ [36]*

### 3.1.4 Strahlung von außen

Nach Anhang I Nr. 1.5.11 der MRL ist auch eine Strahlung zu berücksichtigen, die von außen auf die Maschine einwirkt, soweit diese negative sicherheitstechnische Auswirkungen hat. Hier ist festgelegt:

*„Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass ihre Funktion durch Strahlung von außen nicht beeinträchtigt wird.“ [36]*

Hiermit ist nicht die Störstrahlung abgedeckt, die keine sicherheitsrelevante Auswirkung auf die Maschine oder das hier behandelte Sicherheitsbauteil hat. Diese lediglich prozessrelevante Störstrahlung wird durch die EMV-Richtlinie (siehe Kapitel 2.2.2) abgedeckt. Siehe hierzu u.a. Erwägungsgrund 10 der EMV-Richtlinie:

*„10) Diese Richtlinie sollte nicht die Sicherheit von Betriebsmitteln regeln, da diese in besonderen gemeinschaftlichen und einzelstaatlichen Rechtsvorschriften geregelt wird.“ [35]*

### 3.1.5 Lärmanforderungen

Die Sensoren der gewählten Schutzeinrichtung arbeiten mit Ultraschall. Auch wenn der Ultraschall außerhalb des Hörbereiches des Menschen liegt, muss dieses Phänomen beachtet werden. Geprüft werden muss, ob diese „Luftschallemission“ trotzdem Einfluss auf Sicherheit und Gesundheit von Personen hat. Die MRL legt hierzu fest:

*„1.5.8. Lärm*

*Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass Risiken durch Luftschallemission insbesondere an der Quelle so weit gemindert werden, wie es nach dem Stand des technischen Fortschritts und mit den zur Lärminderung verfügbaren Mitteln möglich ist.*

*Der Schallemissionspegel kann durch Bezugnahme auf Vergleichsemissionsdaten für ähnliche Maschinen bewertet werden.“ [36]*

Zum Einfluss der „Luftschallemission“ durch Ultraschall siehe Kapitel 3.2.6.

## 3.2 Sicherheitstechnische Anforderungen aus Normen

### 3.2.1 Angewandte Normen

Aus den nach MRL harmonisierten Normen (siehe Kapitel 2.2.1) sind folgende Normen für die in dieser Arbeit beschriebene Schutzeinrichtung besonders zu berücksichtigen.

- EN ISO 10218-1 [57]
- EN ISO 10218-2 [58]
- EN ISO 13849-1 [61]
- EN ISO 13855 [63]
- EN 61496-1 [64]

Zu Grenzwerten für Emissionen von Ultraschall existiert keine harmonisierte Norm nach MRL. Als technische Regel wurden hierfür die nachfolgenden aktuellen VDI Richtlinien zugrunde gelegt.

- VDI 2058 Blatt 2 [69]
- VDI 3766 [70]

Aus diesen aufgeführten technischen Regeln ergeben sich die in den nachfolgenden Kapiteln beschriebenen konkreten Anforderungen.

### 3.2.2 EN ISO 10218 Teil 1 und 2 „Industrielle Roboter“

Die EN ISO 10218-1 [57] ist die geltende Norm für Roboter, die sich mit Anforderungen an industrielle Roboter selbst beschäftigt. Zu diesen zählen auch kollaborierende Roboter, wie sie in dieser Arbeit behandelt werden. Die EN ISO 10218-2 [58] befasst sich dagegen mit den Gefährdungen die durch die Integration von Industrierobotern in Industrieroboterzellen und –linien entstehen, die auch noch andere Maschinen enthalten können.

Beide Normen behandeln nicht den Lärm, der durch den Roboter bzw. in der Roboterzelle verursacht wird. Teil 1 der Norm schließt Lärmanforderungen als für Roboter nicht signifikant aus. Teil 2 der Norm erkennt Lärm zwar als signifikante Gefährdung von Robotersystemen, behandelt diese Gefährdung aber nicht. Die speziell durch Ultraschall hervorgerufene mögliche Lärmgefährdung durch den Einsatz der in dieser Arbeit behandelten Schutzeinrichtung am Roboter wird in dieser Arbeit in Kapitel 3.2.6 behandelt.

In Teil 1, Kapitel 3.10, Anmerkung 3 wird ausgeführt, dass alle Anforderungen der Norm an Industrieroboter auch für kollaborierende Roboter gelten.

Der „*kollaborierende Betrieb*“ eines Roboters ist im Teil 1 der Norm in Kapitel 3.4 definiert als „*Zustand, in dem hierfür konstruierte Roboter innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten*“ [57]

Der in dieser Arbeit behandelte Roboter, inklusive Schutzeinrichtung, fällt unter den Anwendungsbereich von Teil 1 der Norm. Der komplette Demonstrator hingegen fällt unter den Anwendungsbereich von Teil 2 der Norm.

Beide Normenteile sind eng miteinander verknüpft. So werden in Kapitel 5.11 „*Kollaborierender Roboterbetrieb*“ des Teil 2 der Norm häufig entsprechende Forderungen des Teils 1 in Bezug genommen, so dass der Teil 1 der Norm im Rahmen dieser Arbeit auch für den kompletten Demonstrator maßgeblich betrachtet werden muss.

#### 3.2.2.1 Benötigter Performance Level für kollaborierende Roboter

Die Anforderungen an die sicherheitsbezogenen Teile von Steuerungen von kollaborierenden Robotern sind im Teil 1 der Norm EN ISO 10218 beschrieben. Je nach Art des kollaborierenden Betriebs (s.u.), für den der Roboter vorgesehen ist, stellt der Teil 1 unterschiedliche Forderungen an die Steuerung des Roboters. Bei Kombination mehrerer Betriebsarten müssen dabei alle entsprechenden Forderungen additiv erfüllt werden. Diese

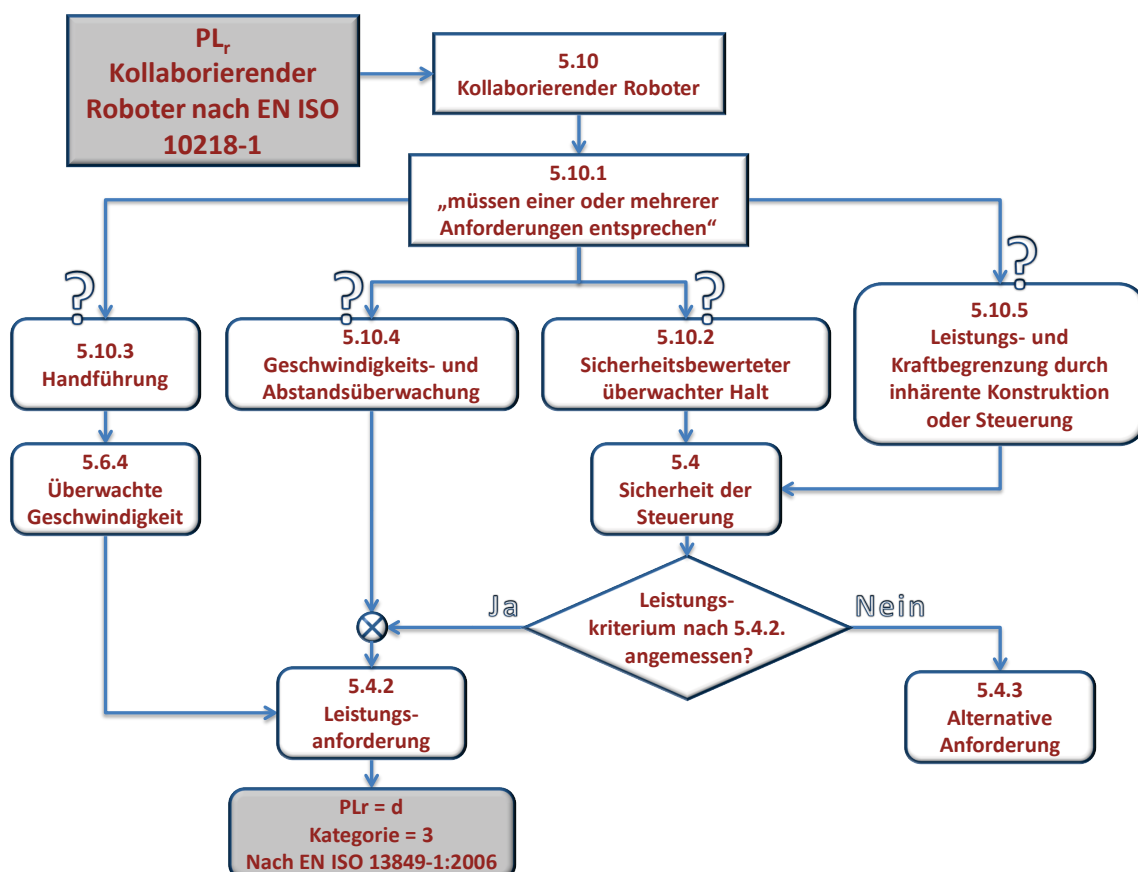
Anforderungen finden sich in Kapitel 5.10 „Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb“ der Norm in den Unterkapiteln 5.10.2 bis 5.10.5. Sie befassen sich im Einzelnen mit:

- „Sicherheitsbewerteter überwachter Halt“ (Kapitel 5.10.2)
- „Handführung“ (Kapitel 5.10.3)
- „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung“ (Kapitel 5.10.4)
- „Leistungs- und Kraftbegrenzung durch inhärente Konstruktion oder Steuerung“ (Kapitel 5.10.5)

Jedes einzelne dieser Kapitel verweist in Bezug auf die Anforderungen an die Sicherheit der Robotersteuerung direkt oder indirekt auf das Kapitel 5.4.2 „Leistungsanforderungen“ des Teil 1. Hier ist grundsätzlich auch der zu erfüllenden Performance Level – PL<sub>r</sub> – geregelt.

In Abweichung zu den Bestimmungen in Kapitel 5.4.2 des Teil 1 hat man bei einem kollaborierenden Roboter nach dem Prinzip der „Leistungs- und Kraftbegrenzung [...]“ bzw. mit „Sicherheitsbewerteter überwachter Halt“ die Wahl, stattdessen alternative Anforderungen nach Kapitel 5.4.3 der Norm zu erfüllen. Dazu muss allerdings eine Risikobeurteilung (siehe Kapitel 3.1) durchgeführt werden, die diese Alternativen als angemessen bewertet.

Abbildung 5 zeigt den Zusammenhang der Kapitel der Norm untereinander in Bezug auf die Ermittlung des PL<sub>r</sub>. Je nach Kombination von Betriebsarten des kollaborierenden Roboters muss der Graph mehrfach durchlaufen werden und kann für einzelne Teile der Steuerung unterschiedliche Anforderungen hervorbringen.



**Abbildung 5: Zusammenhang der Anforderungen an die Sicherheit von Steuerungen kollaborierender Roboter – aus Kapitel 5.10 der EN ISO 10218-1**

Die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung dient der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung und muss nach Kapitel 5.10.4 des Teil 1 die Anforderungen des Kapitels 5.4.2 des Teil 1 erfüllen. Aus diesem Kapitel geht hervor, dass die Steuerungsteile in Performancelevel „d“, Kategorie 3 nach EN ISO 13849-1:2006 [60] oder alternativ nach SIL 2, Hardwarefehler toleranz 1 nach IEC 62061:2005 [67] ausgeführt sein müssen. Ein alternativer PL<sub>r</sub> nach Kapitel 5.4.3 ist bei dieser Betriebsart nicht zulässig.

Teil 2 der Norm stellt ebenfalls Anforderungen an die Sicherheit der Steuerung von kollaborierenden Robotern. In ihrem Kapitel 5.11.2 „Allgemeine Anforderungen“ an kollaborierende Roboter stellt der Teil 2 Anforderungen an den  $PL_r$  für „nichttrennende Schutzeinrichtungen, die für die Anwesenheitserkennung verwendet werden“, wie sie in der vorliegenden Arbeit entwickelt wird. Hier wird auf das Kapitel 5.2.2 des Teil 2 verwiesen, das gleichlautend ist mit Kapitel 5.4.2 des Teils 1. Insofern sind die Anforderungen an die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung aus beiden Teilen der Norm identisch.

### 3.2.2.2 Sicher begrenzte Geschwindigkeit

Um Personen während der Entwicklung und der Tests, der in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung am Roboter, nicht zu gefährden, müssen in dieser Zeit zusätzliche sicherheitstechnischen Anforderungen für den Demonstrator beachtet werden.

Da sich während der Entwicklung und der Tests Personen im Wirkungsbereich des Roboters aufhalten müssen und die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung zu diesem Zeitpunkt noch nicht wirksam ist, muss die Sicherheit dieser Personen auf andere Art und Weise gewährleistet werden. Nach Kapitel 5.8.1 des Teil 1 der Norm müssen beim Steuern des Roboters „von innerhalb des geschützten Bereichs aus“ „Handbediengeräte“ verwendet werden. Dies erfordert nach Kapitel 5.8.2 des Teil 1 eine „reduzierte Geschwindigkeit“ nach Kapitel 5.6 des Teils 1. Im dessen Unterkapitel 5.6.2 findet sich konkrete Vorgaben zum „Betrieb mit reduzierter Geschwindigkeit“:

*„Beim Betrieb mit reduzierter Geschwindigkeit darf die Geschwindigkeit des Werkzeugarbeitspunkts (TCP) 250 mm/s nicht überschreiten. Es sollte auch möglich sein, Geschwindigkeiten unter 250 mm/s als zugeordneten Grenzwert zu wählen.“ [57]*

Diese Anforderung ist in der sicheren Steuerung des im Projekt verwendeten Roboters umgesetzt. Diese Anwendung ist in Kapitel 4 näher erläutert. Zur Demonstration schnellerer Bewegungen über 250 mm/s hinaus wurde im Projekt ein Dummy eingesetzt. [159]

### 3.2.2.3 Anforderungen an den Arbeitsraum / Kollaborationsraum

Der im Projekt EsIMiP durch das Projektteam erstellte Demonstrationsarbeitsplatz wurde so geplant, dass möglichst viele normative Anforderungen an einen Arbeitsraum mit einem kollaborierenden Roboter – Kollaborationsraum – bereits erfüllt sind. Der „Kollaborationsraum“ ist in Kapitel 3.5 des Teil 1 [57] und Kapitel 3.3 des Teil 2 [58] der Norm gleichlautend definiert als:

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

Anforderungen an den Kollaborationsraum werden in Kapitel 5.11.3 des Teil 2 gestellt:

- *„Der Kollaborationsraum [...] muss klar festgelegt sein (z. B. Kennzeichnung am Boden, Schilder, usw.)*
- *Personen/Bedienpersonen müssen durch eine Kombination von nichttrennenden Schutzeinrichtungen und der Einhaltung von Roboterparametern [...] geschützt sein, [...]*
- *jede Person [muss, B.O.] über individuelle Steuerungselemente [...] geschützt sein*
- *[...] die Bedienperson [muss, B.O.] alle Aufgaben leicht ausführen [können, B.O.] und die Position der Ausrüstung und der Maschinen [darf, B.O.] keine zusätzlichen Gefährdungen mit sich [bringen, B.O.] [...]*
- *Sicherheitsgerichtete Software zur Achs- und Raumbegrenzung sollte [...] den Radius der möglichen freien Bewegungen reduzieren*
- *[...] ein Freiraum von mindestens 500 mm (20 in) [sollte vom Bediener zu Fang- oder Quetschstellen, B.O.] gegeben [sein, B.O.] [...]*
  - *Wird der Mindestfreiraum nicht vorgesehen, müssen andere zusätzliche Schutzmaßnahmen zum Stoppen der Roboterbewegung getroffen werden [...]*

- *Bei dynamischer Bewegung (z. B. synchrone Bewegung von Robotern und Förderbändern (line tracking)), sind besondere Überlegungen erforderlich (siehe ISO 13854).“ [58]*

Bei der Gestaltung des Kollaborationsraums, im Rahmen des Demonstrators, wurde die Forderung nach der leichten Ausführbarkeit der Aufgabe und der Forderung keine zusätzlichen Gefährdungen zu erzeugen teilweise nicht eingehalten. Dies war notwendig, um die Funktion und Wirkungsweise der im Projekt entwickelten Schutzeinrichtung zu demonstrieren (siehe Kapitel 4). Die restlichen Forderungen wurden im Demonstrator, u.a. in Verbindung mit der Nutzung eines Handbediengerätes (siehe Kapitel 3.2.2.2), umgesetzt.

### 3.2.3 EN ISO 13849-1 „Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen“

Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung muss nach EN ISO 10218 Teil 1 und 2 ein PL von „d“ und eine Kategorie von 3 nach EN ISO 13849-1 erreichen (siehe Kapitel 3.2.2.1). Dabei verweist die EN ISO 10218 auf die heute nicht mehr aktuelle Ausgabe 2006 der EN ISO 13849-1. Diese wurde inzwischen von der Ausgabe 2008 abgelöst. Allerdings spielt dies für diese Arbeit keine Rolle, da die Änderungen der Version 2008 nicht die Anforderungen an Performance Level – PL – und Kategorie betreffen. Insofern kann in dieser Arbeit die aktuelle Version 2008 zu Grunde gelegt werden.

Die EN ISO 13849-1 [61] stellt Anforderungen an das Design von Hardware und Software von Sicherheitssteuerungen für Maschinen, um die Funktionale Sicherheit des Steuerungssystems zu gewährleisten. Die praktische Anwendung dieser Norm wird im BGIA-Report 2/2008 [141] ausführlich beschrieben. Im Rahmen des in dieser Arbeit entwickelten Demonstrators muss die Funktionale Sicherheit sowohl für die Sensoren selbst, als auch für die Steuerung betrachtet werden, mit der die Sensoren angesteuert und ausgewertet werden. Da die Hardware sicherer Steuerungen auf dem Markt verfügbar ist, muss diese im Rahmen dieser Arbeit nicht behandelt werden. Diese Arbeit beschränkt sich deshalb auf die Hardware der Sensoren selbst, sowie auf die Softwareteile in der Steuerung, die der Absicherung der Sensoren dienen.

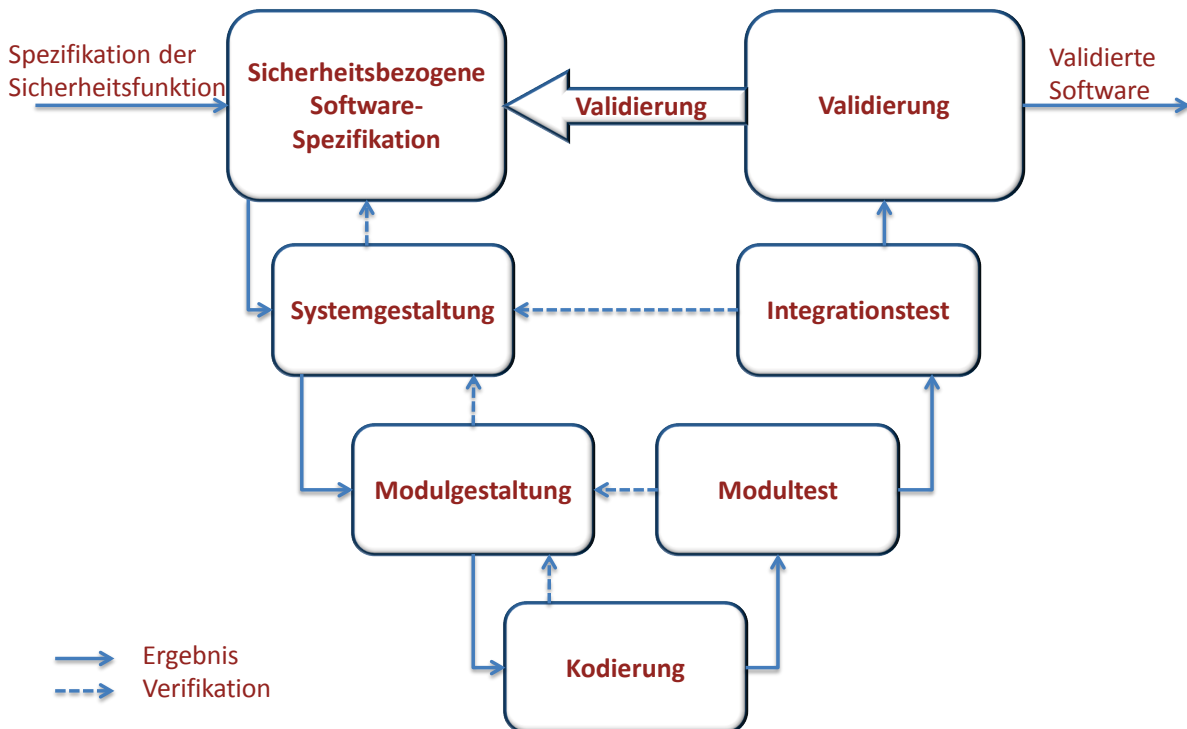
#### 3.2.3.1 Anforderungen an die Programmierung

Die Norm listet in ihrem Kapitel 4.6.2 Anforderungen an Embedded-Software und in Kapitel 4.6.3 Anforderungen an Anwendungssoftware. Beide Listen enthalten u.a. die folgenden Maßnahmen:

- *„Software-Sicherheitslebenszyklus mit Verifikation und Validierung [...];*
- *Dokumentation der Spezifikation und Entwurf;*
- *modulare und strukturierte Entwicklung und Codierung;*
- *[...]“ [61]*

Der Software-Sicherheitslebenszyklus ist ein vereinfachtes „V-Modell“, dargestellt in Abbildung 6, bestehend aus der Spezifikation, der System- und Modul-Gestaltung, der Kodierung sowie deren Tests.





**Abbildung 6: Vereinfachtes V-Modell des Softwarelebenszyklus,**  
**Quelle: EN ISO 13849-1, Bild 6 [61]**

Anhand dieses V-Modells konnte nachgewiesen werden, dass das erste entwickelte Sensorsystem die gestellten Anforderungen nicht erfüllt, so dass ein weiteres System entwickelt werden musste. (siehe Kapitel 6.2.1) Für dieses System mit anderen Sensoren mussten dann auch andere Algorithmen entwickelt werden (siehe Kapitel 7.1.5).

Die Dokumentation der Spezifikation und des Entwurfs des entwickelten Sensorsystems wird in den Kapiteln 6 bis 9 der vorliegenden Arbeit behandelt.

In Kapitel 8 werden die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Programme vorgestellt. Auf die formalen und die sicherheitsbezogenen Anforderungen an die Kodierung selbst wird im Rahmen dieser Arbeit kein Wert gelegt, da sie lediglich dazu dient, die Anwendbarkeit der geplanten Algorithmen und Strukturen am Demonstrator zu zeigen. Eine direkte Überführung des Programmcodes in eine sichere Steuerung war im Rahmen dieser Arbeit nicht geplant, da dieser lediglich für die Testumgebung unter dem Ziel der Veranschaulichung der Lösung entwickelt wurde. Aus demselben Grund mussten auch die restlichen Punkte der Anforderungslisten in Kapitel 4.6.2 sowie Kapitel 4.6.3 der Norm (s.o.) nicht beachtet werden.

### 3.2.3.2 Anforderung an die Sicherheit der Steuerung

In der Norm zu industriellen Robotern (EN ISO 10218-1) wird in Bezug auf die Hard- und Softwaregestaltung kollaborierender Roboter die Erfüllung der Anforderungen der Kategorie 3 und des PL „d“ nach EN ISO 13849-1:2006 [60] gefordert (siehe Kapitel 3.2.2.1). Die Anforderungen der EN ISO 13849-1 in der Ausgabe von 2006 an die Kategorie 3 sind dabei identisch mit denen der aktuell gültigen von 2008 (siehe Kapitel 3.2.3).

#### 3.2.3.2.1 Kategorie

Generell gilt für alle Kategorien nach EN ISO 13849-1, dass die Schutzeinrichtungen „so gestaltet, gebaut, ausgewählt, zusammengebaut und kombiniert werden, dass sie den zu erwartenden Einflüssen standhalten können“ [61]. Diese Forderung ergänzt Anhang I 1.4.1. der MRL (siehe Kapitel 3.1.2). Bei der Konstruktion der Steuerung müssen grundlegende Sicherheitsprinzipien, beschrieben in EN ISO 13849-2 [62], verwendet werden. Außer Kategorie B müssen alle Kategorien zusätzlich bewährte Sicherheitsprinzipien nach

EN ISO 13849-2 einhalten. Für Kategorie 3 gilt nach Kapitel 6.2.6 der EN ISO 13849-1 weiterhin:

*„SRP/CS der Kategorie 3 müssen so gestaltet werden, dass ein einzelner Fehler in einem dieser Teile nicht zum Verlust der Sicherheitsfunktion führt. Wenn immer in angemessener Weise durchführbar, muss ein einzelner Fehler bei oder vor der nächsten Anforderung der Sicherheitsfunktion erkannt werden.“ [61]*

Diese Anforderung an die zu entwerfende Schutzeinrichtung ist die Konkretisierung der entsprechenden Anforderung in Anhang I, 1.2.1. der MRL (siehe Kapitel 3.1.3). Sie ist nach der in diesem Kapitel der Norm vorgesehenen Architektur durch zwei separat arbeitende Kanäle zu lösen. Beide Kanäle erarbeiten redundante Ergebnisse, so dass ein einzelner Fehler in einem der Kanäle keine gefahrbringende Bewegung auslösen kann. Die Kanäle überwachen sich gegenseitig auf Gleichheit der ermittelten Ergebnisse und bringen bei einer nicht tolerierten Abweichung das Robotersystem zum Stillstand. Die Fehlererkennung muss angemessen sein und deshalb nicht zwangsläufig durchgehend erfolgen.

Abbildung 7 stellt die vorgesehene Architektur für eine Kategorie 3 nach EN ISO 13849-1 dar. In dieser Arbeit werden hiervon die Eingabeeinheiten „I1“ und „I2“ behandelt sowie die Tests der Sensoren in den Logiken „L1“ und „L2“ und der Kreuzvergleich der Ergebnisse „c“. Nicht behandelt werden die Logiken selbst sowie deren interne Selbsttests, die Ausgabeeinheiten „O1“ und „O2“ sowie die Verbindungsmittel „i<sub>m</sub>“ und die Überwachungen „m“.

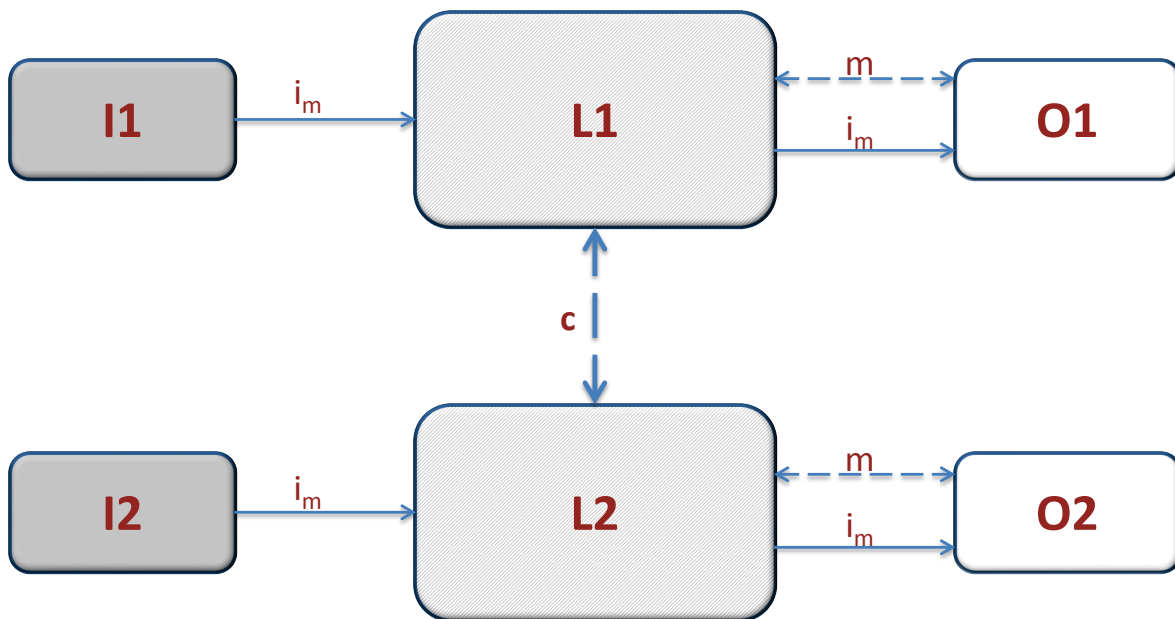


Abbildung 7: Kategorie 3 mit Hervorhebung der in der Arbeit behandelten Teile  
Quelle: EN ISO 13849-1 Bild 11 – Vorgesehene Architektur für Kategorie 3 [61]

### 3.2.3.2.2 Performance Level

Nach Kapitel 4.5.1 der Norm muss für jeden sicherheitsbezogenen Teil einer Steuerung der PL bestimmt werden. Danach müssen folgende Aspekte berücksichtigt werden:

- „quantifizierbare Aspekte“
  - $MTTF_d$ -Wert für einzelne Bauteile,
  - DC,
  - CCF,
  - Struktur;

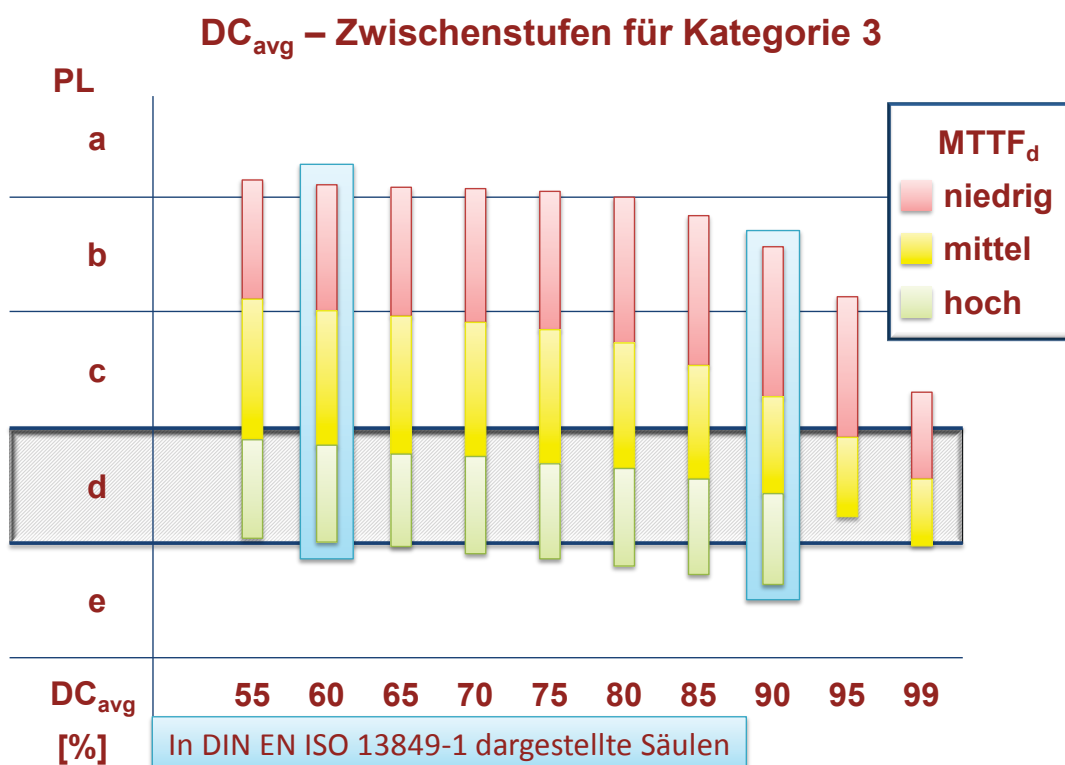
- *nicht quantifizierbare, qualitative Aspekte, die das Verhalten des SRP/CS beeinflussen*
  - *Verhalten der Sicherheitsfunktion unter Fehlerbedingungen,*
  - *sicherheitsbezogene Software,*
  - *systematische Ausfälle*  
*und*
  - *Umgebungsbedingungen.“ [61]*

Die Norm enthält in ihren informativen Anhängen Verfahren für eine vereinfachte Ermittlung eines Teils dieser Aspekte. Da diese Anhänge informativ sind, ist es dem Anwender der Norm freigestellt, die beschriebenen Verfahren anzuwenden. Insofern können die quantitativen Aspekte auch mit anderen Verfahren, wie z.B. „Markov-Modellen, allgemeine stochastische Petrinetze (GSPN), Zuverlässigkeits-Blockdiagrammen“ [61], abgeschätzt werden.

Weiterhin fordert Kapitel 6.2.6 der Norm zur Erfüllung der Kategorie 3:

*„Der Diagnosedeckungsgrad ( $DC_{avg}$ ) der gesamten SRP/CS einschließlich der Fehlererkennung muss niedrig sein. Die  $MTTF_d$  jedes redundanten Kanals muss, abhängig vom  $PL_r$ , niedrig bis hoch sein. Maßnahmen gegen CCF müssen angewendet werden.“ [61]*

Die Forderung nach einem niedrigen  $DC_{avg}$  bedeutet, dass durch die systeminternen Fehlertests im Durchschnitt mindestens 60% der Rate aller gefahrbringenden Ausfälle erkannt wird. Die mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall jedes Kanals -  $MTTF_d$  – muss mindestens niedrig sein, was nach Kapitel 4.5.2 der Norm drei Jahre bedeutet. Durch die Festlegung der EN ISO 10218-1 auf eine Steuerungskategorie von mindestens 3 ist die Erfüllung des  $PL_r$  hauptsächlich von der Kombination aus  $MTTF_d$  und  $DC_{avg}$  abhängig. Der Zusammenhang ist in Abbildung 8 dargestellt.



**Abbildung 8: Performance Level bei feinstufiger Auflösung der  $DC_{avg}$  Skala**  
Quelle: BGIA-Report 2/2008, Abbildung G.4 [141] (Ausschnitt)

Die EN ISO 13849-1 beschränkt sich auf die Darstellung der in Abbildung 8 blau hinterlegten Säulen für einen  $DC_{avg}$  von niedrig (60%) und mittel (90%). Eine feinere Auflösung bietet das Diagramm in Abbildung 8, welches vom IFA anhand des für die Norm verwendeten Rechenmodells erstellt und im BGIA-Report 2/2008 [141] veröffentlicht wurde. Eine noch

feinere Auflösung als die Abbildung 8 wird durch Software erreicht, z.B. SISTEMA vom IFA, die das Rechenmodell für den Zusammenhang der unterschiedlichen Faktoren enthält.

Der  $PL_r$  ist für kollaborierende Roboter durch die EN ISO 10218-1 auf „d“ festgelegt. (siehe Kapitel 3.2.2.1) Abbildung 8 zeigt, dass dieses PL sowohl durch eine hohe Ausfallsicherheit der Module, d.h. eine  $MTTF_d$  von 30 bis 100 Jahren, als auch durch eine hohe Testgüte erreicht werden kann.

### 3.2.3.2.3 Ausfälle aufgrund gemeinsamer Ursache - CCF

Unter CCF (Common Cause Failure) versteht die EN ISO 13849-1 nach ihrem Kapitel 3.1.6:

*„Ausfälle verschiedener Einheiten aufgrund eines einzelnen Ereignisses, wobei diese Ausfälle nicht auf gegenseitiger Ursache beruhen“ [61]*

Mit diesem Ansatz wird berücksichtigt, dass in einem mehrkanaligen System parallel arbeitende Bauteile durch eine gemeinsame Ursache gleichzeitig den gleichen Fehler produzieren können. Das Auftreten dieser Fehler wird dadurch eingeschränkt, dass nach EN ISO 13849-1 verschiedene im Anhangs F der Norm angegebene Maßnahmen kombiniert werden müssen. Dieser Anhang enthält eine Liste, die den verschiedenen möglichen Maßnahmen unterschiedliche Bewertungspunkte zuordnet. Mit den gewählten Maßnahmen muss eine Punktzahl von mindestens 65 auf einer Skala von 0 bis 100 erreicht werden.

### 3.2.3.3 Fehlerbetrachtung nach EN ISO 13849-1

Zur Ermittlung der in Kapitel 3.2.3.2.2 geforderten Parameter muss für die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung eine Fehlerbetrachtung durchgeführt werden. Diese ist im Kapitel 7.2 der Norm behandelt. Hierzu verweist sie auf die EN ISO 13849-2 für eine Auflistung der *„wichtigsten Fehler und Ausfälle für verschiedene Technologien“* [61]. Diese Listen finden sich in der EN ISO 13849-2 in den Anhängen A bis D. Weiterhin bestimmt die EN ISO 13849-1 zur Fehlerbetrachtung:

*„Im Allgemeinen müssen folgende Fehlermerkmale in Betracht gezogen werden:*

- *wenn als eine Folge eines Fehlers weitere Bauteile ausfallen, müssen der erste Fehler zusammen mit allen Folgefehlern als ein Einzelfehler berücksichtigt werden;*
- *zwei oder mehrere einzelne Fehler, die eine gemeinsame Ursache haben, müssen als ein Fehler betrachtet werden (dies ist bekannt als ein CCF);*
- *das gleichzeitige Auftreten von zwei oder mehreren Fehlern unterschiedlicher Ursache wird als höchst unwahrscheinlich angesehen und braucht deswegen nicht betrachtet werden.“ [61]*

Die konkrete Fehlerbetrachtung für die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung findet sich in Kapitel 9.2.

### 3.2.4 EN ISO 13855 „Anordnung von Schutzeinrichtungen“

Die EN ISO 13855 [63] beinhaltet die Berechnungsformeln für die Anordnung von berührungslos wirkenden Schutzeinrichtungen. Diese Norm zielt in Ihrem Kapitel 6 hauptsächlich auf *„Verwendung aktiver optoelektronischer Schutzsysteme“* ab, kann aber äquivalent auch für andere physikalische Phänomene in der Messtechnik, in diesem Fall Akustik, verwendet werden.

Ziel für die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung ist, unter Anwendung harmonisierter Normen,

- einen möglichst geringen Mindestabstand zwischen Roboter und Bediener wählen zu können  
und
- bei gegebenem Abstand eine möglichst schnelle Bewegungsgeschwindigkeit zulassen zu können.

Zum Berechnen dieser Werte müssen der Eindringabstand und der Nachlauf des gesamten Robotersystems bestimmt werden.

### 3.2.4.1 Eindringabstand

Nach Kapitel 3.1.10 der Norm ist der Eindringabstand  $C$  der

*„Abstand, um den sich ein Körperteil (üblicherweise eine Hand) an der Schutzeinrichtung vorbei in Richtung des Gefährdungsbereichs bewegen kann, bevor die Schutzeinrichtung ausgelöst wird.“* [63]

Für alle Sensoren mit einem Detektionsvermögen  $\leq 40$  mm müssen die Formeln aus Kapitel 6.2.3 der Norm angewendet werden. Aus diesen geht hervor, dass Sensoren, die ein Objekt  $\leq 14$  mm Durchmesser erkennen einen „Eindringabstand“ von 0 mm haben. Das heißt, diese Sensoren sind in der Lage, einen einzelnen Finger beim Eintritt in den Sensorbereich sofort zu erkennen. Sie benötigen deshalb keinen zusätzlichen Sicherheitsaufschlag in der späteren Berechnung.

Ein Ziel der in dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung ist es daher, Gegenstände  $\leq 14$  mm Durchmesser im sicherheitskritischen Schutzbereich erkennen zu können.

### 3.2.4.2 Nachlauf des gesamten Robotersystems

In Kapitel 5 der Norm ist der „Nachlauf“ des gesamten Robotersystems beschrieben, das heißt die Zeit, die das Robotersystem vom Eintritt der Gefahrensituation bis zum Stillstand benötigt. Die Nachlaufzeit setzt sich zusammen aus:

- „t1 die maximale Zeitdauer zwischen dem Auslösen der Schutzeinrichtung und dem Zeitpunkt, bis das Ausgangssignal den AUS-Zustand erreicht hat;*
- t2 die Anhaltezeit, d. h. die maximale Zeitdauer, die zur Beendigung der gefährdenden Maschinenfunktion erforderliche ist, nachdem das Ausgangssignal der Schutzeinrichtung den AUS-Zustand erreicht hat. Die Ansprechzeit des Steuerungssystems der Maschine muss in t2 miteinbezogen werden.“* [63]

In dem in dieser Arbeit beschriebenen Projekt gehen in die Nachlaufzeit folgende Zeiten ein:

t1:

- Zykluszeit der Sensoren der Umgebungserfassung
- Zykluszeit der Sensoren der Roboterpositionsmessung
- Senden der Werte von den Sensoren zur Sensorsteuerung
- Einlesen der Werte in der Sensorsteuerung
- Berechnen der aktuell maximal erlaubten Geschwindigkeit
- Senden der Geschwindigkeitsvorgabe an die Robotersteuerung

t2:

- Einlesen der Geschwindigkeitsvorgabe in der Robotersteuerung
- Verarbeiten der Geschwindigkeitsvorgabe in der Robotersteuerung
- Abbremsen des Roboters von der aktuellen Geschwindigkeit auf die Geschwindigkeitsvorgabe

Für t2 wird im Rahmen dieser Arbeit mit dem verwendeten Roboter (siehe Kapitel 4.3) eine Zeit von 70 ms angenommen. [148]

### 3.2.4.3 Mindestabstand

Die Norm EN ISO 13855 gibt in Kapitel 6.2.3 die Berechnungsformel

$$S = (K * T) + C$$

an, um

- den Mindestabstand  $S$  aus
- dem Faktor für die Annäherungsgeschwindigkeit eines Menschen  $K$ ,
- der Nachlaufzeit  $T$  (siehe Kapitel 3.2.4.2) und
- der Eindringtiefe in den Gefahrenbereich bis zur Detektion  $C$  (siehe Kapitel 3.2.4.1)

zu berechnen.

Der Faktor  $K$  beträgt bis 500 mm Mindestabstand  $2 \text{ m/s}$ , darüber  $1,6 \text{ m/s}$ . Auf diesen Faktor muss noch die maximale Geschwindigkeit des Roboters addiert werden, die in diesem Projekt ca.  $11,2 \text{ m/s}$  beträgt (Berechnung siehe Kapitel 12). Somit können sich Mensch und Maschine mit maximal  $K \approx 13,2 \text{ m/s}$  einander nähern.

Erste Überschlagsrechnungen haben für  $T$  einen Wert von 100 ms ergeben. Dieser wird in den folgenden Beispielen verwendet. Es wird zur Vereinfachung davon ausgegangen, dass die Reaktionszeit des Roboters unabhängig von der aktuellen Robotergeschwindigkeit ist. Die Trägheit des Abbremsens des Robotersystems wird aufgrund fehlender konkreter Daten und der im Projekt beobachteten geringen Zeit zwischen Beginn des Abbremsens und dem Stillstand vernachlässigt. In einer späteren konkreten praktischen Anwendung muss dieser Wert aufgrund verschiedener Anbauten an den einzelnen Robotern experimentell ermittelt werden. Die Norm gibt hierzu Hinweise zu Art und Anzahl der einzelnen Messungen in ihrem Anhang D.

Wie in Kapitel 3.2.4.1 beschrieben, kann  $C$  laut Norm auf 0 mm reduziert werden.

Nach Umbreit [117] muss in dieser Rechnung auch die Unsicherheit des Roboterwegmesssystems und des Personendetektionssystems berücksichtigt werden. Für die Darstellung im Rahmen dieser Arbeit können diese Werte als Null angesehen werden. Die Unsicherheit des Roboterwegmesssystems ist gegenüber den notwendigen Sicherheitsabständen verschwindend gering und kann deshalb hier vernachlässigt werden. Die Unsicherheit durch das Personendetektionssystem ist größer, als die des Roboterwegmesssystems, bewegt sich aber bei den in dieser Arbeit verwendeten Sensoren u.a. bei unter 1% [19]. Diese 2 mm bei 20 cm Sicherheitsabstand können im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt werden.

Bei stillstehendem Roboter ergibt sich ein Mindestabstand von

$$S = (2 \text{ m/s} * 100 \text{ ms}) + 0 \text{ mm} = 200 \text{ mm}$$

Bei einem sich maximal schnell bewegendem Roboter müsste ein Mindestabstand von

$$S = [(11,2 \text{ m/s} + 1,6 \text{ m/s}) * 100 \text{ ms}] + 0 \text{ mm} = 1280 \text{ mm}$$

eingehalten werden.

Psychologische Studien während des Projekts EsIMiP (siehe Kapitel 1.4.1) haben ergeben, dass die optimale Leistungsfähigkeit von Menschen von der Robotergeschwindigkeit abhängt, da sich der Mensch bei seinem Arbeiten teilweise auf den Roboter konzentriert. [133][134] Ergebnisse dieser Studie lassen vermuten, dass  $1,5 \text{ m/s}$  die Leistung des Bedieners bei der Kollaboration nicht negativ beeinträchtigen. In einer früher durchgeführte Studie zu diesem Thema [94] konnte Thiemermann zeigen, dass  $1,5 \text{ m/s}$  von den Probanden im Mittel als „sehr schnelle“ Robotergeschwindigkeit wahrgenommen wurde.

Eine danach, in 2013, durchgeführte Studie am IFA konzentrierte sich auf den Einfluss der Autonomie und der Geschwindigkeit des Roboters auf die Beanspruchung des Bedieners. Hierbei wurden Geschwindigkeiten von  $0,75 \text{ m/s}$  und  $1,4 \text{ m/s}$  untersucht. „Beide

Teilergebnisse [der Untersuchungen, B.O.] sprechen dafür, dass autonome und schnelle Bewegungen eines kollaborierenden Industrie-Roboters beim Nutzer zu einer erhöhten Beanspruchung führen“ [151].

Eine Geschwindigkeit von  $1,5 \text{ m/s}$  kann, mit den angenommenen Werten (s.o.), schon bei 350 mm Sicherheitsabstand zwischen Mensch und Roboter gefahren werden.

$$S = [(2 \text{ m/s} + 1,5 \text{ m/s}) * 100 \text{ ms}] + 0 \text{ mm} = 350 \text{ mm}$$

Bewegungen des Roboters die quer zum Menschen oder von ihm weg erfolgen dürfen aus psychologischer Sicht wesentlich schneller sein.

Weiterhin gibt die Norm in ihrem Kapitel 6.2.3.1 vor, dass beim Einsatz optoelektronischer Schutzeinrichtungen ein Unterschreiten von 100 mm Sicherheitsabstand immer zum Stillstand der Maschine führen muss. Diese Forderung lässt sich auch auf andere physikalische Phänomene berührungslos wirkender Schutzeinrichtungen übertragen. Aus der Berechnungsformel des Sicherheitsabstands ergibt sich hieraus eine Nachlaufzeit von 50 ms, die bei still stehendem Roboter als Ziel für ein kollaborierendes Robotersystem betrachtet werden kann:

$$S = (2 \text{ m/s} * 50 \text{ ms}) + 0 \text{ mm} = 100 \text{ mm}$$

Ein Robotersystem, welches schneller reagiert, führt zu keinem geringeren zulässigen Sicherheitsabstand, ermöglicht aber eine schnellere Steigerung der Robotergeschwindigkeit, sobald sich der Mensch weiter als 100 mm entfernt. (siehe hierzu auch Abbildung 9)

### 3.2.4.4 Bewegungsgeschwindigkeit

Die maximal erlaubte Momentangeschwindigkeit des Roboters ist abhängig vom freien Bewegungsraum um ihn herum. Bei 100 ms Reaktionszeit des Gesamtsystems und 200 mm Abstand oder weniger zu einem Menschen beträgt sie  $0 \text{ m/s}$ , wie in Kapitel 3.2.4.3 gezeigt. Bei wachsendem Abstand über 200 mm hinaus ist die zulässige Geschwindigkeit linear abhängig vom Abstand, und lässt sich mit der Formel

$$\begin{aligned} S &= [(K_{\text{Mensch}} + K_{\text{Roboter}}) * T] + C \\ &\equiv K_{\text{Roboter}} = \frac{S - C}{T} - K_{\text{Mensch}} \end{aligned}$$

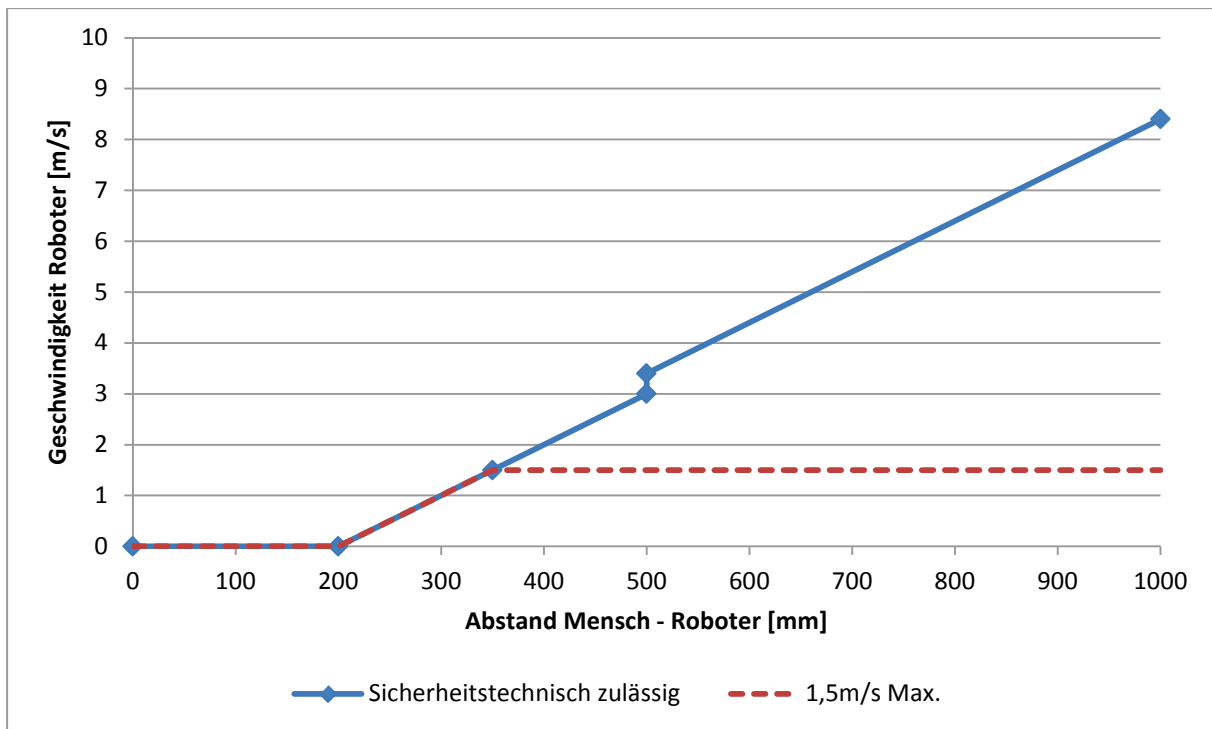
berechnen. Bis 500 mm Sicherheitsabstand (siehe Kapitel 3.2.4.3) gilt somit

$$S \leq 500 \text{ mm}: K_{\text{Roboter}} = \frac{S}{100 \text{ ms}} - 2 \text{ m/s}$$

wobei  $K_{\text{Roboter}}$  die aktuell maximal erlaubte Geschwindigkeit und  $S$  den aktuell eingehaltenen Sicherheitsabstand darstellt. Bei einem größerem Abstand als 500 mm wird die anzunehmende Geschwindigkeit des Menschen um  $0,4 \text{ m/s}$  herabgesetzt (siehe Kapitel 3.2.4.3). Dies kann zur optimalen Ausnutzung des Arbeitssystems auf die Robotergeschwindigkeit aufgeschlagen werden:

$$S > 500 \text{ mm}: K_{\text{Roboter}} = \frac{S}{100 \text{ ms}} - 1,6 \text{ m/s}$$

Abbildung 9 stellt den Zusammenhang von Sicherheitsabstand und möglicher Robotergeschwindigkeit dar. Diese Abbildung geht davon aus, dass die Reaktionszeit des Robotersystems unabhängig von der aktuellen Robotergeschwindigkeit ist (siehe Kapitel 3.2.4.3).



**Abbildung 9: Zusammenhang aktueller Abstand – maximal erlaubte Geschwindigkeit für eine Reaktionszeit von 100ms**

Zusätzlich zu den dargestellten Geschwindigkeiten wurde von Reis Robotics im Projekt EsIMiP eine Steuerung umgesetzt, die die aktuelle Geschwindigkeit automatisch anhand der Annäherung an unterschiedliche Körperteile anpassen kann. [135] Diese Kurven können anhand von weiteren psychologischen Untersuchungen eingestellt werden, müssen aber in jedem Fall auf oder unterhalb der sicheren Geschwindigkeitskurve liegen.

### 3.2.5 EN 61496-1 „Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen“

Die EN 61496-1 klassifiziert berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen – BWS – in vier Typen und gibt für jeden Typ Anforderungen und Prüfvorschriften an. Die Norm beschreibt den Einsatz einer BWS wie folgt:

*„Eine berührungslos wirkende Schutzeinrichtung (BWS) wird an Maschinen angebracht, die ein Risiko der Körperverletzung bergen. Sie bietet Schutz, indem sie die Maschine veranlasst, einen sicheren Zustand einzunehmen, bevor eine Person in eine gefährdende Situation geraten kann.“ [64]*

Es ist nicht Aufgabe dieser Norm zu konkretisieren, welcher Maschinentyp mit welchem BWS Typ ausgestattet werden muss. Hierzu verweist die Norm, soweit dies nicht in einer C-Norm konkretisiert ist, auf die EN ISO 12100 [59] und damit auf die vom Hersteller der Maschine durchzuführende Risikobeurteilung.

Neben Vorgaben an die konkrete Konstruktion einer BWS, z.B. die elektrische Versorgung, die im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet werden, enthält die Norm in ihrem Kapitel 4.2.2 auch „Anforderungen zur Erkennung von Fehlern“.

Bei der Auswahl eines Typs kann man sich an dieser Stelle an der Forderung der EN ISO 10218-1 nach einer Kategorie 3 nach EN ISO 13849-1 orientieren. Die Kategorie 3 kommt in ihren Anforderungen dem BWS Typ 3 nach Kapitel 4.2.2.4 der EN 61496-1 am nächsten. Somit sind für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung die Anforderungen an eine redundante BWS Typ 3 maßgebend.

Für eine redundante BWS Typ 3 schreibt die Norm in Kapitel 4.2.2.4 vor:



„[...]“

*In Fällen, in denen ein einzelner Fehler, der selbst keinen gefährdenden Ausfall der BWS verursacht, nicht aufgedeckt wird, darf das Auftreten eines weiteren Fehlers nicht zu einem gefährdenden Ausfall führen. [...]“ [64]*

Weiterhin fordert die Norm in ihrem Kapitel 4.2.9 die Minimierung von gefährlichen Ausfällen in Folge gemeinsamer Ursachen, ohne hier allerdings ins Detail zu gehen. Die Anforderungen der EN ISO 13849-1 sind an dieser Stelle konkreter (siehe Kapitel 3.2.3.2.3).

Wird nach Kapitel 4.2.11.1 a) der Norm *„während des Betriebs [...] ein [...] Softwareprogramm [...] ausgeführt“* [64], müssen zusätzliche Anforderungen nach ihrem Kapitel 4.2.11.2 erfüllt werden. Unter diesen findet sich auch die Anforderung:

*„Die Software, das Geräteprogramm und die Gerätefunktionsauslegung müssen nach IEC 61508-3 für den angemessenen SIL entwickelt werden (z. B. [...] SIL 2 für Typ 3 [...]).“ [64]*

Insofern gelten über diesen undatierten Verweis neben den Anforderungen der harmonisierten EN ISO 13849-1 (siehe Kapitel 3.2.3.1) für eine BWS auch die Anforderungen der aktuellen EN 61508-3 [65]. Wie in Kapitel 3.2.3.1 erwähnt, ist die sichere Umsetzung der Software allerdings nicht Teil dieser Arbeit.

### 3.2.6 VDI 2058-2 und VDI 3766 „Am Arbeitsplatz erlaubter Ultraschallpegel“

Nach Lärmschutz-Arbeitsblatt LSA 01-400 [149] beschäftigen sich in Deutschland die beiden Normen VDI 2058-2 [69] und VDI 3766 [70] mit dem Thema Ultraschall.

In der VDI 2058-2 wird kurz auf die Bewertung von Ultraschall als Geräuschbelastung eingegangen. Sie nennt außerdem Grenzwerte, deren Überschreiten zu möglicher Schädigung des Menschen führen kann.

*Die VDI 3766 „dient der Erfassung, Bewertung und Beurteilung von luftgeleitetem Ultraschall an Arbeitsplätzen. Es werden Grundlagen, Verfahren und Messtechnik zur quantitativen Erfassung und Beurteilungsrichtlinien beschrieben.“ [70]*

Die VDI 3766 behandelt Ultraschall-Immissionen, soweit sie Beschäftigte in ihrem Hörvermögen im Hörfrequenzbereich (16 Hz bis 16 kHz [70][71]) beeinträchtigen kann. Erkenntnisse aus den Regeln der Technik sowie aus Wissenschaft und Forschung u.a. aus der VDI 2058-2 und dem IFA [139] lassen weitere Rückschlüsse auf Grenzwerte im oberen Hörfrequenzbereich zum Schutz des Gehörs zu.

Die Richtlinie VDI 3766 gibt folgende Kennwerte für die Beurteilung der Belastung durch Ultraschallemissionen vor:

- $L_{EXAU,8h}$  gibt die Belastung bei einem 8 Stunden Arbeitstag an. Dieser AU-bewertete Lärmexpositionspegel stellt hauptsächlich die Lärmbelastung im Hörschallbereich dar. Bis 10 kHz entspricht er dem A-bewerteten Lärmexpositionspegel nach EN 61672-1 [66], über 10 kHz wird der relative Schalldruckpegel stärker abgesenkt als in der A-Bewertung, bei 40 kHz um ca. 80 dB in der AU-Bewertung gegenüber ca. 20 dB in der A-Bewertung.
- $L_{Zeq, Terz, 5min}$  ist der Z-bewertete maximale 5-Minuten-Terzschalldruckpegel, das heißt die lautesten fünf Minuten des Arbeitstages,
- $L_{Zpeak}$  ist der Z-bewertete Spitzenschalldruckpegel.

Für den AU-bewerteten Lärmexpositionspegel gibt die VDI 3766 einen Grenzwert von  $L_{EXAU,8h} = 85$  dB an und für den Z-bewerteten Spitzenschalldruckpegel einen Grenzwert von  $L_{Zpeak} = 140$  dB.

Bei einer Exposition des Arbeitnehmers gegenüber Ultraschall kann es nach Maue zu *„Ultraschallwirkungen wie Kopfschmerzen, Schwindel, Übelkeit und Druckgefühlen auf den Ohren, ggf. schon nach relativ kurzer Belastungszeit“* [139] kommen. Zur Bewertung des Arbeitsplatzes kann nach Maue der Schalldruckpegel  $L_{Zeq, Terz, 5min}$  herangezogen werden [139]. Da die Richtlinie hier keinen entsprechenden Grenzwert vorgibt, schlägt Maue in [139] *„auf der Grundlage entsprechender Empfehlungen in der Literatur und den Richtlinien“* [139]

einen Grenzwert von  $L_{\text{Zeq, Terz, 5min}} = 110$  dB für Terzbandmittenfrequenzen zwischen 20 und 40 kHz vor.

In der VDI 2058-2 wird in Kapitel 3.7 folgendes zu Ultraschall festgestellt:

*„Bleibende Gehörschäden durch luftgeleiteten Ultraschall sind nicht wahrscheinlich, wenn der im folgenden aufgeführte Terzschalldruckpegel unterschritten wird. Das Eindringen von intensivem Ultraschall durch direkten Kontakt auf den Schädelknochen muss ausgeschlossen werden.*

*Um Beeinträchtigungen durch luftgeleiteten Ultraschall zu vermeiden, soll der Terzschalldruckpegel mit der Mittenfrequenz 20 kHz den Wert  $L_t = 110$  dB nicht übersteigen. Für höhere Frequenzen werden auch höhere Grenzwerte diskutiert.“ [69]*

Nach der VDI 3766 sind Messungen der Schallbelastung im Arbeitssystem grundsätzlich an mehreren Messpunkten bei unterschiedlichen Abständen vorzunehmen. Der zu betrachtende Wert ist der im Arbeitssystem gemessene Maximalwert.

## 4 Arbeitssystem

Das Schutzkonzept, welches in der vorliegenden Arbeit vorgestellt wird wurde im Hinblick auf ein bestimmtes Arbeitssystem entwickelt. Dieses Arbeitssystem beschreibt das Zusammenspiel verschiedener Faktoren während der Erfüllung einer Arbeitsaufgabe an einem Arbeitsplatz. Vorgaben und Definitionen über das Arbeitssystem sind in der nicht harmonisierten Norm EN ISO 6385 zu finden, die sich mit der Gestaltung von Arbeitssystemen im Hinblick auf ihre Ergonomie beschäftigt. [30] Zusätzlich wurden spezifische Vorgaben aus der harmonisierten Norm für Robotersysteme DIN EN 10218-2 [58] in Bezug auf Kollaborationsräume (siehe Kapitel 3.2.2.3) beachtet.

Nach Kapitel 2 der EN ISO 6385 ist ein Arbeitssystem definiert als

*„System, welches das Zusammenwirken eines einzelnen oder mehrerer Arbeitender/Benutzer mit den Arbeitsmitteln umfasst, um die Funktion des Systems innerhalb des Arbeitsraumes und der Arbeitsumgebung unter den durch die Arbeitsaufgaben vorgegebenen Bedingungen zu erfüllen“ [30]*

Weiterhin definiert die Norm grundsätzliche Begriffe des Arbeitssystems. Abbildung 10 zeigt die relevanten Teile eines Arbeitssystems und ihr Zusammenwirken.

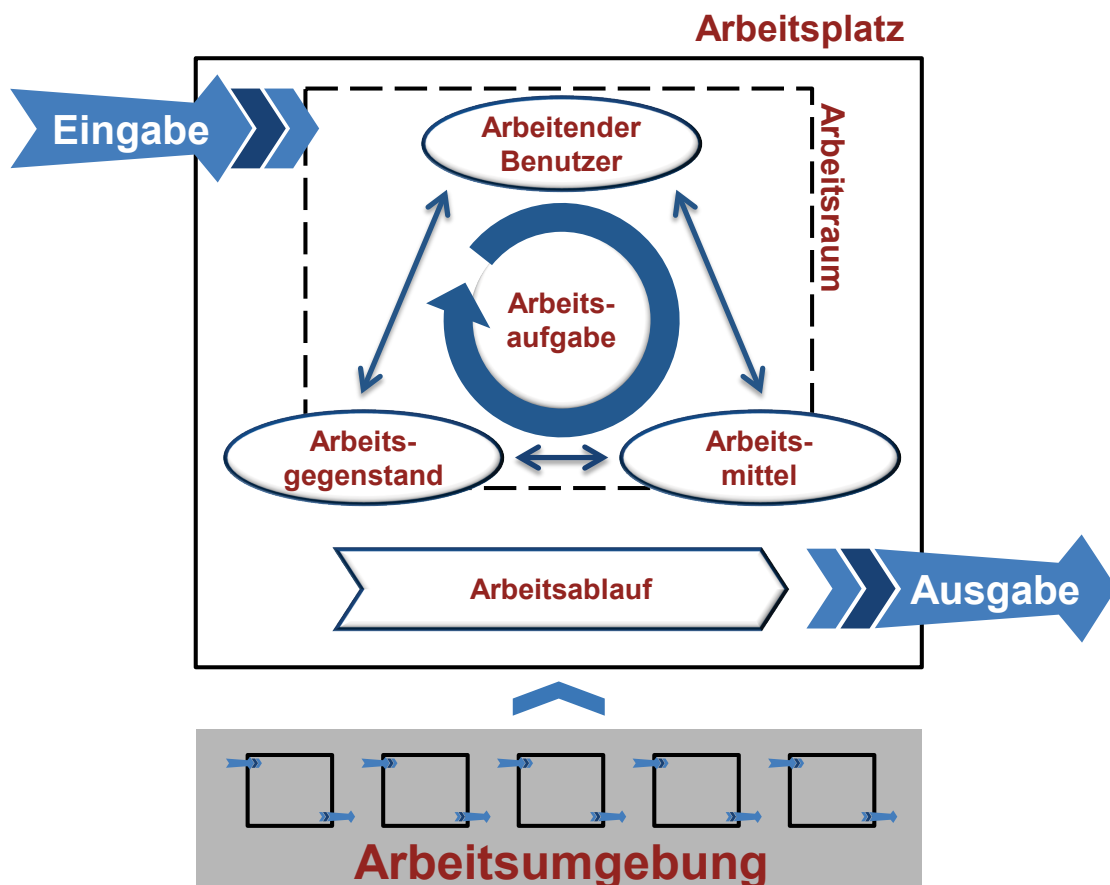


Abbildung 10: Einflüsse im Arbeitssystem

Der Benutzer im Arbeitssystem erfüllt eine oder mehrere Arbeitsaufgaben, in denen er direkt oder über Arbeitsmittel auf Arbeitsgegenstände einwirkt. Die räumliche und zeitliche Abfolge dieses Zusammenwirkens am Arbeitsplatz ist der Arbeitsablauf. Innerhalb des Arbeitsplatzes ist dem Benutzer ein bestimmter Bereich, sein Arbeitsraum, zugewiesen, den er sich mit anderen Benutzern, Arbeitsmitteln und Arbeitsgegenständen teilen kann.

Auf den Benutzer wirken die Arbeitsumgebung und die Arbeitsbelastung ein. Die Arbeitsumgebung beschreibt die „physikalische, chemische, biologische, organisatorische, soziale und kulturelle Faktoren, die einen Arbeitenden/Benutzer umgeben“. Die Arbeitsbelastung ist die „Gesamtheit der äußeren Bedingungen und Anforderungen im

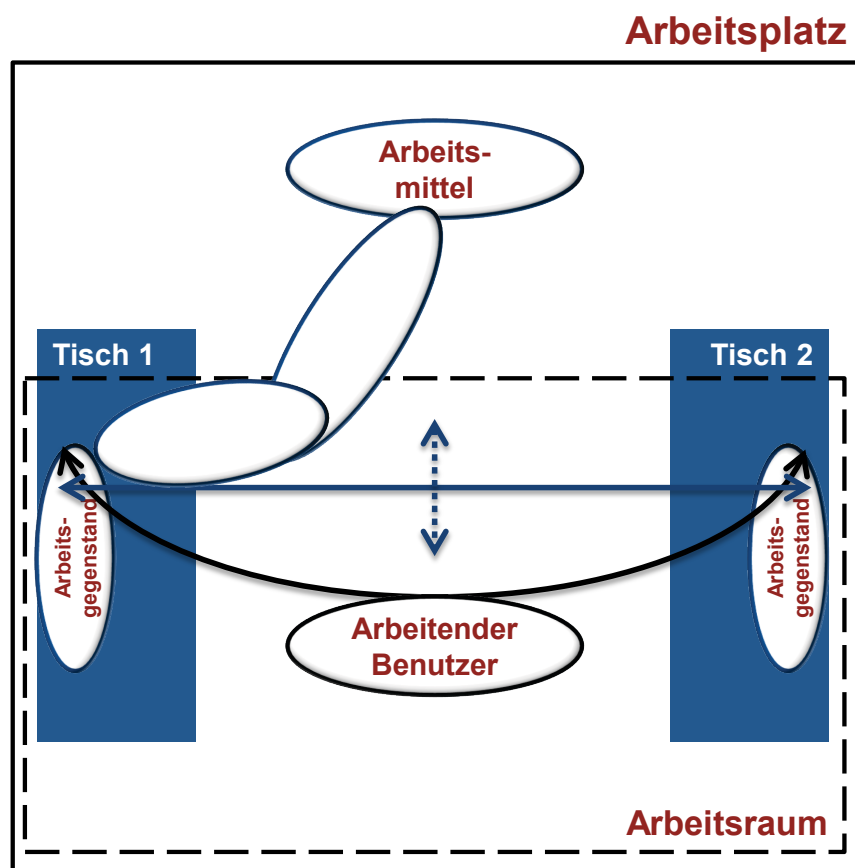
Arbeitssystem, die auf den physiologischen und/oder psychologischen Zustand einer Person einwirken“ [30].

## 4.1 Arbeitssystem des Demonstrators im Projekt EsIMiP

Das Projekt EsIMiP, siehe Kapitel 1.4.1, hat sich mit einem möglichen Arbeitssystem beschäftigt, bei dem der Benutzer bei der Durchführung seiner Arbeitsaufgabe von einem kollaborierenden Roboter (Arbeitsmittel) unterstützt wird. Die Wahl und Gestaltung dieses Arbeitssystems wurde von den Projektpartnern gemeinsam entwickelt.

Das Arbeitssystem musste dafür geeignet sein zu demonstrieren, dass das Ziel des Projekts EsIMiP erreicht wird. Ziel war es, die Prädiktion von menschlichem Bewegungsverhalten und die Erkennung des gesamten menschlichen Körpers zu kombinieren, um die Trajektorie des Roboters erkennbar zu optimieren. Aus diesem Grund wurde als Demonstrationsarbeitsplatz ein Arbeitssystem gewählt, in dem Mensch und Roboter einen großen gemeinsamen Arbeitsraum haben. Durch den gewählten Arbeitsablauf mussten Mensch und Roboter häufig interagieren.

Abbildung 11 zeigt den räumlichen Aufbau der Komponenten des für das Projekt verwendeten Arbeitssystems. In diesem speziellen Fall sollte die Kollaboration von Mensch und Roboter demonstriert werden. Dazu musste der Arbeitsraum des Benutzers sowohl einen Arbeitsgegenstand, als auch das Arbeitsmittel, den industriellen Roboter selbst, beinhalten.



**Beobachter**

Abbildung 11: Aufbau des Demonstrations-Arbeitsplatzes

In dem konkreten, im Projekt demonstrierten Fall überschneiden sich die Arbeitsräume von Roboter und Mensch. Der Arm des Roboters muss zur Erfüllung der Arbeitsaufgabe in den Arbeitsraum des Benutzers hereinragen. Eine direkte Kollaboration, bei der Mensch und Roboter sich berühren, wurde im Projekt ausgeschlossen. Deshalb wurden für die Arbeitsaufgabe des Benutzers weitere Arbeitsmittel auf zwei Arbeitsstationen (Tische) im Arbeitsraum bereitgestellt. Der Benutzer hatte die Arbeitsaufgabe, an den Tischen Arbeitsgegenstände zu kontrollieren und nachzubessern (schwarz dargestellter Laufweg in Abbildung 11). Der Roboter hatte die Arbeitsaufgabe, nicht in Bearbeitung befindliche Arbeitsgegenstände von einem dafür vorgesehenen Platz eines Tisches zum jeweils anderen zu befördern (blau dargestellter Laufweg). Der Arbeitsablauf war so gestaltet, dass die Arbeitswege von Benutzer und Roboter sich möglichst oft kreuzten, um die Interaktionsfähigkeit des Roboters, das Ausweichen vor Menschen, zu demonstrieren (blauer, gepunkteter Doppelpfeil). Der Demonstrationsarbeitsplatz wurde in einem eigenen, dafür vorgesehenen Raum untergebracht, so dass eine zusätzliche Belastung des Benutzers durch die Arbeitsumgebung reduziert wurde. Damit wurde die Arbeitsbelastung vornehmlich durch die Interaktion mit dem Roboter ausgelöst.

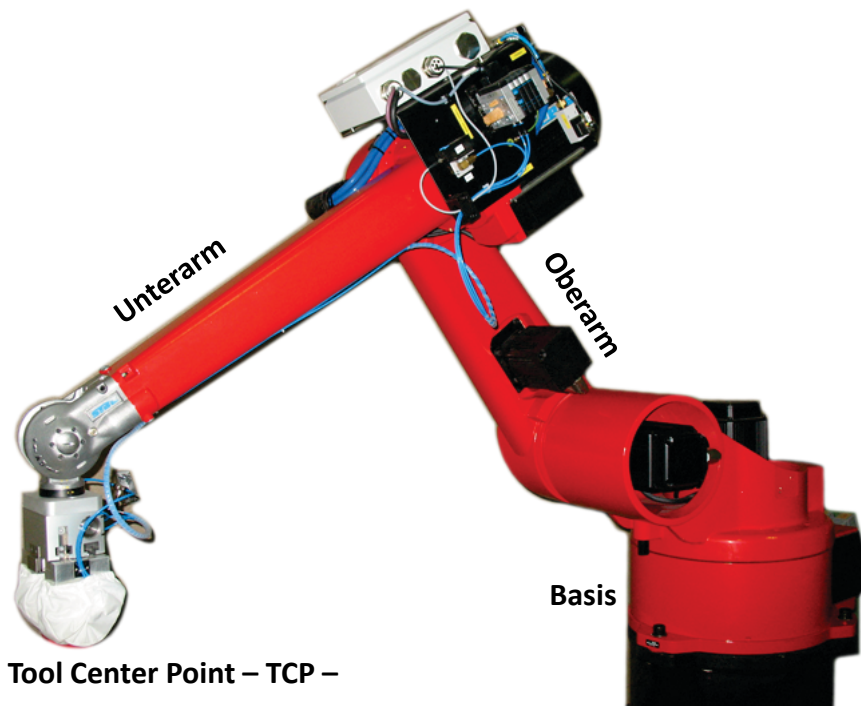
Als Ausgaben des Arbeitssystems wurde dem Benutzer und Begutachtern des Projekts die durch die Sensoren erfasste Umgebung visualisiert. Dies war zum einen das Ergebnis der Menscherfassung durch die prozesstechnischen Sensoren und zum anderen die Ausgabe der Erfassung der freien Umgebung durch die sicherheitstechnischen Sensoren.

Das gewählte Arbeitssystem ist repräsentativ für industrielle Arbeitssysteme, in denen der Roboter größere Wege zurücklegen muss um seine Aufgabe zu erfüllen und dabei auf die mögliche Anwesenheit von Personen in seinem Arbeitsraum Rücksicht nehmen muss.

Da die in der vorliegenden Arbeit entwickelte Sensorik im gesamten Projekt noch nicht in sicherer Technik ausgeführt war, wurde die Robotergeschwindigkeit im praktischen Versuch auf 250 mm/s begrenzt. Ein zusätzlicher, zweiter Benutzer stand außerhalb des Arbeitsraums und überwachte die Roboterbewegung. Hierzu musste er einen Zustimmungstaster gedrückt halten, um den Betrieb des Roboters freizugeben. Diese Vorgaben basieren auf Anhang I, Nr. 1.2.5 der MRL (siehe Kapitel 2.2.1) und sind konkretisiert in der harmonisierten Norm EN ISO 10218-1:2011 „Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter“ (siehe Kapitel 3.2.2.2).

## 4.2 Arbeitsmittel

Im Projekt EsIMiP wurde für den Demonstrationsarbeitsplatz ein Reis RV-20-16 genutzt. Der aktuelle Demonstrator, der in der vorliegenden Arbeit entstanden ist, ist im IFA an einem Reis RV-30-16 installiert (siehe Kapitel 6.2.1). Ergebnisse aus der vorliegenden Arbeit zur Installation, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten, Schutzeinrichtung an dem RV-30-16 wurden im Rahmen der Erstellung des Demonstrationsarbeitsplatzes des Projekts EsIMiP an den hierfür eingesetzten kleineren Roboter RV-20-16 übertragen. Abbildung 12 zeigt den im IFA eingesetzten Reis RV-30-16 vor der Montage der Schutzeinrichtung.



**Abbildung 12: Reis RV-30-16 mit angebautem pneumatischen Greifer**

Auf den Steuerungen beider Roboter ist die gleiche Software von Reis Robotics installiert, die sich lediglich hinsichtlich ihrer Versionsnummer unterscheidet. Zusätzliche Funktionen, die basierend auf in dieser Arbeit ermittelte Anforderungen hin durch Reis Robotics in der Robotersteuerung implementiert wurden (siehe Kapitel 7.2.2.1), sind nur am im Projekt EsIMiP eingesetzten RV-20-16 verfügbar. Sie wurden dort zum Abschluss des Projekts EsIMiP durch die in dieser Arbeit entwickelten Sicherheitsfunktionen genutzt.

### 4.3 Arbeitsgegenstand

Die Arbeitsgegenstände wurden durch kleine Klötze aus Styrodur simuliert, die durch den Roboter über einen Saugnapf gehalten wurden. Hierdurch wurde sichergestellt, dass der Benutzer, im Falle eines Energieausfalls beim Demonstrator, nicht durch herabfallende Arbeitsgegenstände gefährdet werden konnte. Auf einen sicheren Greifer, dessen Konzeption nicht Teil des Projektes war, konnte deshalb verzichtet werden. Die Bearbeitung der Arbeitsgegenstände durch den Benutzer wurde lediglich simuliert, weshalb diese nach einem Bearbeitungsvorgang im Rahmen der Arbeitsaufgabe wieder als neue Eingabe bereitgestellt werden konnten. Die Arbeitsgegenstände wurden damit für diese Demonstration „im Kreis gefahren“. Eine Zuführung neuer Arbeitsmittel in das Arbeitssystem war somit nicht nötig.

## 5 Übersicht über kollaborierende Roboter

Die Anforderungen an Arbeitsplätze mit Robotern unterliegen verschiedensten Einflüssen. So spielen unter anderem,

- die ergonomische Gestaltung,
- Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen,
- Effektivität,
- Umweltaspekte und nicht zuletzt auch
- die Möglichkeit der Amortisation

eine Rolle. Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit der Erfüllung der Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen und hier speziell mit der Personenerfassung im Arbeitsraum.

Anforderungen an die Sicherheit und den Gesundheitsschutz beim Inverkehrbringen und dem Betrieb von Roboterarbeitsplätzen sind vom Gesetzgeber vorgegeben, der seine Schutzziele regelmäßig am Stand der Technik ausrichtet. Davon zu unterscheiden ist der Stand von Wissenschaft und Technik, der im Produkthaftungsrecht zu Grunde gelegt wird. Dieser ist nicht zu verwechseln mit dem sogenannten Stand von Wissenschaft und Forschung, dem Stadium, in dem sich der in dieser Arbeit behandelte Demonstrator befindet. (siehe Kapitel 2)

In diesem Kapitel wird ein Überblick über Systeme aus den drei genannten Bereichen in Bezug auf Personenerfassungssysteme gegeben, die zusammen mit industriellen Robotern im Einsatz sind bzw. in der aktuellen Forschung für diesen Einsatz erprobt werden. Dabei werden die Vor- und Nachteile dieser vorgestellten Lösungen betrachtet.

Die Erkenntnisse aus den vorgestellten Lösungen werden in Kapitel 6 aufgegriffen. In diesem werden verschiedene theoretische Lösungsmöglichkeiten in Form von Thesen aufgestellt, um eine möglichst effektive Lösung für das spezifische, im Projekt gestellte Problem zu finden.

### 5.1 Stand der Technik in der Robotik

Allgemeine sicherheitstechnische Anforderungen an Roboter finden sich in den Rechtsvorschriften (siehe Kapitel 3.1). Konkrete technische Anforderungen finden sich in den harmonisierten Fachnormen für Roboter (siehe Kapitel 3.2). Diese Normen gelten als allgemeine anerkannte Regeln der Technik (siehe Kapitel 2.4.5.1). Zum Zeitpunkt ihrer Veröffentlichung beschreiben sie grundsätzlich den Stand der Technik (siehe Kapitel 2.4.5.2) der sich danach aber weiterentwickeln kann.

Diese Forderung nach der Einhaltung vom Stand der Technik wird in der Praxis von verschiedenen Robotersystemen erfüllt.

#### 5.1.1 Sicher begrenzter Arbeitsraum

Der Arbeitsraum eines industriellen Roboters kann mechanisch durch den Einsatz von Nocken begrenzt werden. Dieses System wurde in 2002 von Adams wie folgt erläutert:

*„Um achsspezifische Schutzzonen zu realisieren, beschränken bei konventioneller Technik Nockenbahnen an den Roboterachsen deren Bewegungsfreiheit. Sie betätigen bei einer Bereichsüberschreitung einen mechanischen Nockenschalter und bewirken so eine Abschaltung des Roboters. Auf Grund der Baugröße ist das Anbringen von Nockenbahnen jedoch nicht an jeder beliebigen Roboterachse möglich.“ [114]*

Ein Roboter kann mit diesen Nocken sicher daran gehindert werden sich zu einer bestimmten Seite über einen festgelegten Achswinkel hinaus zu drehen. Auch Aufbauten auf dem Roboter wie zum Beispiel das in dieser Arbeit entwickelte Sensorsystem, die beim

Einknicken einer Achse über einen bestimmten Winkel hinaus beschädigt würden, können so geschützt werden. Zusätzlich bieten diese Nocken einen sicheren Endanschlag, der den Roboter vor sich selbst schützt.

Ein wichtiger Schritt für den Einsatz von Robotern im kollaborierenden Betrieb war die Einführung des ESALAN Safety Controllers in 1999 „mit achsspezifischen und kartesischen Überwachungsfunktionen sicherheitsrelevanter Geschwindigkeits- und Positionsgrenzwerte“ [113]. Das Design und die Funktionalität waren bereits 1997 durch das Berufsgenossenschaftliche Institut für Arbeitsschutz (heute IFA) im Rahmen einer Baumusterprüfung bestätigt worden. [7] Dieser Controller erlaubte erstmals die sichere steuerungstechnische Auswertung der Achsstellungen. Hierfür wurden Hard- und Software entsprechend der damals nach MRL harmonisierten Norm EN 954-1 [54] ausgeführt.

Zusätzlich zur elektronischen Abbildung der mechanischen Funktionalität erlaubte die elektronische Verarbeitung der Informationen auch eine kartesische Überwachung von Bereichen, bei deren Betreten oder Verlassen der Roboter sicher stillgesetzt wird. Erst durch den Einsatz eines solchen sicheren Controllers ist ein kollaborierender Betrieb möglich, da hiermit sowohl die Drehgeschwindigkeit der einzelnen Achsen, als auch die kartesische Geschwindigkeit und Position des Endpunkts des Roboters sicher überwacht werden können. (siehe hierzu auch [114])

### 5.1.2 Schutzeinrichtungen

Die MRL unterscheidet in Anhang I, Nr. 1.3.8 zwischen verschiedenen, je nach Einsatzfall möglichen, Schutzeinrichtungen:

- Trennende Schutzeinrichtungen
  - feststehende
  - bewegliche
- nicht trennende Schutzeinrichtungen

Nach der BG-Information zu Industrierobotern - BGI 5123 - kommen bei Robotern als feststehende trennende Schutzeinrichtungen Umzäunungen und Kabinen zum Einsatz. Schutztüren, Klappen und Schutzfenster werden als beweglich trennende Schutzeinrichtungen benutzt. Als nicht trennende Schutzeinrichtungen sind Lichtvorhänge, Scanner, Schalmatten, Schaltplatten und Zwei-Hand-Schaltungen gebräuchlich. [140]

Während trennende Schutzeinrichtungen immer starre Bereiche abgrenzen, können nicht trennende Schutzeinrichtungen teilweise parametrisiert werden, um je nach Anforderung unterschiedliche Bereiche abzudecken. Zu diesen flexiblen Schutzeinrichtungen gehören Ultraschallsensoren, Laserscanner und 3D Kameras zur Raumüberwachung. Seit 1996 existieren sichere Ultraschallsensoren. [7] Der erste Laserscanner wurde 1998 für den Einsatz als Schutzeinrichtung zertifiziert. [7] Als 3D Kamera ist das SafetyEye der Firma Pilz GmbH seit 2006 auf dem Markt erhältlich. Diese flexiblen Schutzeinrichtungen müssen mit entsprechenden Softwarenocken des Roboters kombiniert werden, die das dynamische Aktivieren und Deaktivieren von Schutzbereichen unterstützen. (siehe Kapitel 5.1.1)

### 5.1.3 Handgeführte Roboter

Roboter wurden ursprünglich über das Eingeben von einzelnen Achswinkeln bzw. später auch kartesischen Koordinaten in eine Programmoberfläche programmiert. Hierbei musste der Bediener einen sicheren Abstand zum Roboter halten. Mit Einführung einer sicher überwachten Geschwindigkeit (siehe Kapitel 3.2.2.2 und 5.1.1) konnte sich der Bediener beim Programmieren auch in den Arbeitsraum des Roboters begeben.

Neuere Technologien erlauben eine Kollaboration, bei der der Mensch den Roboter „an die Hand“ nimmt und ihm den gewünschten Bewegungsablauf einlernt. Ermöglicht wurde dies durch den Einsatz von 6D-Mäusen. Eine 6D-Maus erlaubt es durch drücken und ziehen in drei Dimensionen sowie das kippen und drehen in weiteren drei Dimensionen den Endeffektor des Roboters zu positionieren. Dieses Eingabegerät konnte zunächst nur am



Programmierhandgerät in sicherer Entfernung vom Roboter verwendet werden. Zur heute üblichen Verwendung am Roboter selbst wurde die Steuerung des Roboters sicherheitstechnisch ertüchtigt. Die erste Kombination von 6D-Maus und sicherer Steuerung (siehe Kapitel 5.1.1) wurde von Reis Robotics in der Steuerung „Robotstar V“ umgesetzt, wie Som in 2000 berichtete. [116]

Eine spätere Generation handgeführter Roboter begann mit dem vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt entwickelten Leichtarmroboter [99] [108]. Dieser von Kuka gebaute Roboter ist der mittlerweile in seiner vierten Generation auf dem Markt erhältlich. Er ist mit internen Sensoren versehen, die die Krafteinwirkung auf jede Achse messen, so dass die Steuerung den Roboter entsprechend der äußeren, durch den Menschen aufgebracht, Kräfte bewegen kann. Die zum Zeitpunkt dieser Arbeit aktuelle Weiterentwicklung des Roboters ist der LWR iiwa [25]. Für eine direkte Mensch Roboter Kollaboration ist dieser Roboter allerdings zurzeit noch nicht zugelassen [26].

### 5.1.4 Einzelplatzlösungen

Für den Einsatz im kollaborierenden Arbeitsraum in der Industrie sind in Deutschland durch die Prüf- und Zertifizierungsstelle Maschinen und Fertigungsautomation des Fachbereichs Holz und Metall der Berufsgenossenschaft Holz und Metall – BGHM – bereits drei Robotersysteme zertifiziert worden [129]. Diese Zertifikate gelten nicht für die Roboter selbst, sondern jeweils nur für das gesamte Arbeitssystem. Die Roboter Automated Production Assistant – APAS – der Firma Robert Bosch GmbH - BOSCH - [130] und der KR 5 SI (vorher KR 3 SI) der Firma MRK-Systeme GmbH [126] sind mit einer weichen berührungsempfindlichen Hülle umgeben. Hierdurch können Sie den Kontakt mit Personen und Hindernissen in der Umgebung sicher wahrnehmen.

Diese „Hülle“ enthält beim KR 5 SI sowohl taktile Sensoren (siehe Kapitel 5.2.2.1), als auch kapazitive Sensoren (siehe Kapitel 5.2.2.5). Hierbei sind allerdings nur die taktilen Sensoren in der nach EN ISO 10218-1 geforderten Sicherheit von PL<sub>r</sub> „d“ ausgeführt. Diese kommen dann zum Einsatz, wenn die unsichereren kapazitiven Sensoren (PL „a“) nicht auslösen. Heiligensetzer veröffentlicht seit 2002 regelmäßig Fortschritte der eingesetzten Technologie [88] [89] [91].

Sowohl Bosch, als auch MRK haben sich beim Auslegen und Messen der Kräfte ihres Systems an den Vorschlägen des IFA [136] orientiert, die zurzeit in die ISO/TS 15066 [68] überführt werden. Bosch wurde in seinem Forschungsvorhaben vom IFA begleitet [128].

Nach Heiligensetzer muss beim Einsatz eines kollaborierenden Roboters immer eine individuelle „Risikoanalyse“ durchgeführt werden. [127] Zur Risikobeurteilung siehe Kapitel 3.1.

Einen anderen Weg geht die TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH. Der dritte von der BGHM zertifizierte Roboter, Biorob-X5, ist bei ca. 1 kg Armmasse in seiner Leistung mit 0,5 kg Handlingmasse und maximal 30 N Krafterzeugung so weit in seiner Kraft begrenzt, dass ein Verletzen des Menschen im geprüfem Arbeitssystem verhindert sein soll. [131]

Als weitere verfügbare Lösung für kollaborierende Roboter wird der UR5 und UR10 von Universal Robots angeboten. [118] Diese Roboter haben eine interne Kraftbegrenzung, deren Wert sich aber noch an der zurückgezogenen Norm EN ISO 10218-1:2006 [56] orientiert. Die hier angegebenen Grenzwerte von 150 N statischer Kraft und 80 W dynamischer Leistung sind in der aktuellen Norm [57] nicht mehr enthalten. Diese verlangt stattdessen differenziertere Werte für einzelne Körperteile (z.B. nach dem Entwurf der ISO/TS 15066 [68]), die im Rahmen einer Risikobeurteilung ermittelt werden müssen. [117]

Ein erst seit Mitte September 2013 auf dem europäischen Markt verfügbarer Roboter ist „Baxter“ von der Firma Rethink Robotics [120]. Dieser ist ebenfalls nur zur EN ISO 10218-1:2006 kompatibel [119]. Er ist mit zusätzlichen Sensoren ausgestattet, die ihn bei Erkennen einer Annäherung langsamer werden lassen sollen.

## 5.2 Stand von Wissenschaft und Technik in der Robotik

Der Stand von Wissenschaft und Technik, beschrieben in Kapitel 2.4.5.3, wird nicht immer nur, wie im Handbuch der Rechtsförmlichkeit definiert, durch *„neueste wissenschaftlich vertretbare Erkenntnisse“* [52] gebildet. Teilweise existieren Lösungsansätze in der Wissenschaft für einen langen Zeitraum, bevor eine Möglichkeit gefunden wird, diese Lösungen in der Praxis umzusetzen. Die lange Entwicklung im Bereich kollaborierender Roboter ist hierfür ein Beispiel.

Projekte zum Thema kollaborierende Roboter sind seit Anfang der 80er Jahre bekannt. Eines der ersten Projekte in diesem Themenbereich wurde 1981 von Wyzdga in Polen durchgeführt [73]. In diesem Projekt wurden aktive Infrarotsensoren auf dem Roboterarm angebracht, um Gegenstände und Menschen in der Nähe des Roboters wahrzunehmen [81]. Graham und Meagher konnten bereits 1985 eine Übersicht über verschiedene Projekte im Zeitraum zwischen 1982 und 1983 zum Thema kollaborierende Roboter erstellen. Sie leiten ihre Arbeit mit einem Hinweis auf „drei bis vier gemeldete Unfälle mit Todesfolge unter Beteiligung von Robotern“ ein [75]. Der in Kapitel 1.3.2 genannte Unfall aus 1979 wurde hierbei nicht berücksichtigt.

Um den Menschen vor dem kollaborierenden Roboter zu schützen, muss die Position von Roboter und Mensch im Arbeitssystem bekannt sein. Die Position des Roboters wird bereits im nicht kollaborierenden Betrieb durch die Prozesssteuerung mittels interner Sensoren ausreichend genau erfasst. Für den kollaborierenden Betrieb fehlt hier allerdings teilweise deren Einbindung in die Sicherheitssteuerung (z.B. Einsatz des ESALAN Systems [113]).

Für eine exakte Bestimmung der Position des Menschen gibt es im nicht kollaborierenden Bereich keinen Grund. Eine simple Anwesenheitskontrolle (z.B. durch ein Lichtgitter) sowie das Teachen unter Verwendung eines Zustimmungstasters (siehe Kapitel 3.2.2.2) ist hier bereits ausreichend. Aus diesem Grund muss für eine sichere Kollaboration diese fehlende Technologie entwickelt werden. Der nachfolgend beschriebene Stand der Wissenschaft fokussiert sich deshalb auf die Bestimmung der Position des Menschen im Arbeitsraum des Roboters.

### 5.2.1 Untersuchung und Vergleich von eingesetzten Sensorsysteme an kollaborierenden Robotern

Für die Bestimmung der Position des Menschen im Arbeitsraum des Roboters im kollaborierenden Betrieb sind spezielle Sensorsysteme notwendig. Projekte zum Thema kollaborierende Roboter wurden bereits mit unterschiedlichen Sensortypen durchgeführt. Hierunter waren u.a.:

- Optoelektronische Sensoren (Kameras) Kapitel 5.2.2.2
  - 2D (auch Einsatz mehrerer Sensoren aus unterschiedlichem Winkel)
    - Sichtbares Spektrum
    - Infrarot
  - 3D
    - Time of flight
    - Stereo Vision
    - Triangulation
- Optoelektronische Sensoren (Laserscanner) Kapitel 5.2.2.3
  - 2D
  - 3D
- Ultraschallsensoren Kapitel 5.2.2.4
- Taktile / Momenten-Sensoren Kapitel 5.2.2.1
- Kapazitive Sensoren Kapitel 5.2.2.5

- Radar (Mikrowellen)

Kapitel 5.2.2.6

Sensortypen, wie zum Beispiel RFID, die nur dann funktionieren, wenn der Bediener spezielle Marker mit sich trägt, wurden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Marker müssen vom Bedienpersonal aktiv eingesetzt werden und wirken nicht zwangsläufig. Bedienpersonal ohne Marker wird nicht geschützt. Der Einsatz von Markern ist eine organisatorische Maßnahmen nach MRL (siehe Kapitel 2.2.1). Diese ist nachrangig zum Einsatz von der in dieser Arbeit entwickelten Sicherheitseinrichtung. Aus diesem Grund wurden Marker in den Thesen (siehe Kapitel 1.5) für diese Arbeit als nicht zielführend deklariert.

Die hier genannten Arbeiten zu Sensorsystemen lassen sich zusätzlich in allozentrische / egozentrische Platzierung der Sensoren und in aktive / passive Messung durch die Sensorsysteme unterteilen. Auf diese Aspekte wird in den folgenden Unterkapiteln eingegangen.

### 5.2.1.1 Platzierung der Sensoren im Arbeitsplatz

Unabhängig von den genutzten Sensortypen lassen sich die meisten Sensoren fest im Arbeitsplatz – allozentrisch – (siehe Abbildung 13) oder am Arbeitsmittel selbst (Roboter) – egozentrisch – (siehe Abbildung 14) platzieren. Diese allozentrische und egozentrische Anbringung wurden bereits 2010 im Rahmen eines Vortrags am ASER Institut definiert und dargestellt [155].

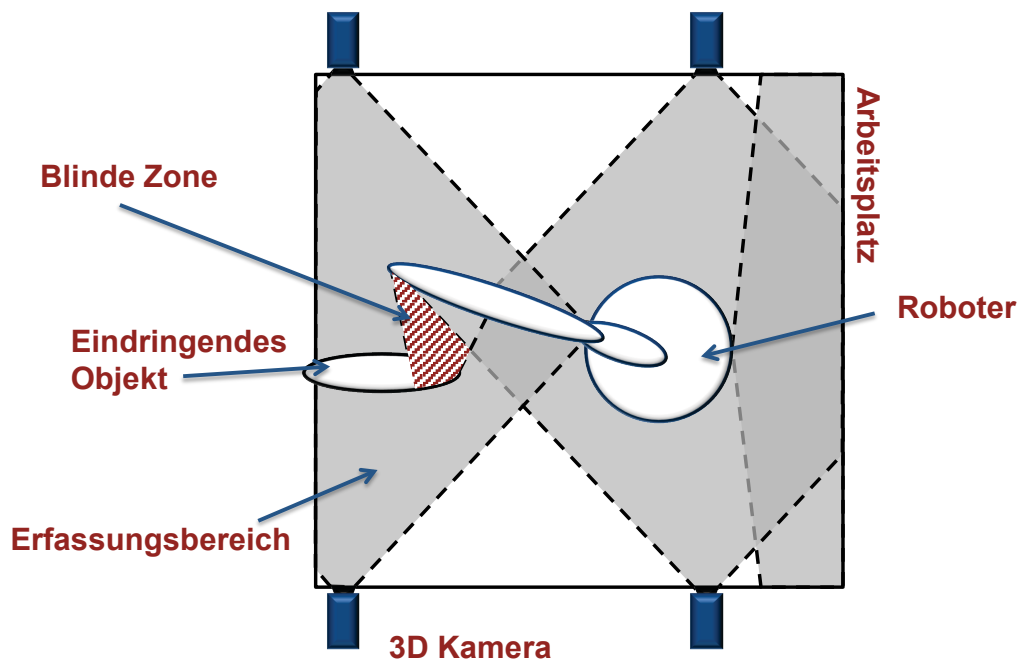
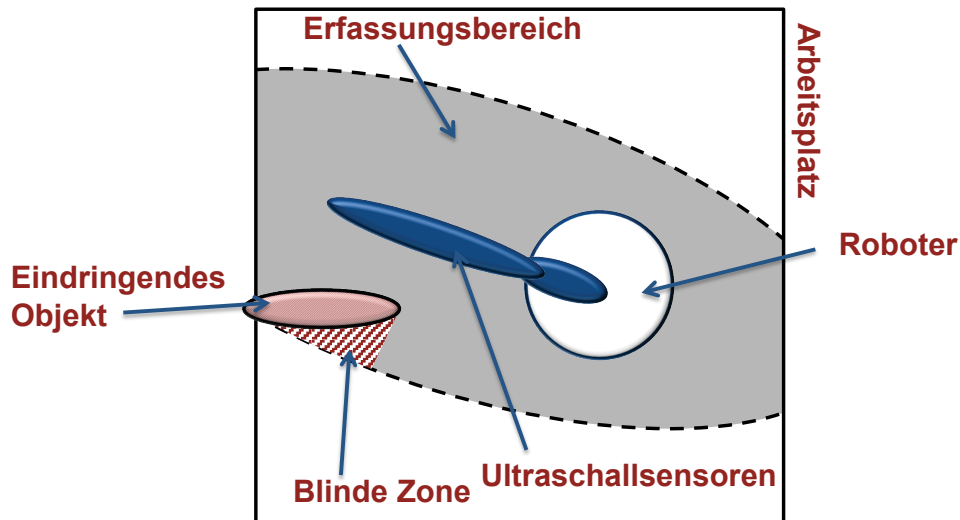


Abbildung 13: Allozentrische Anbringung von 3D Kameras im Arbeitsplatz  
Quelle: Eigener Vortrag, 2010 [155]



**Abbildung 14: Egozentrische Anbringung von Ultraschallsensoren am Arbeitsmittel (Roboter)**  
 Quelle: Eigener Vortrag, 2010 [155]

Mit Ausnahme der kapazitiven Sensoren wird eine Durchdringung von Objekten durch die in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Sensoren nicht erreicht. Grundsätzlich könnten auch andere durchdringende Sensortechniken eingesetzt werden, ohne dabei Marker zu verwenden. Die Messung mittels Funkwellen [12] ist in der Ortsauflösung für eine enge Kollaboration allerdings zu ungenau. Ein theoretisch denkbarer Einsatz von Röntgenstrahlen könnte zwar zu genaueren Ergebnissen führen, verbietet sich aber im Rahmen der Kollaboration aus Gründen des Gesundheitsschutzes.

Bei fehlender Durchdringung der eingesetzten Sensoren kommt es hinter den erfassten Objekten zu „blinden Zonen“, in denen keine Personen oder sonstige Hindernisse erkannt werden. Ein Verfahren des Roboters in diese „blinde Zone“ hinein ist deshalb aus sicherheitstechnischen Gründen nicht zulässig. Dieses Phänomen wird von Henrich regelmäßig (physikalisch nicht korrekt) als „2½D“ Sicht beschrieben [103][107][110]. Durch den Einsatz mehrerer, sich in ihrem Erfassungsbereich überlappender, Sensoren ist eine Reduzierung der „Blinden Zonen“ möglich. Allerdings kommt es auch beim Einsatz zahlreicher allozentrisch platzierter Sensoren immer noch zu „blinden Zonen“. Wie in Abbildung 13 gezeigt, liegen diese auch zwischen dem Roboter und dem zu schützenden Objekt, da beide die Sicht einzelner Sensoren blockieren.

Werden Sensoren, wie in Abbildung 14 gezeigt, egozentrisch platziert, endet ihr Erfassungsbereich stets an der dem Sensor zugewandten äußeren Fläche der erfassten Objekte. Die „blinden Zonen“ hinter den Objekten verhindern eine Gesamtübersicht über den Arbeitsraum. Die Tiefe des Objekts, sowie weitere dahinter liegende Objekte, werden deshalb nicht erkannt. Dies kann, wie auch bei allozentrischer Platzierung der Sensoren durch verschiedene Blickwinkel, von verschiedenen Teilen des Roboters aus teilweise kompensiert werden. Die Möglichkeit verschiedener Blickwinkel ist aber gegenüber der allozentrischen Positionierung stärker eingeschränkt. Der wichtige Kollisionsbereich zwischen Roboter und nächstem Objekt wird hingegen vollständig erfasst.

Eine vollständige Erfassung der Objekte im Arbeitsraum ist sowohl allozentrisch, als auch egozentrisch mit nicht durchdringender Sensortechnik nicht möglich. Die Nachteile einer egozentrischen Platzierung sind allerdings sicherheitstechnisch nicht relevant. Das Ziel dieser Arbeit ist die sichere Reduzierung der Geschwindigkeit in Bezug auf die Annäherung an Objekten im Arbeitsraum. Hierzu ist lediglich eine sichere Erfassung des Abstandes vom Roboter zu Objekten im Arbeitsraum notwendig. Vollständige Informationen über den Arbeitsraum werden nicht benötigt. Das in dieser Arbeit dargestellte, sicherheitsrelevante Sensorsystem zur Abstandsüberwachung beruht daher auf egozentrisch platzierten Sensoren.

Im Projekt EsIMiP wurde, neben dem in dieser Arbeit behandelten sicheren Sensorsystem für die Geschwindigkeitskontrolle, auch eine nicht sichere Pfadplanung entwickelt. Hierfür

waren Informationen über möglichst große Bereiche des Arbeitsraums, mit Abschätzung der Inhalte „blinder Zonen“, erforderlich. Dieses Sensorsystem basierte auf mehreren allozentrisch platzierten Sensoren bestehend aus 2D und 3D Kameras. [162]

### 5.2.1.2 Aktive und passive Sensorsysteme

Die in Kapitel 5.2.1 aufgezählten Sensortypen in den Sensorsystemen können nach aktiv und passiv unterschieden werden. Aktiv bedeutet in diesem Fall, dass die Sensoren selber ein Signal (Licht, Schall, usw.) aussenden, um dann aus der Reflektion in der Umgebung auf die Beschaffenheit der Umgebung zu schließen. Passive Sensoren senden dagegen kein Signal aus, sondern empfangen nur die durch andere Quellen ausgesendeten Signale.

Aktiv werden im Bereich kollaborierender Roboter eingesetzt:

- Optoelektronische Sensoren (Kameras)
  - 2D
    - Infrarot
- Optoelektronische Sensoren (Kameras)
  - 3D
    - Time of flight
    - Triangulation
- Optoelektronische Sensoren (Laserscanner)
  - 2D
  - 3D
- Ultraschallsensoren
- Kapazitive Sensoren
- Radar (Mikrowellen)

Passiv werden im Bereich kollaborierender Roboter eingesetzt:

- Optoelektronische Sensoren (Kameras)
  - 2D
    - Sichtbares Spektrum
  - 3D
    - Stereo Vision
- Taktile / Momenten-Sensoren

Aktive Sensoren sind wenig abhängig von der Umgebung. Sie werden allerdings dann gestört, wenn ein gleiches Signal wie das, das sie aussenden, bereits in der Umgebung vorhanden ist. Dies bedeutet, dass aktive Sensoren, die gleiche oder ausreichend ähnliche Signale zur Messung aussenden, sich gegenseitig „blenden“ können. Diesem Phänomen kann entweder durch geschickte Anordnung der Sensoren, so dass diese sich gegenseitig nicht „sehen“ [110], oder durch ein wechselseitiges Abschalten der Sensoren [90] begegnet werden. Eine weitere Möglichkeit zum Einsatz mehrerer aktiver Sensoren in einem System ist eine Sensoranordnung, bei der die gegenseitige Störung nur zu einer geringen Einschränkung, aber nicht zum Verlust der Funktion führt. (siehe Kapitel 6.2.2)

Passive Sensoren sind in ihrem Einsatz davon abhängig, dass das zu messende Signal in der Umgebung in ausreichender Stärke vorhanden ist. Systeme mit Kameras werden zum Beispiel von schlechter oder stark wechselnder Beleuchtung am Arbeitsplatz negativ beeinflusst (z.B. notwendige Kompensation des Schattenwurfs [144]). Der Einsatz mehrerer passiver Sensoren in einem Arbeitsplatz ist dagegen unkritisch, da diese sich nicht gegenseitig in ihrer Messung beeinflussen.

## 5.2.2 Untersuchung und Vergleich von eingesetzten Sensortypen an kollaborierenden Robotern

Die in Kapitel 5.2.1 vorgestellten Sensorsysteme werden in diesem Kapitel auf ihre Eignung für die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung, unter der Vorgabe egozentrisch platzierter Sensoren (siehe Kapitel 5.2.1.1), untersucht. Weiterhin gilt die Einschränkung auf markerlose Sensorsysteme (siehe Kapitel 5.2.1).

### 5.2.2.1 Taktile / Momenten-Sensoren

Taktile / Momenten-Sensoren haben den Vorteil, dass sie passiv arbeiten und trotzdem in der Praxis kaum durch äußere Einflüsse gestört werden. Aufgrund ihrer Messmethode können sie den Menschen im Arbeitsraum nur dann erfassen, wenn bereits eine Berührung zwischen Mensch und Roboter vorliegt. Ihre Anbringung im Arbeitsraum ist im Wesentlichen egozentrisch am Arbeitsmittel, dem Roboter. Der Einsatz von druckempfindlichen Bodenplatten ist allerdings allozentrisch. [98] Der Detailgrad der Messung ist abhängig von der Größe der druckempfindlichen Fläche jedes Teilsensors bzw. bei Robotern, die die Momente in den Gelenken messen, auf das Teilstück des Arms beschränkt.

Die EN ISO 13855 (siehe Kapitel 3.2.4.3) fordert einen Mindestabstand von 10 cm zwischen Mensch und Roboter. Aufgrund des Wirkprinzips egozentrisch platzierter Taktile / Momenten-Sensoren kann diese Forderung nicht eingehalten werden. Somit können Taktile / Momenten-Sensoren nicht nach der EN ISO 13855 bewertet werden.

Bereits 1989 stellten Takakura et al. eine Methode vor, wie das Drehmoment in den einzelnen Gelenken des Roboters zur Erkennung von Objekten und zum Planen einer kollisionsfreien Trajektorie genutzt werden kann [78].

Die Forschung im Bereich der Momenten-Sensoren ist weit fortgeschritten und erste mit Momenten-Sensoren ausgestattete Roboter existieren bereits auf dem Markt. Die nächste Generation des KUKA Leichtarmroboters soll den Sicherheitsstandards genügen und den sicheren kollaborierenden Betrieb ermöglichen [26] (siehe Kapitel 5.1.4). Die ABB AG arbeitet im Projekt ROSETTA ebenfalls an einem ähnlichen Roboter mit integrierten Momenten-Sensoren. [14]

Ein Nachteil von taktilen / Momenten-Sensoren ist die Kollision, die zur Detektion des Menschen notwendig ist. Hierdurch können kollaborierende Roboter, die mit taktilen / Momenten-Sensoren arbeiten, nur begrenzt schnell, bzw. mit begrenzter Kraft agieren. Eine Kombination mit einem weiteren Sensorsystem erlaubt aber gegebenenfalls eine höhere Arbeitsgeschwindigkeit /-kraft außerhalb der nach EN ISO 13855 vorgeschriebenen 10 cm Zone (siehe Kapitel 3.2.4.3).

Aufgrund der fortgeschrittenen Forschung in diesem Bereich besteht im Rahmen dieser Arbeit kein Forschungsbedarf für den Einsatz dieser Sensoren. Eine Kombination des in dieser Arbeit entwickelten Sensorsystems mit einem Roboter der über taktilen / Momenten-Sensoren verfügt ist jedoch möglich.

### 5.2.2.2 Optoelektronische Sensoren (Kameras)

Kameras, sowohl in 2D, als auch in 3D Anwendung, erlauben das Erfassen vieler Daten in kurzer Zeit. Somit ist durch Kameras in allozentrischer Positionierung eine schnelle Erfassung des gesamten Arbeitsraums (mit Ausnahme der „Blinden Zonen“, siehe Kapitel 5.2.1.1) möglich. Auch wenn in der egozentrischen Platzierung die Anzahl und Größe der „blinden Flecken“ zunehmen, bietet dieser Sensortyp aber auch hier einen hohen Detailgrad an Informationen. So sind die, den Roboter umgebenden, Objekte und der, für die sichere Bewegung, zu bestimmende freie Raum sehr genau erfassbar.

In [87] demonstrieren Ebert und Henrich eine Methode, gleichzeitig aufgenommene 2D Bilder aus verschiedenen Perspektiven zu einer 3D Repräsentation des freien Raums zu kombinieren. Hierbei entstehen sogenannte „Phantomobjekte“. Diese Objekte, die nicht real vorhanden sind, entstehen durch den Vergleich der Aufnahmen mehrerer Objekte aus

verschiedenen Blickwinkeln. Um die Anzahl dieser Phantomobjekte zu reduzieren, musste von ihnen eine Methode eingesetzt werden, die diese Objekte aus dem System herausrechnet. Dies geht allerdings zu Lasten der Sicherheit, da hiernach teilweise auch belegte Räume als frei angezeigt wurden.

Das SafetyEye von PILZ [115], als einziges sicheres Kamerasystem auf dem Markt, benötigt für die sichere Auswertung des Kamerabilds aus zwei passiven 2D Kameras ca. 160 ms [111]. Dieser Wert liegt deutlich über dem in Kapitel 3.2.4.3 angestrebten Wert von 50 bis 100 ms für das Gesamtsystem. Es war somit nicht zu erwarten, dass das Auswerten multipler 2D Kameras zu einem hinreichend schnellen Ergebnis führt. Insofern wird dieser Sensor für die Arbeit nicht weiter verfolgt.

Kameras, die physikalisch direkt 3D Daten messen und deren Geschwindigkeit ausreichend schnell ist [153], sind bis heute noch nicht sicherheitstechnisch ertüchtigt. Diese Kameras arbeiten aktiv und stellen damit eine Herausforderung beim Einsatz mehrerer gleicher Sensortypen dar (siehe Kapitel 5.2.1.2). Hinzu kommt, dass auch hier wieder die Werte mehrerer Kameras kombiniert und ausgewertet werden müssen. Durch die Vielzahl an Daten, die eine 3D Kamera liefert, werden lange Zeiten für die Berechnung der Algorithmen erwartet [153]. Eine Lösung dieses Problems wäre der Einsatz einer einzelnen Kamera, die senkrecht über dem Roboterarbeitsraum angebracht ist [102] [153]. Diese Lösung hat den Nachteil gegenüber mehreren Kameras, dass Objekte und Roboter im Arbeitsraum sich häufig gegenseitig verdecken, so dass hiernach das sichere Weiterarbeiten nicht mehr möglich ist [153]. Aus diesem Grund wird auch dieser Sensortyp im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Eine Kombination von mehreren 2D Kameras und einer 3D Kamera wurde im Projekt Cognition for Technical Systems – CoTeSys – von der Technischen Universität München präsentiert [105]. Hierbei wurde ein sicherer Arbeitsplatz angestrebt, bei dem der Roboter, ähnlich dem Projekt EsMiP (siehe Kapitel 1.4.1), vorrausschauend mit dem Menschen arbeiten sollte. Der in [105] vorgestellte Arbeitsplatz zeigt, dass hierbei, im Gegensatz zum Projekt EsMiP, allerdings nur die Arme des Bedieners in den Interaktionsbereich eindringen.

Ebenfalls im Projekt CoTeSys wurde die Zusammenarbeit mehrerer Kinect-Kameras gezeigt [109]. Lenz et al. demonstrieren in dieser Arbeit die Kombination mehrerer aktiver Kameras mit überschneidendem Erfassungsbereich.

### 5.2.2.3 Optoelektronische Sensoren (Laserscanner)

Laserscanner haben den Vorteil, dass sie bereits seit 1998 im Rahmen einer sicherheitstechnischen Steuerung verwendbar sind. [7] Typische Ansprechzeiten dieser Sensoren liegen bei 60 ms bis 80 ms. [121] Die Ansprechzeit gilt für das Messen einer Ebene mit einem 2D Laserscanner. Zum Erzeugen einer 3D Punktwolke wird ein 2D Laserscanner um seine horizontale Achse gekippt. [86] Dieser Vorgang verlängert die Zeit bis zur vollständigen Erfassung des Raums um ein Vielfaches, da jede „Zeile“ der Punktwolke einzeln erfasst werden muss. Auch bei überschlägiger Betrachtung sind diese Zeiten eindeutig zu lang, um den freien Raum in ausreichender Auflösung sicher zu erfassen. Ein 3D Laserscanner wird aus diesem Grund in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet.

2D Laserscanner werden sowohl allozentrisch, als auch egozentrisch eingesetzt. Bei allozentrischer Platzierung erfasst der Laserscanner eine Ebene im Raum. Verändert sich diese gemessene Ebene, kann das steuernde Programm von der Anwesenheit eines Menschen ausgehen. Da die Ebene immer nur durch einen Teil des menschlichen Körpers, z.B. die Beine, durchdrungen wird, muss das Programm die mögliche Position des gesamten Körpers abschätzen. [97] Aufgrund der daraus resultierenden Unsicherheiten (abgebückter Oberkörper mit ausgestrecktem Arm ergibt ca. 1,50 m Unsicherheit) sind die so zu bildenden Schutzräume zu groß für eine effektive Kollaboration. Dieser Ansatz ist trotzdem geeignet um z.B. einen Sicherheitsbereich um die Basis des Roboters und den Roboterteil der unmittelbar mit der Basis verbunden ist sicher abzutasten. Lediglich die Sicherheitsbereiche

um die Teile des Roboters, die unmittelbar an der Kollaboration beteiligt sind, müssen durch andere Sensorsysteme sicher erfasst werden. (siehe Kapitel 10.4)

Bei egozentrischer Platzierung befindet sich der Laserscanner auf einem Teil des Roboterarms [85] [93] und wird mit diesem bewegt. Hierbei ändert sich der Blickwinkel, wodurch der kritische Raumbereich besser abgedeckt werden kann. Auch bei dieser Platzierung „sieht“ der Laserscanner nur eine Ebene, wodurch auch hier in der Regel größere Schutzbereiche gebildet werden müssen.

Aus diesen Gründen wird auch dieser Sensortyp im Rahmen dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

#### 5.2.2.4 Ultraschallsensoren

Sichere Ultraschallsensoren sind seit 1996 auf dem Markt verfügbar [7]. Die Messzeit eines Ultraschallsensors ist abhängig von der Geschwindigkeit des Schalls und seiner Frequenz.

Die Geschwindigkeit des Schalls liegt in 15°C bis 30°C warmer Luft bei ca. 340 *m/s* bis 350 *m/s*. Die Laufzeit der Messung einer Strecke von 60 cm liegt damit bei maximal ca. 3,5 ms in normaler Umgebungstemperatur. Geschwindigkeitsunterschiede der Schalllaufzeit können hierbei durch eine temperaturabhängige Verarbeitung der Messdaten ausgeglichen werden.

Zusätzlich zur Laufzeit des Schalls muss berücksichtigt werden, dass der Ultraschallimpuls, der zur Messung erzeugt wurde, vor der nächsten Messung in der Messumgebung ausreichend abgeklungen sein muss. Dies verhindert die Störung bei weiteren Messungen. Bei 200 kHz erfolgt eine Messung typischerweise alle 27 ms, bei 400 kHz alle 22 ms, da Schall mit höheren Frequenzen in der Umgebung schneller abklingt [19]. Zusätzlich muss die Reichweite der Sensoren berücksichtigt werden. Diese liegt bei 200 kHz bei ca. 100 cm und bei 400 kHz bei ca. 35 cm [19].

Der Ultraschallsensor liefert beim Einsatz als Sender und Empfänger maximal einen Messwert für jede zu ihm zurückkommende Reflexion des Schalls. Bei Überlagerung von Reflexionen verschiedener Objekte wird nur die erste zurückkommende Reflexion erkannt. Später ankommende Reflexionen von weiter entfernten Objekten, aber auch von Kreuzreflexionen werden ebenfalls als separates Signal empfangen. Somit kann aus der Messung mit einem einzelnen Ultraschallsensor, in Bezug auf den sicheren Abstand zu Objekten, nur bestimmt werden, wie viel Raum in Messrichtung frei von Objekten ist.

Theoretisch wäre es zwar möglich diese Sensoren allozentrisch zu platzieren, aufgrund der schwierigen Objektunterscheidung ist eine egozentrische Anbringung am Arbeitsmittel üblich. [74] [75] [76] [77] [80] [90]

Ein Ultraschallsensor, der gleichzeitig Sender und Empfänger ist, benötigt eine spezifische Zeit um nach dem Senden auszuklingen. Hierdurch ergibt sich ein Raum vor dem Sensor, in dem die exakte Distanz zu Objekten nicht bestimmt werden kann (Totzone). Objekte innerhalb dieses Bereiches werden lediglich als vorhanden erkannt. Dieser Bereich liegt bei 200 kHz bei ca. 12 cm und bei 400 kHz bei ca. 6,5 cm. [19] Der minimale Sicherheitsabstand vom Sensor zum Menschen muss deshalb größer als dieser Wert sein.

Beim Einsatz mehrerer Sensoren in einem Sensorsystem kann über Triangulation eine bessere Positionsbestimmung von Objekten erreicht werden. Allerdings müssen hierzu alle Sensoren ihre Messsignale der Reihe nach senden, inklusive Abklingzeit, was zu verlängerten Messzeiten führt. Eine unterschiedliche Kodierung der Signale ist bei Ultraschallmessungen in Festkörpern, z.B. in der Medizintechnik [15], möglich, wurde aber in Luft bisher noch nicht umgesetzt. Somit ist die Messung mit Triangulation für diese Arbeit nicht geeignet.

Eine weitere Möglichkeit, mehrere Ultraschallsensoren einzusetzen ist es, diese so anzuordnen, dass möglichst wenig Überlappung existiert. Bei jeder Messung werden dann nur so viele Sensoren als Sender genutzt, dass jeder Sensor nur sein eigenes Echo sieht. [90] Der Nachteil hierbei ist ebenfalls eine verlängerte Messdauer, bis alle Sensoren ihr



Signal gesendet und empfangen haben. Auch dieser Einsatz wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

Weiterhin ist es möglich, Ultraschallsensoren mit verschiedenen Frequenzbändern einzusetzen. In der Praxis wurden bereits Systeme getestet, die unterschiedliche Frequenzen zum Trennen der Signale verwenden. Martínez und Martínez nutzten z.B. 2003 an ihrem mobilen Roboter 50 kHz und 70 kHz Ultraschallsensoren und konnten die Signale erfolgreich unterscheiden [9]. Allerdings haben kommerziell verfügbare Sensoren Send- und Empfangsfrequenzbänder einer bestimmten Breite. Wie Abbildung 70 in Kapitel 0 zeigt, sendet ein 50 kHz Sensor auch im Bereich von 40 bis 60 kHz noch signifikante Schallwellen aus. Somit liegen für den Einsatz einer größeren Anzahl von Sensoren nicht ausreichend verschiedene Frequenzbereiche vor. Zumindest würde dies aber gestatten, unterschiedliche Achsen des Roboters mit unterschiedlichen Frequenzen zu sichern, bzw. nahe aneinander stehende, unterschiedliche Roboter mit Sensoren unterschiedlicher Frequenzen zu bestücken. Hierbei muss bei schnellen Bewegungen allerdings der Doppler-Effekt berücksichtigt und gegebenenfalls entsprechend kompensiert werden [11].

Der Nachteil von Ultraschallsensoren, nur das nächste Objekt zuverlässig zu erkennen, ist für diese Arbeit wenig relevant, da das Ziel eine Bestimmung des minimal freien Raums um den Roboter ist. Somit ist dieser Wert der kürzesten Distanz auch der sicherheitstechnisch erforderliche. Die Probleme beim Einsatz mehrerer Ultraschallsensoren können durch gleichzeitiges Auslösen aller Sensoren zwar nicht ganz kompensiert, aber für die Zwecke dieser Arbeit ausreichend reduziert werden, wie Kapitel 6.2.2 zeigt.

### 5.2.2.5 Kapazitive Sensoren

Sicherheitstechnisch erprobte kapazitive Sensoren sind bis zum Erscheinen dieser Arbeit noch nicht auf dem Markt erhältlich. Ein sicherheitstechnischer kapazitiver Sensor [123][124] wird zurzeit beim IFA geprüft [122]. Eine positive Entwicklung auf diesem Gebiet ist wahrscheinlich.

Eine Reaktionszeit dieses kapazitiven Sensors in idealer Laborumgebung, die unter 1 ms liegt, ist theoretisch möglich. Für aktuelle Anwendungen wird eine Reaktionszeit von 10 ms angestrebt, um die Störungstoleranz des Sensors zu erhöhen. Die Reichweite liegt beim Einsatz am Roboterarm bei ca. 10 cm. Die Überwachung größerer Reichweiten ist nach Aussage des Herstellers „bis auf z.B. 20 cm“ möglich. [125]

Bedingt durch die kurze Reichweite dieses und anderer kapazitiver Sensorsysteme werden sie vor allem in egozentrischer Platzierung eingesetzt. [75] [76] [88] [89] [91]

Kapazitive Sensoren haben gegenüber den restlichen, in der Mensch-Roboter Kollaboration eingesetzten, Sensoren den Vorteil, dass sie Objekte durchdringen können. So reagieren diese Sensoren kaum auf die Anwesenheit von Kunststoff, können aber die Anwesenheit vom menschlichen Körper und auch Metall in Ihrer Umgebung deutlich feststellen. Dies funktioniert auch, wenn diese vor dem Sensor durch Kunststoff verdeckt werden.

Kapazitive Sensoren werden, bei auf dem Markt befindlichen kollaborierenden Robotern, zum Beispiel zur Früherkennung genutzt, die zurzeit noch nicht ausreichend sicher ist. Die Sicherheit wird hierbei über zusätzliche sichere taktile Sensoren gewährleistet (siehe Kapitel 5.1.4).

Die geringe Reichweite der Sensoren von wenig mehr als 10 cm, die gerade die in der EN ISO 13855 vorgeschriebenen 10 cm Zone (siehe Kapitel 3.2.4.3) abdeckt, reicht sicherheitstechnisch nicht aus, um den Roboter in ausreichend schneller Arbeitsgeschwindigkeit zu bewegen (siehe Abbildung 9 in Kapitel 3.2.4.4). Berücksichtigt werden muss hierbei der Nachlauf des gesamten Systems (siehe Kapitel 3.2.4.2). Beim Erreichen von 10 cm Abstand zur Person muss der Roboter still stehen. Deshalb wird in dieser Arbeit auf die Betrachtung kapazitiver Sensoren verzichtet. Kapazitive Sensoren sind jedoch geeignet, die Lücke zwischen der in dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung (>10 cm Abstand) und taktilen Sensoren (0 cm Abstand) zu schließen. Durch ihre theoretisch erreichbare schnelle Reaktionszeit sind für die Nachlaufzeit des gesamten Systems

hauptsächlich die Berechnungszeit der Algorithmen und die Reaktionszeit des Roboters selbst ausschlaggebend.

### 5.2.2.6 Radar (Mikrowellen)

Radarsysteme, die in der Abstandsmessung theoretisch eingesetzt werden können, sind Dauerstrichradar und Pulsradar.

Im Bereich der Kollaboration wurde bereits ein Dauerstrichradar untersucht [75]. Dieser nimmt jedoch nur bewegte Objekte wahr, wenn sie sich auf den Sensor zu, oder von ihm weg bewegen. Still stehende Objekte, oder sich quer zum Sensor bewegende Objekte werden nicht gesehen. Dieser Nachteil wurde mittlerweile durch das frequenzmodulierte Dauerstrichradar kompensiert. Durch eine kontinuierliche Frequenzverschiebung können alle Objekte erkannt werden [16][17].

Frequenzmodulierte Dauerstrichradar Sensoren haben, wie auch Ultraschallsensoren, eine Totzone (siehe Kapitel 5.2.2.4), in der keine Abstandsmessung erfolgen kann. Bei Radarsensoren zur Abstandsmessung im Automobilbereich (als Beispiel LRR3 von Bosch aus 2009, Arbeitsfrequenz 77 GHz) endet diese Zone bei 50 cm, bei einer Ungenauigkeit der Messung von 10 cm [16]. Zusätzlich haben diese Sensoren, die für das Messen weiterer Strecken ausgelegt sind, nur einen kleinen Abstrahlwinkel. Dadurch Überlappen sich die Messbereiche erst bei größeren Entfernungen.

Diese Werte, die für die Abstandsberechnung zwischen Autos hinreichend sind, sind für die enge Zusammenarbeit von Mensch und Roboter nicht ausreichend. Die Technologie an sich hingegen ist interessant. Bosch hat seit 2013 ein Nachfolgemodell des Sensors im Programm, der mit einem größeren Abstrahlwinkel arbeitet. [18] Dadurch verbessert sich die Anwendbarkeit als Ersatz für Ultraschallsensoren, allerdings muss die Auflösung weiter gesteigert werden. Seit einigen Jahren arbeiten die Sensoren von Bosch im 77 GHz Bereich [18], der gegenüber dem sonst üblichen 24 GHz Bereich „*Geschwindigkeit und Abstand dreibis fünfmal genauer messen*“ [18] kann. Bei weiterer Erhöhung des Frequenzbereichs und damit auch der Auflösung ist es abzusehen, dass diese Sensoren für kollaborierende Roboter zukünftig interessant werden könnten. (siehe Kapitel 10.4)

Die Größe von auf dem Markt verfügbaren Produkten ist bereits klein genug, um sie am Roboter in egozentrischer Anbringung zu installieren. Aufgrund der großen Totzone und Messtoleranz ist ein Einsatz bei kollaborierenden Robotern zurzeit noch nicht zielführend. Aus diesem Grund wird ihr Einsatz in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

### 5.2.3 Fazit

Aus den in Kapitel 5.2.2 dargestellten Technologien ist für die Lösung der Aufgabenstellung (siehe Kapitel 1.2) im gegebenen Arbeitssystem (Kapitel 4) die Entwicklung eines Sensorsystems auf Basis von Ultraschallsensoren in egozentrischer Platzierung hervorgegangen.

Die Vorteile dieser Sensortechnologie sind:

- Robuste Technologie ist auf dem Markt verfügbar
- Sichere Sensoren wurden bereits durch das IFA geprüft und zertifiziert [7]
- Sicherheitstechnisch ausreichende Messzeit bis zur Verfügbarkeit des Ergebnisses (<30 ms)

Die Nachteile dieser Sensortechnologie sind:

- Totzeit bis zur Messbarkeit der Entfernung
- Aktive Messung: Störung benachbarter Sensoren durch ausgesendetes Messsignal
- Messergebnis: Generell nur kürzeste Distanz bis zum ersten gemessenen Objekt verfügbar
- Mögliche Störung durch Umgebungseinflüsse

Bewertung der Nachteile:

- Durch die Wahl der Anordnung der Sensoren am Roboterarm kann die Totzeit als Nachteil eliminiert werden, da auch hier die Anwesenheit von Objekten erkannt wird. (siehe Kapitel 6.2.2)
- Die Störung durch aktive Messung kann bei entsprechender Anordnung und Ansteuerung minimiert werden. (siehe Kapitel 6.1.1)
- Für das in dieser Arbeit vorgestellte Verfahren der Schutzraumbestimmung sind nur die kürzesten Distanzen zu benachbarten Objekten relevant. Somit kommt dieser Nachteil nur bedingt zum Tragen. (siehe Kapitel 7.1.5.2)
- Die Möglichkeit einen Ultraschallsensor durch Umgebungseinflüsse zu stören ist vorhanden, gilt aber auch für alle anderen in diesem Kapitel dargestellten Sensortypen. Ein kollaborierendes Robotersystem muss sich deshalb in der Sensorwahl entweder den gegebenen Umgebungsbedingungen anpassen oder die Umgebungsbedingungen müssen dem kollaborierenden Robotersystem angepasst werden. Nicht jeder Sensortyp kann in jeder Umgebung eingesetzt werden.



## 6 Entwicklung eines Sensorkonzeptes

In [156], [157] und [161] wurde dargestellt, dass bei kollaborierenden Robotern die Auswahl der Sensorsysteme und der Algorithmen miteinander vereinbar sein müssen. Die Aufgaben eines Sensorsystems zur Absicherung einer sicheren Mensch-Roboter Kollaboration ist es:

- alle notwendigen Umgebungsdaten zu erfassen, die für die Algorithmen benötigt werden, um den freien Raum zu bestimmen (siehe Kapitel 5.2.1.1)
- möglichst nur die notwendigen Umgebungsdaten zu erfassen, um den Zeitaufwand für späteres Ausfiltern der nicht relevanten Umgebungsdaten zu verringern
- die notwendigen Umgebungsdaten möglichst lückenlos zu erfassen, um den Eindringabstand (siehe Kapitel 3.2.4.1) bis zur Detektion des eindringenden Körperteils niedrig zu halten
- die notwendigen Umgebungsdaten möglichst schnell zu erfassen und in möglichst kurzen Zyklen zu liefern, um Reaktionszeiten und damit Sicherheitsabstände gering halten zu können (siehe Kapitel 3.2.4.2)
- die notwendigen Umgebungsdaten möglichst genau zu erfassen, um die Toleranzen bei der Bestimmung der Sicherheitsabstände klein zu halten (siehe Kapitel 3.2.4.3)

In Kapitel 5.2.3 wird gezeigt, dass für die zu lösende Aufgabenstellung (siehe Kapitel 1.2) ein Sensorsystem, basierend auf Ultraschallsensoren, in egozentrischer Platzierung am geeignetsten erscheint.

Im folgenden Unterkapitel werden die möglichen Ansätze als Entscheidungsgrundlage für die Auswahl eines geeigneten Sensorsystems dargestellt. Im zweiten Unterkapitel wird gezeigt, wie das ausgewählte Sensorsystem, das die beste Ortsbestimmung der eindringenden Objekte gewährleistet, im Rahmen dieser Arbeit in die Praxis umgesetzt wurde.

### 6.1 Mögliche Sensorkonzepte

Es existieren unterschiedliche Möglichkeiten zur egozentrischen Platzierung von Ultraschallsensoren am Roboterarm. Einige von ihnen wurden bereits in der Wissenschaft im Bereich kollaborierender Robotik getestet. Konkrete Ansätze aus bisherigen Projekten werden gezeigt und neue Lösungsansätze werden aus diesen abgeleitet. Weiterhin wird die Eignung der Ansätze für die Lösung der Aufgabenstellung überprüft.

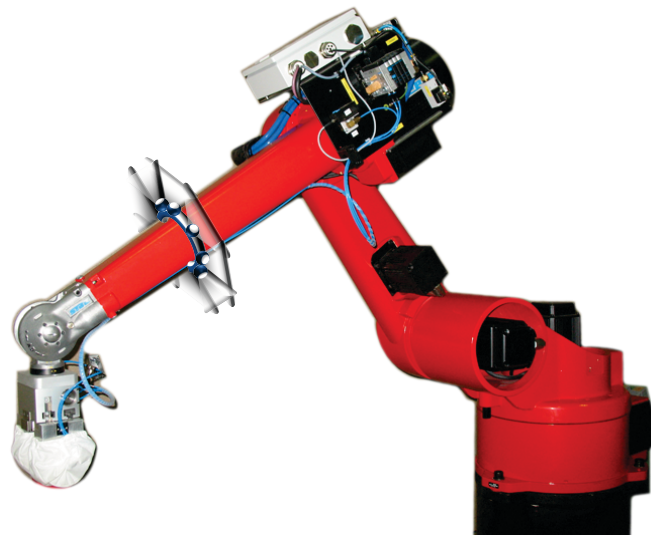
## 6.1.1 Egozentrischen Platzierung

Die verschiedenen Möglichkeiten der egozentrischen Platzierung von Ultraschallsensoren am Roboter sind:

- Am Roboterarm platziert
  - Senkrecht zum Arm messend
    - Im Kreis um den Arm platziert, senkrecht messend [90]
    - Flächendeckend rund um den Arm platziert, jeweils senkrecht zum Arm messend
  - Im Winkel messend
    - Mittig an allen vier Flächen des Arms platziert, in verschiedenen Winkeln nach allen Seiten messend
    - Am oberen Ende des Arms seitlich platziert, zum Tool Center Point – TCP – messend [80] [81]
- Am TCP des Roboters platziert
  - Senkrecht zum TCP messend, im Kreis um den TCP platziert [74] [75] [76]
  - Vom TCP aus senkrecht nach unten messend [83]
  - in verschiedenen Winkeln in Bewegungsrichtung messend [77] [79]

### 6.1.1.1 Im Kreis um den Arm platziert

Eine, im nicht industriellen Bereich bei mobilen Robotern bereits eingesetzte, Art der Platzierung ist die Anordnung der Ultraschallsensoren im Kreis um den abzusichernden Roboter [90]. Abbildung 15 zeigt eine Übertragung dieses Prinzips auf den abzusichernden Teil des Roboterarms.

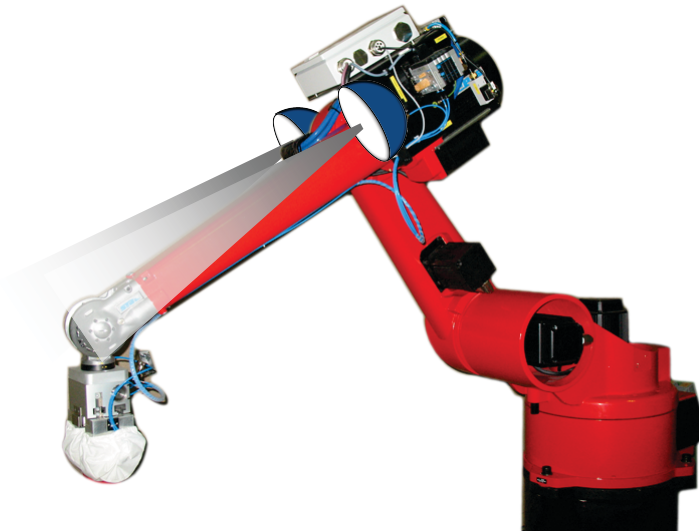


**Abbildung 15: Ultraschallsensoren im Kreis um den zu schützenden Arm**

Während diese Art der Anbringung für den in [90] vorgestellten, mobilen Roboter für dessen Pfadplanung ausreichend ist, ist die geringe Abdeckung der erfassten Bereiche für eine sichere Geschwindigkeitsplanung des dargestellten Arms eines Industrieroboters nicht ausreichend. Hierbei sind nämlich nicht alle gefahrbringenden Teile des Roboters durch die Sensoren abgedeckt. In [90] wurde zusätzlich die Anzahl der aktiven Sensoren, wie in Kapitel 6.1.2 beschrieben, reduziert.

### 6.1.1.2 Am oberen Ende des Arms platziert, zum Tool Center Point messend

Sensoren am Arm so zu platzieren, dass sie entlang des Arms in Richtung TCP messen, um hierbei Erfassungsbereiche entlang des Arms zu erzeugen, wurde 1991 bereits von Podgórski untersucht. [80] [81] Abbildung 16 zeigt eine Platzierung von zwei Sensoren oben am Arm. Podgórski hatte in seiner Arbeit noch zwei weitere Sensoren auf halber Höhe des Arms angebracht, um eine bessere Ortsauflösung in den Schutzbereich eindringender Objekte zu erhalten.



**Abbildung 16: Sensoren sind oben am Arm platziert und messen entlang des Arms**

Auch wenn der gesamte Schutzraum um den Roboterarm von Podgórski überwacht werden kann, ist die Ortsauflösung eindringender Objekte bei dieser Platzierung nur gering. Mit zunehmender Entfernung vom Sensorarray entlang des Arms kann die absolute Distanz von Hindernissen zum Arm immer schlechter bestimmt werden. Hierdurch muss die Geschwindigkeit unter Umständen stark reduziert werden, obwohl die erfassten Objekte in der Realität noch ausreichend weit entfernt sind. Die Ortsauflösung um den TCP, den Bereich in dem eine Kollaboration am wahrscheinlichsten ist, ist hier nur sehr gering. Hierdurch ist ein häufiges, unnötiges Abstoppen des Roboters zu erwarten.

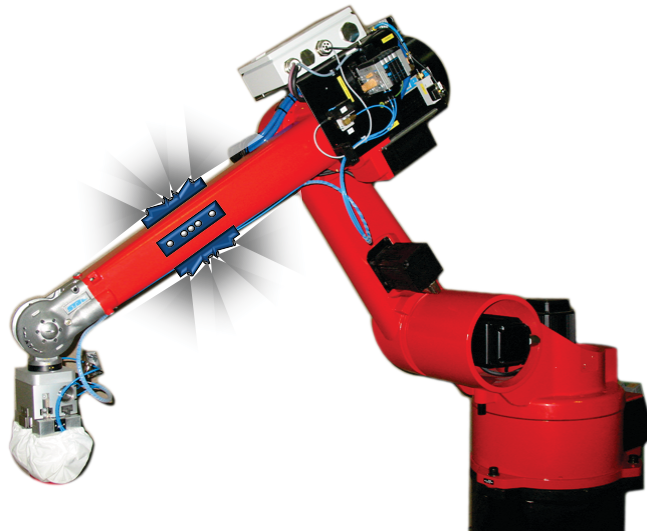
Die Wahl dieser Lösung von Podgórski in 1991 hatte neben den Kosten der Sensoren (siehe Kapitel 0) hauptsächlich zwei Gründe:

- Die in 1991 verfügbaren Ultraschallsensoren hatten eine geringere Zuverlässigkeit, so dass Podgórski eine Lösung wählen musste, bei der so wenig Sensoren wie möglich eingesetzt wurden, um eine ausreichend hohe Verfügbarkeit des Systems zu erreichen. [112]
- Die Reaktionszeit des Robotersystems war gegenüber heutigen Systemen erheblich stärker abhängig von der Komplexität der Algorithmen. Podgórski hatte für seine Lösung einen 10 MHz Prozessor zur Verfügung [80], so dass er die Anzahl an Sensoren auf ein Minimum reduzieren musste. Eine große Anzahl von Sensoren hätte eine hohe Reaktionszeit bedeutet, die wiederum zu einem größeren Sicherheitsabstand geführt hätte. [112]

### 6.1.1.3 Mittig platziert, in verschiedenen Winkeln nach allen Seiten messend

Eine weitere Möglichkeit eine komplette Übersicht über den zu schützenden Bereich um den Roboterarm zu erhalten kann durch eine Kombination der in Kapitel 6.1.1.1 und Kapitel 0 gezeigten Methoden erreicht werden. Dabei werden die Sensoren, wie in Kapitel 6.1.1.1 beschrieben, in der Mitte des Roboterarms platziert und messen gleichzeitig, wie in Kapitel 0 beschrieben, nicht nur im senkrechten Winkel, sondern auch am Roboterarm entlang.

Basierend auf Einparkhilfen aus der Automobilindustrie [22] ist die in Abbildung 17 gezeigte Platzierung denkbar.

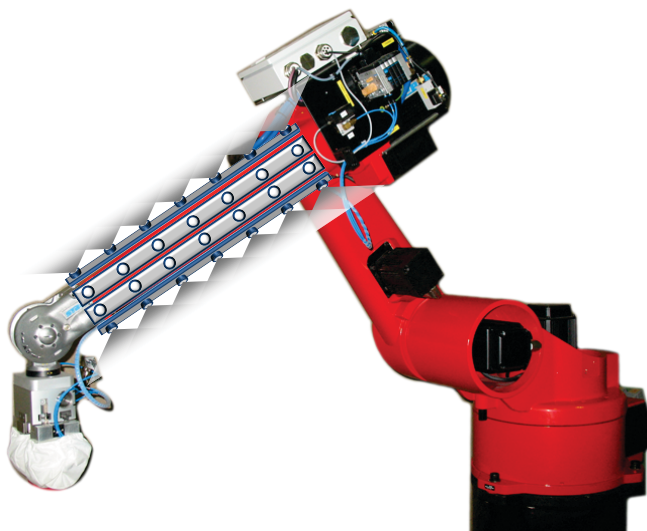


**Abbildung 17: Sensoren sind mittig am Arm platziert und messen in verschiedenen Winkeln nach allen Seiten vom Arm weg und am Arm entlang**

Die Ortsauflösung eindringender Objekte bei dieser Platzierung nimmt, wie schon in Kapitel 0 beschrieben, mit zunehmender Entfernung vom Sensorarray entlang des Arms ab. Dies könnte bedingt kompensiert werden, indem die Sensorarrays nahe dem TCP angebracht werden, in dessen Nähe die größte Wahrscheinlichkeit für eine Kollaboration besteht.

#### 6.1.1.4 Flächendeckend platziert

Das Problem der unvollständigen Abdeckung des Roboterarms, der in Kapitel 6.1.1.1 vorgestellten Lösung, kann ebenfalls durch flächendeckende Platzierung senkrecht vom Roboterarm nach außen messender Sensoren gelöst werden. Abbildung 18 zeigt eine mögliche Umsetzung dieser Anbringung, bei der die auf Schienen montierten Sensoren am Roboterarm befestigt werden.



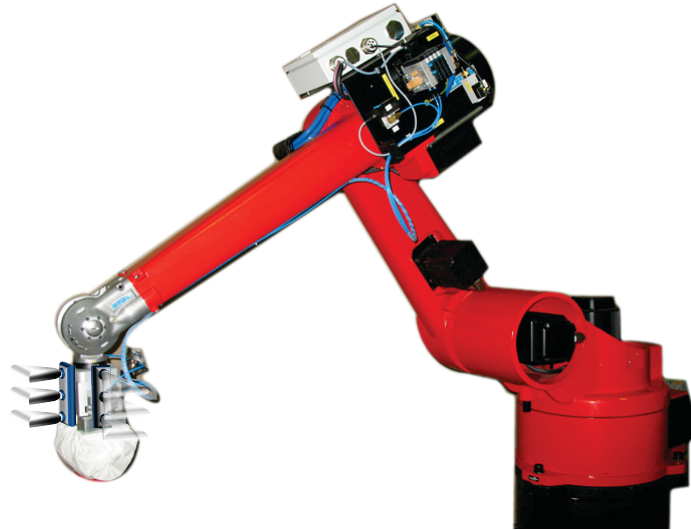
**Abbildung 18: Flächendeckende Platzierung in Reihen um den Roboterarm**

Diese flächendeckende Montage der Sensoren ist zwar, betreffend der Anzahl der zu verwendenden Sensoren, die aufwendigste, allerdings wird durch die große Anzahl der regelmäßig verteilten, senkrecht vom Roboterarm nach außen messenden Sensoren die beste Ortsbestimmung eindringender Objekte in den gesamten Schutzbereich gewährleistet.



### 6.1.1.5 Senkrecht zum Tool Center Point messend

Zusätzlich zum Schutz des Arms existieren verschiedene Ansätze zum Schutz des Werkzeugs am TCP. Der Ansatz senkrecht zum Werkzeug bzw. zum TCP in alle Richtungen zu messen ist in der Ausführung äquivalent zu der, in Kapitel 6.1.1.4 beschriebenen, Platzierung der Sensoren am Arm. Ein erster Ansatz einer Umsetzung dieser Lösung wurde bereits in [74] [75] [76] gezeigt. Hier wurden allerdings nur vier Sensoren eingesetzt, die in je eine Richtung um den TCP gemessen haben. Abbildung 19 zeigt die Platzierung mit mehr Sensoren im Beispiel.

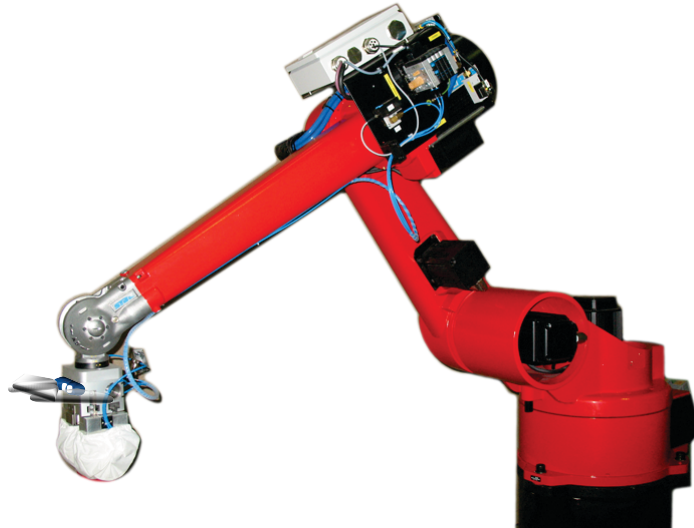


**Abbildung 19: Ultraschallsensoren um das Werkzeug / den TCP herum angebracht**

Wie in der Lösung für den Arm in Kapitel 6.1.1.4 wird auch hier eine gute Ortsauflösung erreicht, wenn entsprechend viele Sensoren eingesetzt werden. Die technische Umsetzung der Lösung ist schwieriger als am Arm, da ein höherer Grad an Miniaturisierung notwendig ist.

### 6.1.1.6 In verschiedenen Winkeln in Bewegungsrichtung des Tool Center Point messend

Durch die flexible Ausrichtung des TCP wird teilweise auf die Lösung zurückgegriffen, Sensoren am TCP nur in eine Richtung anzubringen und den TCP vor Bewegung des Roboters in Bewegungsrichtung auszurichten. Hierfür werden Sensorgruppen eingesetzt, die, wie in Kapitel 6.1.1.3 beschrieben, in unterschiedlichen Winkeln zum TCP angebracht sind. Eine solche Platzierung wurde in [79] untersucht. Abbildung 20 zeigt eine mögliche Platzierung am TCP. In [83] wurden die Ultraschallsensoren unterhalb des TCP angebracht um den Raum unter dem TCP zu überwachen.



**Abbildung 20: Ultraschallsensoren an einer Seite des Werkzeugs / des TCP angebracht**

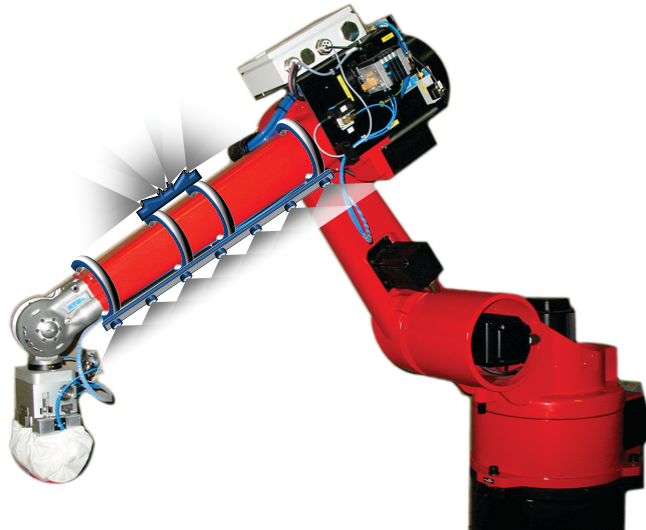
Diese Anordnung hat den Nachteil, dass der TCP vor einer Bewegung immer ausgerichtet werden muss. Bei vorgeplanter Bewegung kann dies mit einbezogen werden und der Pfad entsprechend gewählt werden, wenn der Arbeitsvorgang die notwendige Ausrichtung erlaubt. Sobald der Roboter seine Pfade dynamisch planen soll, z.B. um einem Menschen dynamisch auszuweichen, führt die erneute Ausrichtung des TCP zum Stocken in der Bewegung.

Die Nachteile dieser Art der Platzierung sind ähnlich der beweglichen Anbringung, die in Kapitel 0 beschrieben wird. Der ebenfalls in Kapitel 0 weiter ausgeführte Vorteil liegt in der geringeren Anzahl der erforderlichen Ultraschallsensoren.

Neben der starren Anordnung am beweglichen TCP existiert ein Patent [77], welches für einen einzelnen am TCP angebrachten Array mit wenigen Sensoren zusätzliche Stellmotoren vorsieht. Damit lässt sich dieser unabhängig von der Ausrichtung des TCP bewegen. Das Planen der vorbestimmten Bewegungstrajektorie wird hierdurch flexibler. Der Nachteil des notwendigen Ausrichtens vor ungeplanten Bewegungen bleibt. Kapitel 0 geht weiter auf das Thema bewegliche Platzierungen ein.

### 6.1.1.7 Bewegliche Anbringung

Grundsätzlich ist es möglich die Sensoren in allen bisher genannten Platzierungen sowohl starr, als auch beweglich anzubringen. Abbildung 21 zeigt die mögliche Anbringung für zwei unterschiedliche Systeme.



**Abbildung 21: Anbringung von Sensoren die in verschiedenen Winkeln (Kapitel 6.1.1.3) bzw. senkrecht zum Arm (Kapitel 6.1.1.4) messen und automatisch um den Arm verstellbar angebracht sind**

Eine bewegliche Anbringung spart Kosten bei der Sensorik, da die Anzahl an anzubringenden Sensoren geringer ist. Gleichzeitig wird die Auswertung ungenauer, da die Toleranzen der motorisierten Bewegung zu den restlichen Toleranzen im System hinzukommt und die Bewegungsfreigabe dauert länger, da die Sensoren beim Richtungswechsel der Roboterbewegung programmgesteuert neu ausgerichtet werden müssen.

Im Vergleich zu ersten Ultraschallprojekten aus dem 20ten Jahrhundert sind die Preise für Ultraschallsensoren stark gesunken. 1985 kostete ein einfacher Ultraschallsensor 100 \$ und mehr [75]. Unter Berücksichtigung der Inflationsrate der USA von 1985 bis 2013 entspricht dies in 2013 ca. 217 \$ [23] bzw. 160 € [24]. Professionelle Sensoren aus dem industriellen Einsatz kosten heute um ca. 200 € [19] (siehe Kapitel 13.1.1). Einfache Ultraschallsensoren aus dem Bereich Automobilindustrie, die ebenfalls für den vorgesehenen Einsatz geeignet sind, sind heute bereits für ca. 20 € erhältlich (siehe Kapitel 13.1.2).

Die Kosten für die automatische Verstellung müssen den eingesparten Kosten im Bereich der Sensoren entgegen gestellt werden. Bei ausreichender Robustheit und notwendigen, geringen Toleranzen sind unter Berücksichtigung heutiger Sensorpreise kaum Einsparungen zu erwarten. Weiterhin muss die Fehleranfälligkeit des zusätzlichen, mechanischen Systems bei Sicherheit und auch Verfügbarkeit der Schutzeinrichtung berücksichtigt werden.

Durch diese Faktoren ist eine bewegliche Anbringung aus heutiger Sicht wenig sinnvoll. Alternativ bietet sich an, bei flächendeckender Sensorik nur bestimmte Gruppen von Sensoren aktiv zu schalten, um dadurch den in der Umgebung vorhandenen Ultraschall zu reduzieren. Hierdurch können Ultraschallreflexionen in der Umgebung vermindert werden. Dies kann eine Verkürzung der Messzyklen ermöglichen (siehe Kapitel 5.2.2.4).

### 6.1.2 Messung mit mehreren Ultraschallsensoren

In Kapitel 5.2.2.4 wurden verschiedene Arten der Messung mit Ultraschallsensoren, in Hinsicht auf die gegenseitige Störung bei aktiver Messung, untersucht. Hieraus geht hervor:

- Zwischen zwei Messungen muss gewartet werden, bis der Schall in der Umgebung ausreichend absorbiert wurde, um keine Fehlmessung zu verursachen
- Bei höherer Frequenz wird der Ultraschall in der Luft schneller absorbiert
  - Bei höherer Frequenz sind pro Zeiteinheit mehr Messungen möglich
  - Bei höherer Frequenz nimmt die Reichweite der Sensoren bei gleichbleibender Sendeleistung ab
- Sensoren die im gleichen Frequenzband senden stören sich, wenn sie die Signale des jeweils anderen empfangen
- Es ist nur eine beschränkte Anzahl unterschiedlicher Frequenzbänder möglich
- Eine Kodierung der Sensorsignale ist in Luft nicht möglich

Die daraus resultierenden Lösungsmöglichkeiten für den Einsatz von mehreren Ultraschallsensoren am Roboter sind:

- Sensoren müssen so angeordnet werden, dass jeder einzelne Sensor die Echos aller anderen Sensoren nicht empfängt
- Pro Messung sind wechselseitig nur die Sensorgruppen aktiv zu schalten, die sich nicht gegenseitig in ihrer Messung beeinflussen [90]. Passive Sensoren können hierbei weiterhin als reine Empfänger genutzt werden, um zusätzliche Daten zu liefern.
- Die gegenseitige Beeinflussung muss durch gleichzeitiges Senden des Ultraschallsignals aller Sensoren gemindert werden, hierbei darf kein Sensor im direkten Sendebereich eines anderen liegen

Aufgrund der sicherheitstechnischen Anforderungen der europäischen Maschinenrichtlinie (siehe Kapitel 3.1.3) muss bei der Auswahl der Lösung die Forderung der Zweikanaligkeit aus den harmonisierten Normen (siehe Kapitel 3.2.2.1 und 3.2.3.2.1) berücksichtigt werden. Das bedeutet, dass mindestens zwei unterschiedliche Sensoren den gleichen Raumbereich überwachen müssen. Für die ersten beiden Lösungen bedeutet das, dass hierfür mindestens zwei unterschiedliche Frequenzbereiche gleichzeitig einzusetzen sind, um Störungen zu vermeiden. Alternativ kann in den beiden Lösungen auch abwechselnd von zwei nebeneinander liegenden Sensoren gemessen werden. Dies verdoppelt aber die Zykluszeit.

Zusätzlich muss der Gefahrenbereich um den Roboterarm lückenlos überwacht werden. Eine genaue Anordnung der Sensoren, so dass sich die Messbereiche lückenlos berühren aber nicht überschneiden, ist in der Praxis durch die Form von Haupt- und Nebenkeulen eines einzelnen Sensors im Messbereich nicht umsetzbar.

Somit muss beim Einsatz der ersten Lösung mit zusätzlichen Frequenzbändern gearbeitet werden. Sequenzielle Messungen, die wie in der zweiten Lösung beschrieben nicht lückenlos erfolgen, haben den Nachteil, dass sie die Zeit bis zur vollständigen Erfassung verlängern.

Die genannten Nachteile treten in der dritten Lösung nicht auf. Die Messbereiche überschneiden sich und die Messungen werden bei gleicher Frequenz gleichzeitig durchgeführt. Hierdurch:

- kann die Messzeit auf einen Zyklus beschränkt bleiben.
- wird nur ein Frequenzband genutzt. Dies ermöglicht den Einsatz weiterer unabhängiger Sensorsysteme in der Umgebung, die andere Frequenzbänder nutzen.
- es kann ohne Nachteile für Zykluszeit und Frequenzbänder die sicherheitstechnisch geforderte Mehrkanaligkeit implementiert werden.

Für die vorliegende Arbeit wurde aufgrund dieser Überlegungen die dritte Lösung gewählt. Sie ist in Kapitel 6.2.2 detailliert beschrieben.

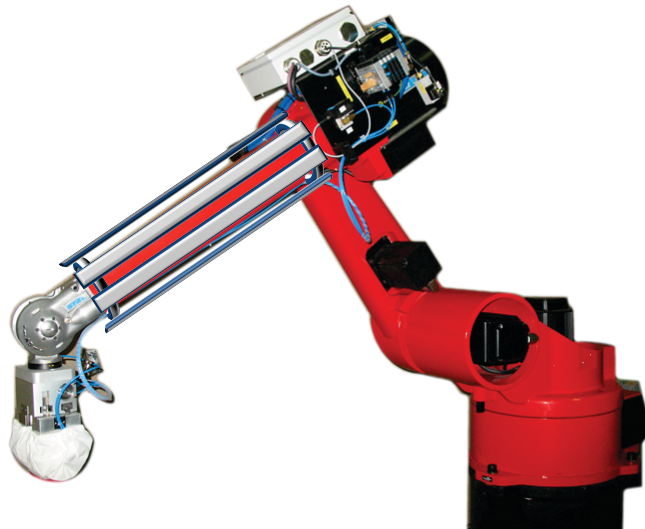
## 6.2 Auswahl des Sensorkonzepts

### 6.2.1 Egozentrischen Platzierung

Aus den in Kapitel 6.1.1 vorgestellten möglichen egozentrischen Platzierungen wurde die, in Kapitel 6.1.1.4 beschriebene, flächendeckende Platzierung aus den dort genannten Gründen ausgewählt. Die ausschlaggebenden Vorteile dieser Lösung gegenüber den anderen sind die höhere Auflösung des freien Raums und bessere örtliche Bestimmung von eindringenden Objekten. Bei ausreichender Sensordichte kann die sicherheitstechnisch geforderte Zweikanaligkeit des Sensorsystems (siehe Kapitel 3.2.2.1 und 3.2.3.2.1) gewährleistet werden.

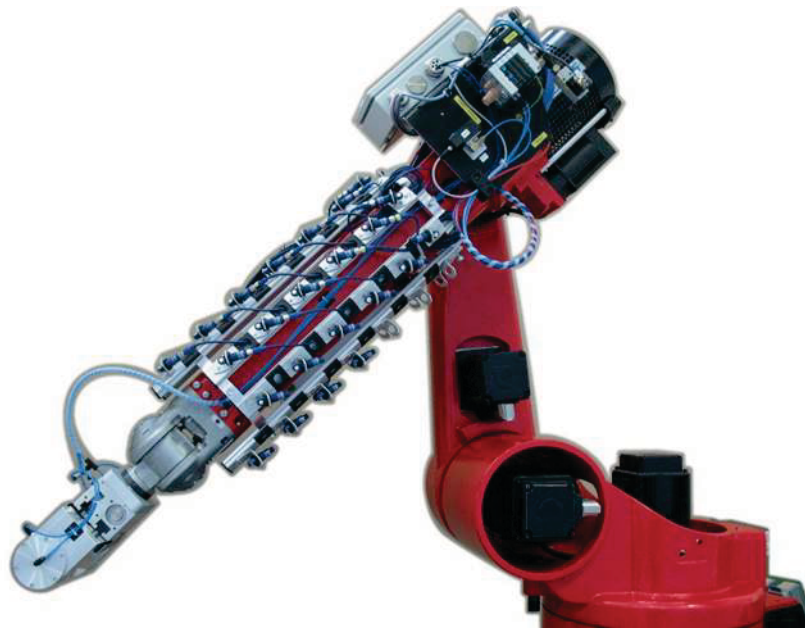
Die flächendeckende Anordnung wurde in der vorliegenden Arbeit auf zwei verschiedene Arten umgesetzt. In diesem Kapitel wird nur die Anordnung der Hardware beschrieben. Die Beschreibungen der einzelnen Komponenten wie Steuerung und Sensoren erfolgt im Anhang dieser Arbeit (siehe Kapitel 13).

Um bei der flächendeckenden Montage von Sensoren am Arm des Roboters diesen nicht mechanisch zu beschädigen und trotzdem möglichst flexibel zu sein, wurden im Rahmen dieser Arbeit zwei Metallringe auf den Arm geschoben und festgeklemmt. Die Ringe wurden dann, zur zusätzlichen Stabilisierung, durch Metallschienen fest miteinander verbunden. Die verschiedenen, in dieser Arbeit entwickelten Demonstratoren konnten dann auf diesen Schienen bzw. direkt auf den Metallringen befestigt werden. Abbildung 22 zeigt das Konzept des Unterbaus am Roboterarm.



**Abbildung 22: Konzept des Basisrahmens für die Sensoren, bestehend aus Metallringen und Schienen**

Die erste im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Anordnung wurde mit Ultraschallsensoren aus dem Bereich industrieller Automatisierung der Firma microsonic GmbH – microsonic – realisiert. Hierzu wurden verschiedene Sensoren des Typs pico+ [19] auf den o.a. Metallschienen befestigt. Abbildung 23 zeigt den im IFA aufgebauten Roboter mit den installierten Sensoren.



**Abbildung 23: Erster Aufbau der Ultraschallsensoren pico+ von microsonic am Roboter RV-30-16 von Reis**

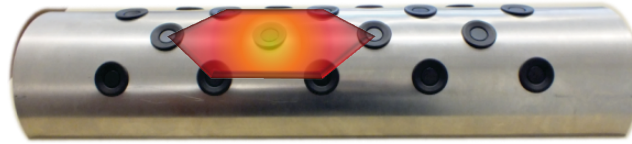
Die Kabelführung von den Sensoren bis hin zur auswertenden Steuerung (PC) erfolgt über vier sich drehende Achsen des Roboters. Lose verlegte Kabel werden durch die egozentrischen Sensoren unter Umständen als eindringende Objekte erkannt. Deshalb ist eine möglichst flexible und gleichzeitig eng am Roboterarm anliegende Kabelführung geboten. Ein enges Anliegen der Kabel, so dass diese die Sensoren möglichst wenig stören, wird durch Bündelung der Kabel erreicht. Kabelbündel, die eine größere Anzahl an Kabeln enthalten, verlieren Flexibilität. Aus diesem Grund muss die Anzahl der Kabel minimiert werden.

Im Rahmen einer von Kurras im IFA durchgeführten und vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Diplomarbeit [145] wurden alle Sensoren zur Übertragung der Messwerte an die auswertende Steuerung mit Beckoff EtherCAT-Klemmen (siehe Kapitel 13.1.3) verbunden. Diese wurden, zusammen mit einem Beckoff EtherCAT-Koppler (siehe Kapitel 13.1.3), ebenfalls auf den Schienen am Unterarm des Roboters befestigt. Die Sensorsignale werden hierüber gemeinsam mittels EtherCat über ein einziges Cat-5-Kabel übertragen. Damit konnten die Anforderungen an das Verlegen der Kabel optimal erfüllt werden.

An diesem ersten Demonstrator wurden verschiedene Algorithmen (siehe Kapitel 7.1.1 bis 7.1.4) umgesetzt und getestet. Hierbei ergab sich, dass der Öffnungswinkel der Sensoren nicht ausreichte, um eine zufriedenstellende Raumabdeckung zu erreichen, bzw. der in diesem Demonstrator technisch realisierbare Abstand der Sensoren zueinander zu groß war.

Um dieses Problem zu beheben, wurden andere Sensoren aus dem Automobilbereich mit einem größeren Öffnungswinkel ausgewählt. Diese Sensoren von Bosch (siehe Kapitel 13.1.2) wurden im Rahmen eines von Kirfel im IFA durchgeführten und vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Praktikums getestet und die elektronische Ansteuerung dieser Sensoren wurde konzipiert. [147]

Im Rahmen einer von Kirfel im IFA durchgeführten und vom Verfasser dieser Arbeit betreuten Bachelorarbeit [148] wurde die synchrone, elektronische Ansteuerung der Sensoren von Kirfel in Anknüpfung an sein Praktikum umgesetzt und die Sensoren wurden in der in Abbildung 24 gezeigten separaten „Demonstrationshalbschale“ installiert.



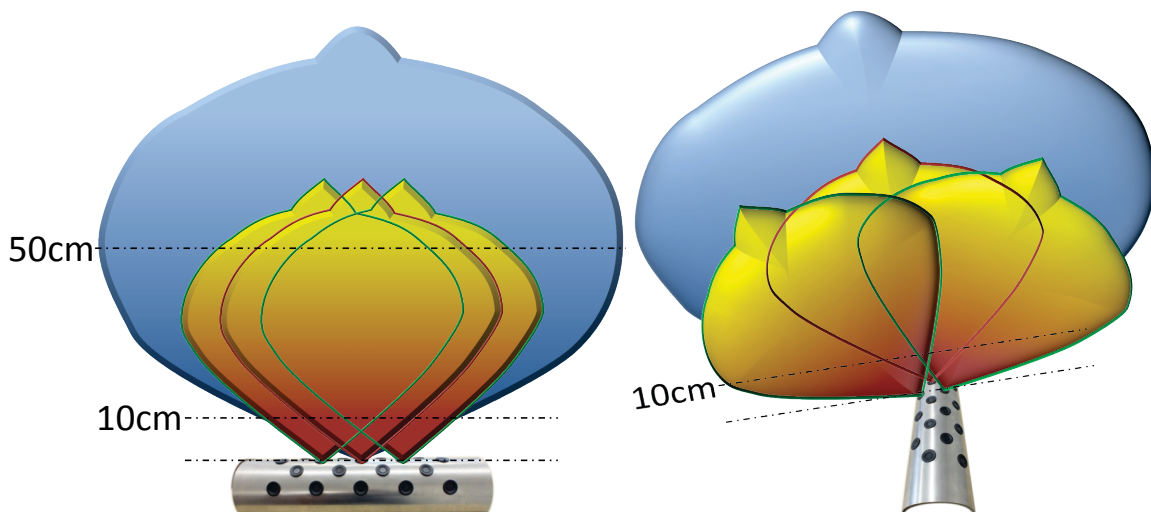
**Abbildung 24: Bild der in [148] entstandenen Demonstrationshalbschale mit eingezeichneter Wabenstruktur**

Um eine Überdeckung der Sensorkeulen zu erreichen, die nahe am Roboterarm beginnt, wurden im Rahmen dieser Arbeit durch Berechnungen auf Basis der Erfassungsbereiche der Bosch Sensoren (Kapitel 13.1.2) folgende Vorgaben ermittelt:

- Abstände der Sensoren untereinander von 10 cm
- Winkel der Sensoren von 30° zueinander

Kirfel entschied sich, im Rahmen seiner Bachelorarbeit, für eine versetzte Anordnung der Sensorreihen um 5 cm. Durch das dadurch entstehende Wabenmuster (rot in Abbildung 24) wird der mittlere Sensor einer Wabe (orange in Abbildung 24) von den Erfassungsbereichen der sechs benachbarten Sensoren überlagert. Dies unterscheidet sich von der ersten gewählten Anordnung, bei der jeweils acht benachbarte Sensoren den Erfassungsbereich des mittleren Sensors überlagern. Die neu gewählte Anordnung wirkt sich positiv auf die, in Kapitel 9.2.1.2 bestimmte, mittlere Zeit bis zum gefährlichen Ausfall ( $MTTF_d$  – siehe Kapitel 3.2.3.2.2) der Schutzeinrichtung aus.

Mit den vorgegebenen Abständen und Winkeln der Sensoren zueinander erreichen die äußeren, rot dargestellten, Sensorkeulen, wie in Abbildung 25 gezeigt, in der Anordnung von Kirfel bereits bei weniger als 10 cm Abstand zur Demonstrationshalbschale eine vollständige Überlagerung der mittleren roten Keule.

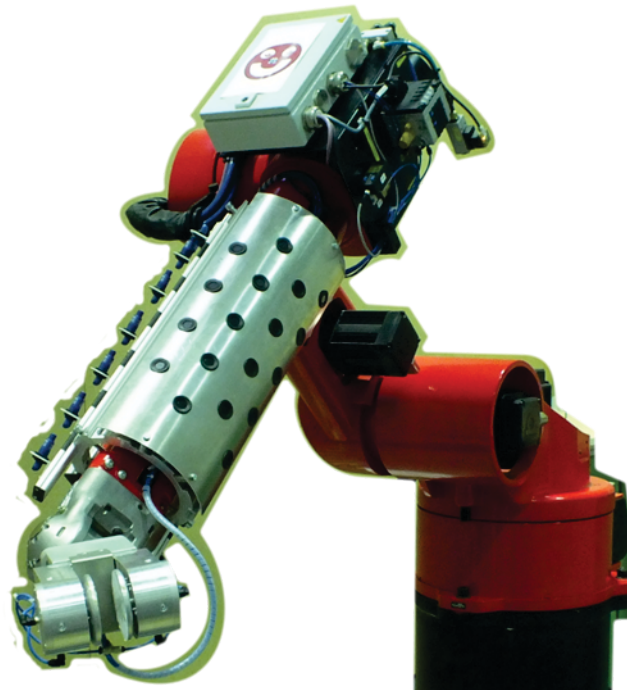


**Abbildung 25: Überlagerung der Sensorkeulen, rot Standardempfindlichkeit, blau erhöhte Empfindlichkeit**

Diese Überlagerung besteht, in den rot dargestellten Keulen, bis zu einem Abstand von mehr als 50 cm, welcher nach Kapitel 3.2.4.4 Abbildung 9 eine maximale Robotergeschwindigkeit von 3 m/s zulassen würde. Kirfel beschreibt in seiner Arbeit, wie sich die vorgegebenen Empfangskennlinien der Sensoren grundsätzlich einstellen lassen, um die Empfindlichkeit der Sensoren zu erhöhen (blaue Keulen) und damit den vollständig überlagerten Erfassungsbereich sowohl zum Roboterarm hin, als auch nach außen weiter zu vergrößern. Beide von Kirfel ausgemessenen Sensorkeulen, bei unterschiedlichen Empfangskennlinien, sind in Kapitel 13.1.2 in Abbildung 75 wiedergegeben.

Nach Abschluss der Bachelorarbeit wurden die Sensoren, mit ihrer in der Bachelorarbeit entwickelten Ansteuerung, an dem bereits entwickelten Haltesystem am Roboterarm

befestigt und über einen PC mit der Steuerung des Roboters verbunden. Abbildung 26 zeigt den Roboter in seinem endgültigen Aufbau.



**Abbildung 26: Finaler Aufbau der Sensoren am Roboter**

Die in Abbildung 26 noch zu sehenden Ultraschallsensoren von microsonic aus dem ersten Aufbau sind nicht mehr funktional, da ihre Ansteuerung auf dem Roboterarm durch die Steuerung der Bosch Sensoren ersetzt wurde. Diese Sensoren sind am Demonstrator verblieben, um alternative Sensoren zeigen zu können.

Für den Nachweis der Funktion der Schutzeinrichtung ist es im Rahmen dieser Arbeit nicht notwendig, den Roboterarm allseitig mit der Schutzeinrichtung zu umgeben. Aus Kostengründen wurde deshalb hierauf verzichtet.

## 6.2.2 Messung mit mehreren Ultraschallsensoren

Kapitel 6.1.2 zeigt, dass für eine Messung mit mehreren Ultraschallsensoren, die gemeinsam einen Freiraum bestimmen sollen ein Ansatz benötigt wird, bei dem:

- sich die Messbereiche überschneiden und
- die Messungen bei gleicher Frequenz gleichzeitig durchgeführt werden können.

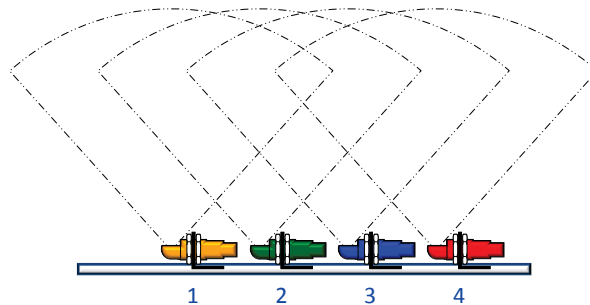
Das Überschneiden der Messbereiche muss, wie in Kapitel 6.2.1 gezeigt, durch die Wahl der Anordnung sichergestellt werden. Eine synchronisierte Messung mehrerer Ultraschallsensoren wird bereits in der industriellen Praxis für verschiedene Sensoren eingesetzt. Hierzu steht z.B. bei microsonic u.a. die SyncBox1 [20] zur Verfügung, die bis zu 50 mic+-Sensoren synchronisieren kann. Da eine solche Synchronisierung einer ähnlichen Anzahl der ebenfalls verwendeten Bosch Sensoren nicht zur Verfügung steht, musste diese im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden (siehe Kapitel 6.2.2).

Die Auswirkungen auf die Messwerte der Sensoren, wenn alle Ultraschallsensoren eines Arrays gleichzeitig ihre Messsignale aussenden, und die Relevanz des dadurch entstehenden Messfehlers für das Sensorsystem werden in Rahmen der ersten Untersuchungen zu dieser Arbeit zunächst nur theoretisch betrachtet. Diese Ergebnisse, die sich danach im Rahmen der praktischen Umsetzung bestätigt haben (siehe Kapitel 7.1), wurden erstmalig in einem Vortrag [155] vorgestellt, der auch Eingang in die vom Verfasser dieser Arbeit an der Bergischen Universität Wuppertal und der Hochschule Bonn-Rhein-Sieg durchgeführte Lehrtätigkeit gefunden hat. Das Konzept wurde außerdem in [156] bzw. ausführlich in [157] beschrieben. Weiterhin war das Konzept Gegenstand einer



Veröffentlichung im Rahmen der „6th International Working on Safety Conference“ [160] [163]. Im Folgenden wird das Konzept basierend auf dem Vortrag und den genannten Veröffentlichungen dargestellt.

Betrachtet wurde hierbei beispielhaft der Fall, dass alle Sensoren auf einer Ebene liegen und sich im Abstrahlwinkel jedes einzelnen Sensors kein weiterer Sensor befindet. Abbildung 27 zeigt eine mögliche Konstellation von vier Sensoren.

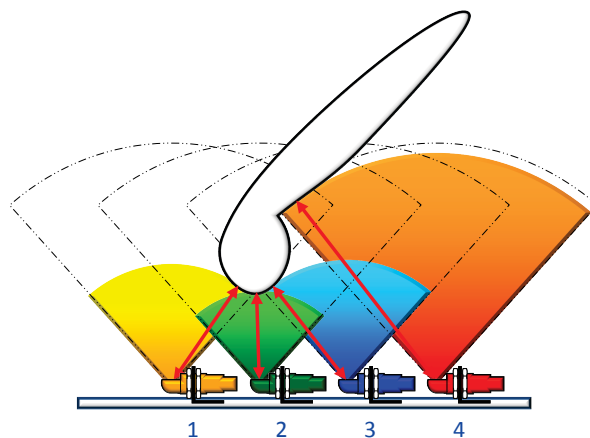


**Abbildung 27: Vier Ultraschallsensoren auf gleicher Höhe, kein Sensor liegt im Abstrahlwinkel eines anderen, Quelle: Nach [156]**

Ein optimales Messergebnis könnte in diesem Fall nur dann erreicht werden, wenn wie in Kapitel 5.2.2.4 beschrieben, die Sensoren entweder

- eine unterschiedliche Kodierung aufweisen,
- eine zeitverzögerte Messung durchführen  
oder
- unterschiedliche Frequenzen der Sensorsignale nutzen.

Abbildung 28 zeigt den Raum, der von Ultraschallsensoren in einem solchen optimalen Fall als frei von Objekten erkannt wird, wenn z.B. wie hier gezeigt ein unregelmäßig geformtes Objekt in den Erfassungsbereich der dargestellten Sensoren eindringt. Dieser Raum basiert, wie in Kapitel 5.2.2.4 beschrieben, auf der kürzesten Laufzeit des Ultraschallsignals zwischen Sendekopf des Sensors und nächstem Punkt des Objekts (roter Doppelpfeil).

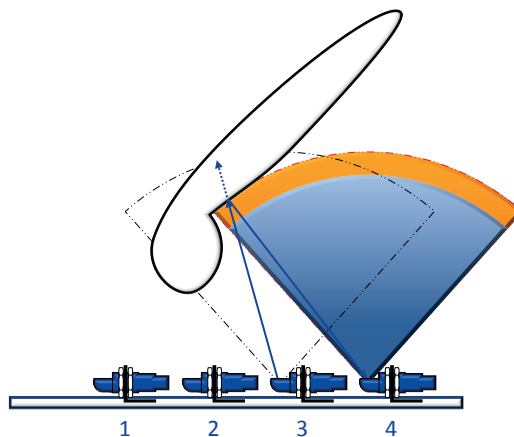


**Abbildung 28: Eindringendes Objekt wirft Echo zurück, Sensor 2 misst geringste Distanz Quelle: Nach [156]**

Wenn dagegen die Sensoren

- keine unterschiedliche Kodierung aufweisen,
- ihre Messung gleichzeitig durchführen  
und
- die gleiche Frequenzen der Sensorsignale nutzen,

kommt es bei der Messung der kürzesten Distanz zu verfälschten Ergebnissen. Abbildung 29 zeigt dies am Beispiel von Sensor 3 und Sensor 4.

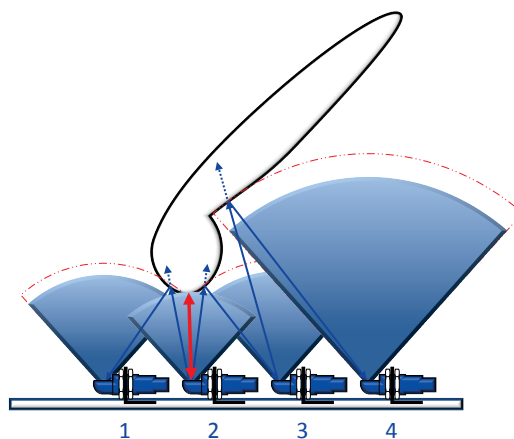


**Abbildung 29: Verkürzte Schallaufzeit für Sensor 4**  
Quelle: Nach [156]

Die von Sensor 4 ermittelte Distanz zum Objekt wird aufgrund der Reflexion des Messsignals an dem Punkt des Objekts gemessen, der Sensor 4 am nächsten ist. Wenn beide Sensoren 3 und 4 ihr Signal gleichzeitig aussenden, trifft das Signal von Sensor 3 aus früher auf diesen Punkt und wird auch zu Sensor 4 zurückgeworfen. Dadurch erreicht diese Reflexion den Sensor 4, bevor dieser die Reflexion seines eigenen Messsignals empfängt. Die verkürzte Signallaufzeit hat zur Folge, dass der Sensor 4 einen kürzeren Abstand zum eindringenden Objekt misst (blauer Bereich), als tatsächlich vorhanden ist (orangefarbener + blauer Bereich).

Der gepunktete, verlängerte Pfeil von Sensor 3 aus gibt den Streckenunterschied zwischen Sensor 3 und Objekt und Sensor 4 und Objekt wieder. Der Messfehler in Sensor 4 beträgt die Hälfte dieser Strecke.

Abbildung 30 zeigt, dass auch Sensor 1 und Sensor 3 das gleiche Problem bei der Messung aufweisen.



**Abbildung 30: Fehlerhafte Messungen (blau) bei gleichzeitiger Messung, minimale Distanz bleibt unbeeinflusst**  
Quelle: Nach [156]

Auf Sensor 2 hat kein anderer Sensor einen Einfluss, da dieser Sensor die kürzeste Distanz zum eindringenden Objekt aufweist. Hierdurch erreicht das Signal von Sensor 2 das Objekt vor allen anderen Signalen und erzeugt eine korrekte Distanzmessung.

Der rot gestrichelte Raum in Abbildung 30 stellt den physikalisch theoretisch messbaren freien Raum dar, der blaue Raum den tatsächlich gemessenen.

Der Fehler in der Bestimmung des freien Raums durch jeden einzelnen Sensor ist somit:

- umso geringer, je kürzer die Distanz zwischen Objekt und dem jeweiligen Sensor ist;
  - Hierbei weist der Sensor mit der kürzesten Distanz keinen Fehler in Bezug auf Fremdreflexionen auf.

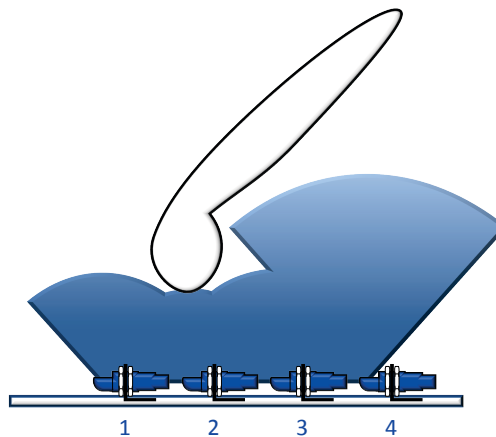
- zur sicheren Seite hin, da Messfehler nur dazu führen können, dass weniger freier Raum gemessen wird, als tatsächlich vorhanden ist.

Theoretisch kann versucht werden, diese Messfehler zu kompensieren, indem die Messwerte der Sensoren nicht nur einzeln, sondern auch im Vergleich zu ihren Nachbarwerten betrachtet werden. Auf größere Messwerte könnte hierbei theoretisch ein Zuschlag gegeben werden, da diese wahrscheinlich von den Reflexionen der Nachbarsensoren beeinflusst wurden. Diese Kompensation des Fehlers wurde zu Beginn der Überlegungen bereits verworfen und in den Veröffentlichungen auch nicht diskutiert. Da im Rahmen einer Mensch-Roboter Kollaboration mit komplexen, nicht regelmäßigen Formen der eindringenden Objekte gerechnet werden muss, kann nicht mit regelmäßigen Reflexionsfehlern gerechnet werden.

Durch die Verteilung der Fehler – je kürzer der Abstand, desto kleiner der Fehler – ist der Fehler nicht sicherheitsrelevant. Bei Anwendung des Algorithmus zum Bestimmen der erlaubten Geschwindigkeit (siehe Kapitel 7.2), bei dem kürzere Abstände potentiell höhere Einflüsse auf die erlaubte Geschwindigkeit haben, wird die maximal erlaubte Geschwindigkeit wenn überhaupt nur geringfügig verringert.

Auf eine Messung von weiteren Signalen, die nach dem ersten erkannten Echo an den Sensoren eintreffen, kann verzichtet werden. Aufgrund der vielen ausgesandten Messsignale der verschiedenen Sensoren können hieraus keine sicheren Schlüsse auf weiter hinten liegende Objekte gezogen werden (siehe Kapitel 5.2.2.4). Diese werden zur Bestimmung der sicheren Geschwindigkeit auch nicht benötigt.

Werden die Sensoren flächendeckend eingesetzt, kann davon ausgegangen werden, dass der Zwischenraum der Sensoren, der unterhalb der vereinten Messkeulen liegt, ebenfalls frei von Objekten ist. Rein physikalisch ist ein Aufenthalt von eindringenden Objekten nur in diesen Zwischenräumen nicht möglich. Ein Objekt, das in diesen Räumen präsent ist, ist auch im abgedeckten Messbereich mit weniger als 10 cm Abstand präsent. Es muss von außen in diesem Raum hineingehalten werden, dadurch werden Sensoren ausgelöst und die Roboterbewegung stoppt (siehe Kapitel 3.2.4.3). Somit ergibt sich der in Abbildung 31 gezeigte, blaue Raum als von den vier Sensoren gemessener Raum, der frei von Objekten ist.



**Abbildung 31: Vollständiger als frei von Objekten gemessener Raum**  
Quelle: Nach [156]

Lediglich ein Ablegen von Gegenständen auf dem Roboterarm in den o.a. Zwischenräumen der einzelnen Sensoren könnte zu Problemen führen. Hierauf muss in der Betriebsanleitung hingewiesen werden (siehe Kapitel 2.2.1). Die Möglichkeit der Ablage von Gegenständen auf der Schutzeinrichtung wurde im Aufbau des zweiten Demonstrators bedacht und durch die Wahl der runden Form weitgehend verhindert (siehe Kapitel 6.2.1).

Der betrachtete Fall gilt nur solange, wie kein Sensor im Abstrahlwinkel eines zweiten liegt. Eine Notwendigkeit, dass zwei Sensoren auf diese Art platziert werden existiert bei den einzelnen Gliedmaßen des Roboters nicht. Allerdings würde eine Schutzeinrichtung, die sowohl Arm, als auch Werkzeug schützt, regelmäßig durch Abknicken des Werkzeugs diese

Situation hervorrufen. Mögliche Lösungen sind eine intelligente Ansteuerung der Sensoren, die in diesem Fall einen Teil der betroffenen Sensoren passiv schaltet, so dass diese nur noch Ultraschallsignale empfangen und nicht selber Messsignale senden. Eine zweite Möglichkeit ist die bereits diskutierte Option der Nutzung verschiedener Frequenzen für die einzelnen Teilsysteme. Beide Möglichkeiten sind nicht Gegenstand der vorliegenden Arbeit.

## 7 Entwicklung eines Algorithmus zur Robotersteuerung

Wie in [156], [157] und [161] dargestellt, können über Algorithmen zwei unterschiedliche Ziele in der Mensch-Roboter Kollaboration erfüllt werden. Mit ihnen kann:

- die Bahn / Trajektorie, auf der der Roboter sich von seiner aktuellen Position aus zu seinem Ziel bewegt an die Umgebungsbedingungen angepasst werden und der Roboter effektiv ausweichen, und
- die Geschwindigkeit, mit der sich der Roboter zum gegenwärtigen Zeitpunkt und an jedem Folgepunkt der Bahnkurve maximal bewegen darf, bestimmt werden.

Zum Erreichen einer sicheren Mensch-Roboter Kollaboration ist es, wie in Kapitel 1.4.1 dargestellt, ausreichend, wenn eines der beiden o.a. Ziele sicher erfüllt wird. Für das übrige Ziel ist dann eine prozesstechnische Betrachtung ausreichend. Aufgrund der vergleichsweise höheren Komplexität einer Bahnplanung, ist die sichere Geschwindigkeitsplanung im Rahmen der Sicherheitssteuerung zu bevorzugen.

In [156], [157] und [161] wurden Ansätze zum Algorithmus präsentiert, die mit den vom Sensorsystem erfassten Daten eine sichere Geschwindigkeitsplanung für die Mensch-Roboter Kollaboration ermöglichen. Hiernach muss ein solcher Algorithmus:

- mit der Art und Anzahl der vom Sensorsystem gelieferten Daten auskommen,
- die vom Sensorsystem zyklisch gelieferten Daten möglichst schnell verarbeiten, so dass der Mindestabstand von Mensch und Roboter gering bleiben kann, und
- mit der Unsicherheit in den realen Daten zurechtkommen.

Um die maximale Geschwindigkeit zu bestimmen, mit der sich der Roboter vom gegenwärtigen Zeitpunkt bis zum nächsten Messzyklus bewegen darf, sind folgende Schritte notwendig:

- der freie Raum, d.h. die Umgebung um den Roboter, die frei von Objekten ist, muss bestimmt werden,
- die Geschwindigkeit vom Roboter muss anhand des freien Raums bestimmt werden, und
- gegebenenfalls muss der freie Raum nach Bestimmung der Geschwindigkeit, unter Berücksichtigung der Rechenzeit, um die Distanz möglicher Eindringungen in diesem Zeitraum reduziert werden und die Geschwindigkeit erneut bestimmt werden.

Hierbei ist zu beachten, ob Objekte, deren Position in der Arbeitsumgebung bekannt ist, erkannt und für die Geschwindigkeitsbestimmung ignoriert werden können.

### 7.1 Bestimmung des freien Raums

Das in Kapitel 6.2.1 beschriebene Sensorsystem ist darauf ausgelegt, den gesamten Raum um den Unterarm des Roboters (siehe Abbildung 12) abzudecken. Ein erster, einfach umzusetzender Algorithmus zur Bestimmung des freien Raums ist, den Sensorwert, der den kleinsten Abstand zwischen Roboter und Fremdobjekt darstellt, als Maß für den freien Raum anzunehmen und hieraus die erlaubte Geschwindigkeit des TCP zu errechnen. Dies wird in Unterkapitel 7.1.1 vorgestellt und es wird dargelegt, warum dieses Verfahren nicht geeignet ist.

Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung des freien Raums ist die Vereinigung aller geometrischen, dreidimensionalen Formen der Ultraschallkeulen, soweit Sie den Messbereich als frei von Objekten anzeigen, zu einer gemeinsamen komplexen Form. Dies

wird in Unterkapitel 7.1.2 kurz dargestellt und es wird gezeigt, warum dieser Ansatz nicht zielführend ist.

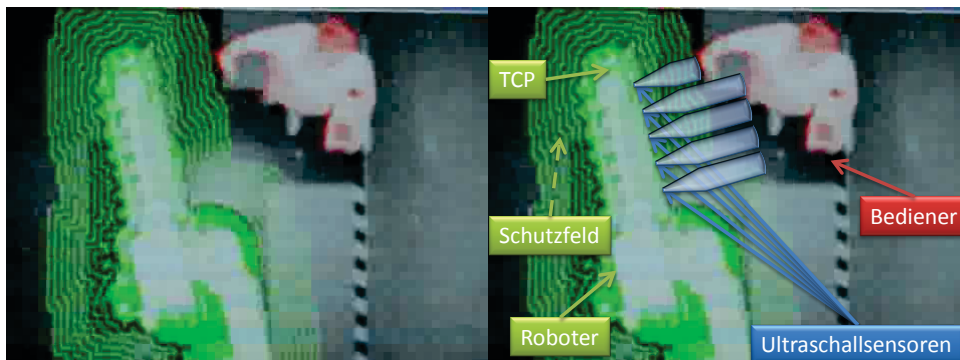
In Unterkapitel 7.1.3 wird dargestellt, den freien Raum über die Abstraktion der o.a. geometrischen, dreidimensionalen Formen der Ultraschallkeulen mittels Voxel - dreidimensionale Pixel - zu bestimmen. Auch hier wird erläutert, warum dieser Ansatz in der Praxis nicht funktioniert.

Der Ansatz aus Unterkapitel 7.1.3 wird in Unterkapitel 7.1.4 über einen Octree, dies ist eine bestimmte Art Voxel, zu speichern und zu komprimieren, erweitert. Zur Bestimmung des freien Raums in der praktischen Anwendung ergab sich zusammen mit den Sensorsystemen eine zu geringe Performanz, weshalb auch dieser Ansatz zur Bestimmung des freien Raums nicht geeignet ist.

In Unterkapitel 7.1.5 wird ein Algorithmus vorgestellt, der im Rahmen dieser Arbeit speziell für die vorgestellten Sensorsysteme entwickelt wurde. Dieser Algorithmus vereinfacht die geometrische Form der Sensorkeulen auf Kugelausschnitte. Diese Kugelausschnitte werden zu einer einfachen Oberflächenstruktur vereint. Mit diesem Algorithmus wird die in der Praxis notwendige Bearbeitungsgeschwindigkeit erreicht.

### 7.1.1 Erfassung aller Sensoren als ein Messwert

Der erste in dieser Arbeit umgesetzte Algorithmus zur Reduzierung der Robotergeschwindigkeit ist die Reduzierung der Geschwindigkeit des TCP, basierend auf der kürzesten gemessenen Distanz aller Ultraschallsensoren. Abbildung 32 zeigt die im Rahmen dieser Arbeit umgesetzte Anwendung dieses Verfahrens. Dazu wurde das entwickelte Programm in ein Programm aus einer früheren Arbeit [153] integriert.



**Abbildung 32: Einbindung der Ultraschallabstände in das in [153] entwickelte Programm, Bild mit und ohne Hervorhebungen**

Die Ultraschallkeulen, die in Abbildung 32 rechts eingezeichnet sind, sind in dieser, durch das Programm erzeugten, bildlichen Darstellung der Sicherheitsabstände nicht vorhanden. Hierzu ist in einem späteren Algorithmus, wie in Kapitel 7.1.2 gezeigt, die Darstellungsform aus Abbildung 33 in das Programm implementiert worden.

Die Größe des Schutzfelds ist im gezeigten Fall abhängig von der Distanz, die der oberste Sensor im Bild misst (kleinster gemessener Abstand). Abhängig von dieser Schutzfeldgröße wird die Geschwindigkeit des TCP des Roboters durch das Programm aus [153] reduziert.

Das Nutzen der kürzesten Distanz für die maximale Geschwindigkeit des TCP hat mehrere Nachteile:

- Die Geschwindigkeit wird Bewegungsrichtungsunabhängig reduziert. Es findet keine Unterscheidung statt, ob der Roboter sich zum Objekt hin, an ihm vorbei oder davon weg bewegt.
- Die Geschwindigkeit wird auch beim Bewegen auf Objekte zu zum Teil unnötig stark reduziert, wenn z.B. der Sensor, der die kürzeste Distanz misst weit vom schnellsten Punkt des Roboterarms entfernt ist.
- In der Regel ist der TCP der Punkt des Roboters, der sich am schnellsten bewegt, da er in der Regel von der fest stehenden Basis am weitesten entfernt ist. In

Ausnahmesituationen, besonders in Singularitäten, kann es jedoch vorkommen, dass andere Teile des Roboters sich schneller bewegen. Die daraus entstehenden Gefahren sind über die Geschwindigkeitsanpassung des TCP nicht abgesichert. Eine sichere Geschwindigkeitsreduzierung mit diesem Verfahren allein über die Festlegung der TCP Geschwindigkeit kann nicht erreicht werden.

Um den dritten Nachteil auszugleichen kann man dieses Verfahren soweit erweitern, dass die maximale Geschwindigkeit aller Achsen bestimmt wird.

Die ersten beiden Nachteile senken die Verfügbarkeit des kollaborierenden Roboters derart, dass die Lösung für die Praxis in der Regel nicht tauglich ist. Dieser Ansatz wird deshalb hier nicht weiter verfolgt.

### 7.1.2 Geometrische Formen der Ultraschallkeulen als Oberfläche vereinen

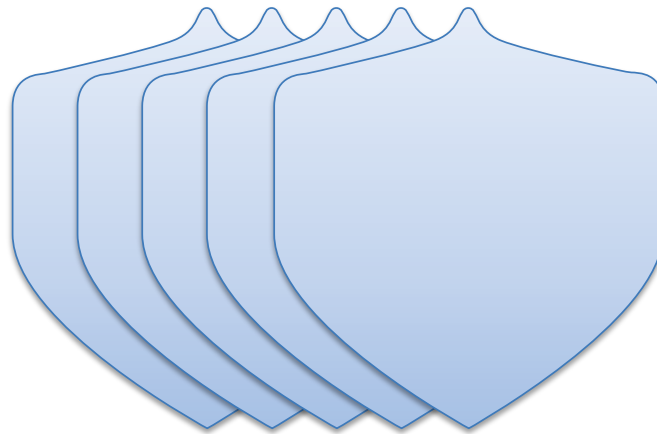
Eine genaue Darstellung des freien Raums erhält man, wenn man ein Abbild der geometrischen Formen jeder einzelnen Sensorkeule (siehe Kapitel 13.1.2 und Kapitel 13.1.1) im Programm erzeugt und diese zu einer Oberfläche eines gemeinsamen freien Raums kombiniert. Abbildung 33 zeigt eine im Rahmen dieser Arbeit realisierte Einbindung der geometrischen Form der Ultraschallkeulen in das in [153] entwickelte Programm.



**Abbildung 33: Einbindung der geometrischen Form der Ultraschallkeulen in das in [153] entwickelte Programm**

Die in [153] realisierte Erfassung des Arbeitsraums mittels einer 3D-Kamera (roter Bediener, grüner Roboter, dunkler/hellblauer Hintergrund) wurde für die in Abbildung 33 gezeigte Darstellung mittels der Programmierschnittstelle „Offene Grafikkbibliothek“ - OpenGL - (Open Graphics Library) (siehe auch Kapitel 8.3) visualisiert. Der Roboter (rot), sowie die an seinem Arm positionierten Ultraschallsensoren (dunkelblau) wurden aus den Werten der Roboterachsstellungen und der Ultraschallsensoren mit OpenGL Objekten visualisiert. Die Werte aller Sensoren wurden über extrinsische Kalibrierung vereinigt, um danach mit OpenGL in einem Bild dargestellt zu werden. Die extrinsische Kalibrierung, Kamera zu Roboter, ist in [153] beschrieben, die extrinsische Kalibrierung, Ultraschallsensoren zu Roboter, wurde von Kurras in [145] gezeigt.

Da Sensorkeulen in der Regel komplexe Formen besitzen ist es kaum möglich, daraus eine einfache gemeinsame Oberfläche zu erstellen. Abbildung 34 zeigt beispielhaft fünf sich überlappende Ultraschallkeulen des in dieser Arbeit verwendeten Bosch Ultraschallsensors (siehe Kapitel 13.1.2).



**Abbildung 34: Fünf sich überlagernde Sensorkeulen (z.B. hier Bosch Ultraschallsensor – siehe Kapitel 13.1.2) bilden eine neue, komplexere Form**

Eine Anwendung dieser Methode zur Bestimmung des freien Raums ist aus diesem Grund nicht zielführend und wird deshalb in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

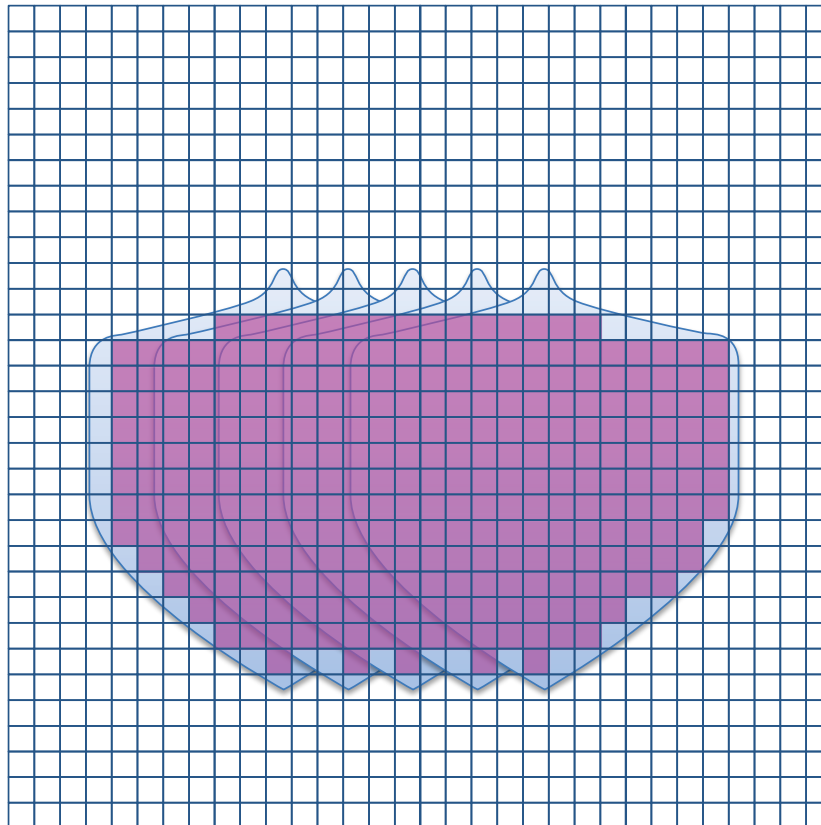
Gleichzeitig ist es nicht zielführend, die Bestimmung der maximal zulässigen Geschwindigkeit über den von jeder einzelnen Keule berechneten freien Raum zu bestimmen. Das Problem der komplexen Oberflächenstruktur wird in diesem Fall lediglich von der Oberfläche der Keulen auf den Roboterarm verlagert. Der Rechenaufwand wird deutlich größer. Ein solcher Algorithmus ist aufgrund der zu erwartenden Zykluszeit damit für die praktische Anwendung nicht zielführend.

### 7.1.3 Kombination aller Sensorwerte in Voxeln

Eine bessere Möglichkeit die Sensorkeulen zu vereinen ist es, sich den komplexen geometrischen Formen der Keulen über Voxel (dreidimensionale Pixel) anzunähern. Hierfür wird zunächst der gesamte Arbeitsraum des Roboters in gleich große Quader, die Voxel, eingeteilt. Danach wird die geometrische Form jeder Sensorkeule einzeln im Voxelraum betrachtet. Solche Voxel, die komplett innerhalb der Form der Keule liegen, werden als freier Raum gespeichert. Die Kombination der freien Voxel aller Sensoren des Sensorsystems ergibt den gemessenen freien Raum.

Die Genauigkeit der Bestimmung des freien Raums ist hierbei abhängig von der Auflösung. Um z.B. einen Raum von  $2m * 2m * 2m$  mit Voxeln von  $1cm$  Kantenlänge zu erfassen müssen  $200^3 = 8.000.000$  Zustände gespeichert werden. Durch die Dreidimensionalität des Voxels verachtfacht sich der Speicherbedarf mit jeder Halbierung der Kantenlänge. Je kleiner die Kantenlänge hierbei gewählt wird, umso genauer lässt sich die Form der Ultraschallkeulen abbilden. Da nur gespeichert werden muss, ob ein Voxel freien Raum enthält oder nicht, kann jedes Voxel in je einem Bit gespeichert werden. 8 Millionen Zustände belegen somit 8 Megabyte. Der Speicherbedarf in diesem Beispiel ist somit, im Vergleich zu heute üblichen Speichermengen, gering. Ein großer Nachteil dieser Methode ist jedoch die nötige Zeit, um diese Datenmenge zu bearbeiten. Nach jeder Messung muss nämlich jede Sensorkeule in diesen Speicher neu eingetragen werden. Dieser Zeitbedarf lässt eine praktische Umsetzung mit den heute üblichen Rechnergeschwindigkeiten nicht zu. Abbildung 35 zeigt die Sensorkeulen aus Abbildung 34 in einem Pixelraster. Die pink dargestellten Pixel liegen vollständig innerhalb der Sensorkeulen. In dreidimensionaler Anordnung werden aus den Pixeln Voxel.

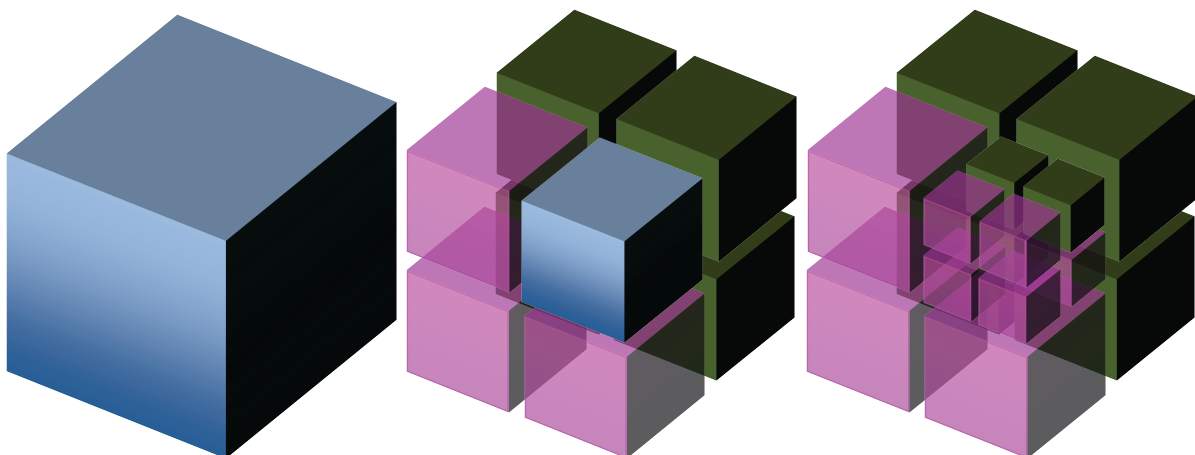




**Abbildung 35: Sensorkeulen im Pixelraste: Pink = freier Raum, durchsichtig = unbekannt / Objekt vorhanden**

### 7.1.4 Kombination aller Sensorwerte in einem Octree

Der Speicherplatz eines Voxelmodells aus Kapitel 7.1.3 und ebenso die Zeit, die ein Algorithmus benötigt dieses komplett zu bearbeiten, kann reduziert werden, wenn zum Speichern der Voxel ein Octree genutzt wird [29]. Ein Octree kombiniert bestimmte, räumlich zusammenhängende Voxel gleichen Inhalts zu größtmöglichen Quadern. Das heißt, ein solcher Teilquader enthält entweder nur freien Raum oder nur belegten Raum. Teilquader, in denen sowohl freier, als auch belegter Raum vorhanden ist müssen weiter in kleinere Quader unterteilt werden. Als Beispiel enthalten die blauen Quader in Abbildung 36 sowohl Raumbereiche, die belegt sind (dunkelgrüne Bereiche) als auch solche, die nicht belegt sind (rosafarbene Bereiche).

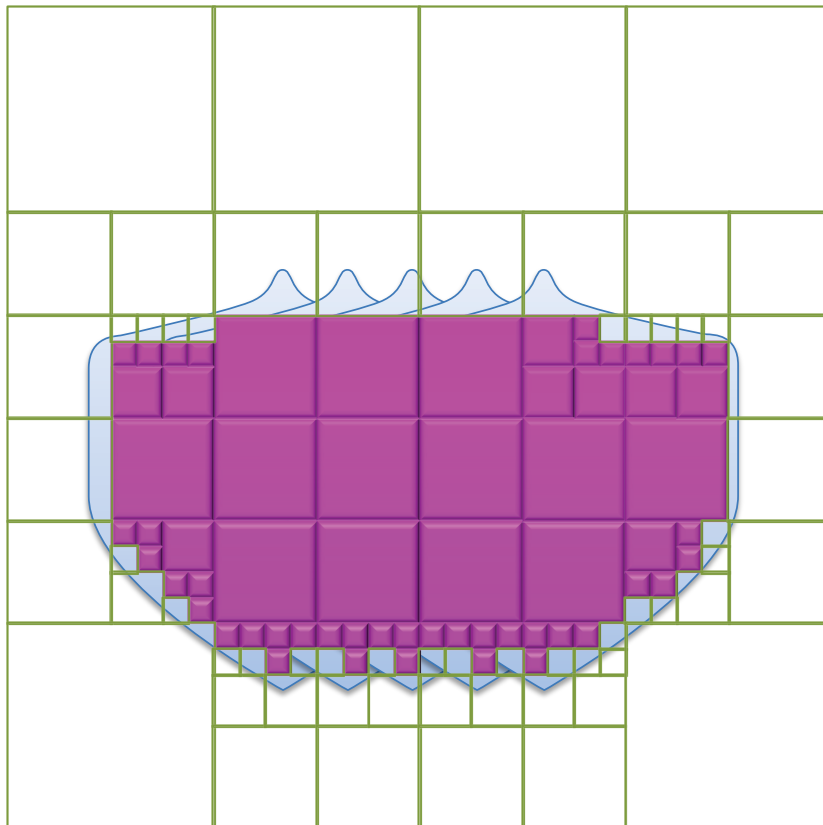


**Abbildung 36: Arbeitsraum als ein Quader dargestellt**

**1) Ursprungsquader; 2) Erste Teilung in acht Teilquader; 3) Erneute Teilung eines Teilquaders**  
 Durch das Teilen des blauen Ursprungsquaders in acht gleichgroße Teilquader können Raumbereiche, die danach als komplett frei (rosa), oder komplett belegt (grün) erkannt

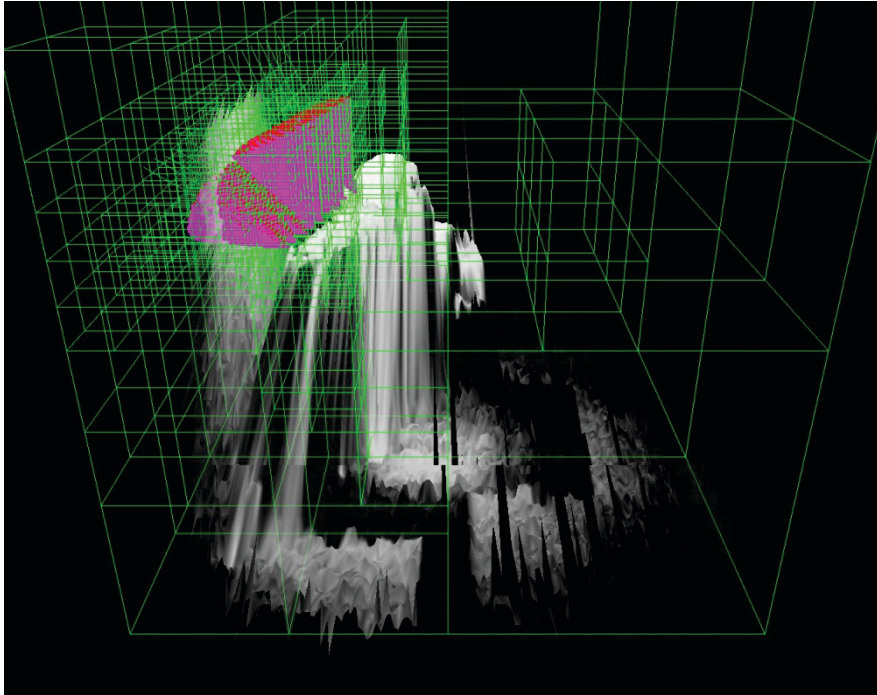
werden, als ein Datensatz abgespeichert werden. Der verbleibende blaue Unterquader, in dem immer noch belegte und unbelegte Bereiche enthalten sind, wird in einem weiteren Schritt erneut in acht gleiche Quader aufgeteilt. In der Praxis wird dies so lange fortgesetzt, bis die entstehenden Quader alle als komplett frei oder komplett belegt erkannt sind oder bis die Kantenlänge der Unterquader eine bestimmte Untergrenze erreicht hat. Im Beispiel aus Kapitel 7.1.3 wurde hierfür eine Untergrenze von 1 cm angenommen. Der Name „Octree“ stammt daher, dass jedes Element einer Ebene sich in acht Teile verzweigt (octo – acht) und die Speicherstruktur meistens in einem Baum angelegt wird (tree – Baum).

Abbildung 37 zeigt die Bereiche, die in Abbildung 35 als komplett frei identifiziert wurden, in einem Quadtree an. Ein Quadtree ist ein zweidimensionaler Octree.



**Abbildung 37: Darstellung der freien Bereiche aus Abbildung 35 in einem Quadtree**

Als Umsetzung der Erfassung des freien Raums im Rahmen dieser Arbeit, wurden die in Kapitel 7.1.2 dargestellten Ultraschallkeulen in einem Octree gespeichert (siehe Abbildung 38). Dieser Programmteil wurde in das in [153] entwickelte Programm implementiert, um die Berechnung des Octree in Kombination mit dem über eine 3D Kamera erfassten Roboter und der Objekte in seiner Umgebung visuell überprüfen zu können.



**Abbildung 38: OpenGL Darstellung des Roboters mit dem von den Sensoren als frei erkanntem Raum (rosa) in einem Octree**

Die Erfahrungen, die durch diese Implementierung gesammelt wurden, zeigen:

- die Daten eines Octree können, im Vergleich zum Voxelmodell, schneller aus den geometrischen Formen der Sensorkeulen aufgebaut werden;
- die gewonnenen Daten des Octree können schneller bearbeitet werden;
- die Laufzeit eines auf einem Octree basierenden Algorithmus ist immer noch zu hoch für die an diese Arbeit gestellte Aufgabe (siehe Kapitel 1.2).

Diese Ergebnisse werden durch die Ergebnisse aus der Bachelorarbeit von Kirfel [148], in der von Kirfel ebenfalls ein Octree implementiert wurde, gestützt.

Im gezeigten Fall ist das Octree-Modell konstant im Raum verankert. Durch die Bewegung des Roboters im Raum ändern sich der Ort und die Ausrichtung der Sensoren zum feststehenden Gitter. Somit müssen alle Sensorkeulen fortlaufend einzeln in den Octree neu einberechnet werden. Eine andere Möglichkeit ist es, den Ursprung des Octrees im Arm des Roboters zu verankern und damit mit dessen Position mitzubewegen. In diesem Fall können für jeden Sensor einzelne Raumbelagungen zu diskreten Messwerten vorberechnet und in Tabellen („Lookup tables“) abgelegt werden. Dies erlaubt eine beschleunigte Berechnung des freien Raums. Die Werte anderer, ebenso abgesicherter Teile des Roboters, wie z.B. des Endeffektors, müssen hierbei in diesen sich mit dem Arm bewegenden Raum transferiert werden. Der Nachteil bei dieser Methode ist, dass die Raumbelagung durch bekannte Objekte, die bei einem konstanten Octree direkt verglichen werden kann, ebenfalls in den Raum des Arms transformiert werden muss bzw. der freie Raum um den Arm in den ursprünglichen Raum der Objekte. Diese Umwandlungen kosten erneut Rechenzeit, so dass hier kein Vorteil gegenüber der in [148] ausführlich beschriebenen Methode besteht. Durch Fehler, die dadurch bedingt sind, dass die Gitternetze (festes zu bewegliches Netz) in unterschiedlichen Winkeln zu einander stehen, kommt es zusätzlich im Rahmen der Transformation zu nicht zu vermeidenden Ungenauigkeiten.

Der Octree kann im Rahmen dieser Arbeit allerdings genutzt werden, um die statische Umgebung des Arbeitsplatzes einzulernen (siehe Kapitel 7.4.2).

## 7.1.5 Kombination aller Sensorwerte zu einer Außenfläche des freien Raums

Aus der Evaluierung bekannter Methoden (Kapitel 7.1.1 bis 7.1.4) ist hervorgegangen, dass lediglich die Umsetzung in Kapitel 7.1.1 ausreichend schnell wäre. Diese Methode ist allerdings, wie im Kapitel 7.1.1 beschrieben, für den Einsatz in der Sicherheitstechnik nicht ausreichend genau genug. Die in Kapitel 7.1.2 bis 7.1.4 getesteten Algorithmen sind in der praktischen Anwendung ungeeignet für eine ausreichend schnelle Bestimmung des freien Raums und damit einer ausreichend schnellen Bestimmung der maximal erlaubten Geschwindigkeit.

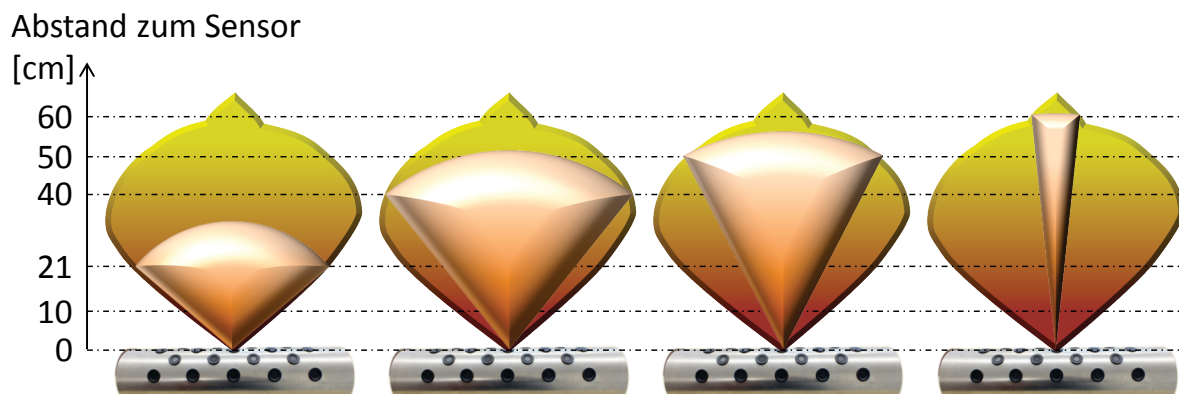
Um eine schnelle und möglichst genaue Bestimmung des freien Raums um den Roboterarm zu ermöglichen, wird deshalb eine im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Methode vorgestellt, die auf einer geometrischen Vereinfachung der Darstellung der Sensorkeulen basiert. Diese Methode weicht von den in Kapitel 7.1.1 bis 7.1.4 beschriebenen Methoden ab und verfolgt einen anderen Ansatz. Ziel ist hierbei die direkte Erstellung der Gesamtoberfläche des Raums, der um den Roboterarm frei von Fremdobjekten ist, ohne dazu den Umweg über die Bestimmung des Volumens des Raums zu nehmen. Sie ist im Hinblick auf einen möglichst geringen Rechenaufwand bei gleichzeitiger Einhaltung der sicherheitstechnisch geforderten Zweikanaligkeit (siehe Kapitel 3.2.3.2.1) hin optimiert worden.

In Kauf genommen wird bei dieser Methode, dass durch die Vereinfachung der Sensorkeulen Messreichweite verloren geht und durch die Erstellung der Oberfläche der als frei angezeigte Raum gegenüber dem von den Sensoren als frei gemessenen Raum reduziert wird.

Diese Lösung wurde erstmalig in [158] schriftlich dargelegt und in [161] vorgestellt.

### 7.1.5.1 Geometrische Vereinfachung der Sensorkeulen

Der erste Schritt, die geometrische Vereinfachung der Sensorkeulen, ist in Abbildung 39 am Beispiel der Standardkeulen (rot) der Bosch Ultraschallsensoren (siehe Kapitel 13.1.2) dargestellt. Die Sensorkeulen werden auf mathematisch einfacher beschreibbare Kugelausschnitte (orange) reduziert. Diese müssen dabei komplett innerhalb der Messkeulen der Sensoren liegen, da nur in diesem Bereich Informationen über den freien Raum vorliegen. Durch die Form der Sensorkeulen muss der Öffnungswinkel der Kugelausschnitte umso enger werden, je größer dessen Kugelradius ist, um diese Bedingung zu erfüllen.

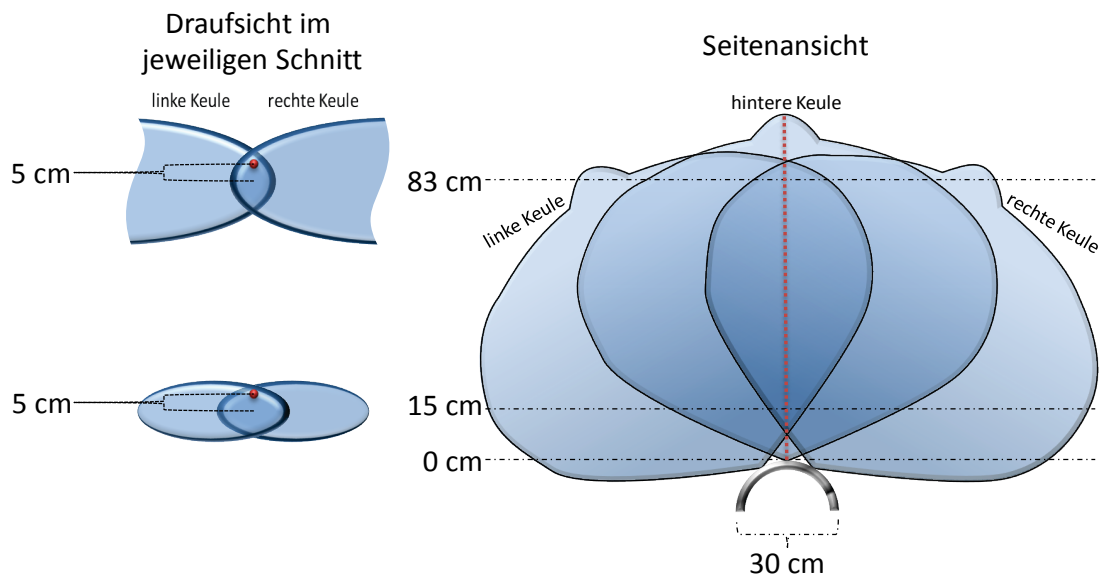


**Abbildung 39: Beispiele für die Vereinfachung der geometrischen Formen der Sensorkeulen zu Kugelausschnitten**

Der erste dargestellte Kugelausschnitt in Abbildung 39 deckt den gesamten Öffnungswinkel der Sensorkeule ab. An seinem unteren Rand der Kalotte erreicht er allerdings nur eine Höhe von ca. 21 cm. Das andere Extrem ist der vierte dargestellte Kugelausschnitt, der bei einer Reichweite von 60 cm nur einen geringen Öffnungswinkel zulässt. Das bedeutet, je größer der Kugelradius des Kugelausschnitts wird, umso kleiner wird der Öffnungswinkel.

Um die Sicherheit des Sensorkonzepts zu gewährleisten, muss der Messwert eines Sensors im Rahmen dieser Arbeit immer von einem der ihn umgebenden Sensoren verifiziert werden können, um Redundanz zu gewährleisten. Das bedeutet, seine maximale Messweite ist auch durch die Überdeckung benachbarter Sensorkeulen limitiert.

In Abbildung 25 aus Kapitel 6.2.1 wird gezeigt, dass bei der Demonstrationshalbschale von Kirfel (Durchmesser 18 cm) die Keulenbreite und Keulenreichweite bei Standardempfindlichkeit der Sensoren genügt, um eine Überlagerung der Sensorkeulen in ausreichendem Maß zu erreichen. Im Rahmen dieser Arbeit muss aus baulichen Gründen eine Halbschale mit 30 cm Durchmesser benutzt werden, um diese am Arm des Roboters befestigen zu können. Durch die Wahl der höheren Empfindlichkeit der Sensoren (siehe Kapitel 13.1.2), kann der Winkelversatz von  $30^\circ$  beibehalten werden. Dabei wird ab einem Abstand von ca. 10 cm zur Halbschale weiterhin eine redundante Überdeckung der Sensorkeulen erreicht. Abbildung 40 zeigt in der Seitenansicht, dass die redundante Überdeckung mit erhöhter Sensorempfindlichkeit bei ca. 15 cm Abstand vom Sensor beginnt und bis ca. 83 cm Abstand besteht. Hierbei muss der Versatz des mittleren Sensors von 5 cm in der Tiefe berücksichtigt werden (siehe Kapitel 6.2.1) und der Umstand, dass der horizontale Öffnungswinkel der Sensoren größer ist als der Vertikale (siehe Kapitel 13.1.2). Daraus resultiert die ovale Form in der Draufsicht in Abbildung 40.

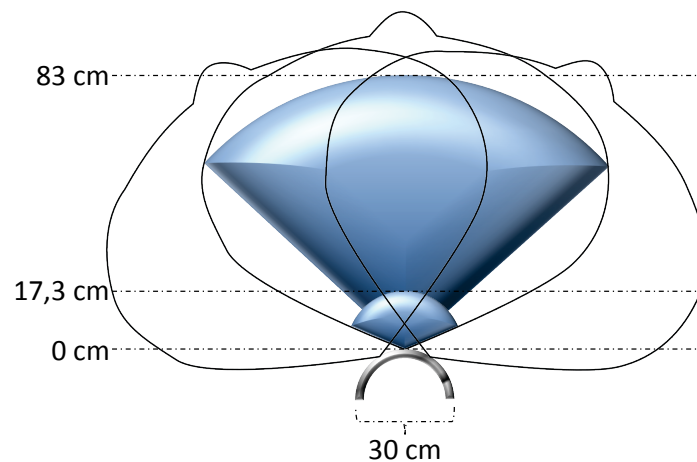


**Abbildung 40: Abdeckung der Sensorkeulen bei empfindlicher Einstellung in der Seitenansicht, der mittlere Sensor ist 5 cm hinter den seitlichen angeordnet**

Der Versatz von 5 cm bedeutet für die Überlappung, wie in der Draufsicht gezeigt, dass bei 15 cm Abstand vom Sensor diese auf jeden Fall auch mindestens senkrecht über dem entsprechenden Sensor (rote Punkte / rot gepunktete Linie) beginnt. Weiterhin ergibt sich, dass auch bei 83 cm Abstand die Überlappung noch gegeben ist. Hieraus ergibt sich für die Anordnung ein redundanter Überwachungsbereich von mindestens 15 bis 83 cm Abstand senkrecht über jedem Sensor. Der redundante Bereich senkrecht zur Halbschale zwischen den einzelnen Sensoren, der durch den jeweils zentralen Sensor und einen der ihn umgebenden Sensoren abgedeckt wird, ist dabei über jedem Punkt der Halbschale größer, als der vorgenannte Bereich.

Für eine Reihe von Sensoren entlang des Roboterarms kann der Anfang der redundanten Überdeckung mit der Formel für die Höhe eines gleichseitigen Dreiecks  $h = \frac{\sqrt{3}}{2} a$  berechnet werden, wenn für den vertikalen Öffnungswinkel der Sensoren die vom Hersteller angegebenen  $\pm 30^\circ$  genutzt werden. Wird der Abstand vom linken Nachbarsensor zum rechten Nachbarsensor von 20 cm in diese Formel eingesetzt, ergibt sich eine Höhe und damit der Abstand des Beginns der redundanten Überdeckung von ca. 17,3 cm. Das Ende dieses Bereichs liegt bei ca. 88 cm und damit außerhalb des vorher bestimmten Bereichs von 83 cm.

Somit kann ein Bereich um die Halbschale von ca. 17,3 bis 83 cm auf jeden Fall als redundant überwacht angenommen werden. Die später, für die Erstellung der Oberfläche des freien Raums, genutzten vereinfachten Kugelausschnitte aus Abbildung 39 können darin wie in Abbildung 41 dargestellt in Abhängigkeit vom gemessenen Wert eingefügt werden.



**Abbildung 41: Graphische Bestimmung des Sensorbereichs, der von allen umliegenden Sensoren erfasst wird**

### 7.1.5.2 Vereinigung der Oberflächen der Kugelausschnitte zu einer gemeinsamen Oberfläche

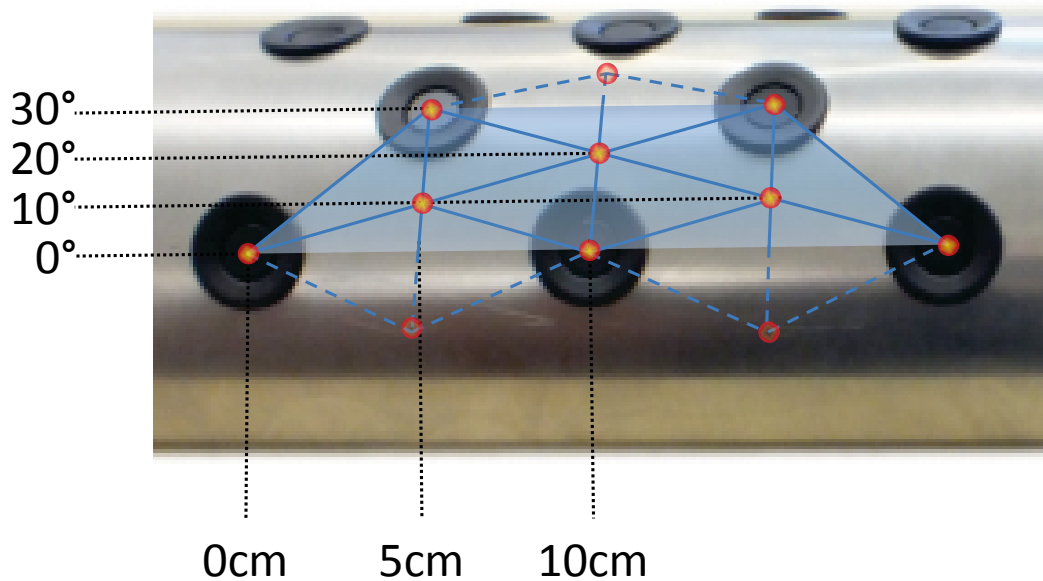
Um die Gesamtoberfläche des Raums, der um den Roboterarm frei von Fremdobjekten ist, zu bestimmen, ohne dazu den Umweg über die Bestimmung des Volumens des Raums zu nehmen, werden die Oberflächen der einzelnen Kugelausschnitte zu einer gemeinsamen Oberfläche vereinigt. Hierbei muss auf die Einhaltung der geforderten Redundanz geachtet werden (siehe Kapitel 3.2.3.2.1).

#### 7.1.5.2.1 Verlustfreie Vereinigung der Oberflächen

Ein erster Ansatz der Vereinigung der Oberflächen der Kugelausschnitte ist es, die Schnittkanten benachbarter Kugeln zu berechnen und aus den so entstehenden Schnittbahnen eine zusammenhängende Oberfläche zu formen. Dieser Ansatz würde allerdings verlangen, aus vielen Kugelpaaren durch Berechnung der Schnittbahn Kurven zu berechnen, die danach wieder mit weiteren Kugeln bzw. anderen Schnittbahnen geschnitten werden müssen. Dieser theoretisch denkbare Ansatz führt in der Praxis allerdings zu einem, für die praktische Anwendung, immer noch zu großem Rechenaufwand. Dazu kommt, dass die notwendige Validierung der Software (siehe Kapitel 3.2.3.1) mit einem erheblichen Aufwand verbunden ist. Zusätzlich ist die entstehende Fläche zwar weniger speicherintensiv als die in Kapitel 7.1.2 bis 7.1.4 beschriebenen Lösungen, die Komplexität der Fläche führt aber ebenfalls bei der später durchzuführenden Kollisionsbestimmung mit dem freien Raum zu einem erhöhten Rechenaufwand.

#### 7.1.5.2.2 Rasternetz zur Vereinigung der Oberflächen

Aus oben genanntem Grund wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode basierend auf einem Rasternetz entwickelt. Dieses Rasternetz besteht aus Geraden, die vom Mittelpunkt der Halbschale aus senkrecht durch die Oberfläche der Halbschale verlaufen. Die Anordnung des Rasters ist in Abbildung 42 gezeigt.



**Abbildung 42: Anordnung des Rasternetzes**  
**rote Punkte: Durchstoß durch die Oberfläche der Halbschale**  
**blaue Linien: Verbindung der Durchstoßpunkte zu einem Gitternetz**

Das Rasternetz ist so angeordnet, dass jeder Sensor sowie die Mittelpunkte aus drei benachbarten Sensoren senkrecht durchdrungen werden. In ihrem weiteren Verlauf durchdringen die Rasterlinien dann die Oberfläche der Kugelausschnitte aus Kapitel 7.1.5.1.

Bei diesem Ansatz erfolgt keine Vereinigung der tatsächlichen Oberflächen der Kugelausschnitte (siehe Kapitel 7.1.5.2.1). Stattdessen werden aus dem Rasternetz und den Oberflächen der einzelnen Kugelausschnitte Schnittpunkte berechnet, die ein dreidimensional verformtes Gitternetz bilden. Die Verbindungslinien von je drei benachbarten Punkten des Gitternetzes bilden die äußeren Kanten einzelner Oberflächen, die jeweils ein Dreieck bilden. Die Aneinanderreihung der Dreiecke bildet eine lückenlose Grenze des freien Raums um den Roboterarm. Diese Gesamtfläche berührt die Kugelausschnitte an ihren Schnittpunkten mit dem Rasternetz und liegt dabei immer innerhalb des als frei gemessenen Raums. Der durch diese mathematische Vereinfachung für nachfolgende Kollisionsbestimmungen verloren gegangene freie Raum ist gering. Die mathematische Komplexität des Problems und der damit verbundene Rechenaufwand werden mit diesem Ansatz jedoch stark reduziert. Der notwendige Rechenaufwand wird in Kapitel 9.1 dargestellt.

Abbildung 43 zeigt die Rasterlinien von der Seite und von vorne. Abbildung 44 zeigt die fertige dreidimensionale Umsetzung an der Halbschale am Roboterarm und die hierbei entstehenden, oben beschriebenen Dreiecke der äußeren Hülle des freien Raums (rote Fläche).

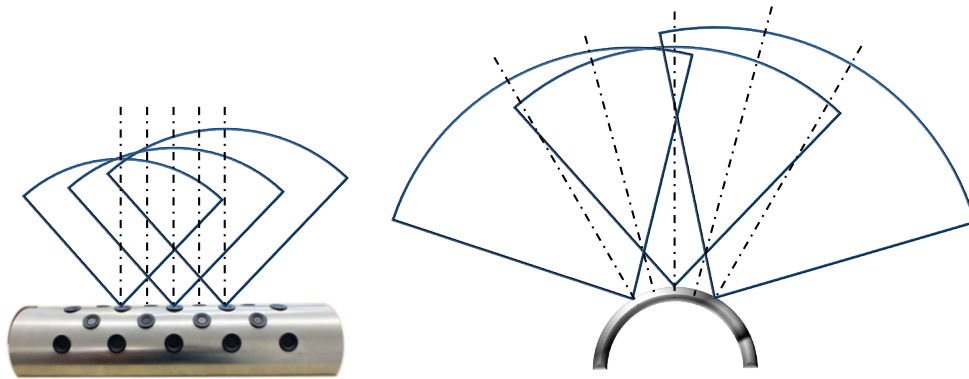


Abbildung 43: Darstellung der Stützlinien durch und zwischen den Sensorkeulen im zweidimensionalen Raum

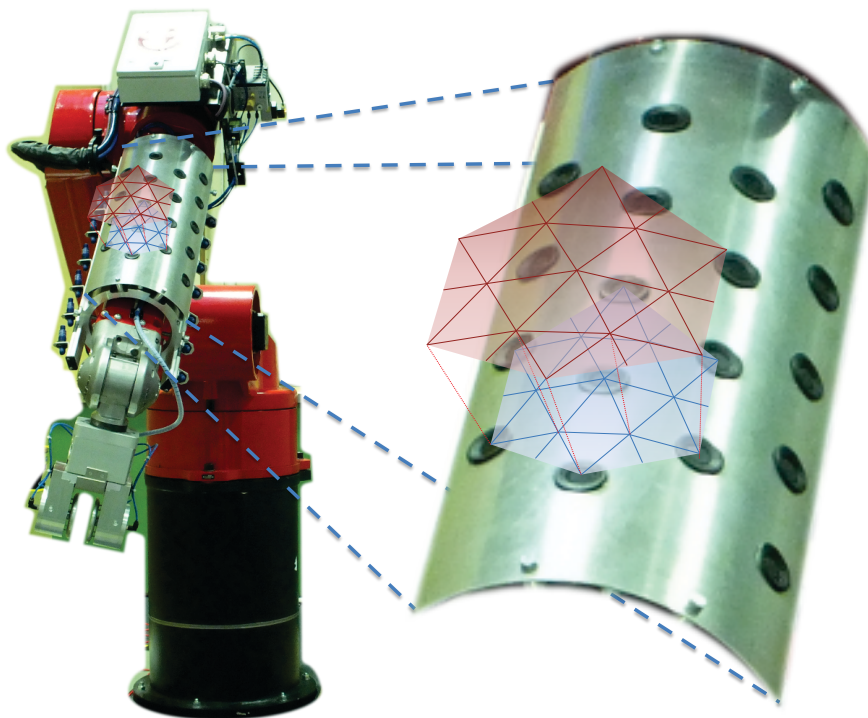


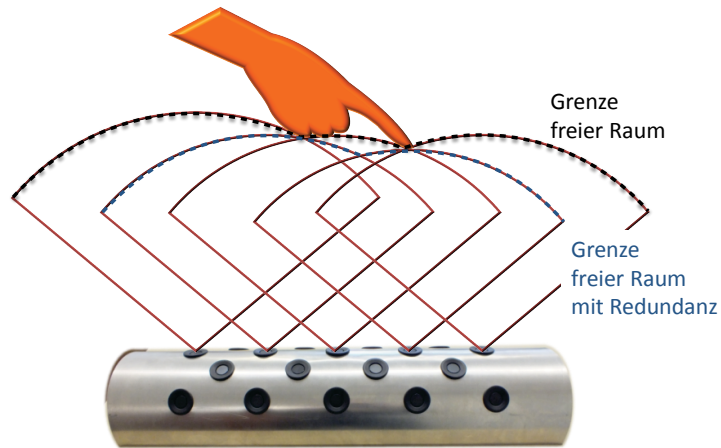
Abbildung 44: Ausschnitt der äußeren Fläche um den Reis RV-30-16, blau: an der Schutzeinrichtung anliegend, rot: über der Schutzeinrichtung

### 7.1.5.2.3 Algorithmus zur einkanaligen Vereinigung der Oberflächen mittels Rasternetz

Zur besseren Veranschaulichung wird der Algorithmus in diesem Kapitel für ein zweidimensionales System am Beispiel aus Abbildung 45 erläutert. Abbildung 45 zeigt die Halbschale von der Seite zusammen mit den zweidimensional dargestellten Kugelausschnitten der Sensoren einer Reihe, die sich aus den gemessenen Abständen des jeweiligen Sensors zur gezeigten Hand ergeben.

Diese Lösung wurde erstmalig in [158] schriftlich dargelegt und in [161] vorgestellt.

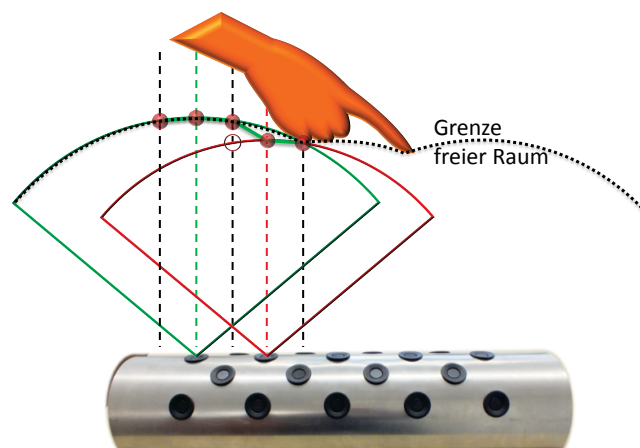




**Abbildung 45: Kugelausschnitte, die sich aus den Messwerten der Sensoren bis zur Hand ergeben, inklusive der Grenzen zum einfach und redundant gemessenen tatsächlichen freien Raum**

Zur besseren Veranschaulichung ist der Fehler, der die Messwerte bei zeitgleichem Aussenden des Messsignals durch die Sensoren geringfügig reduzieren kann (siehe Kapitel 6.2.2), in Abbildung 45 außer Acht gelassen worden. Auf die Logik des Algorithmus hat der Fehler keinen Einfluss, da der Algorithmus lediglich auf dem erfassten Messwert aufbaut und dieser durch einen solchen Fehler nur zur sicheren Seite hin leicht verfälscht sein kann. Fehlertoleranzen in den Messwerten müssen vor Anwendung des Algorithmus zur Berechnung der Gesamtoberfläche des angezeigten freien Raums vom Messwert subtrahiert werden. Sie haben jedoch keinen Einfluss auf die Logik dieses Algorithmus.

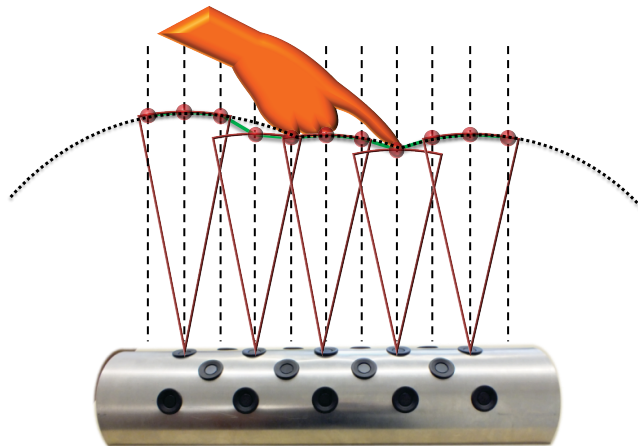
Abbildung 46 zeigt die Schnittpunkte des Rasternetzes mit den Kugelausschnitten am Beispiel der ersten beiden Sensoren. Die Kugelausschnitte werden hier nur mit den jeweiligen Linien des Rasternetzes direkt über ihrem zugehörigen Sensor (rot mit rot, grün mit grün) und den direkt neben ihnen liegenden Linien (schwarz) geschnitten. Die Verbindungslinien zwischen benachbarten Schnittpunkten (grüne Linie) liegen dabei innerhalb der Grenzen des tatsächlichen freien Raums (schwarze gepunktete Linie). Bei der mittleren, schwarzen Rasterlinie wird der Schnittpunkt ausgewählt, der weiter von der Halbschale entfernt liegt, da dieser am Ende des tatsächlichen freien Raums liegt.



**Abbildung 46: Schnittpunkte zwischen dem Raster und den ersten beiden Kugelausschnitten**

Abbildung 47 zeigt die Schnittpunkte aller in Abbildung 45 gezeigten Kugelausschnitte mit dem Rasternetz. Da die Kugelausschnitte nur mit ihrer eigenen und den nebenliegenden Rasterlinien geschnitten werden, können sie mathematisch auf entsprechend enge Öffnungswinkel reduziert werden. Der Abstand der Sensoren kann bei Anwendung dieses Algorithmus also maximal so groß gewählt werden, dass der mögliche Öffnungswinkel nach Kapitel 7.1.5.1 größer, oder gleich dem vom Algorithmus verwendeten Öffnungswinkel ist.

Dies ist, neben der im Kapitel 7.1.5.1 dargestellten Beschränkung der möglichen Messweite, der zweite begrenzende Parameter für die Messweite des Sensorsystems.



**Abbildung 47: Mathematische Reduzierung der Kugelausschnitte auf die notwendige Breite und Schnittpunkte zwischen dem Raster und allen Kugelausschnitten**

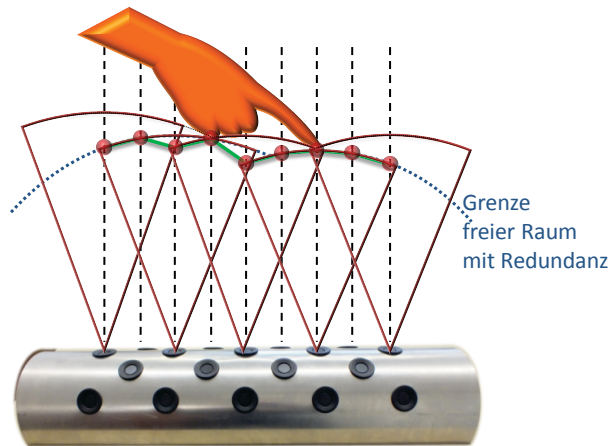
Die in diesem Kapitel dargestellte Anwendung des Algorithmus erreicht nicht die sicherheitstechnisch geforderte Zweikanaligkeit (siehe Kapitel 3.2.3.2.1). Die durch die Sensoren verlaufenden Rasterlinien werden nur mit einem Kugelabschnitt geschnitten. Die zwischen den Sensoren liegenden Rasterlinien schneiden zwar zwei Kugelabschnitte, allerdings wird hier der äußere Schnittpunkt für die Bestimmung der Oberfläche des angezeigten freien Raums gewählt, womit auch hier keine Redundanz vorliegt.

Im folgenden Kapitel wird deshalb der Algorithmus auf Zweikanaligkeit erweitert.

#### **7.1.5.2.4 Erweiterung des Algorithmus auf zweikanalige Vereinigung der Oberflächen mittels Rasternetz**

Zum Erreichen der Zweikanaligkeit müssen alle Rasterlinien mindestens zwei Kugelabschnitten schneiden. Durch das vorgesehene geradlinige Verbinden der Schnittpunkte zur Oberfläche des angezeigten freien Raums ist es allerdings notwendig, die Rasterlinien die senkrecht durch einen Sensor verlaufen mit drei Kugelabschnitten zu schneiden (dem Kugelabschnitt des Sensors selbst sowie den Kugelabschnitten der nebenliegenden Sensoren). Der ausgewählte Schnittpunkt muss im Gegensatz zum einkanaligen System (siehe Kapitel 7.1.5.2.3) immer der innerste sein, damit gewährleistet ist, dass die Verbindungslinie innerhalb des redundant erfassten Bereiches bleibt. Durch die gerade Verbindung mit nebenliegenden Schnittpunkten kann es ansonsten dazu kommen, dass der zweikanalig überwachte Raum verlassen wird.

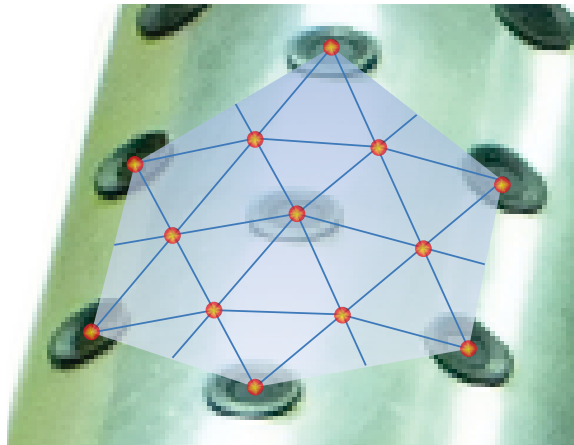
Abbildung 48 zeigt die resultierenden Schnittpunkte und die für ein redundantes Sensorsystem mindestens benötigte Breite der Kalotte der Kugelabschnitte.



**Abbildung 48: Erweiterung der Schnittpunktbestimmung um redundante Messergebnisse zu erreichen**

Die blau gepunktete Linie zeigt den Bereich an, der im Beispiel zweikanalig als tatsächlich frei gemessen wird. Durch die Verbindung der Schnittpunkte entsteht die in Abbildung 48 dargestellte grüne Linie, die innerhalb des zweikanalig überwachten, tatsächlichen freien Raums liegt.

In den dreidimensionalen Raum übertragen bedeutet dies, dass der aus dem Messwert eines Sensors gebildete Kugelabschnitt mit der ihn durchstoßenden Rasterlinie und 12 weiteren ihn umgebenden Rasterlinien geschnitten werden muss. Abbildung 49 zeigt die Positionen der Rasterlinien für einen Sensor.



**Abbildung 49: Durchstoßpunkte der Rasterlinien (orange) die mit dem Kugelabschnitt des mittleren Sensors geschnitten werden müssen.**

Durch das in Kapitel 7.1.5.2.2 erläuterte Verbinden der Schnittpunkte zu Dreiecksflächen entsteht die dort gezeigte Oberfläche, die nun im redundant überwachten Bereich liegt.

Die mathematischen Zusammenhänge des Algorithmus sind in Kapitel 14 (Anhang III) dargestellt.

#### 7.1.5.2.5 Vorbereiten der Oberfläche für Kollisionsberechnung

Die in Kapitel 7.1.5.2.4 erstellte Oberfläche des freien Raums wird später in dieser Arbeit für Kollisionsbestimmungen eingesetzt. Im Rahmen der Pfadplanung mobiler und industrieller Roboter kann die Karte des freien Raums für die Durchführung der Kollisionsberechnung häufig optimiert werden [153]. Die hier angewandte Methode für gleichmäßig geformte Körper ist die Reduktion des Körpers auf seinen Mittelpunkt, bei gleichzeitiger Reduktion aller Abstände zur Umgebung. Durch die regelmäßige Form der benutzten Halbschale ist es möglich, diese Optimierung auch für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung durchzuführen.

Abbildung 50 zeigt die Reduzierung der Halbschale auf ihre Mittellinie und die damit verbundene äquivalente Verschiebung der Oberfläche des angezeigten freien Raums. Dazu

werden lediglich die Schnittpunkte auf den Rasterlinien um einen festen Wert (Radius der Halbschale) hin zur Mittellinie der Halbschale verschoben. Für das Ergebnis der Berechnung, ob nach einer Bewegung der Halbschale eine Kollision erfolgt, spielt es keine Rolle, ob die Oberfläche der Halbschale gegen die ursprüngliche Oberfläche des angezeigten freien Raums (grün gestrichelte Linie) oder die Mittelachse der Halbschale gegen die reduzierte Oberfläche (grüne Linie) geprüft wird. Die zweite Variante ist allerdings mit wesentlich weniger Rechenaufwand verbunden. Der zusätzliche Rechenaufwand für die zunächst durchzuführende Reduktion des Raums ist gering, da nur die Ortsvektoren der Schnittpunkte um eine vorher festgelegte Länge gekürzt werden müssen.

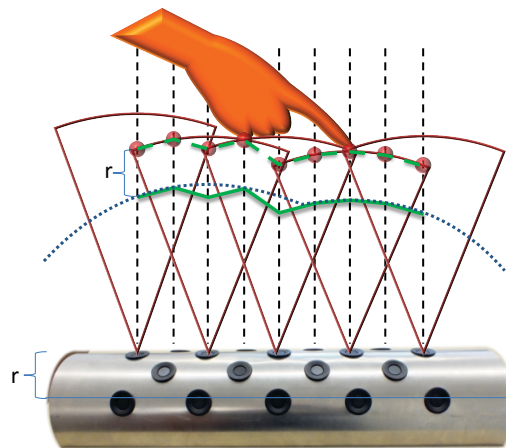


Abbildung 50: Reduzierung des angezeigten freien Raums um den Radius der Halbschale

#### 7.1.5.2.6 Anpassen der Oberfläche an den erforderlichen Mindestabstand

Basis der Berechnung der zulässigen maximalen Geschwindigkeit (siehe Kapitel 7.2) ist der sicherheitstechnisch zulässige Mindestabstand (siehe Kapitel 3.2.4.3), der durch die mögliche Annäherung des Menschen an den Roboter zwischen zwei Messzyklen entsteht. Im Rahmen dieser Arbeit sind dies 20 cm bei einer Gesamtreaktionszeit von 100 ms.

Hierzu wird die Oberfläche, wie in Abbildung 51 gezeigt, äquivalent zu Kapitel 7.1.5.2.5 an jeder Rasterlinie um die Distanz des Mindestabstands nach EN ISO 13855 näher an die Halbschale gezogen.

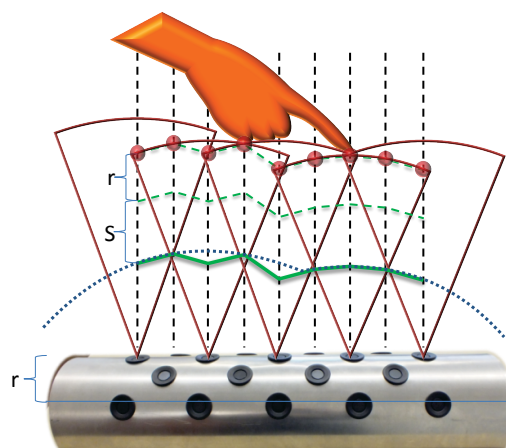
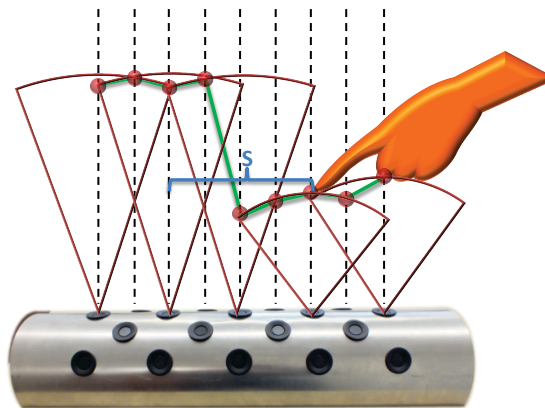


Abbildung 51: Weitere Reduzierung des angezeigten freien Raums um den Mindestabstand  $S$  (siehe Kapitel 3.2.4.3)

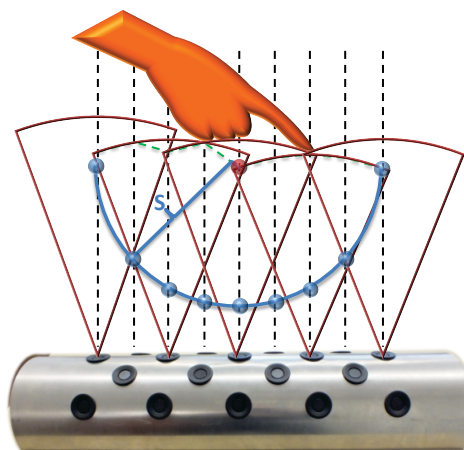
#### 7.1.5.2.7 Anpassen der Oberfläche an die Möglichkeit der waagerechten Eindringung

Neben der in Kapitel 7.1.5.2.6 beschriebenen senkrechten Annäherung von Personen an die Schutzeinrichtung muss auch ein mögliches waagerechtes Eindringen in den ermittelten freien Raum beachtet werden. Abbildung 52 zeigt diese mögliche waagerechte Eindringung.



**Abbildung 52: Mögliche Eindringung in den ermittelten freien Raum, waagrecht zur Schutzeinrichtung**

Um eine Eindringung des Menschen in den geschützten Bereich zu verhindern, muss die Anpassung des freien Raums grundsätzlich um den Sicherheitsabstand nicht nur senkrecht zur Schutzeinrichtung erfolgen, sondern kreisförmig (im dreidimensionalen kugelförmig) um die ermittelten Schnittpunkte. Für den mittleren Punkt aus Abbildung 51 ergeben sich hierdurch die in Abbildung 53 blau dargestellten Punkte. Aus allen diesen Punkten jeder Rasterlinie ist erneut derjenige auszuwählen, der der Schutzeinrichtung am nächsten liegt.



**Abbildung 53: Übertragung einer gemessenen Eindringung auf benachbarte Rasterlinien**

Bei einem ausreichend großen Öffnungswinkel der Sensoren wird diese Methode unter Umständen nicht benötigt, da alle Sensoren derselben Reihe dann ähnliche Werte messen. In diesem Fall wird der Punkt, der der Schutzeinrichtung am nächsten ist, durch die Position des Schnittpunkts der eignen Rasterlinie vorgegeben. Somit kann auf die in Kapitel 7.1.5.2.6 beschriebene Methode zurückgegriffen werden, da diese weniger Rechenaufwand bedeutet (siehe Kapitel 14.1.3). Durch den großen Öffnungswinkel der verwendeten Sensoren und die stets auftretenden Kreuzechos konnte für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung auf diesen Ansatz verzichtet werden.

#### **7.1.5.2.8 Fazit zur Methode der Vereinigung der Oberflächen mittels Rasternetz**

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode hat gegenüber den anderen gezeigten Methoden wesentliche für die Praxis relevante Vorteile:

- Der freie Raum um den Roboterarm wird durch eine regelmäßige, mathematisch einfach darstellbare Oberfläche begrenzt.
- Die Erstellung der Oberfläche basiert auf schnell ausführbaren mathematischen Formeln.
- Der redundant überwachte Raum ist einfach darstellbar.

- Die Reduktion des freien Raums für verschiedene Zwecke ist schnell und einfach durchführbar.

Diese Vorteile führen zu einer kurzen Rechenzeit, die pro Messzyklus der Sensoren mehrere Berechnungen des freien Raums und der maximal erlaubten Geschwindigkeit des Roboters zulässt. Durch die kurze Rechenzeit, deren Wert Teil des Nachlaufs des Robotersystems ist, wird der Wert des Mindestabstands von Mensch zu Roboter nur geringfügig beeinträchtigt.

Lediglich der Verlust an Raum, der von den Sensoren als frei gemessen wurde, ist ein geringer Nachteil. Dieser Verlust ist in der Abbildung 48 am Unterschied des tatsächlich freien, zum angezeigten freien Raum zu erkennen. In der praktischen Anwendung ist dieser Verlust allerdings eher gering, da benachbarte Sensoren erfahrungsgemäß ähnliche Sensorwerte anzeigen.

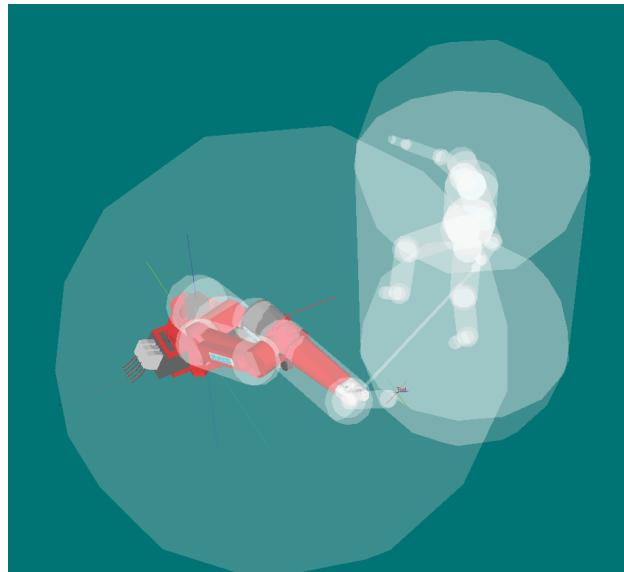
## 7.2 Bestimmung der zulässigen Geschwindigkeit

Die Kenntnis der Parameter des freien Raums aus Kapitel 7.1.5 ist die Basis für die Bestimmung der maximal zulässigen Geschwindigkeit des Roboters. Hierzu existieren verschiedene Algorithmen, die im Folgenden beschrieben werden.

### 7.2.1 Bekannte Ansätze zur Bestimmung der maximal zulässigen Geschwindigkeit

Eine Möglichkeit die maximal zulässige Geschwindigkeit eines Roboterarms in seiner Umgebung zu bestimmen ist es, den kürzesten Abstand des Roboters zum freien Raum zu berechnen und die Geschwindigkeit hierauf anzupassen. In [153] wurde eine Methode vorgestellt, dies durch Expandieren des virtuellen Roboterobjekts bis zur Kollision mit einem Punkt der Oberfläche des freien Raums durchzuführen. Diese Methode, die in [153] im zweidimensionalen Raum eingesetzt wurde, ist im dreidimensionalen Raum allerdings wegen der Rechenintensität praktisch nicht umsetzbar.

Eine weitere Möglichkeit ist die Bestimmung der Vektoren zwischen konkreten Teilen des Roboters und konkreten Teilen des umgebenden Raums. Henrich beschreibt hierzu eine Methode, den Roboter in einem Kugelmodell nachzubilden und von diesem ausgehend alle Abstände zu einzelnen Pixeln der eindringenden Objekte konservativ abzuschätzen. [106] Im Projekt EsMiP (siehe Kapitel 1.4.1) wurde eine ähnliche Methode, ebenfalls auf Vektoren basierend, von Reis Robotics genutzt, um den Abstand zwischen einzelnen Körperteilen des Menschen und den Armteilen sowie dem Werkzeug des Roboters zu bestimmen (siehe Abbildung 54) [135]. Beide Methoden setzen für ihre Distanzberechnung voraus, dass das eindringende Objekt bereits ermittelt wurde und damit bekannt ist. Dadurch kann die Berechnung der Abstände auf eine Teilmenge des Arbeitsraums begrenzt werden.



**Abbildung 54: Abstandsbestimmung zwischen Roboter und einzelnen Körperteilen des Menschen**

Quelle: Som, Reis GmbH & Co. KG Maschinenfabrik [135]

Alle oben aufgeführten Methoden haben für das in dieser Arbeit betrachtete Ziel der Sicherheit den Nachteil, dass sie unabhängig von der Bewegungsrichtung des Roboters sind. Hierdurch müssen die Abstände vom Roboterarm ausgehend in alle Richtungen gemessen werden. Im Ergebnis wird der Roboter dann über die kürzeste ermittelte Distanz abgebremst. Dies bedeutet, dass ein Roboter, der sich von der Oberfläche des freien Raums und damit zur sicheren Seite entfernt, ebenso abgebremst wird, wie einer der sich dieser nähert.

## 7.2.2 Entwickelter Ansatz zur Bestimmung der maximal zulässigen Geschwindigkeit

Ziel dieser Arbeit ist es, den gesamten Körper des Roboterarms auf Kollision mit der Oberfläche des freien Raums zu testen, um alle möglichen Kollisionspunkte von Roboter und Umgebung zu bestimmen. Dabei soll die Anzahl der Rechenschritte möglichst klein gehalten werden, um diese Kollisionsbestimmung in der für die praktische Anwendung notwendigen Echtzeit durchführen zu können. Da die Zeit für die Berechnung mit in die Nachlaufzeit des Robotersystems einfließt, muss diese möglichst klein sein. Diese Zeit ergibt sich aus:

- der Zeit zwischen zwei Distanzmessungen, die beim Einsatz der Ultraschallsensoren von Bosch in praktischen Tests von Kirfel auf 30 ms eingestellt wurden [148],
- der Nachlaufzeit des Roboters von 70 ms (siehe Kapitel 3.2.4.2) und
- der angestrebten Nachlaufzeit des gesamten Robotersystems von 100 ms (siehe Kapitel 3.2.4.3).

Die Ultraschallsensoren können allerdings auch in kürzeren Abständen messen. Dabei muss jedoch die Zeit bis zum Abklingen des Ultraschallsignals im Raum beachtet werden. Praktische Tests am in dieser Arbeit entwickelten Sensorsystem haben gezeigt, dass 65 Hz (ca. 15 ms Messzyklus) erreicht werden können (siehe Kapitel 13.1.2). Hierdurch ergibt sich für den im Folgenden beschriebenen Algorithmus eine geringe zulässige Zeitspanne von maximal 10 ms. Je kürzer diese Zeit ist, umso besser klingt das Ultraschallsignal im Raum aus. Die vom Algorithmus erreichte Zeit ist hierbei im Ergebnis kurz genug (siehe Kapitel 9.1).

Um diese geringe zur Verfügung stehende Rechenzeit einzuhalten muss der Rechenaufwand möglichst klein gehalten werden. Ausgehend von der Überlegung, dass Kollisionen nur in Bewegungsrichtung des Roboterarms gefährlich sind und damit vermieden werden müssen (siehe Kapitel 3.1 und 9.5) müssen mögliche Kollisionen auch nur in diese

Richtung überprüft werden. Eindringungen in anderen Bereichen des Arbeitsraums sind sicherheitstechnisch unbedenklich und können damit vernachlässigt werden.

Basierend auf der vorgenannten Überlegung wird eine Berechnung der maximal zulässigen Geschwindigkeit entwickelt. Diese basiert zunächst darauf, die durchzuführende Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit des Roboterarms zu ermitteln und diese dann mit der Position der Oberfläche des freien Raums zu vergleichen. Hiermit wird berechnet welchen Anteil der geplanten Bewegung der gesamte Roboterarm durchführen kann ohne dass er mit dieser Oberfläche kollidiert.

Durch die Begrenzung der Kollisionsberechnung in die Richtung der durchzuführenden Bewegung wird gegenüber den in Kapitel 7.2.1 beschriebenen Methoden der Rechenaufwand erheblich reduziert. Gleichzeitig muss bei dieser Methode allerdings gewährleistet werden, dass nur die vorberechnete Bewegung durchgeführt wird.

### 7.2.2.1 Bestimmung der geplanten Roboterbewegung

Um die maximal zulässigen Geschwindigkeit zu berechnen, muss als Erstes die vom Roboter geplante Roboterbewegung (Richtung und Geschwindigkeit) bestimmt werden. Hierbei bieten sich folgende Alternativen:

- Alle physikalisch möglichen Bewegungen des Roboters werden vorausberechnet.
- Nur die aktuell gegebene Geschwindigkeit und Richtung werden weitergeführt.
- Die geplante Geschwindigkeit und Richtung werden vor Ausführung der Bewegung überprüft.

Ein Berechnen aller physikalisch möglichen Bewegungen ist im gegebenen Fall nicht zweckdienlich, da die Trajektorie des Roboters laut Aufgabenstellung (siehe Kapitel 1.2) nicht beeinflusst werden soll, sondern nur die Geschwindigkeit. Diese Methode berechnet somit Zustände, die im Arbeitssystem später gar nicht eintreten dürfen. Methoden dieser Art werden bei alternativer Pfadplanung oder zur Pfadoptimierung angewendet.

Ein Weiterführen der aktuellen Momentangeschwindigkeit und Richtung ist möglich, solange der Roboter sich bis zur Kollision mit gleichbleibender Geschwindigkeit und Richtung bewegt. Bei, im Vergleich zur Laufzeit des Algorithmus, hohen Beschleunigungen oder großen Richtungsänderungen wird die Kollisionsberechnung mit falschen Werten durchgeführt. Ebenfalls nachteilig ist bei dieser Lösung, dass bei Stillstand des Roboters mit Bewegungen in alle Richtungen gerechnet werden muss.

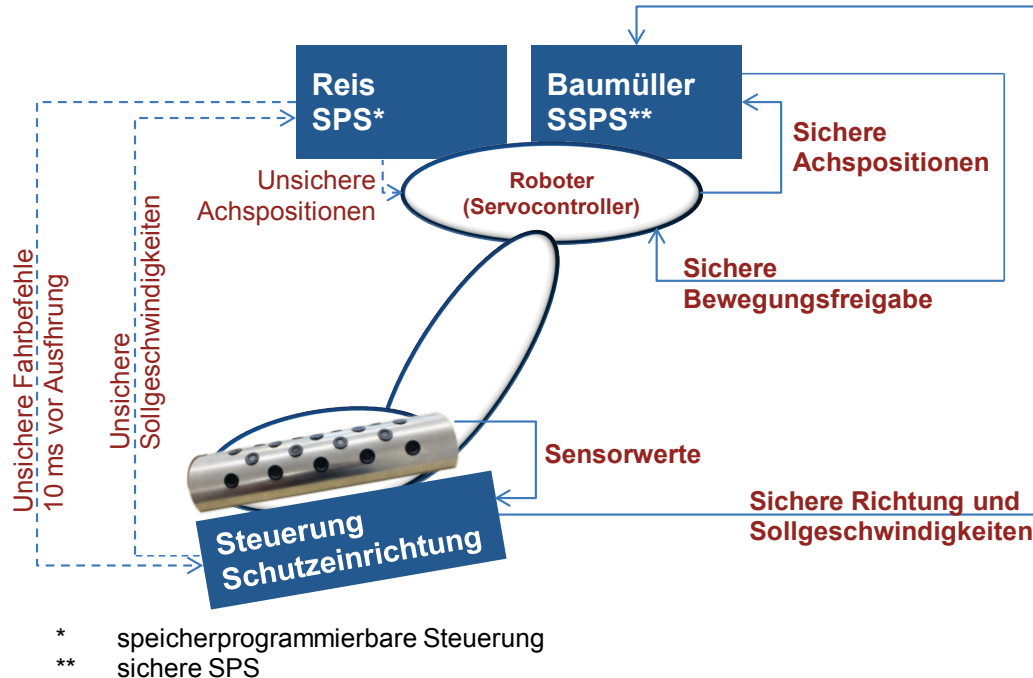
Der dritte mögliche Ansatz, die Bewegung des Roboters vor Ausführung prüfen zu lassen, verlangt grundsätzlich die Integration der sicheren Steuerung der Geschwindigkeit in die Pfadplanung. Diese erfolgt in der Regel prozesstechnisch und ist damit nicht sicher. Eine alternative Möglichkeit, die im Rahmen dieser Arbeit entwickelt wurde, ist es, dass Fahrbefehle über eine unsichere Schnittstelle von der Prozesssteuerung an die sichere Steuerung übermittelt werden. Diese unsicheren Fahrbefehle werden dann auf Kollision mit der sicheren Oberfläche des freien Raums geprüft, die Geschwindigkeit wo nötig sicher angepasst und die Ausführung des Fahrbefehls und der Geschwindigkeit sicher überwacht. Somit wird hierbei ein sicherer Bewegungskorridor für den Roboterarm freigegeben. Fehler in der Prozesssteuerung des Pfades, die zum Verlassen dieses Korridors führen würden, werden durch die Sicherheitssteuerung aufgefangen. Die aktuelle Position des Roboters muss hierbei in der Schutzeinrichtung mitgehalten werden, oder jeweils aus der sicheren Steuerung des Roboters empfangen werden.

Der Roboterhersteller Reis Robotics hat im Rahmen der Zusammenarbeit im Projekt EsIMiP eine externe Schnittstelle implementiert, die die Fahrbefehle des Roboterarms 10 ms vor Ausführung bereitstellt [162]. Die dadurch auftretende minimale Verzögerung bis zur Ausführung des aktuellen Fahrbefehls ist in der Praxis für den prozesstechnischen Ablauf in der Regel nicht relevant. Zusätzlich besitzt die Steuerung von Reis Robotics externe Schnittstellen, um Fahrbefehle von außen entgegenzunehmen. Gleichzeitig hat der Steuerungshersteller Baumüller, ebenfalls im Rahmen der Zusammenarbeit im Projekt EsIMiP, eine sichere Schnittstelle implementiert. Über diese können die durch die



Schutzeinrichtung bestimmte Bewegungsrichtung und Geschwindigkeit an die sichere Steuerung der Motoren übergeben werden. Dort wird deren Ausführung dann sicher überwacht.

Der Zusammenhang aller Kommunikationspfade der Komponenten untereinander ist in Abbildung 55 dargestellt.



**Abbildung 55: Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander  
 Sichere Pfade durchgezogen und fett**

Da bei einem 6-Achsen-Roboter jeder Achsstellung Einfluss auf die Position und Ausrichtung aller nachfolgenden Achsen hat, kann auch die zu langsame Bewegung einer einzelnen Achse zur Kollision führen, da hierdurch der Pfad auf dem sich der Roboter bewegt vom auf Kollision geprüften und freigegebenen Pfad abweicht. Um die Einhaltung des Pfades zu überprüfen

- können Geschwindigkeitsbänder bestehend aus maximalen und minimalen Drehgeschwindigkeiten überwacht werden.
- kann die Position des TCP sicher überwacht werden.
- kann das Einhalten der vorher bestimmten Trajektorie über das Verhältnis der Achsgeschwindigkeiten zu einander überwacht werden.

Die erste Lösung lässt geringe Abweichungen bei der Durchführung des Pfades durch die Prozesssteuerung zu, die im Rahmen von zusätzlichen Sicherheitsabständen kompensiert werden müssen.

Bei der zweiten Lösung können durch verschiedene mögliche Achsstellungen bei gleicher TCP Position theoretisch Kollisionen auftreten, so dass hier zusätzliche Informationen überwacht werden müssen.

Die dritte Lösung bietet eine optimale Überwachung der durchgeführten Position, ist aber im Rahmen einer Sicherheitssteuerung von Elektromotoren in der Regel nicht verfügbar.

Baumüller ermöglicht aktuell lediglich vorher definierte Geschwindigkeitsbänder zu überwachen [162], eine Erweiterung auf enge dynamische Geschwindigkeitsbänder, welches der letzten genannten Möglichkeit nahe kommt, wurde aber im Projekt EsIMiP diskutiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die erste Lösung umgesetzt. Damit kann die, auf Basis der prozesstechnischen Daten, ermittelte sichere Geschwindigkeit der geplanten Bewegung sicher überwacht werden. Wenn fehlerhafte Daten an die sichere Steuerung

übermittelt werden und eine sichere Geschwindigkeit hieraus fehlerhaft bestimmt wird, führt, wie oben beschrieben, eine abweichende Bewegung bei Ausführung durch die Prozesssteuerung zum sicheren Abschalten des Roboters. Somit können die prozesstechnischen Daten für die Bestimmung der sicheren zulässigen Geschwindigkeit genutzt werden.

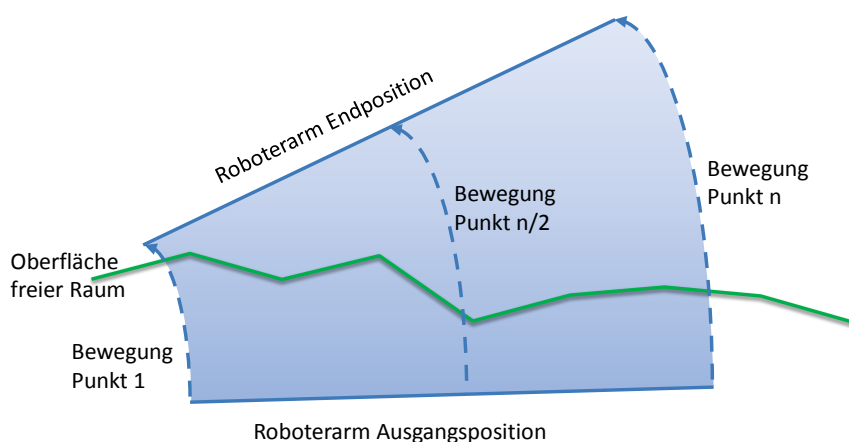
### 7.2.2.2 Bestimmung der Kollision mit der Oberfläche des freien Raums

Nachdem die geplante Geschwindigkeit und Richtung des Roboterarms bekannt ist, ist der nächste Schritt die Bestimmung der Strecke, die der Roboterarm zurücklegen kann bis er mit der Oberfläche des freien Raums kollidiert. Hierzu bieten sich zwei Methoden an:

- Die Wege, die alle Punkte des Roboterarms während der geplanten Roboterbewegung zurücklegen werden vorausberechnet. Im nächsten Schritt werden die auf diesem Weg liegenden, möglichen Schnittpunkte des Roboterarms mit der Oberfläche des freien Raums bestimmt. Aus dieser Menge möglicher Schnittpunkte wird dann der zeitmäßig erste auftretende Schnittpunkt als maßgebender Kollisionspunkt ausgewählt.
- Für diskrete Lagen des gesamten Roboterarms während der geplanten Bewegung wird eine vollständige Kollisionsberechnung des Arms mit der Oberfläche des freien Raums durchgeführt. Hierbei wird die maximal mögliche Endlage auf dem zurückzulegenden Weg ermittelt, bei der der Roboterarm noch nicht mit der Oberfläche des freien Raums kollidiert.

In Kapitel 7.1.5.2.5 ist beschrieben, dass die Oberfläche des freien Raums um den Radius der Halbschalen näher an die Halbschale versetzt wird. Dies erlaubt es, nicht die gesamte Halbschale, sondern nur die Mittelachse der Halbschale gegen die reduzierte Oberfläche zu prüfen.

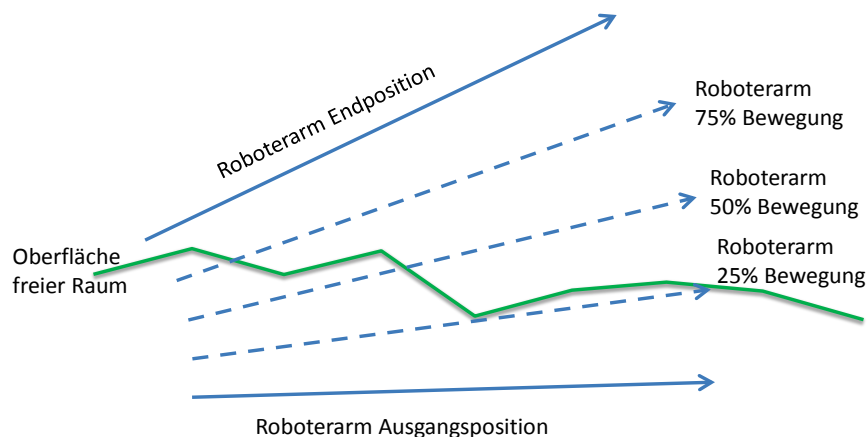
Für die erste Lösung bedeutet dies, dass der gesamte Bewegungsablauf, der Punkte der Mittelachse des Roboterarms, bis zum Erreichen der geplanten Position bestimmt werden muss. Abbildung 56 zeigt eine Bewegung des Roboterarms, bei der Bewegungsabläufe einzelner Punkte des Arms dargestellt sind. Um eine möglichst exakte Kollisionsbestimmung durchzuführen ist es nötig, die Anzahl der Punkte  $n$  möglichst groß zu wählen. Die Größe von  $n$  bestimmt die Genauigkeit mit der Kollisionen gefunden werden. Die Ermittlung der Kollision mit der sicherheitstechnisch erforderlichen Genauigkeit ist mathematisch aufwendig und erfordert einen hohen Rechenaufwand. Zusätzlich ist der Nachweis, dass das entstehende Raster sicherheitstechnisch genau genug ist, aufwendig.



**Abbildung 56: Kollisionsbestimmung über die Wege aller Punkte der Mittelachse des Roboterarms**

Für die zweite Lösung ist es ausreichend, die Mittelachse des Roboterarms als einzelnen Vektor zu betrachten. Dessen mögliche Schnittpunkte die eine Kollision mit der Oberfläche des freien Raums anzeigen müssen berechnet werden müssen. Abbildung 57 zeigt eine Darstellung mit je einem berechneten Zwischenschritt alle 25% der geplanten Bewegung.

Aus sicherheitstechnischen Gründen ist die Anzahl der berechneten Zwischenschritte unerheblich, da nur der größte ermittelte kollisionsfreie Zwischenschritt freigegeben wird. Die Anzahl der Zwischenschritte ist allerdings relevant für die Genauigkeit, mit der die zuzulassende maximale Geschwindigkeit der optimalen Geschwindigkeit angenähert wird.



**Abbildung 57: Kollisionsbestimmung der Mittelachse des Roboterarms in diskreten Positionen**

Im Rahmen dieser Arbeit wurde die zweite Lösung gewählt. Diese ist sicherheitstechnisch günstiger als die erste Lösung. Durch die Berechnung der Kollision, über den mathematisch einfachen Vektor der Mittelachse, ist auch der Rechenaufwand grundsätzlich geringer, als die Berechnung des Bewegungsverlaufs einzelner Punkte des Roboterarms gegen die Oberfläche des freien Raums. Durch die einfachere Berechnung kann die Schrittweite ausreichend klein gewählt werden, um die zugelassene Geschwindigkeit der optimalen Geschwindigkeit weitestgehend anzunähern. Eine optimierte Lösung für die Minimierung der erforderlichen Zwischenschritte wurde in 2010 in [154] vorgestellt und wird im nächsten Kapitel erläutert.

### 7.2.3 Berechnung der Kollision mit dem angezeigten freien Raum auf der vorgegebenen Bewegungsbahn

Zur Bestimmung, ob der Roboter auf dem Weg zur geplanten Position mit der Oberfläche des freien Raums kollidiert oder diese gar durchstößt, muss berechnet werden, ob sich die Mittelachse des Roboterarms in ihrer geplanten Zielposition mit einem der Dreiecke der Oberfläche des freien Raums (siehe Kapitel 7.1.5.2.2) schneidet. Die Mittelachse wird bei Kollision im ersten Test schrittweise auf der geplanten Bewegungsbahn zurück verschoben und erneut auf Kollision geprüft. Dies ist der Beginn eines iterativen Prozesses, in dem die Mittelachse in Abhängigkeit vom jeweils zuvor ermittelten Ergebnis der Kollisionsprüfung in kleiner werdenden Schritten vor oder zurück verschoben und jeweils erneut auf Kollision geprüft wird. Die grundsätzliche Methode dieser Berechnung wurde bereits in [158] gezeigt und wird im Rahmen dieser Arbeit zu Ende geführt.

Um sicherzugehen, dass die Mittelachse nicht durch die Abstände der einzelnen Schritte bei einer Prüfung komplett außerhalb der Oberfläche des freien Raums liegt und damit keine Kollision auslöst, wird im Rahmen dieser Arbeit zusätzlich in jedem Schritt ein Ortsvektor von der gegenwärtigen Position des Roboters zur Endposition auf Kollision mit der Oberfläche geprüft. Beim Prüfen auf Kollision ergibt sich einer der drei möglichen, in Abbildung 58 dargestellten, grundsätzlichen Fälle.

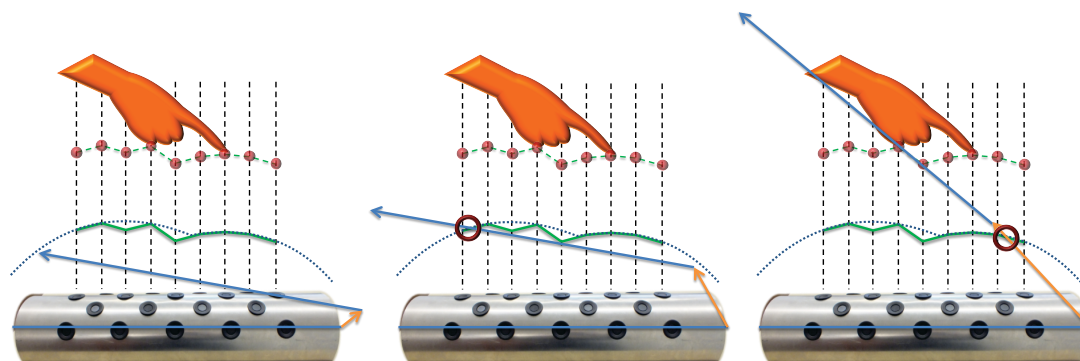


Abbildung 58: Mögliche Ergebnisse der Kollisionsbestimmung

1. Keine Kollision

2. Kollision von Mittelachse und Umgebung

3. Kollision von Ortsvektor und Umgebung

Zusätzlich ist auch eine Kollision von Mittelachse, als auch Ortsvektor möglich. Dies wird im Programm jedoch nicht untersucht, da der aktuelle Iterationsschritt bereits beim Feststellen einer Kollision abgebrochen und der Nächste gestartet wird.

Liegt keine Kollision zwischen den beiden Vektoren (blaue Mittelachse und orangefarbener Ortsvektor) vor bedeutet dies, dass die geplante Bewegung bei Einhaltung des notwendigen Sicherheitsabstandes durchgeführt werden kann. Liegt eine Kollision vor, so unterschreitet der Roboter den geforderten Sicherheitsabstand. In diesem Fall muss die Strecke, die sich der Roboterarm in den nächsten 10 ms bewegen darf, reduziert werden und damit dessen Geschwindigkeit.

Die Wahl der Zwischenschrittweite, in denen diese iterative Kollisionsbestimmung abläuft, wurde bereits in 2010 in [154] vorgestellt. Die konkrete Art der Kollisionsbestimmung über Vektoren, die die Dreiecke der Oberfläche des freien Raums durchstoßen, wurde später entwickelt. Abbildung 59 zeigt den grundsätzlichen iterativen Prozess, mit dem die Anzahl der zu prüfenden Schrittweiten auf ein Minimum beschränkt wird.

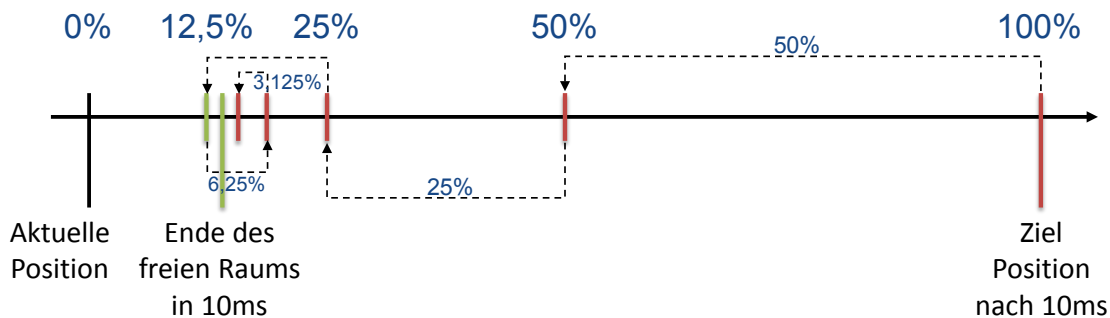


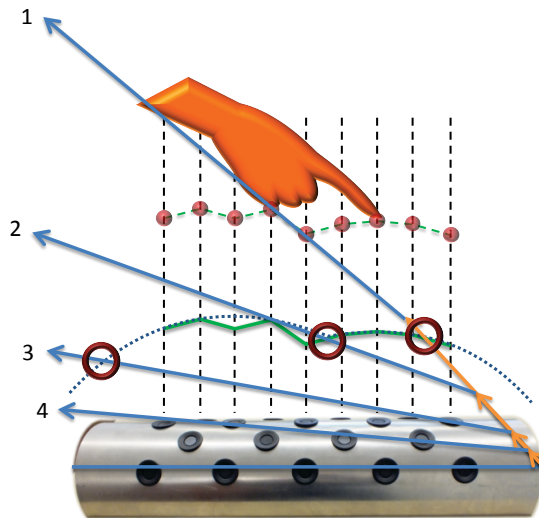
Abbildung 59: Beispiel Berechnung der Geschwindigkeit über iterative Annäherung nach [154]

Im dargestellten Beispiel sind die aktuelle Position des Roboterarms und dessen Zielposition in 10 ms gegeben. Liegt bei 100% Bewegungsweite eine Kollision vor, muss die iterative Berechnung der maximal zulässigen Geschwindigkeit mit zunächst 50% Schrittweite gestartet werden. In jedem Iterationsschritt wird geprüft, ob eine Kollision vorliegt und zusätzlich wird die aktuelle Schrittweite halbiert. Liegt eine Kollision vor, wird die aktuelle Schrittweite von der geprüften Position abgezogen. Ist dies nicht der Fall, wird sie addiert. Wird bei 100% Schrittweite eine Kollision festgestellt, ergibt sich somit die Formel:

$$\text{Bewegungswegweite} = \frac{\text{Schrittweite}}{1} - \frac{\text{Schrittweite}}{2} \pm \frac{\text{Schrittweite}}{2^2} \pm \frac{\text{Schrittweite}}{2^3} \pm \dots$$

Die ersten vier Schritte des in Abbildung 59 gezeigten Prozesses sind in Abbildung 60 dargestellt. Im Schritt 1 werden die Vektoren (Mittelachse und Ortsvektor), die die Zielposition bilden, geprüft und es wird festgestellt, dass hier der Ortsvektor mit der Grenze des freien Raums kollidiert. Für Schritt 2 werden die Bewegungswegweite und damit die

Geschwindigkeit um 50% reduziert. Hier kollidiert die Mittelachse mit der Oberfläche des freien Raums. Ebenso im Schritt 3 bei 25% Bewegungsweite. Nach einer weiteren Halbierung der Schrittweite wird in Schritt 4 festgestellt, dass beide Vektoren innerhalb der Oberfläche des freien Raums liegen. Für den nächsten Schritt 5 würde, wie Abbildung 59 zeigt, die Bewegungsweite um 6,25% Schrittweite erhöht und erneut geprüft.



**Abbildung 60: Darstellung der Berechnungen, die zu den Ergebnissen aus Abbildung 59 führen**

Nach zehn Kollisionsbestimmungen ist die vorgestellte Formel auf  $\frac{\text{Schrittweite}}{1024}$  genau. Somit weicht die berechnete maximale Schrittweite bzw. die davon abhängige maximale Geschwindigkeit um höchstens 0,1% von der optimal möglichen Geschwindigkeit ab. Diese Genauigkeit ist für die Praxis ausreichend, so dass an dieser Stelle die Berechnung abgebrochen werden kann.

Die ausführliche mathematische Kollisionsberechnung wird in Kapitel 14.2 dargestellt.

### 7.3 Dynamisierung des Sicherheitsabstands

Das Wissen um den Zustand der Umgebung wird nach Abschluss einer Messung mit zunehmender Zeit „unschärfer“. Es muss davon ausgegangen werden, dass Objekte, die sich zum Zeitpunkt der Messung direkt an den Grenzen des freien Raums befunden haben, sich auf den Roboter zu bewegen. Deshalb muss die Größe des als frei bestimmten Raums mit zunehmender Zeit aus sicherheitstechnischen Gründen kontinuierlich bis zur nächsten Messung reduziert werden. Die Reduzierung des freien Raums zwischen zwei Messzyklen kann mit  $2\text{ m/s}$  vorgenommen werden, da dies die normative Annäherungsgeschwindigkeit eines Menschen im Nahbereich an die Gefahrenzone ist (siehe Kapitel 3.2.4.3).

In Kapitel 7.1.5.2.6 wurde eine konservative Berechnung der Nachlaufzeit genutzt, um die Oberfläche des freien Raums um den Mindestabstand, der sich aus der gesamten Nachlaufzeit des Robotersystems ergibt, zu reduzieren. Die dort angenommene Nachlaufzeit von 100 ms setzt sich aus den angenommenen 30 ms für das Sensorsystem (siehe Kapitel 7.2.2) und den angenommenen 70 ms Anhaltezeit für den Roboter zusammen (siehe Kapitel 3.2.4.2).

Die Nachlaufzeit von 30 ms des Sensorsystems ist bei Ultraschall allerdings hauptsächlich deshalb notwendig, um abzuwarten bis der Schall in der Umgebung abklingt und ein neuer Wert gemessen werden kann (siehe Kapitel 7.2.2). Bei  $20^\circ\text{C}$  Umgebungstemperatur beträgt die Schallgeschwindigkeit ca.  $343\text{ m/s}$ . Eine Messung von 86 cm Reichweite (redundant überwachter Bereich, siehe Kapitel 7.1.5.1) dauert somit ca. 5 ms (Hin- und Rückweg) und zeigt damit den Zustand der Umgebung von vor 2,5 ms (Rückweg) an.

Die erste Kollisionsberechnung zum Zeitpunkt der Messung des Echos muss

- diese 2,5 ms,
- die 70 ms Anhaltezeit des Roboters, sowie
- 2 ms für die zweifache eigene Laufzeit bis zur Bestimmung eines Ergebnisses (siehe Kapitel 9.1)

als gesamte Nachlaufzeit beachten. Dies ist die minimale Nachlaufzeit des Robotersystems zu Beginn des Messzyklus. Die zweifache Laufzeit der Kollisionsberechnung ist hierbei nötig, damit das Ergebnis bis zum Abschluss der nächsten Berechnung gültig bleibt.

Nach der ersten Berechnung muss eine neue Kollisionsberechnung gestartet werden, die zur minimalen Nachlaufzeit des Robotersystems eine weitere Laufzeit der Kollisionsberechnung addiert. Damit wird die mögliche Annäherung einer Person in der Zeit nach der Messung berücksichtigt. Dies muss fortgeführt werden, bis eine neue Messung vorliegt. Dann beginnt der Prozess von neuem.

Mittels dieser Überlegung kann die maximal zulässige Geschwindigkeit gegenüber einer starren Nachlaufzeit von 100 ms (siehe Kapitel 7.1.5.2.6) dynamisiert werden. Ist für 100 ms Nachlaufzeit ein Sicherheitsabstand von 20 cm notwendig, so reicht bei 74,5 ms ein Sicherheitsabstand von 14,9 cm, da diese Werte nach Kapitel 3.2.4.4 linear abhängig sind. Abbildung 51 kann somit erweitert werden. Abbildung 61 zeigt zusätzlich eine Oberfläche für 74,5 ms Nachlauf an. Die jeweils aktuelle Oberfläche liegt zwischen diesen beiden Sicherheitsabständen und muss für die jeweils aktuelle Nachlaufzeit bestimmt werden.

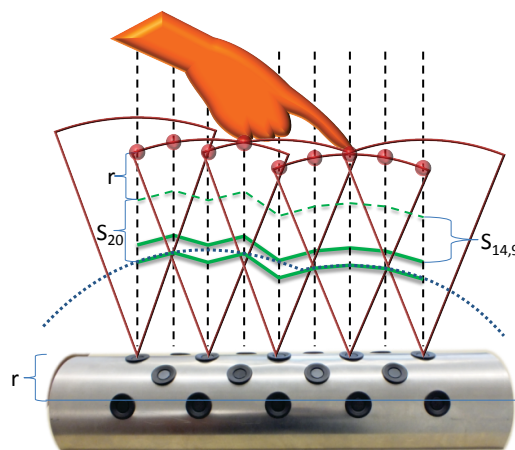


Abbildung 61: Erweiterung der Abbildung 51 um einen Sicherheitsabstand von 14,5 cm

## 7.4 Bekannte statische Objekte im Arbeitsraum

Schutzeinrichtungen, die den freien Raum um einen kollaborierenden Roboter bestimmen, haben Vorteile, wenn sie statische Objekte von dynamischen Objekten unterscheiden können. Wenn sich der Roboter dynamischen Objekten, also einem Menschen oder vom Menschen bewegten Objekten, nähert, muss seine Geschwindigkeit reduziert werden. Bei der Annäherung an statische Objekte muss die Schutzeinrichtung nicht auslösen und der Roboter darf sich weiterhin mit maximal abgesicherter Geschwindigkeit bewegen.

Eine Unterscheidung von statischen und dynamischen Objekten anhand einer Messung mit markerlosen Sensoren ist sicherheitstechnisch, zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit, nicht möglich. Weder Kameras, z.B. anhand der Farbe oder Form der Objekte, noch Ultraschallsensoren, z.B. anhand des Reflexionsvermögens des Objekts, können dies leisten. Zwar werden, z.B. in der Unterhaltungsindustrie, große Fortschritte gemacht, den Menschen mit hoher Wahrscheinlichkeit aus verschiedenen Sensordaten zu erkennen, allerdings sind diese Wahrscheinlichkeiten für die Maschinensicherheit nicht ausreichend. Zusätzlich sind einige der in der Unterhaltungsindustrie verwendeten Ansätze (Randomized

Decision Forests [13]) in der Praxis für sichere Steuerungen nicht verifizierbar, da sie nur mit hoher Wahrscheinlichkeit richtige Ergebnisse liefern.

### 7.4.1 Reales und virtuelles Einlernen der Umgebung

Eine Möglichkeit zur sicheren Unterscheidung von statischen und dynamischen Objekten ist es, die Sensorwerte für die statische Umgebung für jede einzelne Position des Roboterarms einzulernen. Werden im späteren Betrieb kürzere Distanzen zwischen Roboter und dieser Umgebung festgestellt, müssen diese folgerichtig von einem dynamischen Hindernis ausgelöst sein. Das Einlernen der Sensorwerte kann real oder virtuell geschehen.

- Beim realen Einlernen müssen alle möglichen, später im Betrieb anzufahrenden Positionen abgefahren, gemessen und in einer Tabelle abgespeichert werden. Diese Werte werden später direkt mit den aktuell gemessenen Werten der Sensoren verglichen. Diese Positionen müssen so eng beieinander liegen, dass die Messwerte zwischen zwei benachbarten Positionen sicher interpoliert werden können.
- Beim virtuellen Einlernen wird zunächst die reale Umgebung im Computer virtuell nachgebildet. Im Betrieb werden, mit Hilfe der Position des Roboters und dieser virtuellen Umgebung, die gemessenen Sensorwerte auf Plausibilität gegen die statische Umgebung geprüft.

Der Vorteil des realen Einlernens ist eine einfachere, schnellere Erkennung der Anwesenheit von dynamischen Objekten, da die erwarteten Werte der statischen Objekte direkt aus der Tabelle abgerufen werden können bzw. aus zwei Tabellenwerten interpoliert werden können. Der Nachteil der Methode ist, dass zum Absichern ungeplanter Bewegungen des Roboters alle möglichen Positionen des Roboters eingemessen sein müssten. Der logistische Aufwand, den Arbeitsraum komplett abzudecken, ist in der Praxis nicht durchführbar.

Der Vorteil des virtuellen Einlernens ist die Möglichkeit, alle möglichen Positionen des Roboters auf Abstände zu den statischen Objekten hin zu überprüfen und damit den Arbeitsraum komplett abzudecken. Der Nachteil ist eine, gegenüber dem realen Einlernen, erhöhte Rechenzeit. Gleichzeitig können, bedingt durch Reflexionen der Messsignale an der Umgebung, nicht immer alle auftretenden Werte exakt berechnet werden.

Ein Roboter muss während der Erfüllung seiner Aufgabe bestimmte Wege immer wieder gleich abfahren, z.B. das Anfahren direkt vor einer definierten Greifposition oder das Abfahren einer Schweißnaht. Für diese Wege ist die Methode des realen Einlernens geeignet, da hier nur eine definierte Menge an Positionen erfasst werden muss. Da diese Methode vor allem das Werkzeug des Roboters während des Manipulierens von Objekten absichert und im Rahmen dieser Arbeit der Arm des Roboters und nicht dessen Werkzeug geschützt wird, wird diese Methode an dieser Stelle erläutert aber nicht im Rahmen dieser Arbeit implementiert.

Der Ansatz des virtuellen Einlernens der Umgebung mittels Kameradaten wurde im Programm aus [153] umgesetzt, das im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelt und mit der entwickelten Schutzeinrichtung verknüpft wurde. Die in Kapitel 7.1.1 ff. gezeigten Darstellungen, die diesem Programm entstammen, zeigen die Position des Bedieners und des Roboters über die Einfärbung der jeweiligen Objekte an. Zusätzlich wurde von Kirfel in seinem Programm zur Visualisierung des Sensorsystems [148] das Einlernen der statischen Umgebung mittels Ultraschallsensoren der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung implementiert.

Beim virtuellen und realen Erfassen der Sensorwerte der statischen Umgebung können die eingemessenen Daten zur Fehlererkennung in den Sensoren beitragen. Werden Distanzen gemessen, die größer sind als die Grenzen bekannter statischer Objekte, deutet dies auf eine Veränderung der statischen Umgebung bzw. auf einen Fehler im Sensor hin. Distanzen, die kürzer gemessen werden, müssen als dynamische Objekte angenommen werden, so dass hier eine Veränderung der statischen Umgebung bzw. ein Fehler im Sensor nicht festgestellt werden kann.

## 7.4.2 Karte der statischen Umgebung

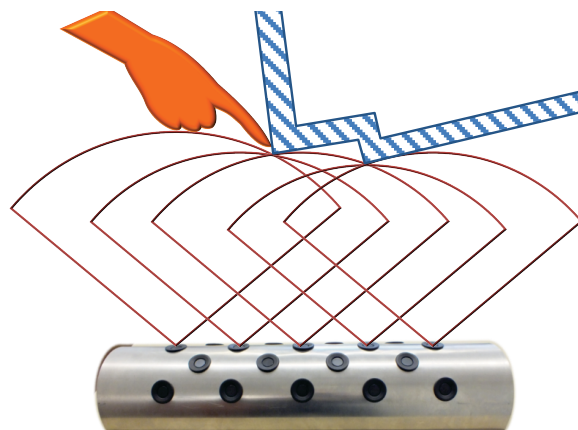
Die Rechenzeit für das Einlesen und Optimieren der statischen Umgebung des Roboters spielt nur eine untergeordnete Rolle, da dies nur bei der Ersteinrichtung durchgeführt werden muss und wenn statische Objekte (z.B. ein Arbeitstisch) verändert werden. Während des eigentlichen Arbeitsablaufs wird hierfür keine Rechenzeit benötigt. Zum korrekten Einlesen der statischen Umgebung muss der Bediener sich hierbei außerhalb des Arbeitsraums aufhalten.

Die virtuelle statische Umgebung wird im Rahmen dieser Arbeit durch das Kombinieren von Ultraschallmessungen im Raum eingelernt. Da die Ultraschallmessungen jeweils einen Teilbereich des Raums zeigen, der frei von Objekten ist, ergibt die Summe aller freien „Teilräume“ den gesamten Teil des Arbeitsraums, der frei von statischen Objekten ist. Jeder dieser Teilräume wird in einem Octree gespeichert (siehe Kapitel 7.1.4) deren Kombination am Ende den gesamten freien Raum darstellt. Ultraschallmessungen können über Reflexionen an glatten Oberflächen verfälscht werden. Zur visuellen Kontrolle der Erfassung des freien Raums kann die Darstellung genutzt werden, die von Kirfel in seinem Programm zur Visualisierung des Sensorsystems [148] implementiert wurde.

Kirfel beschreibt in seiner Arbeit eine Methode, die eine Isofläche aus dem gespeicherten Octree extrahiert. Mit dieser werden spätere Kollisionsberechnungen mit der statischen Umgebung auf die Grafikkarte ausgelagert, was auf einem PC eine schnellere Berechnung zulässt. [148]

## 7.4.3 Unterscheidung der statischen und dynamischen Objekte

Bei der Nutzung der ermittelten statischen Umgebung zur Unterscheidung von statischen und dynamischen Objekten treten Probleme auf. Ultraschallsensoren liefern jeweils nur einen Messwert, welcher durch den großen Erfassungswinkel ein Objekt an einer beliebigen Position des Kugelabschnitts in der gemessenen Entfernung anzeigt. Gleichzeitig können aber auch mehrere Objekte in gleicher Entfernung zum Sensor liegen, was allerdings nicht durch den Sensor erkannt werden kann. Abbildung 62 zeigt das Problem im Detail anhand der eindringenden Hand und der gleichen Messung beim Vorhandensein einer statischen Wand.



**Abbildung 62: Form der Sensorkeulen bei Anwesenheit eines statischen und eines danebenliegenden dynamischen Objekts**

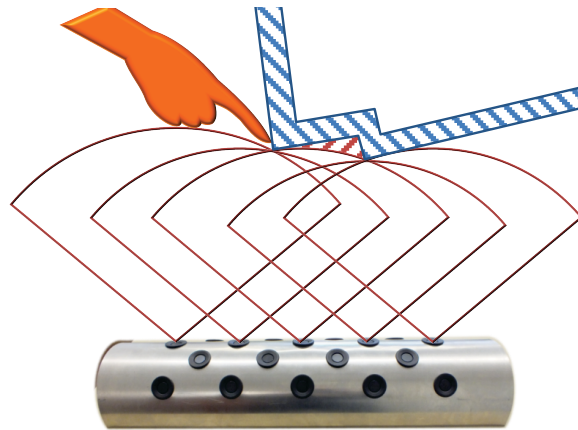
Es kann im gezeigten Fall nicht ausgeschlossen werden, dass am Ende des erfassten Bereichs zusätzlich zu den erkannten statischen Objekten ein weiteres dynamisches liegt. Auch wenn Messungen auf statische Objekte zurückgeführt werden können, kann nicht in jedem Fall ausgeschlossen werden, dass im ähnlichen Abstand auch dynamische Objekte vorhanden sind.

Aus diesem Grund ergibt sich für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung die Einschränkung, dass ein ungebremstes Fahren im Raum nur in einer solchen Umgebung möglich ist, die frei von statischen Objekten ist, da diese im Rahmen der



Geschwindigkeitsreduktion wie dynamische Objekte behandelt werden müssen. Diese Schlussfolgerung basiert auf den beschriebenen theoretischen Überlegungen. Die Beobachtungen der realen Schutzvorrichtung, die im Rahmen dieser Arbeit gebaut wurde, lassen vermuten, dass ein solches Annähern an den Roboter in der Praxis nicht zufällig auftreten kann. Da diese Schutzvorrichtung neu entwickelt wurde, liegen hierüber allerdings noch keine ausreichenden Erkenntnisse aus realen Anwendungen vor, um diese stricte Sicherheitseinschätzung zu diesem Zeitpunkt zu lockern. Insofern können spätere Erkenntnisse aus der Praxis an dieser Stelle zu einer anderen Einschätzung führen.

Eine mögliche Reduzierung dieses Problems basiert darauf, dass Räume, die komplett zwischen Sensorkeulen eingeschlossen sind und zu klein sind um dynamische Objekte zu enthalten, zur freien Oberfläche hinzugezählt werden können. Abbildung 63 zeigt eine mögliche Erweiterung durch die rot schraffierte Fläche.



**Abbildung 63: Erweiterung des freien Raums um eingeschlossene Flächen.**

Dieser Ansatz birgt allerdings wiederum Probleme. Es kann nicht sichergestellt werden, dass immer die Kante des eingeschlossenen Raums zweikanalig erfasst wird. Zusätzlich ist es im dreidimensionalen Raum selten möglich, die Umgebung des eingeschlossenen Raums so zu erfassen, dass das Hineinreichen eines dynamischen Objektes sicher ausgeschlossen werden kann.

Insbesondere aus diesem Grund wurde die Karte der statischen Umgebung, im Rahmen dieser Arbeit, nur für einen Baustein der Fehlererkennung der Sensoren genutzt. Sensoren die statische Objekte regelmäßig nicht anzeigen haben offensichtlich einen Fehler. Einzelne Fehlmessungen können durch totale Ablenkungen des Ultraschalls ausgelöst werden, so dass die Anzahl an erlaubten Fehlmessungen von der Umgebung abhängt und individuell einzustellen ist.

Durch die alleinige Nutzung zur Fehlererkennung kann die Betrachtung der Rechengeschwindigkeit vernachlässigt werden. Die Anforderung an ein Kategorie 3 System ist, dass Fehler „Wenn immer in angemessener Weise durchführbar“ [61] erkannt werden müssen (siehe Kapitel 3.2.3.2.1). Dies bedeutet in der Praxis, dass Fehlererkennungen auch auf mehrere Zyklen verteilt werden können, um die Rechenlast entsprechend zu verteilen.



## 8 Aufbau der Programme

Im Rahmen dieser Arbeit wurden verschiedene Programme entwickelt, die teilweise über den Austausch von Daten zusammenarbeiten. In diesem Kapitel werden diese Programme in ihrer Funktionsweise und in ihrem Ablauf soweit beschrieben, wie es für das Verständnis der vorliegenden Ausarbeitung notwendig ist.

Der Quellcode der Programme ist dieser Ausarbeitung als Anhang beigelegt.

- Kapitel 8.1 stellt die automatische Kalibrierung der Sensorpositionen vor. Dieses Programm wurde von Kurras für seine Diplomarbeit [145], die im Rahmen der vorliegenden Arbeit betreut wurde, erstellt.
- Kapitel 8.2 stellt die Erweiterung dieser Kalibrierung vor, die teilweise zusammen mit Heisel im Rahmen seines Praktikums [146] vorgenommen wurde.
- Kapitel 8.3 stellt vor, wie die Messwerte und Positionsdaten der Ultraschallsensoren in das in [153] entstandene Programm integriert wurden und wie dieses Programm zum Abgleich und zur Darstellung der Ultraschallwerte und der aus [153] vorhandenen Kamerawerte erweitert wurde.
- Kapitel 8.4 stellt das Programm vor, das genutzt wurde um über EtherCAT die Kommunikation mit der sicheren Steuerung von Baumüller praktisch zu demonstrieren.
- Kapitel 8.5.1 stellt die Erfassung der Oberfläche des freien Raums mittels der Bosch Ultraschallsensoren im zweiten Demonstrator vor. In diesem Programm wurde von Kirfel, im Rahmen seiner Bachelorarbeit [148], der Nachweis der Funktionalität der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen geführt.
- Kapitel 8.5.2 stellt die Erweiterung des Programms von Kirfel um die Schnittstelle für die Kommunikation mit dem Roboter vor.

### 8.1 Kalibrierung der Position der Sensoren am Roboterarm – 2D

Die Positionierung der Sensoren am Arm war bedingt durch die Art der Befestigung nicht exakt. Das Ziel der Diplomarbeit [145] von Kurras war es aus diesem Grund eine automatisierte Positions- und Richtungsbestimmung der Sensoren vorzunehmen, um nach Umrüstarbeiten schnell eine genaue Kalibrierung dieser extrinsischen Parameter zu erlangen. Dies wurde mit Hilfe einer, im Rahmen der Diplomarbeit, im Arbeitsraum des Roboters senkrecht befestigten Metallstange erreicht, die als bekanntes Referenzobjekt bei verschiedenen Roboterfahrten genutzt wurde.

Die in der Diplomarbeit [145] erzielte Genauigkeit der Positionsbestimmung der Sensoren war für die weiteren Schritte in der vorliegenden Arbeit ausreichend genau, um die Positionsdaten in das Programm aus Kapitel 8.3 zu übernehmen. Die Auslesung der Sensorwerte wurde in der Diplomarbeit in Microsoft Visual Studio 2005 in Verbindung mit einer Schnittstelle zum Programm TwinCAT PLC von Beckhoff im PC realisiert.

### 8.2 Kalibrierung der Position der Sensoren am Roboterarm – 3D

Aus Lizenzgründen wurde das Programm aus Kapitel 8.1 verworfen. Um die notwendige Schnittstelle zwischen Microsoft Visual Studio 2008 Express (siehe Kapitel 13.2.2) und dem Treiber TwinCAT I/O (siehe Kapitel 13.2.1) zu implementieren, wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit ein neues Programm entwickelt.

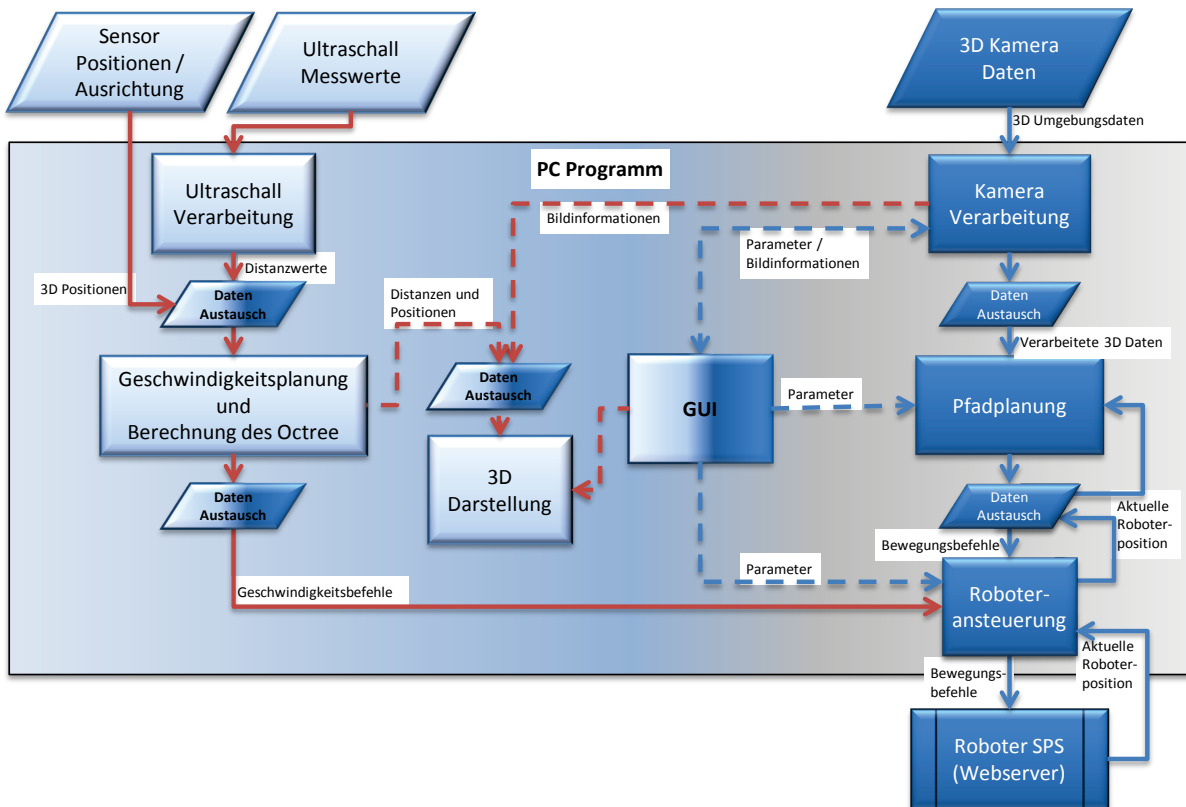
In einem nachfolgenden Praktikum [146] wurden, gemeinsam mit Heisel, in dieses Programm für die Positionsbestimmung überarbeitete Algorithmen implementiert, die bis zum Ende der vorliegenden Arbeit für den ersten Demonstrator genutzt wurden.

### 8.3 Erfassung der Umgebung mit Ultraschallsensoren – erster Demonstrator

Im Rahmen der Erstellung des ersten Demonstrators der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung wurde das im Rahmen von [153] entwickelte Programm um folgende Punkte erweitert:

- eine Schnittstelle zur Übernahme der in Kapitel 8.1 bzw. Kapitel 8.2 ermittelten Daten der Sensorpositionen und Ausrichtungen
- eine Schnittstelle zum Anfordern und Einlesen der aktuellen Messwerte der Ultraschallsensoren
- eine Planung der Geschwindigkeit des Roboters, basierend auf den vorgenannten Werten, sowie die Übergabe dieser Geschwindigkeit an die Roboteransteuerung (siehe Kapitel 7.1.1)
- eine Berechnung des Octrees aus den Werten und Positionen der Ultraschallsensoren (siehe Kapitel 7.1.4) und dessen Weitergabe an die 3D Darstellung
- eine 3D Darstellung sowohl der vorhandenen Kameradaten, als auch der neu erfassten Ultraschallwerte (siehe Kapitel 7.1.1, 7.1.2 und 7.1.4) mittels der Programmierschnittstelle „Offene Grafikkbibliothek“ - OpenGL - (Open Graphics Library)
- eine Erweiterung der grafischen Nutzerschnittstelle (graphical user interface – GUI) zur Ansteuerung der neuen Funktionen

Abbildung 64 zeigt die Einbindung der neuen Teile in das Programm. Hierbei stellt jedes Rechteck einen eigenen, parallel ablaufenden Thread dar. Diese teilen ihre Ergebnisse über ein gemeinsames Modul „Daten Austausch“. Dieses Modul wurde für die Aufnahme neuer Daten, im Rahmen dieser Arbeit, überarbeitet.



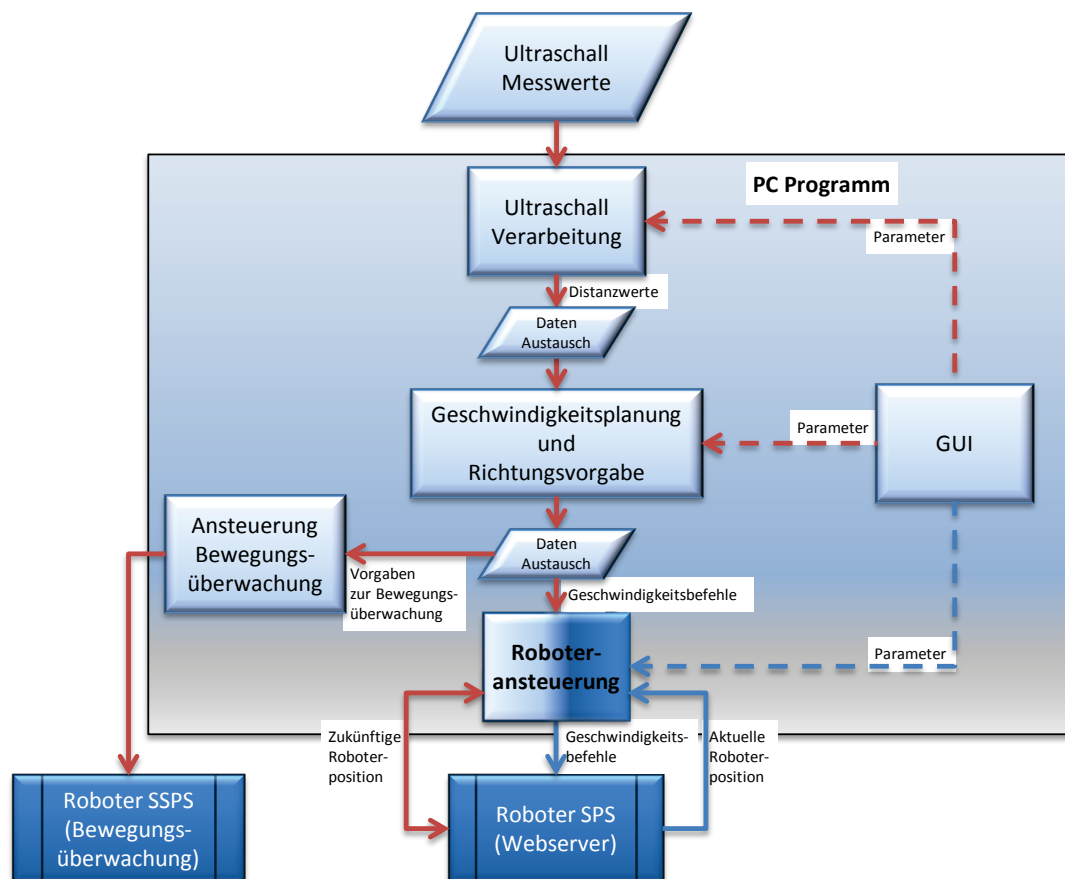
**Abbildung 64: Darstellung des Programmablaufs aus [153] erweitert um die im Rahmen dieser Arbeit programmierten Komponenten**  
 (dunkelblau, weiße Schrift: aus [153] vorhanden  
 hellblau, schwarze Schrift / rote Pfeile: im Rahmen dieser Arbeit entwickelt  
 hell-dunkler Datenaustausch: im Rahmen dieser Arbeit erweitert)

## 8.4 Ansteuerung der Schnittstellen mittels EtherCAT

Im Rahmen dieser Arbeit wurde zur vereinfachten Demonstration/Vorführung der Funktionsfähigkeit der, in Kapitel 7.2.2.1 beschriebenen, Kommunikation zwischen Roboter, Schutzeinrichtung und Sicherheitssteuerung ein separates Programm entwickelt, das

- mittels EtherCAT die Werte der Ultraschallsensoren einliest,
- eine Geschwindigkeit aus diesen Werten berechnet,
- die Geschwindigkeitsvorgabe über TCP/IP an den Webserver der Prozesssteuerung des Roboters übermittelt  
und
- die Bewegungsvorgabe (Richtung und Geschwindigkeit) über EtherCAT an die sichere Bewegungsüberwachung des Roboters übermittelt.

Abbildung 65 zeigt den Ablauf des Programms. Auch hier wurde erneut die Komponente der Roboteransteuerung aus [153] übernommen, die an die im Projekt EsIMiP von Reis Robotics neu eingebrachten Parameter angepasst wurde.



**Abbildung 65: Darstellung des Programmablaufs zur Kommunikation mit der Prozesssteuerung und der Bewegungsüberwachung des Roboters**  
 (dunkelblau, weiße Schrift: externe Komponenten von Reis / Baumüller  
 hellblau, schwarze Schrift / rote Pfeile: im Rahmen dieser Arbeit entwickelt  
 hell-dunkler Datenaustausch: im Rahmen dieser Arbeit erweitert)

Das Programm funktioniert allein mit der Hardware des ersten im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Demonstrators. Eine Anbindung an zusätzliche Hardware, die nicht Bestandteil dieser Arbeit ist, ist nicht erforderlich. Das Programm wurde für die Vorführung der Geschwindigkeitsreduktion im Rahmen des Demonstrationsvideos [159] genutzt.

## 8.5 Erfassung der Umgebung mit Ultraschallsensoren – zweiter Demonstrator

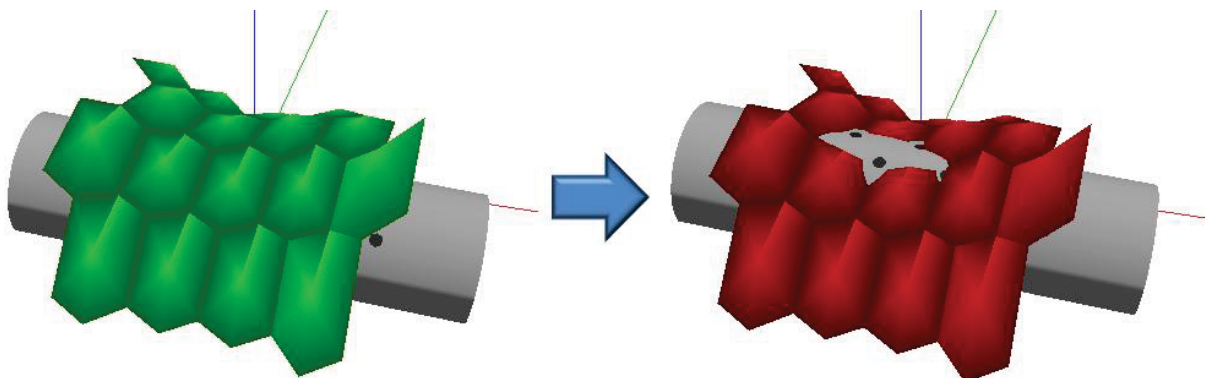
### 8.5.1 Für die Demonstratorschiene ohne Roboter

Die Algorithmen zur Erfassung der Oberfläche des freien Raums und zur Bestimmung der Kollision mit diesem, die im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelt wurden (siehe Kapitel 7.1.5, 7.2 und 7.3), wurden von Kirfel im Rahmen seiner Bachelorarbeit [146] in einem Programm praktisch umgesetzt. Ziel war hierbei nicht die Optimierung der Geschwindigkeit, mit der die Algorithmen ausgeführt werden, sondern eine Möglichkeit zu schaffen, diese in der Praxis zu verifizieren. Optimierte wurde lediglich die Berechnung der Rasterlinien (siehe Kapitel 7.1.5.2.2) im Programm, indem diese zu Beginn vorausberechnet und abgespeichert werden. Eine Optimierung der mathematischen Ausführung der Algorithmen wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit gezeigt (siehe Kapitel 9.1 und 14).

Neben diesen Algorithmen wurden in diesem Programm ebenfalls die Tests für die Sensoren umgesetzt, die zeigen sollen, ob jeder Sensor noch korrekt arbeitet (siehe Kapitel 9.2.1.3).

Die Struktur des Programms ist, auch wie die der vorher gezeigten Programme (Kapitel 8.1 bis 8.4), Thread basiert. Das bedeutet in diesem Fall, dass alle komplizierten Berechnungen in einem eigenen Programmteil gestartet werden. Die einzelnen Programmteile laufen parallel und unabhängig voneinander ab und melden nach Fertigstellung ihr Ergebnis. Diese Thread basierte Programmierung erlaubt es, bei einer Demonstration einen möglichst flüssigen Ablauf zu zeigen. Für die Echtzeitfähigkeit der Schutzeinrichtung in einer industriellen Umsetzung ist dieser Ansatz nicht geeignet. Kirfel schreibt in Kapitel 4.3.2.1 seiner Arbeit: „die Reihenfolge, in der die Anweisungen unterschiedlicher Threads ablaufen, ist nicht deterministisch“ [146].

Die grafische Darstellung der Ergebnisse der Algorithmen wurde von Kirfel mittels der Programmierschnittstelle OpenGL umgesetzt. Abbildung 66 zeigt zwei von diesem Programm mit OpenGL erzeugte Darstellungen.



**Abbildung 66: Links: Bestimmen der Oberfläche des freien Raums, Rechts: Einfrieren der Oberfläche und virtuelles Bewegen der Schutzeinrichtung zur Darstellung einer Kollision**  
Quelle: Kirfel [146]

Die linke Darstellung zeigt eine Momentaufnahme der aus den Sensorwerten erzeugten Oberfläche des freien Raums. Diese Momentaufnahme kann im Programm eingefroren werden und die Schutzeinrichtung kann hiernach virtuell im Raum bewegt werden. Die Algorithmen zur Bestimmung der Kollision färben die gesamte Oberfläche rot, sobald an einer Stelle eine Kollision erkannt wird, wie in der rechten Darstellung zu sehen (Durchbruch der Schiene in der Mitte).

Ebenfalls im Programm umgesetzt ist die Erstellung der freien Umgebung in einem Octree und die Vereinfachung dieses Octrees auf eine Isofläche (siehe Kapitel 7.4.2).

## 8.5.2 Erweiterung um Roboterschnittstelle und Position

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde der zweite Demonstrator am Roboter montiert. Neben mechanischen Anpassungen (Radius der Schutzvorrichtung, Befestigung an den Aluminiumringen) musste auch das vorhandene Programm (siehe Kapitel 8.5.1) um eine Schnittstelle zur Steuerung des Roboters erweitert werden. Hierzu wurde ein weiterer Thread programmiert und in das Programm eingefügt, der den Quellcode der Schnittstelle zum Webserver des Roboters aus den vorher beschriebenen Programmen (siehe Kapitel 8.3 und 8.4) enthält. Die Schnittstelle zur Sicherheitssteuerung des Roboters aus Kapitel 8.4 kann an dieser Stelle entfallen, da diese spezielle Sicherheitssteuerung von Baumüller nur Teil des im Projekt EsIMiP (siehe Kapitel 1.4.1) verwendeten Demonstrators ist.

Die Positionsdaten des Roboterarms, die mittels der Schnittstelle im Programm erfasst werden, sind mit der Position der Schutzvorrichtung am Roboter verknüpft, so dass eine Bewegung des Roboters sich auf die Bewegung der im Computer dargestellten Schutzvorrichtung überträgt. Über das bereits vorhandene Einfrieren der Oberfläche des freien Raums lässt sich so durch eine reale Bewegung des Roboterarms eine Kollision demonstrieren.





## 9 Untersuchung der Qualität und Sicherheit der Schutzeinrichtung

Bei der Entwicklung einer Schutzeinrichtung müssen insbesondere die gesetzlichen sicherheitstechnischen Anforderungen an Sicherheitsbauteile beachtet werden. Ohne Erfüllung dieser Anforderungen darf die Schutzeinrichtung nicht auf dem Markt bereitgestellt bzw. in Betrieb genommen werden. Der Einsatz für „Forschungszwecke“ ist hiervon ausgenommen. (siehe Kapitel 2.2.1)

Gleichzeitig muss die Qualität der Schutzeinrichtung bezüglich ihrer Reaktionsgeschwindigkeit und der Anzahl ihrer Fehlauflösungen ausreichend sein. Die Anzahl von Fehlauflösungen ist beim Einsatz von Ultraschall stark abhängig von der individuellen Arbeitsumgebung der Schutzeinrichtung wie Reflexionen im Raum und Ultraschallstörquellen und wird im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet. Dies ist Bestandteil der individuell durchzuführenden Risikobeurteilung der fertigen Maschine. Weiterhin kann die in dieser Arbeit beschriebene Schutzeinrichtung mit Sensoren unterschiedlicher Frequenzen realisiert werden, deren Fremdbeeinflussungen variieren können.

Da die Hardware, des im Demonstrator eingesetzten PCs, nicht mit einer späteren industriellen Umsetzung vergleichbar ist, wird die Reaktionsgeschwindigkeit der Schutzeinrichtung anhand des maximal erwarteten Rechenaufwands für die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Algorithmen bestimmt. Dies erlaubt für eine spätere industrielle Anwendung eine Abschätzung der benötigten Hardware für die Ausführung der Kollisionsbestimmung in einer bestimmten Rechenzeit (siehe hierzu Kapitel 3.2.4).

Im Anschluss wird zum Nachweis der Erfüllung der einschlägigen gesetzlichen Bestimmungen zunächst die Einhaltung der sicherheitstechnischen Anforderungen aus den in Kapitel 3.2 vorgestellten Normen dargelegt. Mit diesem Ergebnis wird der Nachweis der Einhaltung der einschlägigen gesetzlichen Bestimmungen geführt, die vom Demonstrator bereits abgedeckt werden.

### 9.1 Rechenaufwand der Berechnung der maximal zulässigen Geschwindigkeit

Kapitel 14 enthält die einzelnen Rechenschritte, die für jede einzelne Berechnung der maximal zulässigen Geschwindigkeit benötigt werden. Dazu wird für eine Messung der Ultraschallsensoren einmal die Oberfläche des freien Raums bestimmt. Hiernach werden Kollisionsberechnungen zwischen Roboterarm und dieser Oberfläche durchgeführt.

Für jede Berechnung der Oberfläche des freien Raums um den Roboterarm sind nach Kapitel 14.1 pro Sensor:

- vier Zugriffe auf je eine Lookup-Tabelle  
und
- bis zu zehn Größenvergleiche von je zwei Längen

erforderlich. Dazu kommen drei Subtraktionen pro Sensor für jede Anpassung der Oberfläche bei dynamischem Sicherheitsabstand (siehe Kapitel 7.3).

Für die Kollisionsberechnung zwischen Roboterarm und Oberfläche des freien Raums sind nach Kapitel 14.2 z.B. beim Einsatz von 80 Sensoren in der Schutzeinrichtung:

- 9600 Divisionen
- 146880 Multiplikationen
- 256800 Subtraktionen/Additionen
- 115200 Vergleiche

im theoretisch schlechtesten Fall erforderlich.

Hierfür können 1319040 Prozessortakte veranschlagt werden, so dass dies von einem 1,3 GHz Prozessor in ca. einer Millisekunde berechnet werden kann. Durch die hohe Parallelisierbarkeit der Berechnungen ist ebenso ein Einsatz von z.B. zwei 650 MHz Prozessoren zum Erreichen einer Rechenzeit von einer Millisekunde möglich. (siehe Kapitel 14.2.2)

Für die Bestimmung der zulässigen Geschwindigkeit werden für jedes Dreieck in der Oberfläche des freien Raums je zehn Kollisionsberechnungen durchgeführt. Da diese Berechnungen in Abhängigkeit des vorherigen Ergebnisses erfolgen, sind sie schwieriger zu parallelisieren, da ergebnisabhängige Berechnungen für die beiden möglichen Ergebnisse (Kollision / keine Kollision) durchgeführt werden müssen. Die Kollision der Vektoren (Mittelachse und Ortsvektor) mit verschiedenen Dreiecken ist allerdings komplett unabhängig und kann daher vollständig parallel ausgeführt werden. Das bedeutet, dass eine Verdopplung der Anzahl der Prozessorkerne auch fast eine Halbierung der Laufzeit des Algorithmus zur Folge hat. Die Grenzen sind hierbei durch die Geschwindigkeit der Kommunikation der Speicher der Prozessoren untereinander gesetzt. Weiterhin ist es möglich die Kollisionsberechnung, die mathematisch immer wieder gleich durchgeführt wird, direkt in der Hardware eines Spezialprozessors auszulagern und so die Geschwindigkeit dieser Berechnungen zu erhöhen.

Nach Kapitel 14.2.2 müssen allerdings nicht immer alle Berechnungen durchgeführt werden, so dass auch der Einsatz eines 725 MHz Prozessors, bzw. mehrerer entsprechend langsamerer, parallel arbeitender Prozessoren, in der Praxis ausreichend ist. Durch den iterativen Aufbau der Algorithmen liegt schnell eine sichere maximal zulässige Geschwindigkeit vor, die im weiteren Verlauf optimiert wird. Somit ist auch ein 725 MHz Prozessor sicher und echtzeitfähig.

## 9.2 Fehlerbetrachtung nach EN ISO 13849-1

Aus der Norm EN ISO 10218 für kollaborierende industrielle Roboter geht, wie in Kapitel 3.2.2.1 beschrieben hervor, dass die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung die Anforderungen

- Performance Level required - PL<sub>r</sub> - „d“  
und
- Kategorie 3

erfüllen muss.

### 9.2.1 Nachweis des erreichten Performance Levels - PL -

Neben der Kategorie der Schutzeinrichtung, die für die Anwendung am kollaborierenden Roboter auf mindestens 3 festgelegt ist, ist für die Berechnung des PL auch die mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall jedes Kanals - MTTF<sub>d</sub> - und der durchschnittliche Diagnosedeckungsgrad - DC<sub>avg</sub> - der eingesetzten Selbsttests relevant. Hierbei erlaubt die Wahl von Bauteilen mit einer hohen MTTF<sub>d</sub> den Einsatz von Selbsttests mit einem niedrigeren DC<sub>avg</sub>, bzw. benötigen Bauteile mit niedrigem MTTF<sub>d</sub> den Einsatz von Selbsttests mit einem hohen DC<sub>avg</sub>. Der Leitfaden des IFA zur EN ISO 13849-1 schreibt hierzu in Kapitel 6.2.14: *„Durch wirksame Tests lässt sich z.B. eine schlechte Zuverlässigkeit der Komponenten teilweise kompensieren.“* [141]

#### 9.2.1.1 Erreichte Kategorie

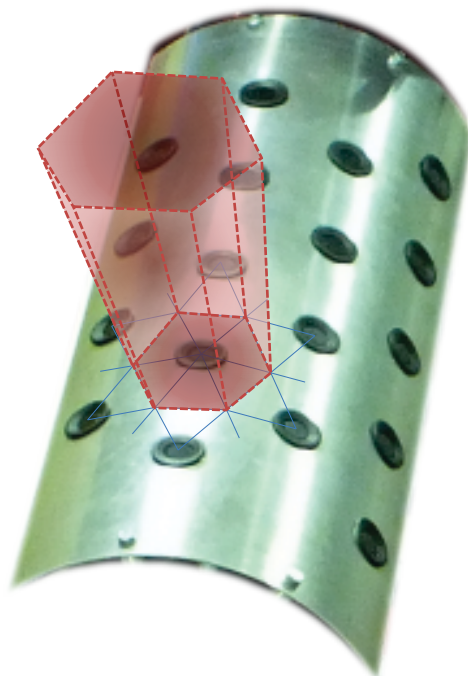
Zur Bestimmung der erreichten Kategorie bzw. des erreichten PL müssen im ersten Schritt die von der Schutzeinrichtung auszuführenden Sicherheitsfunktionen definiert werden. Diese ist für die hier entwickelte Schutzeinrichtung das „Auslösen einer sicheren, reduzierten Geschwindigkeit bei Annäherung von Objekten an den Roboter bzw. vom Roboter an Objekte“.

Für diese Sicherheitsfunktion müssten grundsätzlich alle einzelnen Ultraschall Sensoren der Schutzeinrichtung gemeinsam als eine Einheit betrachtet werden. Die Wahrscheinlichkeit dieses Sensorsystems auszufallen würde sich bei dieser Betrachtungsweise aus den Einzelwahrscheinlichkeiten der einzelnen Sensoren auszufallen zusammensetzen. Ein System mit einer hohen Sensordichte würde deshalb rechnerisch gefährlicher erscheinen als eines mit einer niedrigen. Um solche Fälle pragmatisch sinnvoll lösen zu können, hat die Berufsgenossenschaft Holz und Metall [142] und das IFA [143] je ein Papier vorgestellt, in dem „Sicherheitsfunktionen nach DIN EN ISO 13849-1 bei überlagerten Gefährdungen“ (Titel von [142] und [143]) behandelt werden. Dabei erweitert das Papier des IFA das Papier der Berufsgenossenschaft Holz und Metall.

Das IFA stellt in seinem Papier dar, wie Gefährdungen auf einzelne Gefährdungsbereiche aufgeteilt werden können, in denen nur der gefährdende Aktor betrachtet wird. Dies wird daraus abgeleitet, dass schon die Vorgängernorm EN 954-1 [54] nur Teile einer Sicherheitsfunktion betrachtet, also Sensor, Logik und Aktor separat bewertet werden.

Analog zu diesem Schluss kann man die Gefährdungen auf einzelne Sicherheitsbereiche aufteilen, in denen nur der jeweils überwachende Sensor tätig ist. Eine auf die in dieser Arbeit behandelte Schutzeinrichtung übertragbare Lösung wurde vom IFA in [141] in Kapitel 5.3.2 dargestellt. Hier wird das Beispiel eines Schutzzauns gegeben, bei dem das Öffnen von verschiedenen Schutztüren jeweils als eigene Sicherheitsfunktion modelliert wird.

Dementsprechend lässt sich die in diesem Kapitel vorgestellte Sicherheitsfunktion aufteilen auf „Auslösen einer sicheren, reduzierten Geschwindigkeit bei Annäherung von Objekten an den Roboter bzw. vom Roboter an Objekte in Bereich 1“ bis „Auslösen ... in Bereich n“. Diese Lösung wurde erstmals in [158] präsentiert. Die einzelnen Bereiche können aufgrund der verwendeten Algorithmen gewählt werden. Diese Algorithmen teilen den Raum um den Roboterarm in getrennte, redundant gemessene Bereiche auf (siehe Kapitel 7.1.5.2.4), wie in Abbildung 67 für einen Bereich beispielhaft dargestellt.



**Abbildung 67: Darstellung eines einzelnen Sicherheitsbereichs**

Der Sensor in der Mitte des gezeigten Sicherheitsbereichs ist hierbei ein Kanal der Schutzeinrichtung. Die sechs umgebenden Sensoren bilden den zweiten redundanten Kanal (siehe Kapitel 7.1.5.2.4). Bei symmetrischem Aufbau der Schutzeinrichtung kann jeder Sicherheitsbereich einzeln in das, in Abbildung 68 dargestellte, Blockdiagramm des kollaborierenden Roboters überführt werden.

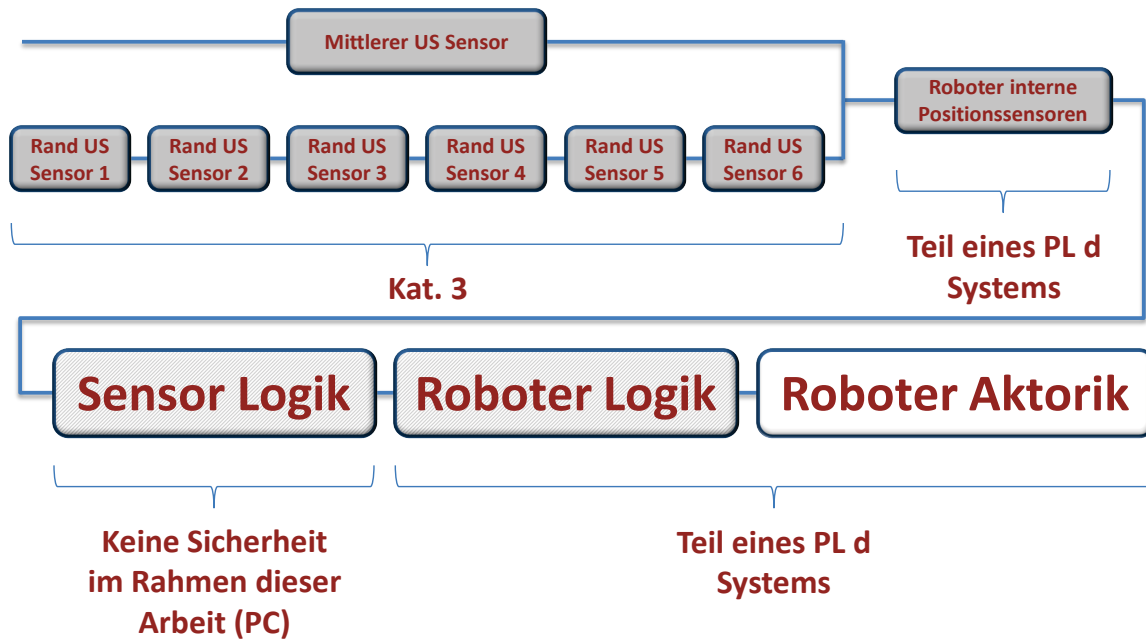


Abbildung 68: Blockdiagramm: Auslösen einer sicheren, reduzierten Geschwindigkeit bei Annäherung an den Roboter in Bereich n (nach [158])

Bei dieser Betrachtung ist jeder einzelne Sensor immer nur Teil jeweils eines Kanals. Bei dessen Ausfall oder Fehlfunktion bleibt die Sicherheit der Schutzeinrichtung, wie nach EN ISO 13849-1 gefordert (siehe Kapitel 3.2.3.2.1), erhalten. Ein Ausfall mehrerer Sensoren ist solange nicht sicherheitskritisch, solange keiner hiervon mit einem anderen ausgefallenen Sensor benachbart ist. Der Ausfall zweier benachbarter Sensoren führt allerdings dazu, dass zwei benachbarte Schutzbereiche nicht mehr sicher überwacht werden.

In Abbildung 68 ist für die Sensor Logik keine Sicherheit angegeben, da diese nicht Teil der vorliegenden Arbeit war und im Rahmen dieser Arbeit über einen PC realisiert wurde. Um das Robotersystem insgesamt sicher und damit für die Praxis einsetzbar zu machen, wird ein Aufbau des gesamten Robotersystems nach Abbildung 69 benötigt.

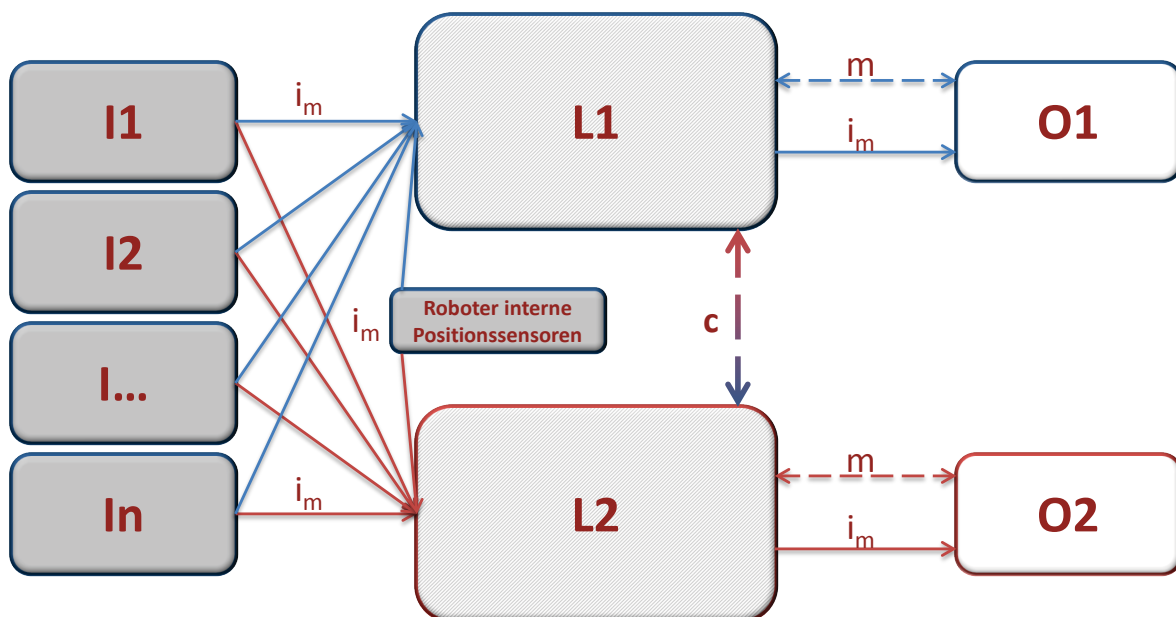


Abbildung 69: Aufbau des Robotersystems inklusive sicherer Logik, blauer Rand: erster Kanal, roter Rand: redundanter Kanal

In Abbildung 69 verwendete Abkürzungen:

- „I1“ und „In“ Eingabeeinheiten (Ultraschallsensoren)

- „L1“ und „L2“ Logiken (Sensorlogik und Aktorlogik)
- „c“ Kreuzvergleich der Ergebnisse
- „O1“ und O2“ Ausgabeeinheiten
- „i<sub>m</sub>“ Verbindungsmittel
- „m“ Überwachungen

Hierbei ist zu beachten, dass, im Gegensatz zur klassischen Darstellung von Kategorie 3 (siehe Kapitel 3.2.3.2.1), alle Sensoren mit beiden Logiken verbunden sein müssen, da jeder Sensor für einen Schutzbereich einen einzelnen Kanal bildet und gleichzeitig für umgebende Schutzbereiche Teil derer überwachender Kanäle ist.

### 9.2.1.2 Erreichte mittlere Zeit jedes Kanals bis zum gefahrbringenden Ausfall - $MTTF_d$

Die  $MTTF_d$ , angegeben in Jahren, ist sowohl der Kennwert der Zuverlässigkeit einzelner Komponenten, als auch der Kennwert von Einheiten die aus mehreren Komponenten bestehen, bis hin zum gesamten System. Der Leitfaden des IFA zur EN ISO 13849-1 führt das Kapitel zum  $MTTF_d$  6.2.11 wie folgt ein:

*„Die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten, aus denen die Steuerung aufgebaut wird, geht entscheidend in die Gesamtzuverlässigkeit des Systems ein. Als Zuverlässigkeitskennwert fließt daher die sogenannte mittlere Zeit bis zum Gefahrbringenden Ausfall  $MTTF_d$  (Mean Time to Dangerous Failure) in den PL mit ein.“ [141]*

Nach Anhang D1.1 dieses Leitfadens des IFA drückt der  $MTTF_d$  Wert aus, dass zu diesem Zeitpunkt „ca. 63 % aller anfänglich intakten Bauteile gefahrbringend ausgefallen sind“ [141].

Die einzelnen Bauteile des im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Ultraschallsensors von Bosch (siehe Kapitel 13.1.2) wurden von Kirfel [148] untersucht und mittels „Parts-Count“ Verfahren nach EN ISO 13849-1 Anhang D [61] wurde ein Wert von 1030 Jahren für die  $MTTF_d$  des gesamten Sensors bestimmt. Daraus folgend, ebenfalls nach dem „Parts-Count“ Verfahren bestimmt, ergibt sich für die sechs Sensoren aus dem zweiten Kanal von Abbildung 68 eine  $MTTF_d$  von 171,7 Jahren. Nach Kapitel 6.2.13 des BGIA-Report 2/2008 [141] kann mittels einer „Failure Mode and Effect Analysis“ -FMEA- meistens ein besseres Ergebnis als mit dem „Parts-Count“ Verfahren bestimmt werden. Allerdings muss die  $MTTF_d$  jedes Kanals in einem Kategorie 3 System auf 100 Jahre begrenzt werden (siehe EN ISO 13849-1 [61] Kapitel 4.5.2). Die Durchführung einer detaillierten FMEA kann hier somit zu keinem besseren Ergebnis führen. Aus diesem Grund wird im Rahmen dieser Arbeit hierauf verzichtet.

Kirfel hat in [148] für die Bestimmung der einzelnen Bauteilwerte typische Werte gleichartiger Bauteile aus der in der Fachwelt anerkannten SN 29500 [72] genutzt. Diese Norm ist Basis für die Bestimmung von Wartungsintervallen von elektrischen Bauteilen und somit eigentlich nicht für den direkten Einsatz in der Sicherheitstechnik geeignet, wird aber unter anderem auch in der EN ISO 13849-1 [61] im Informativen Anhang C für Bauteilwerte herangezogen. Die genauen Werte der Bauteile können von diesen abweichen. Der Wert von 171,7 Jahren für den Kanal 2 aus Abbildung 68 ist, gegenüber den nach der vorgegebenen Kappung nutzbaren 100 Jahren, allerdings ausreichend groß, um im Rahmen dieser Arbeit auf genauere Bauteilwerte zu verzichten.

### 9.2.1.3 Erreichter Diagnosedeckungsgrad - DC

Der DC ist nach Kapitel 3.1.26 der EN ISO 13849-1 definiert als:

*„Maß für die Wirksamkeit der Diagnose, die bestimmt werden kann als Verhältnis der Ausfallrate der bemerkten gefährlichen Ausfälle und Ausfallrate der gesamten gefährlichen Ausfälle“ [61]*

Um ein gesamtes System nach EN ISO 13849-1 abzuschätzen, muss ein „durchschnittlicher DC“ -  $DC_{avg}$  - aller Bauteile bestimmt werden. Dieser  $DC_{avg}$  kann nach EN ISO 13849-1 Anhang E aus den einzelnen DC und den zugehörigen  $MTTF_d$  bestimmt werden. Im Rahmen

dieser Arbeit wird der  $DC_{avg}$  für die Bauteile des Sensorsystems der entwickelten Schutzeinrichtung konservativ abgeschätzt.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden verschiedene Selbsttests entwickelt, die im Rahmen der Arbeit von Kirfel [148] praktisch umgesetzt wurden:

- Tests zum Ausschwingverhalten des Piezoelements
- Erkennen eines zu geringen gemessenen Abstands gegenüber den Nachbarsensoren
- Abschätzen der Wahrscheinlichkeit bei wesentlich größeren, gemessenen Abständen gegenüber den Werten der benachbarten Sensoren
- Prüfen auf Kollision der Sensorkeulen mit der Umgebung

Zusätzlich hat Kirfel im Rahmen seiner Arbeit [148]:

- einen Test anhand des Sensorprotokolls umgesetzt, in dem er testet, ob der Chip im Sensor auf Statusanfragen reagiert.
- einen Test auf Korrelation benachbarter Messwerte programmiert, basierend auf beobachteten Kreuzechos und vorhandenen großen Öffnungswinkeln.

Der durchschnittliche Diagnosedeckungsgrad aller Tests bezogen auf alle Bauteile eines Sensors wurde von Kirfel in seiner Arbeit konservativ mit  $DC_{avg} = 60\%$ , d.h. „niedrig“, abgeschätzt. Diese Schätzung weicht vom real, durch die Kombination der Tests, erreichten Ergebnis nach unten ab. Diese konservative Abschätzung hat aber durch die hohe  $MTTF_d$  keinen Einfluss auf das, im folgenden Kapitel errechnete, Ergebnis und muss daher nicht korrigiert werden.

#### 9.2.1.4 Erreichter Performance Level - PL - Ergebnis

Eine Kombination der Ergebnisse

- Kategorie 3
- $MTTF_d = 100$  Jahre (hoch)
- $DC_{avg} = 60\%$

ergibt nach EN ISO 13849-1 (Abbildung 8 aus Kapitel 3.2.3.2.2) den in EN ISO 10218 (siehe Kapitel 3.2.2.1) geforderten PL „d“ für jeden Sicherheitsbereich des Sensorsystems (siehe Kapitel 9.2.1.1). Da diese Sicherheitsbereiche der Schutzeinrichtung, im Rahmen der Betrachtung des gesamten Robotersystems, hinsichtlich ihres PL einzeln betrachtet werden können, ist eine Kombination der einzelnen PL aller Sicherheitsbereiche nicht erforderlich.

Im gesamten Robotersystem müssen die PL aller Systemteile (Sensorik des Sicherheitsbereichs, Steuerung, Aktoren) zusammen weiterhin die Anforderungen des PL „d“ erfüllen. Um dies nachzuweisen können die Ausfallraten dieser Systemteile addiert werden. Dies ist über deren Wert für ihre durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde - PFH - möglich.

Zwischen dem PL und dem PFH besteht ein numerischer Zusammenhang. In Kapitel 6.1 des Leitfadens des IFA [141] wird erläutert, dass das PL „d“ für eine PFH von  $\geq 10^{-7} 1/h$  bis zu einer PFH von  $< 10^{-6} 1/h$  gilt.

Mit den, in diesem Kapitel bestimmten, Werten kann die exakte PFH aus dem Anhang K der EN ISO 13849-1 bestimmt werden. Es ergibt sich damit eine PFH von  $1,01 * 10^{-7} 1/h$ . Da der Performance Level „d“ bereits bei  $< 10^{-6} 1/h$  beginnt, lässt die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung auch bei konservativer Abschätzung der Werte ausreichend Spielraum für weitere Komponenten, die in der gesamten Sicherheitskette des kollaborierenden Roboters zusätzlich berücksichtigt werden müssen (Steuerung, Aktoren).

## 9.2.2 Erreichter Schutz gegen Ausfälle durch gemeinsame Ursachen - CCF

Eine Bewertung des CCF kann, im Rahmen dieser Arbeit, nicht vorgenommen werden. Die meisten Punkte der Liste in Anhang F der EN ISO 13849-1 (siehe Kapitel 3.2.3.2.3) beziehen sich auf den endgültigen Aufbau der Hardware. Von den abgefragten, maximal zu erreichenden 100 Punkten können durch das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schutzsystem maximal 80 Punkte erreicht werden. Dies ist dadurch bedingt, dass eine Diversität der Kanäle der Schutzeinrichtung nicht gegeben ist, die mit 20 Punkten bewertet wird. Dies ist gegenüber den geforderten, mindestens zu erreichenden 65 Punkten für eine konkrete industrielle Umsetzung ausreichend.

## 9.3 Einteilung des Typs der Berührungslos wirkenden Schutzeinrichtung nach EN 61496-1

Durch die zweikanalige Struktur der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung (siehe Kapitel 9.2.1.1) führt ein einzelner Fehler nicht zum Verlust des Detektionsvermögens. Somit ist zur Einordnung der BWS in den Typ 3 nachzuweisen, dass *„das Auftreten eines weiteren Fehlers nicht zu einem gefährdenden Ausfall [führt, B.O.]“* [64].

An dieser Stelle gibt die Norm keine Anforderungen an die Aufdeckungsrate von Fehlern an. Für die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung ist vorgesehen, dass alle Sensoren im Betrieb getestet werden und somit die Schutzeinrichtung nach dem Erkennen eines Fehlers in den sicheren Zustand wechselt. Sensoren, die aufgrund ihrer Bewegungsbahnen im Prozess nicht regelmäßig bekannte Objekte erfassen und hierüber vollständig verifiziert werden können, müssen für diesen Test regelmäßig außerhalb des Prozessablaufs an einem Objekt geprüft werden. Im Demonstrationsarbeitsplatz im IFA steht hierfür eine senkrecht befestigte Metallstange zur Verfügung, die auch schon zur extrinsischen Kalibrierung des ersten Demonstrators genutzt wurde (siehe Kapitel 8.1).

## 9.4 Messung und Beurteilung der Ultraschallbelastung durch das Sensorarray

Der in dieser Arbeit entwickelte Ultraschallsensorarray (siehe Kapitel 6.2) aus Bosch Ultraschallsensoren (siehe Kapitel 13.1.2) wurde im IFA in der endgültigen Version, in Zusammenarbeit mit dem Referat 4.1 „Lärm“ des IFA, gemessen und anhand der, in Kapitel 3.2.6 angegebenen, Grenzwerte beurteilt [150]. Die Auswertung ergab das in Abbildung 70 dargestellte Schmalbandspektrum im Messabstand von 8 cm senkrecht zu einem mittig platzierten Sensor der Schutzeinrichtung (Messaufbau siehe Abbildung 71):

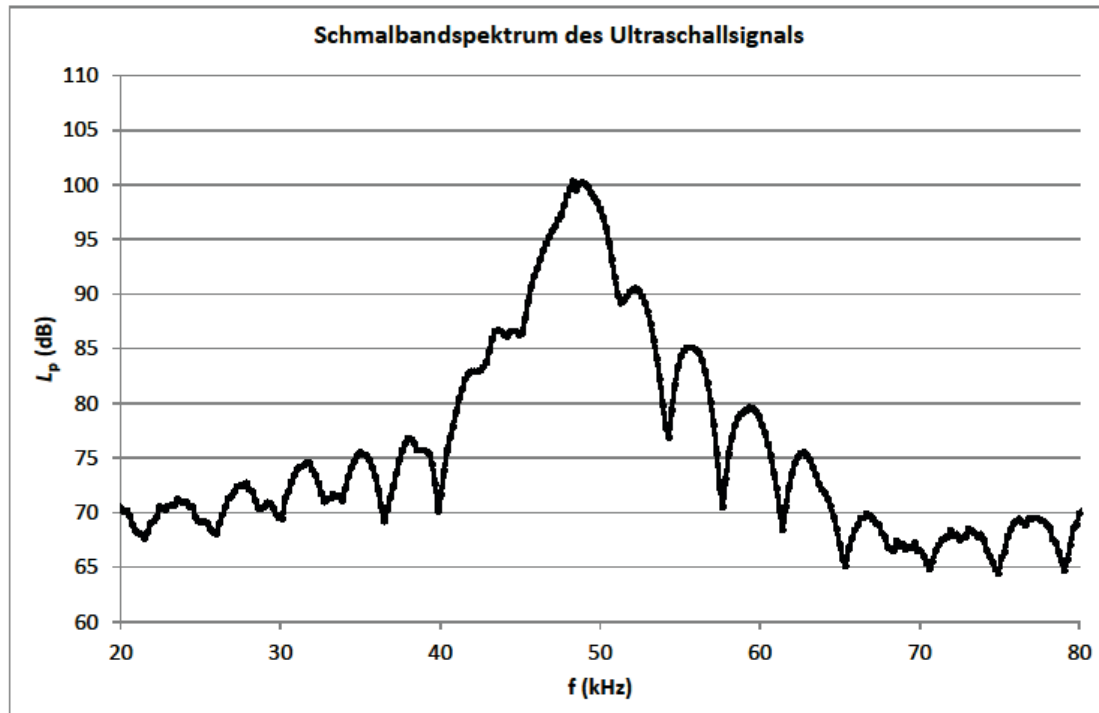


Abbildung 70: Schmalbandspektrum im Abstand von 8 cm  
Quelle: Abbildung aus [150]

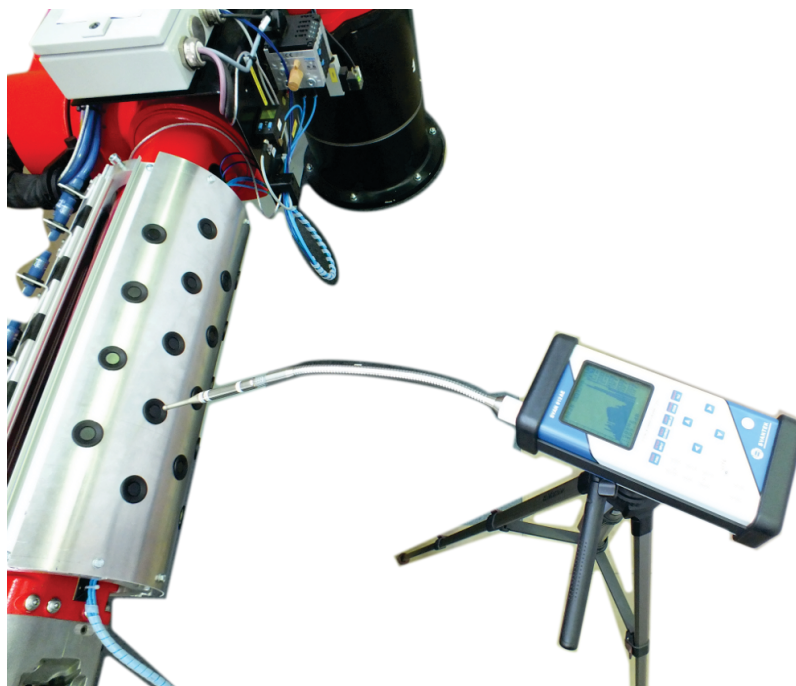
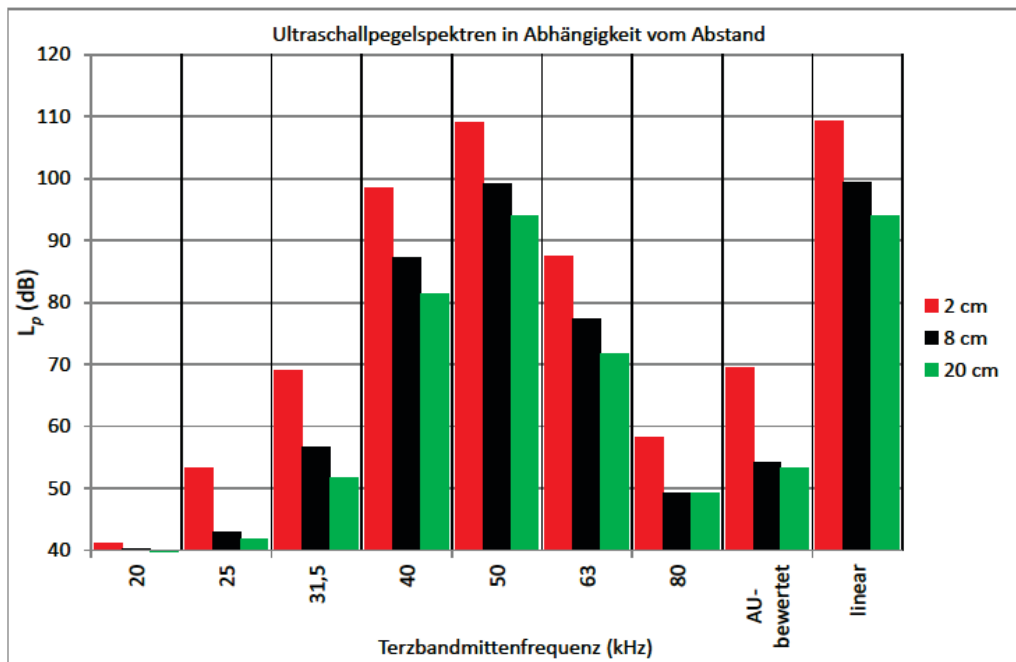


Abbildung 71: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschallkennwerte

Aus dem dargestellten Schmalbandspektrum ist zu erkennen, dass die eingesetzten Sensoren hauptsächlich im Bereich um 50 kHz senden. Subharmonische sind nicht vorhanden. Die von Maue vorgeschlagenen Grenzwerte [139] reichen bis 40 kHz Terzbandmittenfrequenz (siehe Kapitel 3.2.6). Diese können aber, da der Einfluss von Ultraschall auf den menschlichen Körper mit steigender Frequenz abnimmt, linear erweitert werden, ohne das Schädigungsrisiko zu unterschätzen. Daher kann auch für 50 kHz ein maximaler 5-Minuten-Terzschalldruckpegel von bis zu 110 dB als unbedenklich eingestuft werden. Weitere Messungen ergaben hierzu die, in Abbildung 72 dargestellten, Terzspektren im Abstand von 2, 8 und 20 cm zur Schutzeinrichtung.





**Abbildung 72: Ultraschallpegelspektren in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensorsystem**  
Quelle: Abbildung aus [150]

Aus der Abbildung 72 geht hervor, dass die Terzbandmittenfrequenz um 50 kHz bei 2 cm Abstand den größten Beitrag zum Gesamtschalldruckpegel liefert. Interferenzen der Sensoren, die eine signifikante Erhöhung des Schalldruckpegels beim Überlagern von Messbereichen der Sensoren zur Folge haben, wurden bei den Messungen nicht festgestellt. Die Frequenzen um 50 kHz sind bereits in Abbildung 70 als hauptsächliche Arbeitsfrequenz der Bosch-Sensoren identifiziert worden. Selbst im Abstand von nur 2 cm liegt der Schalldruckpegel bei der 50 kHz-Terz unterhalb von 110 dB. Der letzte in [139] angegebene Grenzwert von 110 dB bei 40 kHz wird deutlich unterschritten.

Die Einhaltung des Grenzwerts von  $L_{Zpeak} = 140$  dB (siehe Kapitel 3.2.6) wurde bei einem Abstand von 2 cm zum Sensor untersucht. Hierbei ergab sich ein Wert von  $L_{Zpeak} = 135$  dB [150].

Da im geplanten Arbeitssystem (siehe Kapitel 4) bei vorgesehenem Arbeitsablauf keine Exposition des Bedieners gegenüber dem kollaborierenden Roboter bei weniger als 2 cm Abstand von Roboter zum Ohr des Bedieners zu erwarten ist, kann davon ausgegangen werden, dass der Bediener durch die Einwirkungen des Ultraschalls nicht geschädigt wird. Eine solche Exposition ist selbst im Reparatur- oder Einrichtbetrieb unwahrscheinlich. Bei den Messungen handelt es sich um die Messungen der Luftschallimmission. Eine signifikante Körperschallimmission ist, unter Berücksichtigung der vernünftigerweise vorhersehbaren Fehlanwendung, der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung nicht zu erwarten. Aus diesem Grund wurde, im Rahmen dieser Arbeit, die Körperschallimmission nicht gemessen. In der Betriebsanleitung muss jedoch vor dieser Fehlanwendung gewarnt werden.

## 9.5 Umsetzung der signifikanten grundlegenden Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen

Wie in Kapitel 3.1 dargestellt, muss die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung in einer späteren industriellen Umsetzung u.a. Anforderungen aus folgenden Unterkapiteln des Anhang I der Maschinenrichtlinie einhalten:

- Nr. 1.2 Steuerungen und Befehlseinrichtungen
  - Nr. 1.2.1. Sicherheit und Zuverlässigkeit von Steuerungen
  - Nr. 1.2.3. Ingangsetzen

- Nr. 1.4 Anforderungen an Schutzeinrichtungen
  - Nr. 1.4.1. Allgemeine Anforderungen
  - Nr. 1.4.3. Besondere Anforderungen an nichttrennende Schutzeinrichtungen
- Nr. 1.5 Risiken durch sonstige Gefährdungen
  - Nr. 1.5.8 Lärm
  - Nr. 1.5.11 Strahlung von außen

In diesem Kapitel wird die Erfüllung der signifikanten Anforderungen durch die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung bewertet.

### 9.5.1 Steuerungen und Befehlseinrichtungen

**Tabelle 3:**  
**1.2.1. Sicherheit und Zuverlässigkeit von Steuerungen (Kapitel 3.1.3)**

1.2.1. Sicherheit und Zuverlässigkeit von Steuerungen	Entwickelte Schutzeinrichtung
<b>„Steuerungen sind so zu konzipieren und zu bauen, dass es nicht zu Gefährdungssituationen kommt.“</b>	
	Die Sicherheit der Steuerung der Schutzeinrichtung ist nicht Gegenstand dieser Arbeit (PC – siehe Kapitel 6.2.1). Die Steuerung ist fest mit dem Arm des Roboters verbunden und somit Beschleunigungen und Erschütterungen ausgesetzt. Im Rahmen des Projekts ergaben sich keine negativen Auswirkungen durch mechanische Beanspruchung. Allerdings kann dies nicht als Basis für die Entwicklung eines Serienprodukts angesehen werden.

**Tabelle 4:**  
**1.2.3. Ingangsetzen (Kapitel 3.1.3)**

1.2.3. Ingangsetzen	Entwickelte Schutzeinrichtung
<b>„Das Ingangsetzen einer Maschine darf nur durch absichtliches Betätigen einer hierfür vorgesehenen Befehlseinrichtung möglich sein. [...] Bei Maschinen, die im Automatikbetrieb arbeiten, darf das Ingangsetzen oder Wiedereingangssetzen nach einer Abschaltung [...] ohne Bedienereingriff möglich sein, sofern dies nicht zu einer Gefährdungssituation führt.“</b>	
	Die in Nr. 1.2.3. festgelegten Anforderungen für das „Ingangsetzen“, speziell für das „Wiedereingangssetzen nach einem Stillstand“, zeigen deutlich, dass das Fortführen einer, wegen Annäherung eines Fremdkörpers unterbrochenen, Bewegung gestattet ist, da die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung den freien Bewegungsraum eindeutig feststellen kann. Somit entsteht durch das Wiedereingangssetzen keine Gefährdung.

## 9.5.2 Anforderungen an Schutzeinrichtungen

Tabelle 5:  
1.4.1. Allgemeine Anforderungen (Kapitel 3.1.2)

1.4.1. Allgemeine Anforderungen	Entwickelte Schutzeinrichtung
<b>Trennende und nichttrennende Schutzeinrichtungen</b>	
- <b>müssen stabil gebaut sein</b>	
	Der Demonstrator (siehe Abbildung 26) besteht aus einer stabilen Stahlplatte. In diese sind in der Praxis erprobte Ultraschallsensoren aus dem Automobilbereich versenkt eingesetzt. Die Befestigung am Roboter besteht aus stabilen Aluminiumringen.
- <b>müssen sicher in Position gehalten werden</b>	
	Die Stahlplatte des Demonstrators ist dauerhaft mit den o.a. Aluminiumringen verbunden. Die Aluminiumringe sind formschlüssig mittels Quetschverbindung am Roboterarm befestigt.
- <b>dürfen keine zusätzlichen Gefährdungen verursachen</b>	
	Durch die gebogene Oberfläche und die abgerundeten Kanten der mechanischen Bauteile entstehen keine neuen Gefährdungen. Zu Gefährdungen durch Lärm siehe Tabelle 8.
- <b>dürfen nicht auf einfache Weise umgangen oder unwirksam gemacht werden können</b>	
	Die Ultraschallüberwachung kann durch Abdecken der Sensoren (kein zurückfallender Schall wird gemessen), durch Anhalten des Piezos (kein Schall wird erzeugt) und durch Umlenken der Schallkeulen (falsche Werte werden gemessen) manipuliert werden. Die aufgezählten Manipulationen werden über die implementierten Selbsttests (siehe Kapitel 9.2.1.3) erkannt.
- <b>müssen ausreichend Abstand zum Gefahrenbereich haben</b>	
	Die Berechnung des notwendigen Abstands ist in Kapitel 3.2.4.3 beschrieben. Durch die Umsetzung der in Kapitel 7 beschriebenen Algorithmen wird sichergestellt, dass der notwendige Sicherheitsabstand bei Bewegung des Roboters eingehalten wird. Die Abstände zu beweglichen Teilen werden auf Einhaltung der normativen Vorgaben aus EN ISO 13855 überwacht.
- <b>dürfen die Beobachtung des Arbeitsvorgangs nicht mehr als unvermeidbar einschränken</b>	
	Die Beobachtung des Arbeitsvorgangs wird durch die Schutzeinrichtung nicht eingeschränkt.
- <b>müssen die für das Einsetzen und/oder den Wechsel der Werkzeuge und zu Wartungszwecken erforderlichen Eingriffe möglichst ohne Abnahme oder Außerbetriebnahme der Schutzeinrichtungen zulassen, wobei der Zugang ausschließlich auf den für die Arbeit notwendigen Bereich beschränkt sein muss</b>	
	Die Schutzeinrichtung am Roboterarm, die Gegenstand dieser Arbeit ist, ist fest installiert und verbleibt beim Wechsel des Werkzeugs am Arm. Anmerkung: Eine zusätzliche Schutzeinrichtung für das Werkzeug, die nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, ist unter Umständen auf dieses anzupassen und muss daher mit diesem gewechselt werden.

Tabelle 6:

## 1.4.3. Besondere Anforderungen an nichttrennende Schutzeinrichtungen (Kapitel 3.1.2)

1.4.3. Besondere Anforderungen an nichttrennende Schutzeinrichtungen	Entwickelte Schutzeinrichtung
<b><i>Nichttrennende Schutzeinrichtungen müssen so konstruiert und in die Steuerung der Maschine integriert sein, dass</i></b>	
- <b><i>die beweglichen Teile nicht in Gang gesetzt werden können, solange sie vom Bedienungspersonal erreicht werden können</i></b>	
	Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung verhindert das Bewegen des Roboters in Richtung des Bedienungspersonals, wenn dieses den Sicherheitsabstand zum Roboterarm unterschreitet. Eine Bewegung, die nicht auf das Bedienungspersonal hin gerichtet ist, wird, im Rahmen dieser Arbeit, als nicht gefährdend angesehen. Somit gilt hier die in Kapitel 3.1 beschriebene Ausnahme aus Nr. 2 der „Allgemeinen Grundsätze“ der MRL, dass dies nur bei einer entsprechenden Gefährdung vorzusehen ist.
- <b><i>Personen die beweglichen Teile nicht erreichen können, solange diese Teile in Bewegung sind, und</i></b>	
	Die Berechnung des notwendigen Abstands ist in Kapitel 3.2.4.3 beschrieben. Durch die Umsetzung der in Kapitel 7 beschriebenen Algorithmen wird sichergestellt, dass der notwendige Sicherheitsabstand bei Bewegung des Roboters eingehalten wird. Die Abstände zu beweglichen Teilen werden auf Einhaltung der normativen Vorgaben aus EN ISO 13855 überwacht.
- <b><i>bei Fehlen oder Störung eines ihrer Bestandteile das Ingangsetzen der beweglichen Teile verhindert wird oder die beweglichen Teile stillgesetzt werden.</i></b>	
	Selbsttests, die eine Fehlfunktion feststellen, wurden programmiert und die Erfassung der Umgebung ist in Kategorie 3 nach EN ISO 13849-1 implementiert. Eine normativ geforderte zweikanalige Auswertung der Sensordaten ist nicht Gegenstand dieser Arbeit (Auswertung hier über PC) und muss bei einer industriellen Umsetzung erstellt werden. (siehe Tabelle 3)
<b><i>Ihre Einstellung darf nur durch eine absichtliche Handlung möglich sein.</i></b>	
	Die Ultraschallsensoren sind fest und in eindeutiger Position mit der Stahlplatte verbunden. Verstellmöglichkeiten sind nicht vorgesehen. Da die sichere Umsetzung der Steuerung der Schutzeinrichtung nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, wird auch der Teil der sicheren Parametrierung der Schutzeinrichtung hier nicht behandelt (Parametrierung hier über PC – siehe Tabelle 3).

### 9.5.3 Risiken durch sonstige Gefährdungen

Tabelle 7:  
1.5.11. Strahlung von außen (Kapitel 3.1.4)

1.5.11. Strahlung von außen	Entwickelte Schutzeinrichtung
<p><b><i>Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass ihre Funktion durch Strahlung von außen nicht beeinträchtigt wird.</i></b></p>	
	<p>Da die sichere Umsetzung der Steuerung der Schutzeinrichtung nicht Gegenstand dieser Arbeit ist, ist der im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Demonstrator nicht im Hinblick auf Störfestigkeit entwickelt worden. Eine EMV Bewertung der Schutzeinrichtung bleibt der industriellen Umsetzung überlassen.</p>

Tabelle 8:  
1.5.8. Lärm (Kapitel 3.1.5)

1.5.8. Lärm	Entwickelte Schutzeinrichtung
<p><b><i>Die Maschine muss so konstruiert und gebaut sein, dass Risiken durch Luftschallemission insbesondere an der Quelle so weit gemindert werden, wie es nach dem Stand des technischen Fortschritts und mit den zur Lärminderung verfügbaren Mitteln möglich ist.</i></b></p>	
	<p>Die Gefährdung durch Lärm wird in Kapitel 0 dieser Arbeit untersucht. Eine Gefährdung durch Lärm ist danach, nach dem Stand der Technik, nicht zu erwarten.</p>



## 10 Zusammenfassung und Ausblick

### 10.1 Zusammenfassung

Die Mensch-Roboter Kollaboration ist ein Arbeitsszenario, dass in der nahen Zukunft große Beachtung erfahren wird. Schon heute existieren vereinzelt Arbeitsplätze mit sicherheitstechnisch geprüften kollaborierenden Robotern in der Industrie (siehe Kapitel 5.1.4).

Diese Arbeit stellt die Entwicklung einer Schutzeinrichtung vor, die den Arm eines Roboters absichert, so dass für diesen ein sicheres, kollisionsfreies Kollaborieren mit dem Menschen möglich ist. Die dargestellte Schutzeinrichtung beschränkt sich, im Rahmen dieser Arbeit, auf die Absicherung des Unterarms des Roboters, betrachtet an geeigneten Stellen allerdings auch die Absicherung des Tool Center Points - TCP -.

Als Basis für die Entwicklung der Schutzeinrichtung wird die rechtliche Lage im europäischen Wirtschaftsraum und speziell in Deutschland dargestellt. Weiterhin werden die technischen Anforderungen an die Schutzeinrichtung aus den gesetzlichen Vorgaben ermittelt sowie die Vorgaben aus den Normen, die für einen kollaborierenden Roboter die allgemein anerkannten Regeln der Technik darstellen. Der Stand der Technik wird an verschiedenen existierenden Systemen gezeigt und der Stand der Wissenschaft wird aus Projekten um kollaborierende Roboter dargestellt.

Aus diesen Ergebnissen wird als Konzept für die in dieser Arbeit behandelten Schutzeinrichtung ein Sensormodul aus vielen parallel messenden Ultraschallsensoren erarbeitet, das am Roboterarm angebracht wird und den, um den Roboterarm, freien Raum sicher misst.

Ein Prototyp der Schutzeinrichtung wurde im Rahmen dieser Arbeit entwickelt und bereits auf verschiedenen Vorträgen und Vorführungen, unter anderem zum Abschluss des Projektes EsIMiP (siehe Kapitel 1.4.1), der Öffentlichkeit vorgestellt.

Diese Arbeit zeigt, dass die entwickelte Schutzeinrichtung den ermittelten gesetzlichen und normativen Vorgaben genügt und somit die Basis für einen sicher kollaborierenden Roboter bildet.

### 10.2 Thesen Betrachtung

Tabelle 9: Die Ergebnisse der Arbeit in Bezug auf die in Kapitel 1.5 aufgestellten Thesen

These	Bewertung / Begründung
<b>Eine sicherheitsgerichtete Überwachung eines Roboters in einem Arbeitsbereich mit bekannten Ausmaßen kleiner 5x5m ist mit markerloser Sensortechnik möglich.</b>	verifiziert
	In der vorliegenden Arbeit wird gezeigt, dass ein Roboter in einem Arbeitsraum, mit am Roboter montierten Ultraschallsensoren, möglich ist. Zur Wirksamkeit des dargestellten Konzepts sind keine Markeirungen an der Umgebung oder dem bedienenden Personal notwendig.
<b>Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend schnell möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.</b>	verifiziert
	Die in dieser Arbeit dargestellte Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten erfolgt im Bereich von 30 ms. Dies bedeutet nach EN ISO 13855 einen Sicherheitsabstand von 6 cm. Zusätzlich muss hierbei noch die Reaktionszeit des Roboters beachtet werden, die in dieser Arbeit mit zusätzlichen 70 ms angenommen wird, was einen zusätzlichen Sicherheitsabstand von weiteren 14 cm bedeutet. Dieser

	Abstand hängt vom Roboter ab, dessen Entwicklung nicht Gegenstand dieser Arbeit ist.	
<b>Eine Erfassung und Verarbeitung der Umgebungsdaten ist ausreichend genau möglich, um einen geringen Abstand zwischen Mensch und Roboter zuzulassen.</b>		verifiziert
	Durch die in dieser Arbeit beschriebenen, geometrischen Algorithmen zur Bestimmung der Oberfläche des freien Raums, insbesondere durch die zum Nachweis der Sicherheit benötigte Zweikanaligkeit (siehe Kapitel 7.1.5.2.4), geht ein geringer Prozentsatz des maximal erfassten freien Raums verloren. Der Raum, der zweikanalig als frei bestimmt wird, ist ausreichend genau, um damit kollaborierend arbeiten zu können.	
<b>Mehrere aktive Sensoren lassen sich zu einem redundanten Array zusammenschalten um eine sichere, zweikanalige Auswertung zu ermöglichen. Hierbei wird die notwendige Kategorie 3 und der notwendige Performance Level „d“ nach EN ISO 13849-1:2008 [61] erreicht.</b>		verifiziert
	Im Rahmen dieser Arbeit wird die benötigte zweikanalige Auswertung der Sensoren beschrieben (siehe Kapitel 7.1.5.2.4). Der Nachweis, dass die Schutzeinrichtung die Anforderungen an ein Kategorie 3 System erfüllt wird in Kapitel 9.2.1.1 geführt. Zusammen mit weiteren, nach EN ISO 13849-1:2008 geforderten, Werten wird in 9.2.1.4 dargestellt, dass die Schutzeinrichtung die Anforderungen an Performance Level „d“ voll erfüllt.	
<b>Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung kann die rechtlichen Anforderungen an das Inverkehrbringen erfüllen und damit eine Grundlage zur Erfüllung der Arbeitsschutzanforderungen an ein kollaborierendes Robotersystem bilden.</b>		verifiziert
	Im Rahmen dieser Arbeit wurde die Erfüllung der rechtlichen Grundlagen an das Inverkehrbringen von Schutzeinrichtungen betrachtet, die nicht unbedingt Teil der industriellen Umsetzung sind. In Kapitel 9.5 wird gezeigt, dass die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung diese signifikanten Anforderungen erfüllt und dass es für die Erfüllung der restlichen relevanten Anforderungen kein Hindernis gibt. Wie in Kapitel 2.4.4 gezeigt wird, ist dies ein wesentlicher Punkt, um den Anforderungen des Arbeitsschutzes, insbesondere § 7 Absatz 1 der BetrSichV, zu genügen.	

### 10.3 Praktischer Nutzen

Die in dieser Arbeit vorgestellte Schutzeinrichtung ist nicht speziell für einen industriellen Roboter entwickelt worden, sondern universell für Roboter unterschiedlicher Hersteller einsetzbar. Hierbei ist lediglich zu beachten, dass der Roboter über eine Schnittstelle verfügen muss, über die er die nächste anzufahrende Position übermittelt und eine kurze Zeit wartet (ca. 10 ms), bevor diese Position angefahren wird. Es ist darauf geachtet worden, dass diese Positionsdaten nicht sicher übermittelt werden müssen, so dass jede Prozesssteuerung hierzu in der Lage ist.

Weiterhin ist zum Einsatz dieser Schutzeinrichtung eine sichere Steuerung nötig, die die Bewegungsrichtungen und Geschwindigkeiten der Achsen des Roboters überwacht. Da diese Steuerung in jedem nicht inhärent sicheren kollaborierenden Roboter vorhanden sein muss, stellt sie keinen Mehraufwand dar. Die notwendige Exaktheit der Überwachung ist allerdings noch nicht in allen sicheren Steuerungen enthalten. (siehe Kapitel 7.2.2.1)



In der Arbeit ist gezeigt, dass zum Berechnen der zulässigen Geschwindigkeit innerhalb einer Millisekunde in der Regel ein 750 MHz Prozessor für einen Kanal ausreicht, so dass eine Umsetzung in der Industrie möglich ist. Fernerhin können die gezeigten Algorithmen weitestgehend parallelisiert werden, so dass Erweiterungen des Systems mit mehr Sensoren steuerungstechnisch kein Problem darstellen.

Die in dieser Arbeit entwickelte Schutzeinrichtung ist im Hinblick auf kollaborierende Roboter entwickelt. Ein Einsatz an anderen Objekten als Schutzeinrichtung ist allerdings möglich, solange die sicherheitstechnischen Anforderungen an die Schutzeinrichtung Kategorie 3 und Performance Level „d“ nach EN ISO 13849-1 [61] nicht übersteigen.

## 10.4 Ausblick

Im Rahmen dieser Arbeit sind verschiedene Punkte angesprochen worden, die in späteren Projekten bearbeitet werden können:

- In Kapitel 5.2.2.4 wird dargestellt, dass nicht beliebig viele Ultraschallsysteme nebeneinander am Roboter arbeiten können. Da der Oberarm des Roboters in der Regel nicht oder nicht oft an der Kollaboration mit dem Menschen beteiligt ist, ist es sinnvoll, diesen auf andere Art zu schützen. Dies ist zum Beispiel mit einem an der Basis des Roboters befestigten 2D-Laserscanner möglich, dessen Ortsbestimmung von eindringenden Objekten für eine direkte Kollaboration ungeeignet ist (siehe Kapitel 5.2.2.3).
- Im Rahmen dieser Arbeit wurde unter anderem eine Integration der neu entwickelten Schutzeinrichtung mit Ultraschallsensoren in ein vorhandenes Programm, das eine 3D-Kamera nutzt, vorgestellt (siehe Kapitel 8.3). Dabei wurde darauf verzichtet, die Geschwindigkeitsplanung der Ultraschall-Schutzeinrichtung mit der Pfadplanung der 3D-Kamera aus [153] zu verknüpfen, da dies bereits Teil des Projektes EsIMiP war [162]. Eine solche Verknüpfung kann das Ergebnis des Projektes EsIMiP (siehe Kapitel 1.4.1) im IFA in einem demonstrationsfähigen Gerät präsentieren.
- Wie in Kapitel 5.2.2.6 dargestellt, ist der Einsatz von Radarsensoren am Roboter, aus heutiger Sicht, nur begrenzt möglich. Sobald Radarsensoren mit Ultraschallsensoren in Bezug auf Mindestabstand des Messobjekts und Auflösung gleichziehen, ist ein Ersatz der Ultraschallsensoren bzw. deren Ergänzung mit Radarsensoren bei gleichem Konzept möglich. Dies würde das Einsatzgebiet der Schutzeinrichtung erweitern.
- Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine mechanischen Möglichkeiten genutzt, um zu verhindern, dass die Schutzeinrichtung hervorstehende Teile des Roboters erkennt. Hierzu können zum Beispiel Umlenkflächen eingesetzt werden, die dafür sorgen, dass der von den Sensoren ausgesendete Ultraschall nicht auf diese Flächen trifft, bzw. von diesen Flächen nicht in Richtung Schutzeinrichtung reflektiert wird. Das Umlenken von Ultraschall ist in der industriellen Anwendung gängige Praxis [21].
- Eine Ultraschall basierte Schutzeinrichtung, die sowohl Arm, als auch Werkzeug schützt, ruft regelmäßig durch Abknicken des Werkzeugs die Situation hervor, dass Sensoren direkt aufeinander gerichtet sind. Dies ist für die Anwendung der in dieser Arbeit beschriebenen Schutzeinrichtung ausgeschlossen (siehe Kapitel 6.2.2). Eine mögliche Lösung ist eine intelligente Ansteuerung der Sensoren, die in diesem Fall einen Teil der betroffenen Sensoren passiv schaltet, so dass diese nur noch Ultraschallsignale empfangen und nicht selber Messsignale senden. Eine zweite Möglichkeit ist die in dieser Arbeit diskutierte Option der Nutzung verschiedener Frequenzen für die einzelnen Teilsysteme (siehe Kapitel 5.2.2.4).
- Der Unterschied des angezeigten zum tatsächlichen freien Raum kann auf Kosten der Rechenzeit reduziert werden, wenn die Position der Rasterlinien nicht festgelegt sondern für jede Berechnung neu erstellt wird. Durch den Versatz der Sensoren zueinander sind die in dieser Arbeit angegebenen Punkte nicht immer optimal zum

Schnittpunkt der benachbarten Sensorkeulen. Um diese Schnittpunkte mathematisch zu bestimmen sind allerdings Kugeln miteinander zu schneiden, was mathematisch aufwändiger ist, als das in Kapitel 7.1.5.2 dargestellte Verfahren. Auch ist die erläuterte Nutzung von Lookup-Tabellen (siehe Kapitel 9.1 und 14.1.3) zur Wandlung von Sensormesswerten zur Oberfläche des freien Raums aufgrund der Vielzahl an möglichen Kombinationen unter Umständen nicht mehr möglich. Im Rahmen dieser Arbeit wurden daher feste Durchstoßpunkte gewählt, die für die Reichweite des überwachten Raums möglichst optimal liegen. Die eingesparte Rechenzeit kann dann in die Dynamisierung des Sicherheitsabstands investiert werden (siehe Kapitel 7.3).

# 11 Verzeichnisse

## 11.1 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Anzahl von Robotern im Betrieb, 1961 – 2012 Datenquelle: IFR Statistical Department [4] .....	11
Abbildung 2: Vergleich von Robotern im Betrieb (in 1000) zu Unfällen im Betrieb, Datenquellen: IFR Statistical Department [4] und DGUV Referat "Statistik - Arbeitsunfälle, Prävention" [138] .....	14
Abbildung 3: Tortendiagramm der Verletzungen verteilt auf ihre Orte Zahlenwerte: Gesamtzahl der Verletzungen 2005 – 2012 [138] .....	15
Abbildung 4: Vom EU-Recht zum nationalen Recht.....	19
Abbildung 5: Zusammenhang der Anforderungen an die Sicherheit von Steuerungen kollaborierender Roboter – aus Kapitel 5.10 der EN ISO 10218-1 .....	38
Abbildung 6: Vereinfachtes V-Modell des Softwarelebenszyklus, Quelle: EN ISO 13849-1, Bild 6 [61].....	41
Abbildung 7: Kategorie 3 mit Hervorhebung der in der Arbeit behandelten Teile Quelle: EN ISO 13849-1 Bild 11 – Vorgesehene Architektur für Kategorie 3 [61].....	42
Abbildung 8: Performance Level bei feinstufiger Auflösung der DC <sub>avg</sub> Skala Quelle: BGIA-Report 2/2008, Abbildung G.4 [141] (Ausschnitt).....	43
Abbildung 9: Zusammenhang aktueller Abstand – maximal erlaubte Geschwindigkeit für eine Reaktionszeit von 100ms .....	48
Abbildung 10: Einflüsse im Arbeitssystem .....	51
Abbildung 11: Aufbau des Demonstrations-Arbeitsplatzes .....	52
Abbildung 12: Reis RV-30-16 mit angebautem pneumatischen Greifer .....	54
Abbildung 13: Allozentrische Anbringung von 3D Kameras im Arbeitsplatz Quelle: Eigener Vortrag, 2010 [155].....	59
Abbildung 14: Egozentrische Anbringung von Ultraschallsensoren am Arbeitsmittel (Roboter) Quelle: Eigener Vortrag, 2010 [155].....	60
Abbildung 15: Ultraschallsensoren im Kreis um den zu schützenden Arm.....	70
Abbildung 16: Sensoren sind oben am Arm platziert und messen entlang des Arms.....	71
Abbildung 17: Sensoren sind mittig am Arm platziert und messen in verschiedenen Winkeln nach allen Seiten vom Arm weg und am Arm entlang .....	72
Abbildung 18: Flächendeckende Platzierung in Reihen um den Roboterarm.....	72
Abbildung 19: Ultraschallsensoren um das Werkzeug / den TCP herum angebracht .....	73
Abbildung 20: Ultraschallsensoren an einer Seite des Werkzeugs / des TCP angebracht ....	74
Abbildung 21: Anbringung von Sensoren die in verschiedenen Winkeln (Kapitel 6.1.1.3) bzw. senkrecht zum Arm (Kapitel 6.1.1.4) messen und automatisch um den Arm verstellbar angebracht sind.....	75
Abbildung 22: Konzept des Basisrahmens für die Sensoren, bestehend aus Metallringen und Schienen.....	77
Abbildung 23: Erster Aufbau der Ultraschallsensoren pico+ von microsonic am Roboter RV-30-16 von Reis .....	78
Abbildung 24: Bild der in [148] entstandenen Demonstrationshalbschale mit eingezeichneter Wabenstruktur .....	79
Abbildung 25: Überlagerung der Sensorkeulen, rot Standardempfindlichkeit, blau erhöhte Empfindlichkeit.....	79
Abbildung 26: Finaler Aufbau der Sensoren am Roboter.....	80

Abbildung 27: Vier Ultraschallsensoren auf gleicher Höhe, kein Sensor liegt im Abstrahlwinkel eines anderen, Quelle: Nach [156] .....	81
Abbildung 28: Eindringendes Objekt wirft Echo zurück, Sensor 2 misst geringste Distanz Quelle: Nach [156] .....	81
Abbildung 29: Verkürzte Schalllaufzeit für Sensor 4 Quelle: Nach [156].....	82
Abbildung 30: Fehlerhafte Messungen (blau) bei gleichzeitiger Messung, minimale Distanz bleibt unbeeinflusst Quelle: Nach [156] .....	82
Abbildung 31: Vollständiger als frei von Objekten gemessener Raum Quelle: Nach [156].....	83
Abbildung 32: Einbindung der Ultraschallabstände in das in [153] entwickelte Programm, Bild mit und ohne Hervorhebungen .....	86
Abbildung 33: Einbindung der geometrischen Form der Ultraschallkeulen in das in [153] entwickelte Programm.....	87
Abbildung 34: Fünf sich überlagernde Sensorkeulen (z.B. hier Bosch Ultraschallsensor – siehe Kapitel 13.1.2) bilden eine neue, komplexere Form .....	88
Abbildung 35: Sensorkeulen im Pixelraster: Pink = freier Raum, durchsichtig = unbekannt / Objekt vorhanden .....	89
Abbildung 36: Arbeitsraum als ein Quader dargestellt 1) Ursprungsquader; 2) Erste Teilung in acht Teilquader; 3) Erneute Teilung eines Teilquaders.....	89
Abbildung 37: Darstellung der freien Bereiche aus Abbildung 35 in einem Quadtree .....	90
Abbildung 38: OpenGL Darstellung des Roboters mit dem von den Sensoren als frei erkanntem Raum (rosa) in einem Octree .....	91
Abbildung 39: Beispiele für die Vereinfachung der geometrischen Formen der Sensorkeulen zu Kugelausschnitten .....	92
Abbildung 40: Abdeckung der Sensorkeulen bei empfindlicher Einstellung in der Seitenansicht, der mittlere Sensor ist 5 cm hinter den seitlichen angeordnet .....	93
Abbildung 41: Graphische Bestimmung des Sensorbereichs, der von allen umliegenden Sensoren erfasst wird .....	94
Abbildung 42: Anordnung des Rasternetzes rote Punkte: Durchstoß durch die Oberfläche der Halbschale blaue Linien: Verbindung der Durchstoßpunkte zu einem Gitternetz.....	95
Abbildung 43: Darstellung der Stützlinien durch und zwischen den Sensorkeulen im zweidimensionalen Raum .....	96
Abbildung 44: Ausschnitt der äußeren Fläche um den Reis RV-30-16, blau: an der Schutzeinrichtung anliegend, rot: über der Schutzeinrichtung.....	96
Abbildung 45: Kugelausschnitte, die sich aus den Messwerten der Sensoren bis zur Hand ergeben, inklusive der Grenzen zum einfach und redundant gemessenen tatsächlichen freien Raum .....	97
Abbildung 46: Schnittpunkte zwischen dem Raster und den ersten beiden Kugelausschnitten .....	97
Abbildung 47: Mathematische Reduzierung der Kugelausschnitte auf die notwendige Breite und Schnittpunkte zwischen dem Raster und allen Kugelausschnitten .....	98
Abbildung 48: Erweiterung der Schnittpunktbestimmung um redundante Messergebnisse zu erreichen .....	99
Abbildung 49: Durchstoßpunkte der Rasterlinien (orange) die mit dem Kugelabschnitt des mittleren Sensors geschnitten werden müssen. ....	99
Abbildung 50: Reduzierung des angezeigten freien Raums um den Radius der Halbschale.....	100

Abbildung 51: Weitere Reduzierung des angezeigten freien Raums um den Mindestabstand $S$ (siehe Kapitel 3.2.4.3).....	100
Abbildung 52: Mögliche Eindringung in den ermittelten freien Raum, waagrecht zur Schutzeinrichtung .....	101
Abbildung 53: Übertragung einer gemessenen Eindringung auf benachbarte Rasterlinien.....	101
Abbildung 54: Abstandsbestimmung zwischen Roboter und einzelnen Körperteilen des Menschen Quelle: Som, Reis GmbH & Co. KG Maschinenfabrik [135] .....	103
Abbildung 55: Kommunikation der einzelnen Komponenten untereinander Sichere Pfade durchgezogen und fett.....	105
Abbildung 56: Kollisionsbestimmung über die Wege aller Punkte der Mittelachse des Roboterarms.....	106
Abbildung 57: Kollisionsbestimmung der Mittelachse des Roboterarms in diskreten Positionen.....	107
Abbildung 58: Mögliche Ergebnisse der Kollisionsbestimmung 1. Keine Kollision 2. Kollision von Mittelachse und Umgebung 3. Kollision von Ortsvektor und Umgebung .....	108
Abbildung 59: Beispiel Berechnung der Geschwindigkeit über iterative Annäherung nach [154].....	108
Abbildung 60: Darstellung der Berechnungen, die zu den Ergebnissen aus Abbildung 59 führen.....	109
Abbildung 61: Erweiterung der Abbildung 51 um einen Sicherheitsabstand von 14,5 cm .....	110
Abbildung 62: Form der Sensorkeulen bei Anwesenheit eines statischen und eines danebenliegenden dynamischen Objekts.....	112
Abbildung 63: Erweiterung des freien Raums um eingeschlossene Flächen. ....	113
Abbildung 64: Darstellung des Programmablaufs aus [153] erweitert um die im Rahmen dieser Arbeit programmierten Komponenten (dunkelblau, weiße Schrift: aus [153] vorhanden hellblau, schwarze Schrift / rote Pfeile: im Rahmen dieser Arbeit entwickelt hell-dunkler Datenaustausch: im Rahmen dieser Arbeit erweitert) .....	117
Abbildung 65: Darstellung des Programmablaufs zur Kommunikation mit der Prozesssteuerung und der Bewegungsüberwachung des Roboters (dunkelblau, weiße Schrift: externe Komponenten von Reis / Baumüller hellblau, schwarze Schrift / rote Pfeile: im Rahmen dieser Arbeit entwickelt hell-dunkler Datenaustausch: im Rahmen dieser Arbeit erweitert) .....	118
Abbildung 66: Links: Bestimmen der Oberfläche des freien Raums, Rechts: Einfrieren der Oberfläche und virtuelles Bewegen der Schutzeinrichtung zur Darstellung einer Kollision Quelle: Kirfel [146] .....	119
Abbildung 67: Darstellung eines einzelnen Sicherheitsbereichs .....	123
Abbildung 68: Blockdiagramm: Auslösen einer sicheren, reduzierten Geschwindigkeit bei Annäherung an den Roboter in Bereich $n$ (nach [158]).....	124
Abbildung 69: Aufbau des Robotersystems inklusive sicherer Logik, blauer Rand: erster Kanal, roter Rand: redundanter Kanal.....	124
Abbildung 70: Schmalbandspektrum im Abstand von 8 cm Quelle: Abbildung aus [150] ....	128
Abbildung 71: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschallkennwerte.....	128
Abbildung 72: Ultraschallpegelspektren in Abhängigkeit vom Abstand zum Sensorsystem Quelle: Abbildung aus [150].....	129
Abbildung 73: Seitenansicht des Reis RV 30-16 Arbeitsraums [27] mit Geschwindigkeitsvektoren .....	155

Abbildung 74: Gehäuse pico+ microsonic Größenangabe: microsonic GmbH [19] .....	157
Abbildung 75: „Empfangscharakteristik des Bosch Ultraschallsensors 0 263 003 331“, Quelle: Messung und Grafik von A. Kirfel, [148].....	158
Abbildung 76: Darstellung der symmetrischen Anordnung der Durchstoßpunkte der Rasterlinien durch die Schutzeinrichtung nach Abbildung 49 und Schnitt zur Darstellung der Rasterlinien und Durchstoßpunkte .....	161
Abbildung 77: Berechnung der Länge des Vektors <b>RS</b> .....	162
Abbildung 78: Kollision zwischen Roboterarm und Oberfläche siehe Abbildung 60 .....	164
Abbildung 79: Kollisionsbestimmung mittels Normalenform der Dreiecksebene und dem Vektor der Mittelachse des Roboterarms .....	165

## 11.2 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Sicherheitstechnische Anforderungen.....	32
Tabelle 2: Übersicht über die Anwendung des „sicherheitstechnischen“ öffentlichen Rechts .....	32
Tabelle 3: 1.2.1. Sicherheit und Zuverlässigkeit von Steuerungen (Kapitel 3.1.3).....	130
Tabelle 4: 1.2.3. Ingangsetzen (Kapitel 3.1.3) .....	130
Tabelle 5: 1.4.1. Allgemeine Anforderungen (Kapitel 3.1.2).....	131
Tabelle 6: 1.4.3. Besondere Anforderungen an nichttrennende Schutzeinrichtungen (Kapitel 3.1.2) .....	132
Tabelle 7: 1.5.11. Strahlung von außen (Kapitel 3.1.4).....	133
Tabelle 8: 1.5.8. Lärm (Kapitel 3.1.5).....	133
Tabelle 9: Die Ergebnisse der Arbeit in Bezug auf die in Kapitel 1.5 aufgestellten Thesen .....	135

## 11.3 Abkürzungsverzeichnis

9. ProdSV	Maschinenverordnung
ABl.	Amtsblatt der europäischen Union
AEU-Vertrag	Vertrag über die Arbeitsweise der Europäischen Union
AMBV	Arbeitsmittelbenutzungsverordnung
Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie	Richtlinie 2009/104/EG
ArbSchG	Arbeitsschutzgesetz
ASIC	application-specific integrated circuit (anwendungsspezifische integrierte Schaltung)
ATEX	Explosive Atmosphären (frz.: ATmosphère EXplosibles)
Baumüller	Baumüller Nürnberg GmbH
BetrSichV	Betriebssicherheitsverordnung
BGBl.	Bundesgesetzblatt
BGI 5123	BG-Information zu Industrierobotern
BGIA	Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitsschutz
BMAS	Bundesministeriums für Arbeit und Soziales
BMJ	Bundesministeriums der Justiz
B.O.	Björn Ostermann (bei Einfügungen von Interpolationen in Zitaten)
BOSCH	Robert Bosch GmbH

CCF	Ausfälle aufgrund gemeinsamer Ursache
CoTeSys	Cognition for Technical Systems
DC	Diagnosedeckungsgrad
DC <sub>avg</sub>	durchschnittlicher Diagnosedeckungsgrad
DGUV	Deutsche gesetzliche Unfallversicherung
EFTA	europäische Freihandelsassoziation
EG-Vertrag	Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft
EMV	elektromagnetische Verträglichkeit
EVPG	Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz
EWG	Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft
EWR	europäischer Wirtschaftsraum
FMEA	Failure Mode and Effect Analysis
GPSG	Geräte- und Produktsicherheitsgesetz
GSA	Sicherheits- und Gesundheitsschutzanforderungen
HdR	Handbuch der Rechtsförmlichkeit
IFA	Institut für Arbeitsschutz der DGUV
IFR	International Federation of Robotics
KUKA	KUKA Robotics
microsonic	microsonic GmbH
MRL	„Maschinenrichtlinie“ 2006/42/EG
MTTF <sub>d</sub>	mittlere Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall jedes Kanals
PFH	Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde
PHG	Programmierhandgerät
PL	Performance Level
PL <sub>r</sub>	zu erfüllender Performance Level
ProdHaftG	Produkthaftungsgesetz
ProdSG	Produktsicherheitsgesetz
Reis Robotics	Reis GmbH & Co. KG Maschinenfabrik
SISTEMA	Sicherheit von Steuerungen an Maschinen (Software des IFA)
TCP	Tool Center Point
Voxel	dreidimensionale Pixel

## 11.4 Literaturverzeichnis

- [1] First human to be killed by a robot  
Guinness World Records, <http://www.guinnessworldrecords.com/records-9000/first-human-to-be-killed-by-a-robot/> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [2] “First human killed by robot”,  
United Press International Dispatch, July, 1982
- [3] United States Patent 2988237, Inventors: Devol Jr., George C.
- [4] IFR Statistical Department, Executive Summary of World Robotics 2006-2013  
<http://www.worldrobotics.org/> (Abgerufen am 13.10.2013)

- [5] CSEM entwickelt den kleinsten Delta-Roboter der Welt  
CSEM Centre Suisse d' Electronique et de Microtechnique SA, Pressemitteilung, 14.11.2005  
[http://www.csem.ch/docs/Show.aspx/8731/docname/CP05-PocketDelta\\_DE.pdf](http://www.csem.ch/docs/Show.aspx/8731/docname/CP05-PocketDelta_DE.pdf) (Abgerufen am 21.11.2013)
- [6] M-2000iA  
Fanuc Robotics Webseite  
<http://www.fanucrobotics.de/de/countries/frde/news/archive/europapremiere%20-%20schwerlastroboter%20m-2000ia> (abgerufen am 13.10.2013)
- [7] Datenbank DGUV Test  
<http://zzmweb.dguv.de/> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [8] Definitionen: Neue Maschinenrichtlinie 2006/42/EG  
<http://www.maschinenrichtlinie.de/maschinenrichtlinie/neue-mrl-2006-42-eg/sicherheitsanforderungen/definitionen/> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [9] Fuzzy Wall Following based on the Dual Frequency Sonar System of the Mobile Robot Ram-2  
Martínez M. A., Martínez J. L.; IASTED Proc. of the 3th International Conference on Artificial Intelligence and Applications. Benalmádena, Spain, 2003
- [10] Betriebssicherheitsverordnung Band 2, v. Locquenghien, Ostermann, Klindt, 1. Auflage 2004, Bundesanzeiger Verlag, Köln, ISBN 3-89817-360-7
- [11] Theoretical Design Issues of a Multi-Sensor Doppler Tolerant System  
Randall R., Michel H.; Proceedings of the 2006 International Conference on Artificial Intelligence, ICAI 2006, Las Vegas, Nevada, USA, June 26-29, 2006, Volume 2
- [12] Through-Wall Tracking Using Variance-Based Radio Tomography Networks  
Wilson J., Patwari N.; 2009, Cornell University Library, <http://arxiv.org/abs/0909.5417v2> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [13] Real-time human pose recognition in parts from single depth images  
Shotton, J. et al.; Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), 2011 IEEE Conference on, 2011, p. 1297 – 1304, ISBN 978-1-4577-0394-2,  
<http://research.microsoft.com/pubs/145347/bodypartrecognition.pdf> (abgerufen am 13.10.2013)
- [14] ROSETTA project – Robot control for Skilled ExecuTion of Tasks in natural interaction with humans  
<http://fp7rosetta.org/> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [15] Ultrasonic Array for Obstacle Detection Based on CDMA with Kasami Codes  
Diego, C. et al.; Sensors 2011, 11, 11464–11475, Basel, Schweiz, ISSN 1424-8220
- [16] LRR3: 3rd generation Long-Range Radar Sensor  
Datenblatt, Bosch, 2009,  
[http://www.bosch-automotivetechnology.com/media/db\\_application/downloads/pdf/safety\\_1/en\\_4/lrr3\\_datenblatt\\_de\\_2009.pdf](http://www.bosch-automotivetechnology.com/media/db_application/downloads/pdf/safety_1/en_4/lrr3_datenblatt_de_2009.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [17] Automatisieren per Mikrowelle  
Bregulla M.; more@Turck, Ausgabe 01 2013  
[www.turck.de/de/articles\\_pdf/more11305.pdf](http://www.turck.de/de/articles_pdf/more11305.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [18] Bosch fertigt den millionsten Radarsensor – Schlüsselkomponente der Fahrerassistenz  
Bosch, Pressemitteilung, 2013  
<http://www.bosch-presse.de/presseforum/details.htm?txtID=6242> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [19] pico+ Ultraschallsensoren der Firma microsonic GmbH  
Werte von pico+35/WK/F und pico+100/WK/F  
<http://www.microsonic.de/de/Produkte/picoplus.htm> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [20] SyncBox1 der Firma microsonic GmbH  
Werte der SyncBox1  
<http://www.microsonic.de/de/Produkte/Zubehoer/SYNCBOX/SyncBox1.htm> (Abgerufen am 13.10.2013)



- [21] Schallführung der Firma microsonic GmbH  
<http://www.microsonic.de/de/Produkte/Zubehoer/Schallfuehrung.htm> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [22] Greensight – Detection, visualisation and alarm  
Groeneveld Transport Efficiency B.V.  
<http://www.groeneveld-group.com/getfile.php?id=198> (Abgerufen am 11.08.13)
- [23] CPI Inflation Calculator, U.S. Bureau of Labor Statistics  
[http://www.bls.gov/data/inflation\\_calculator.htm](http://www.bls.gov/data/inflation_calculator.htm) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [24] Eurokurs (Dollar - Euro) (USD-EUR), finanzen.net GmbH, Kurs: 1€ = 0,7531\$  
<http://www.finanzen.net/devisen/eurokurs> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [25] Premiere für den LBR iiwa  
Kuka Presse - und Finanzveröffentlichungen, 2013, KUKA AG  
[http://www.kuka-ag.de/de/press/kuka\\_publications/press\\_and\\_financial/PM\\_130325\\_lbr\\_iiwa.htm](http://www.kuka-ag.de/de/press/kuka_publications/press_and_financial/PM_130325_lbr_iiwa.htm) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [26] Hannover Messe: Kollege Leichtbauroboter  
Marsiske, H.P.; Ziegler, P.-M.; heise online, News, 2013, Heise Zeitschriften Verlag GmbH & Co. KG, Hannover  
<http://heise.de/-1837649> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [27] RV30-16, RV30-26 - Technische Daten  
<http://www.reisrobotics.de/media/file/1246> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [28] Ultraschall – Sensorsystem  
InMach Intelligente Maschinen GmbH, Prospekt zu Bosch Ultraschallsensor (Generation 4),  
<http://www.inmach.de/downloads/INMACH-Flyer-Ultraschall-Sensorsystem-web.pdf>  
(Abgerufen am 13.10.2013)
- [29] Introduction To Octrees  
Suter, J.; flipcode.com, 1999  
[http://www.flipcode.com/archives/Introduction\\_To\\_Octrees.shtml](http://www.flipcode.com/archives/Introduction_To_Octrees.shtml) (Abgerufen am 22.11.2013)

#### **11.4.1 Europäische Verträge, Richtlinien sowie nationale Gesetze und Verordnungen**

- [30] Vertrag von Lissabon zur Änderung des Vertrags über die europäische Union und des Vertrags zur Gründung der europäischen Gemeinschaft  
Konsolidierte Fassung  
*ABl. Nr. C 115 vom 9.5.2008, S. 47*
- [31] 85/374/EWG „Produkthaftungsrichtlinie“  
Richtlinie 85/374/EWG des Rates vom 25. Juli 1985 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über die Haftung für fehlerhafte Produkte  
*ABl. Nr. L 210 vom 7.8.1985, S. 29*
- [32] 89/391/EWG „Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie“  
Richtlinie 89/391/EWG des Rates vom 12. Juni 1989 über die Durchführung von Maßnahmen zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Arbeitnehmer bei der Arbeit  
*Vom 12. Juni 1989 (ABl. Nr. L 183, S. 1) zuletzt geändert durch Artikel 1 der Verordnung vom 22. Oktober 2008 (ABl. L 311, S. 1) in Kraft getreten am 11. Dezember 2008*
- [33] 94/9/EG „ATEX-Richtlinie“  
Richtlinie 94/9/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 23. März 1994 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten für Geräte und Schutzsysteme zur bestimmungsgemäßen Verwendung in explosionsgefährdeten Bereichen  
*ABl. L 100 vom 19.4.1994, S. 1*

- [34] 97/23/EG „Druckgeräte-Richtlinie“  
Richtlinie 97/23/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 29. Mai 1997 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Druckgeräte  
*ABl. L 181 vom 9.7.1997, S. 1*
- [35] 2004/108/EG „EMV-Richtlinie“  
Richtlinie 2004/108/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 15. Dezember 2004 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über die elektromagnetische Verträglichkeit und zur Aufhebung der Richtlinie 89/336/EWG  
*ABl. L 390 vom 31.12.2004, S. 24*
- [36] 2006/42/EG „Maschinenrichtlinie“  
Richtlinie 2006/42/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Mai 2006 über Maschinen und zur Änderung der Richtlinie 95/16/EG (Neufassung)  
*ABl. Nr. L 157 vom 9.6.2006, S. 24*
- [37] Leitfaden für die Anwendung der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG, 2. Auflage, Brüssel, Juni 2010  
[http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/machinery/index\\_de.htm](http://ec.europa.eu/enterprise/sectors/mechanical/machinery/index_de.htm) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [38] Verordnung (EG) Nr. 765/2008 Akkreditierung und Marktüberwachung  
Verordnung (EG) Nr. 765/2008 des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Juli 2008 über die Vorschriften für die Akkreditierung und Marktüberwachung im Zusammenhang mit der Vermarktung von Produkten und zur Aufhebung der Verordnung (EWG) Nr. 339/93 des Rates  
*Abi. Nr. L 218 vom 13.8.2008, S. 30*
- [39] EG Beschluss 768/2008/EG „Gemeinsamer Rechtsrahmen für Binnenmarktrichtlinien“  
Beschluss Nr. 768/2008/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 9. Juli 2008 über einen gemeinsamen Rechtsrahmen für die Vermarktung von Produkten und zur Aufhebung des Beschlusses 93/465/EWG des Rates  
*Abi. Nr. L 218 vom 13.8.2008, S. 82*
- [40] 2009/104/EG „Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie“  
Richtlinie 2009/104/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über Mindestvorschriften für Sicherheit und Gesundheitsschutz bei Benutzung von Arbeitsmitteln durch Arbeitnehmer bei der Arbeit (Zweite Einzelrichtlinie im Sinne des Artikels 16 Absatz 1 der Richtlinie 89/391/EWG)  
*ABl. EG Nr. L 260 vom 3.10.2009, S. 5*
- [41] 2009/105/EG „Richtlinie einfache Druckbehälter“  
Richtlinie 2009/105/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 16. September 2009 über einfache Druckbehälter  
*ABl. EG Nr. L 264 vom 8.10.2009, S. 12*
- [42] 2009/125/EG „Oekodesign-Richtlinie“  
Richtlinie 2009/125/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte  
*ABl. EG Nr. L 285 vom 31.10.2009, S. 10*
- [43] Arbeitsschutzgesetz – ArbSchG  
Gesetz über die Durchführung von Maßnahmen des Arbeitsschutzes zur Verbesserung der Sicherheit und des Gesundheitsschutzes der Beschäftigten bei der Arbeit  
*Arbeitsschutzgesetz vom 7. August 1996 (BGBl. I S. 1246), das zuletzt durch Artikel 15 Absatz 89 des Gesetzes vom 5. Februar 2009 (BGBl. I S. 160) geändert worden ist*
- [44] Betriebssicherheitsverordnung – BetrSichV  
Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Bereitstellung von Arbeitsmitteln und deren Benutzung bei der Arbeit, über Sicherheit beim Betrieb überwachungsbedürftiger Anlagen und über die Organisation des betrieblichen Arbeitsschutzes  
*Betriebssicherheitsverordnung vom 27. September 2002 (BGBl. I S. 3777), die zuletzt durch Artikel 5 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist*

- [45] Arbeitsmittelbenutzungsverordnung – AMBV  
*Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Benutzung von Arbeitsmitteln bei der Arbeit (AMBV) vom 11. März 1997 (BGBl. I Nr. 16 vom 19.03.1997 S. 450), geändert durch Artikel 397 der Verordnung vom 29. Oktober 2001 (BGBl. I S. 2785)*
- [46] Arbeitsmittel- und Anlagensicherheitsverordnung – ArbmittV  
Referentenentwurf für eine Verordnung über Sicherheit und Gesundheitsschutz bei der Verwendung von Arbeitsmitteln und dem Betrieb von Anlagen (Arbeitsmittel- und Anlagensicherheitsverordnung – ArbmittV)  
[http://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Thema-Arbeitsschutz/referentenentwurf-betriebssicherheitsverordnung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](http://www.bmas.de/SharedDocs/Downloads/DE/Thema-Arbeitsschutz/referentenentwurf-betriebssicherheitsverordnung.pdf?__blob=publicationFile) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [47] Produktsicherheitsgesetz - ProdSG  
Gesetz über die Bereitstellung von Produkten auf dem Markt  
*Produktsicherheitsgesetz vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2179; 2012 I S. 131)*
- [48] Maschinenverordnung – 9. ProdSV  
*Neunte Verordnung zum Produktsicherheitsgesetz (Maschinenverordnung) vom 12. Mai 1993 (BGBl. I S. 704), die zuletzt durch Artikel 19 des Gesetzes vom 8. November 2011 (BGBl. I S. 2178) geändert worden ist*
- [49] Geräte- und Produktsicherheitsgesetz – GPSG  
Gesetz über technische Arbeitsmittel und Verbraucherprodukte  
*Artikel 1 des Gesetzes vom 06.01.2004 (BGBl. I S. 2 ff.)*
- [50] Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln – EMVG  
*Gesetz über die elektromagnetische Verträglichkeit von Betriebsmitteln vom 26. Februar 2008 (BGBl. I S. 220), das zuletzt durch Artikel 1 des Gesetzes vom 20. April 2012 (BGBl. I S. 606) geändert worden ist*
- [51] Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz – EVPG  
Gesetz über die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte  
*Energieverbrauchsrelevante-Produkte-Gesetz vom 27. Februar 2008 (BGBl. I S. 258), das durch Artikel 6 des Gesetzes vom 31. Mai 2013 (BGBl. I S. 1388) geändert worden ist*
- [52] Produkthaftungsgesetz – ProdHaftG  
Gesetz über die Haftung für fehlerhafte Produkte  
*Produkthaftungsgesetz vom 15. Dezember 1989 (BGBl. I S. 2198), das zuletzt durch Artikel 9 Absatz 3 des Gesetzes vom 19. Juli 2002 (BGBl. I S. 2674) geändert worden ist*
- [53] Handbuch der Rechtsförmlichkeit, 3. Auflage, Bundesministerium der Justiz  
*Bekanntmachung des Handbuchs der Rechtsförmlichkeit, Bundesanzeiger Nummer 160a vom 22.10.2008, ISSN 0720-6100*

## 11.4.2 Normen und Technische Regeln

- [54] EN 954-1:1996  
Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze
- [55] EN ISO 6385:2004  
Grundsätze der Ergonomie für die Gestaltung von Arbeitssystemen
- [56] EN ISO 10218-1:2006  
Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter
- [57] EN ISO 10218-1:2011  
Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 1: Roboter
- [58] EN ISO 10218-2:2011  
Industrieroboter - Sicherheitsanforderungen - Teil 2: Robotersysteme und Integration

- [59] EN ISO 12100:2010  
Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung
- [60] EN ISO 13849-1:2006  
Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze
- [61] EN ISO 13849-1:2008  
Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze
- [62] EN ISO 13849-2:2012  
Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen - Teil 2: Validierung
- [63] EN ISO 13855:2010  
Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen
- [64] EN 61496-1:2004/AC:2010  
Sicherheit von Maschinen – Berührungslos wirkende Schutzeinrichtungen – Teil 1: Allgemeine Anforderungen und Prüfungen
- [65] EN 61508-3:2010  
Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer/elektronischer/programmierbarer elektronischer Systeme - Teil 3: Anforderungen an Software
- [66] EN 61672-1:2010  
Elektroakustik - Schallpegelmesser - Teil 1: Anforderungen
- [67] EN 62061:2005  
Sicherheit von Maschinen - Funktionale Sicherheit sicherheitsbezogener elektrischer, elektronischer und programmierbarer elektronischer Steuerungssysteme
- [68] ISO/PDTS 15066 (Committee Draft)  
Robots and robotic devices — industrial Safety requirements  
Collaborative industrial robots
- [69] VDI 2058 Blatt 2:1988-06  
Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung
- [70] VDI 3766:2012-09  
Ultraschall - Arbeitsplatz - Messung, Bewertung, Beurteilung und Minderung
- [71] TRLV Lärm – Teil Allgemeines, Januar 2010  
Technische Regeln zur Lärm- und Vibrations-Arbeitsschutzverordnung
- [72] SN 29500 (alle Teile nach SN 29500-1 H1:2011-07)  
Siemens Norm, Ausfallraten Bauelemente, Siemens AG, 2004-2011

### **11.4.3 Veröffentlichungen zu kollaborierende Roboter – allgemein**

- [73] The Device Protecting the Industrial Robot from Injuring the Human,  
Wydzga, S, 1981, Industrial Institute of Automation and Measurements, Warschau, Polen  
(unveröffentlichter Report in polnisch – zitiert nach [81])
- [74] Safety sensor systems for industrial robots  
Kilmer, R.D.; Proceedings of Robots VI Conference, 1982, Seite 479-491
- [75] A sensory-based robotic safety system,  
Graham, J.H.; Meagher, J.F.; Control Theory and Applications, IEE Proceedings 1985, USA
- [76] A Safety and Collision Avoidance System for Industrial Robots,  
Graham, J.H.; Meagher, J.F.; Derby, S.J.; IEEE Transactions on Industry Applications 1986,  
USA
- [77] US4674057 A – Ultrasonic ranging control system for industrial robots (Patent)  
Caughman, D.O.; Plumley, W.J.; Lockheed Corporation, Eingetragen am 18. März 1986,

- [78] An approach to collision detection and recovery motion in industrial robot, Takakura, S.; Murakami, T.; Ohnishi, K.; Industrial Electronics Society, (IECON '89), 1989
- [79] The use of Ultrasonic Information in path control of an industrial robot Nunes, U.C.; Dias, J.M.; de Almeida, A.T.; Proceedings of the ISMM International Symposium Industrial, Vehicular and Space Applications of Microcomputers, New York, U.S.A., 1990, ISBN: 0889861706 9780889861701
- [80] Automatyczny ultradźwiękowy system ochrony pracowników na stanowiskach zrobotyzowanych Podgórski, D.; Politechnika Warszawska, Warschau, Polen, 1991
- [81] Robot safety research and development in Poland: an overview, Podgorski, D.; Wanski, T.; Kaczanowski, S.; Chapter 11 in Human-Robot Interaction, Taylor & Francis, London / Washington, DC, 1992
- [82] The model of the video safety system for industrial robots, Zycki, A.; ISMCR, International Symposium on Measurement and Control in Robotics, 4, 1995, Central Institute for Labour Protection, Warschau, Polen
- [83] An Ultrasonic Sensor Based Robot Safety System Koudenburg, HM; Nagarajah, CR; Sixth International Conference on Manufacturing Engineering: Manufacturing; a Global Perspective; Proceedings, The, 1995, Melbourne, Australien
- [84] Visual surveillance system for detection of moving objects by scene modelization in uncontrolled robotic environments, Abdallah, A.; Acquisition, Tracking, and Pointing XI, Orlando, FL, USA 1997 Dept Productique, Ecole des Mines de Douai, France
- [85] Collision Avoidance and Handling for a Mobile Manipulator, Wösch, T.; Neubauer, W.; MORPHA, 2002
- [86] Rob@work: Robot Assistant in Industrial Environments Helms, E.; Schraft, R. D.; Hägele, M.; MORPHA, 2002
- [87] Safe Human-Robot-Cooperation: Image-based collision detection for Industrial Robots, Ebert, D. M.; Henrich, D. D.; IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and System, 2002
- [88] Safe human-robot cooperation in industrial production, Heiligensetzer, P.; Wörn, H.; VDI-Berichte Band 1679, 2002, KUKA Roboter, Augsburg, Germany; Institute for Process Control & Robotics (IPR), Universität Karlsruhe (TH), Germany
- [89] Safeguarded human-robot interaction in production, ISR, International Symposium on Robotics, 33, 2002, P. Heiligensetzer; H. Wörn; KUKA Roboter, Augsburg, Germany; Institute for Process Control & Robotics (IPR), Universität Karlsruhe (TH), Germany
- [90] An error detection model for ultrasonic sensor evaluation on autonomous mobile systems Bank, D.; Robot and Human Interactive Communication, 2002. Proceedings. 11th IEEE International Workshop on, Seiten 288-293, ISBN 0-7803-7545-9
- [91] Safe human-robot cooperation for robots in the low payload range, Heiligensetzer, P.; ISR, 35<sup>th</sup> International Symposium on Robotics, Paris, 2004
- [92] Applying reflexes to enhance safe human-robot-co-operation with a humanlike robot arm, Yigit, S.; Burgart, C.; Wörn, H.; ISR, International Symposium on Robotics, 35, 2004, Universität Karlsruhe (TH), Germany
- [93] Toward Safe Human-Robot Co-Operation in Manufacturing, Stopp, A.; Baldauf, T.; Horstmann, S.; Kristensen, S.; Advances in Human Robot Interaction p. 255ff. (MORPHA), ISBN 978-3-540-23211-7, Springer, Berlin, 2004
- [94] Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinmontage mit einem SCARA-Roboter, Thiemermann, S.; Universität Stuttgart, Dissertation, 2004

- [95] Image-based 3D-surveillance in man-robot-cooperation,  
Kruger, J.; Nickolay, B.; Schulz, O.; 2004 2nd IEEE International Conference on Industrial Informatics, Berlin, Germany,  
Fraunhofer Inst for Production Syst & Design Technol, Berlin, Germany
- [96] A safety concept for robot assistants in manufacturing,  
Stopp, A.; Baldauf, T.; Horstmann, S.; Kristensen, S.; Automatisierungstechnische Praxis - atp  
Band 47, 2005, Heft 2,  
DaimlerChrysler, Berlin, Germany
- [97] Virtuelle Wände legen den Roboter lahm – Personensichere Steuerung macht Schutzzäune überflüssig  
Som, F.; Industrie Anzeiger, 2005, Konradin Verlag R. Kohlhammer GmbH, Leinfelden-Echterdingen
- [98] EP1820611 A1 / EP1820611 B1 – Industrierobotersystem (Patent)  
Sjöberg R.; Strand M.; Eingetragen am 17. Febr. 2006, Abb Research Ltd.
- [99] The DLR lightweight robot: Design and control concepts for robots in human environments,  
Albu-Schäffer, A.; Haddadin, S.; Ott, C.; Stemmer, A.; Wimböck, T.; Hirzinger, G.; The Industrial Robot Band 34, 2007, Heft 5, Seite 376-385
- [100] Development of a stereo vision system for industrial robots,  
Oh Jong-Kyu, Lee Chan-Ho; International Conference on Control, Automation and Systems, 2007. ICCAS '07,  
Hyundai Heavy Ind. Co. Ltd., Ulsan
- [101] Robot introduction in Human work environment. Developments, Challenges and Solutions,  
Ogorodnikova, O.; IEEE International Conference on Computational Cybernetics, 2007. ICCCC 2007.  
Budapest Univ. of Technol. & Econ., Budapest
- [102] Robotersteuerung für sichere Mensch-Roboter-Kooperation  
Som, F.; Workshop Assistierende Roboter, Fachveranstaltung der Berufsgenossenschaft Metall Nord Süd, August 2007, Lengfurt
- [103] Multi-camera Collision Detection between Known and Unknown Objects,  
Henrich, D.; Gecks, T.; 2nd ACM/IEEE International Conference on Distributed Smart Cameras – ICDSC 2008, Sept 7–11, Stanford/USA, 2008
- [104] Merging of range images for inspection or safety applications,  
Mure-Dubois, J.; Hugli, H.; Two- and Three-Dimensional Methods for Inspection and Metrology VI, San Diego, CA, USA, 2008,  
Inst of Microtechnol, Univ of Neuchatel, Neuchatel, Switzerland
- [105] Joint-action for humans and industrial robots for assembly tasks,  
Lenz, C.; Nair, S.; Rickert, M.; Knoll, A.; Rösel, W.; Gast, J.; Bannat, A.; Wallhoff, F.; 2008 RO-MAN: The 17th IEEE International Symposium on Robot and Human Interactive Communication, Munich, Germany,  
Technische Universität München, München, 2008
- [106] Sichere Mensch/Roboter-Koexistenz und Kooperation  
Henrich, D.; Fischer, M.; Gecks, T.; Kuhn, S.; ROBOTIK 2008, München, 2008
- [107] 3D Collision Detection for Industrial Robots and Unknown Obstacles using Multiple Depth Images  
Fischer M., Henrich D.; German Workshop on Robotics, 2009, Braunschweig
- [108] The KUKA-DLR Lightweight Robot arm – a new reference platform for robotics research and manufacturing,  
Bischoff, R.; Kurth, J.; Schreiber, G.; Koeppe, R.; Albu-Schäffer, A.; Beyer, A.; Eiberger, O.; Haddadin, S.; Stemmer, A.; Grunwald, G.; Hirzinger, G.; Robotics (ISR), 2010 41st International Symposium on and 2010 6th German Conference on Robotics (ROBOTIK), 7-9 June 2010, München, ISBN: 978-3-8007-3273-9

- [109] Fusing multiple kinects to survey shared human-robot-workspaces  
Lenz C.; Grimm, M.; Röder, T.; Knoll, A.; Technical Report TUM-I1214, Technische Universität München, München, 2012
- [110] Sensor- and Plausibility-based Surveillance of Human/Robot-Workspaces  
Hänel, M.; Fischer, M.; Henrich, D.; Kuhn, S.; 7th German Conference on Robotics, 2012
- [111] Produktion 2020 – Sichere Mensch-Roboter-Kooperation und Bild basierte Arbeitsraumüberwachung für die Fertigung der Zukunft – Herausforderung in Transfer, Forschung, Entwicklung  
Glück M.; Roßkopf, B.; Wolf, J.; Wagner, P.; Forschungsbericht 2012 Hochschule Augsburg University of Applied Sciences
- [112] Private Email Korrespondenz mit Dr. Daniel Podgórski, CIOP-PIB (Central Institute for Labour Protection – National research institute)  
Podgórski, D.; CIOP-PIB, Warsaw, Poland, 2013

#### **11.4.4 Veröffentlichungen zu kollaborierende Roboter – existierende Produkte**

- [113] ESALAN-Systeme – Programmierbare elektronische Systeme mit Sicherheitsfunktion – Produktübersicht  
[http://www.schmersal.com/kasbase/bilddata/broschue/b\\_esap01.pdf](http://www.schmersal.com/kasbase/bilddata/broschue/b_esap01.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [114] Kollege Roboter wird teamfähig  
Adams, F.; IEE, 2002 Nr. 9, Hüthig GmbH, Heidelberg
- [115] Dreidimensional Steuern und Überwachen – Erstes sicheres Kamerasystem SafetyEYE eröffnet neue Perspektiven für Safety & Security  
<http://www.pilz.com/de-DE/company/press/messages/sub/products/articles/00951> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [116] Den Roboter im Griff  
Som, F.; Plastverarbeiter, Ausgabe 10/2000, Hüthig GmbH, Heidelberg
- [117] Mensch-Roboter-Kooperation – Chancen und Grenzen  
Umbreit, M.; Fachveranstaltung Maschinen- und Produktsicherheit, 10. Mai 2012
- [118] Die Produkte von Universal Robots, inklusive Technische Spezifikationen UR5 und UR10  
<http://www.universal-robots.com/DE/Produkte.aspx> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [119] Baxter™ safety and compliance overview  
rethink robotics, <http://www.rethinkrobotics.com/resources/safety/> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [120] Baxter gets its European visa  
Email Newsletter der Firma rethink robotics, 17.09.2013
- [121] Onlinekatalog SICK – Sensor Intelligence  
Produktgruppe S300, S300 Mini, S3000  
<https://www.mysick.com/eCat.aspx> (abgerufen am 13.10.2013)
- [122] Neue Walzwerke mit einem Walzendurchmesser von < 400mm  
FA Chemie, Berufsgenossenschaft Rohstoffe und chemische Industrie, Stand 2010
- [123] DE10131243 (C1) – Capacitive proximity switch e.g. for production line robot, uses difference signal between 2 screened sensor electrodes  
Luetkens, L; Reutlingen, 2001
- [124] DE102009053077B3 – Kapazitive Näherungssensoranordnung (Patent)  
Luetkens, L; Reutlingen, 2009
- [125] Private Email Korrespondenz mit Luer Luetkens von Luetkens Automation,  
Luetkens, L; Reutlingen, 2013
- [126] Datenblatt: KR 5 SI (SafeInteraction)  
MRK-Systeme GmbH, Augsburg  
[http://www.mrk-systeme.de/downloads/Prospekt\\_KR\\_5\\_SI.pdf](http://www.mrk-systeme.de/downloads/Prospekt_KR_5_SI.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)

- [127] Weiche Hülle, harter Kern  
Herkommer, G.; Computer & Automation (10-2011, S. 23), WEKA Fachmedien GmbH, Haar  
[http://www.computer-automation.de/feldebene/mechatronik/fachwissen/article/82393/1/Sicher\\_auch\\_ohne\\_Zaun/](http://www.computer-automation.de/feldebene/mechatronik/fachwissen/article/82393/1/Sicher_auch_ohne_Zaun/)  
(Abgerufen am 13.10.2013)
- [128] Roboter ohne Käfig – Interviews  
Speckner, C.; Schlaich, P.; Sinß, F.; Heiligensetzer, P.; DGUV Arbeit und Gesundheit  
[http://www.arbeit-und-gesundheit.de/webcom/show\\_article.php/\\_c-661/\\_nr-381/\\_p-1/i.html](http://www.arbeit-und-gesundheit.de/webcom/show_article.php/_c-661/_nr-381/_p-1/i.html)  
(Abgerufen am 13.10.2013)
- [129] Robotik  
Webseite Berufsgenossenschaft Holz und Metall:  
Arbeitsschützer/Fachinformationen/Maschinen/Robotik  
<http://www.bghm.de/arbeitschuetzer/fachinformationen/maschinen/robotik.html> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [130] Roboter mit Sensorhaut  
Aus der BG-Welt, 2012, Berufsgenossenschaft Holz und Metall
- [131] Projektinformation BioRob®-Arm  
TETRA Gesellschaft für Sensorik, Robotik und Automation mbH, 2013,  
[http://www.tetra-ilmeneau.de/downloads/TETRA%20BioRob-Arm%20Projektinformation%2011\\_2010%20DT.pdf](http://www.tetra-ilmeneau.de/downloads/TETRA%20BioRob-Arm%20Projektinformation%2011_2010%20DT.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)

#### **11.4.5 Veröffentlichungen zu kollaborierende Roboter – aus EsIMiP, ohne eigene Beteiligung**

- [132] Optimization-Based Robotic Manipulation for Safe Interaction with Human Operators  
Ding, H.; Universität Kassel, 2012, Dissertation, zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Arbeit noch nicht veröffentlicht
- [133] Ergonomic Human-Robot Coexistence in the Branch of Production, (Arbeitstitel)  
Bortot, D.; Technische Universität München, Dissertation, voraussichtlich 2014
- [134] An Investigation in Virtual Reality on Human Factors Requirements for Human-Robot-Collaboration  
Naber, B.; Nickel, P.; Huelke, M.; Lungfiel, A.; 6th International Conference Towards Safety Through Advanced Solutions, Sopot, Poland
- [135] Reis Robotics, Statusbericht  
Som, F.; im Rahmen des Gesamttreffens des Projekts EsIMiP, 19.03.2012, Obernburg

#### **11.4.6 DGUV Artikel und Paper**

- [136] BG/BGIA-Empfehlungen für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie  
Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern.  
U 001/2009 (Stand: Oktober 2009, Fassung Februar 2011), BGIA, Sankt Augustin
- [137] Sichere Zusammenarbeit von Mensch und Industrieroboter  
Huelke, M.; Umbreit, M.; Ottersbach, H.J.; MM Maschinenmarkt (2010) Nr. 33, S. 32-34, Würzburg
- [138] Unfälle mit/ an automatischen Maschinen, Transferanlagen und Robotern  
Berichtsjahr 2005 – 2012, Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung – DGUV, Abteilung: Statistik - Makrodaten, Arbeits- und Schülerunfälle
- [139] Messung und Beurteilung von Ultraschallgeräuschen am Arbeitsplatz  
Maue, J. H.; Technische Sicherheit Bd. 2 (2012) Nr. 7/8 – Juli/August  
[http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2012\\_075.pdf](http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2012_075.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [140] BG-Information Industrieroboter – BGI 5123,  
Juni 2008, Fachausschuss Maschinenbau, Fertigungssysteme, Stahlbau  
<http://publikationen.dguv.de/dguv/pdf/10002/bgi5123.pdf> (Abgerufen am 13.10.2013)



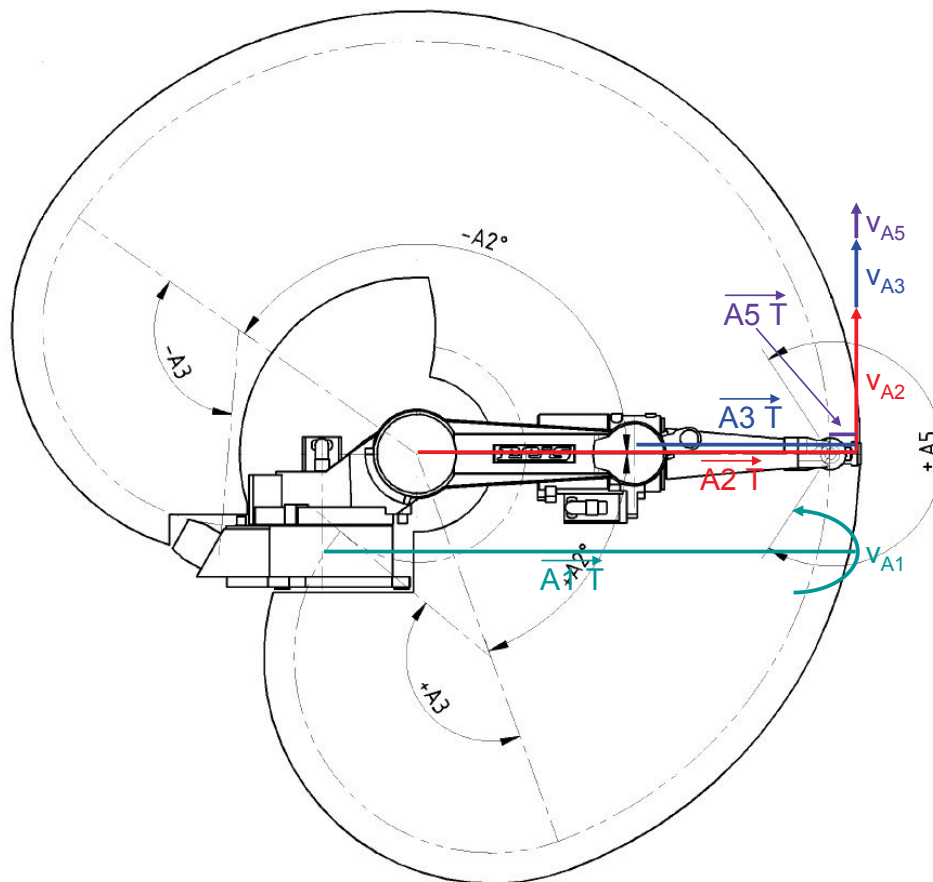
- [141] Funktionale Sicherheit von Maschinensteuerungen, 2. Geänderte Auflage, Hauke, M.; et al.; BGIA-Report 2/2008, DGUV, Berlin, Dezember 2008, ISBN 978-3-88383-771-0
- [142] Sicherheitsfunktionen nach DIN EN ISO 13849-1 bei überlagerten Gefährdungen. Fachausschuss-Informationenblatt Nr. 047, Ausgabe 5/2010, Hrsg.: Fachausschuss Maschinenbau, Fertigungssysteme, Stahlbau, Mainz, 2010
- [143] Sicherheitsfunktionen nach DIN EN ISO 13849-1 bei überlagerten Gefährdungen. Apfeld, R.; Schaefer, M.; Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin, März 2011
- [144] Machbarkeitsstudie zur Personendetektion mit Kamerasystemen im Arbeitsumfeld von Industrierobotern  
Pilger, J.; St. Augustin, Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg, Oktober 2005, Bachelorarbeit am BGIA (heute IFA)
- [145] Realisierung einer Ultraschallsensorik mit automatischem Einlesen eines Schutzfeldes zur Kalibrierung eines kollaborierenden Roboters  
Kurras, D.; Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Diplomarbeit im IFA, 2010
- [146] Praktikumsbericht für das Fachpraktikum im Rahmen des Bachelor Studiengangs Sicherheitstechnik  
Heisel, B.; Bergische Universität Wuppertal, Praktikum im IFA, 2011
- [147] Praxisprojektbericht im Studiengang Bachelor Informatik  
Kirfel, A.; Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Praktikum im IFA, 2012
- [148] Konzeption und Realisierung eines sicheren Ultraschall-Sensorsystems zur Absicherung von Industrierobotern  
Kirfel, A.; St. Augustin, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, September 2012, Bachelorarbeit im IFA
- [149] Lärmschutz-Arbeitsblatt LSA 01-400, Lärmesstechnik - Ermittlung des Lärmexpositionspegels am Arbeitsplatz,  
BGI/GUV-I 792-010 ,2012
- [150] Ultraschallimmissionsmessung an der im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Schutzeinrichtung Gemessen und ausgewertet durch die Mitarbeiter D. F. Förster, R. Paulsen und A. Wolff des Referats 4.1 „Lärm“ im Fachbereich Arbeitsgestaltung, Physikalische Einwirkungen des IFA, 2013
- [151] Auswirkung von Autonomie und Geschwindigkeit in der virtuellen Mensch-Roboter-Kollaboration  
Koppenborg, M.; Lungfiel, A.; Naber, B.; Nickel, P.; 59. Kongress der Gesellschaft für Arbeitswissenschaft, Seite 417ff., Chancen durch Arbeits-, Produkt- und Systemgestaltung – Zukunftsfähigkeit für Produktions- und Dienstleistungsunternehmen, Fachhochschule Krefeld, 2013

### 11.4.7 Eigene Werke

- [152] Infrastructure between autonomous motion controls and robot simulating software,  
Ostermann, B., Fachhochschule Bonn-Rhein-Sieg / BGIA, April 2008, Sankt Augustin
- [153] Industrial jointed arm robot evading dynamic objects,  
Ostermann, B., Hochschule Bonn-Rhein-Sieg / BGIA, Januar 2009, Sankt Augustin  
[http://www.maschinenbautage.eu/fileadmin/veroeffentlichungen/Master\\_Thesis\\_Bjoern\\_Ostermann.pdf](http://www.maschinenbautage.eu/fileadmin/veroeffentlichungen/Master_Thesis_Bjoern_Ostermann.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [154] An Approach for Safe and Efficient Human-Robot Collaboration  
Stengel, D.; Ostermann, B.; Ding, H.; Bortot, D.; Schiller, F.; Stursberg, O.; Bengler, K.; Huelke, M.; Som, F.; Strunz, U.; 6th International Conference Safety of Industrial Automated Systems, Juni 2010, Tampere (Finnland)  
[http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2010\\_112.pdf](http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2010_112.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)

- [155] Von Zäunen befreit – Mensch Roboter Kollaboration – Wissenschaft und Technik  
Ostermann, B.; Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium 2010, Institut ASER e.V, Wuppertal  
[http://suqr.uni-wuppertal.de/fileadmin/Fachgebiete/SiTe/LuFG\\_Sicherheitsrecht/Kolloquium\\_Download/Ostermann\\_09-11-2010.pdf](http://suqr.uni-wuppertal.de/fileadmin/Fachgebiete/SiTe/LuFG_Sicherheitsrecht/Kolloquium_Download/Ostermann_09-11-2010.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [156] Von Zäunen befreit – Industrieroboter mit Ultraschall absichern,  
Ostermann, B.; Huelke, M.; Kahl, A.; atp - Automatisierungstechnische Praxis, Nr. 9 (2011), S. 52-59  
[http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2011\\_128.pdf](http://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2011_128.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [157] Von Zäunen befreit - Industrieroboter mit Ultraschall absichern, (Erweiterte Fassung)  
Ostermann, B.; Huelke, M.; Kahl, A.; Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium 2010-2011, Forschungsbericht Nr. 27 (Band 7), S. 19-39, Hrsg.: Pieper, R., Wuppertal 2012. ISBN: 978-3-936841-23-7  
[http://www.institut-aser.de/pdf\\_files/literatur/Pieper-Lang-Sicherheitswissenschaftliches-Kolloquium-2010-2011.pdf](http://www.institut-aser.de/pdf_files/literatur/Pieper-Lang-Sicherheitswissenschaftliches-Kolloquium-2010-2011.pdf) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [158] Internes Papier des IFA – Zur Veröffentlichung im Rahmen der Bachelorthesis von Alexander Kirfel  
Ostermann, B.; intern, August 2012, Sankt Augustin, veröffentlicht in [148]
- [159] Netz und doppelter Boden des kollaborierenden Roboters  
Text: Ostermann, B.; TU München, Video zum Projekt Abschluss EsIMiP, August 2012, Garching  
<http://www.ais.mw.tum.de/index.php?id=121#c1949> (Abgerufen am 13.10.2013)
- [160] Freed from fences – Safeguarding industrial robots with ultrasound  
Ostermann, B.; Huelke, M.; Kahl, A.; 6th International Working on Safety Conference– Towards Safety Through Advanced Solutions, September 2012, Sopot (Polen)
- [161] Freed from fences – Human Robot Collaboration in the Institute for Occupational Safety and Health (IFA)  
Ostermann, B.; 6th International Working on Safety Conference– Towards Safety Through Advanced Solutions, September 2012, Sopot (Polen), Vortragsfolien  
[http://www.wos2012.pl/pdf/13/TS10\\_4%20Ostermann%20WOS2012.pdf](http://www.wos2012.pl/pdf/13/TS10_4%20Ostermann%20WOS2012.pdf) (Abgerufen am 19.09.2012 – Webseite inzwischen abgeschaltet)
- [162] Sicher und effizient – Was hinter dem Forschungsprojekt EsIMiP steckt  
Düpjohann, W.; Ostermann, B.; Stengel, D.; Computer & Automation (1-2013, S. 33), Januar 2013, WEKA Fachmedien GmbH, Haar  
[http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/safety/fachwissen/article/94013/0/Was\\_hinter\\_dem\\_Forschungsprojekt\\_EsIMiP\\_steckt/](http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/safety/fachwissen/article/94013/0/Was_hinter_dem_Forschungsprojekt_EsIMiP_steckt/) (Abgerufen am 13.10.2013)
- [163] Freed from fences – Safeguarding industrial robots with ultrasound  
Ostermann, B.; Huelke, M.; Kahl, A.; Safety Science Monitor, Volume 17, Issue 1, 2013, Schweden  
[http://ssmon.chb.kth.se/vol17/3\\_Ostermann%20ny.pdf](http://ssmon.chb.kth.se/vol17/3_Ostermann%20ny.pdf) (Abgerufen am 08.10.2013)

## 12 Anhang I: Maximale Geschwindigkeit des Reis RV 30-16



**Abbildung 73: Seitenansicht des Reis RV 30-16 Arbeitsraums [27] mit Geschwindigkeitsvektoren**

Die maximale Geschwindigkeit des Tool-Center-Points lässt sich aus den Angaben des Datenblatts [27] vom Hersteller Reis Robotics errechnen. Hierzu müssen die maximalen Winkelgeschwindigkeiten der rotatorischen Achsen 1, 2, 3 und 5 mit ihren jeweiligen maximalen Bahnlängen multipliziert werden.

Für die Winkelgeschwindigkeiten gilt nach [27]:

$$A1 = 165 \frac{^\circ}{s}$$

$$A2 = 165 \frac{^\circ}{s}$$

$$A3 = 150 \frac{^\circ}{s}$$

$$A5 = 450 \frac{^\circ}{s}$$

Für die maximalen Auslenkungen gilt nach [27]:

$$\overline{A1\ TCP} = 2200\text{mm}$$

$$\overline{A2\ TCP} = 1880\text{mm}$$

$$\overline{A3\ TCP} = 1080\text{mm}$$

$$\overline{A5\ TCP} = 100\text{mm}$$

Somit ergibt sich für die maximalen Geschwindigkeiten:

$$v_{A1} = \frac{2200\text{mm} * 2 * \pi}{360^\circ} * 165^\circ/\text{s} \approx 6336 \text{ mm/s}$$

$$v_{A2} = \frac{1880\text{mm} * 2 * \pi}{360^\circ} * 165^\circ/\text{s} \approx 5414 \text{ mm/s}$$

$$v_{A1} = \frac{1080\text{mm} * 2 * \pi}{360^\circ} * 150^\circ/\text{s} \approx 2827 \text{ mm/s}$$

$$v_{A1} = \frac{100\text{mm} * 2 * \pi}{360^\circ} * 450^\circ/\text{s} \approx 785 \text{ mm/s}$$

Da die Bewegungsrichtung der Achse 1 senkrecht zu den Bewegungsrichtungen von Achse 2 und 3 ist, muss die Gesamtgeschwindigkeit über das Vektorprodukt errechnet werden. Die Bewegungsrichtung von Achse 5 kann hiernach in Richtung der resultierenden Geschwindigkeit addiert werden, da sich Achse 5 am Punkt der maximalen Geschwindigkeiten durch Achse 4 beliebig ausrichten lässt.

Die Ausrichtung der Achse 5 wird durch den Winkel bestimmt, der sich aus den Geschwindigkeiten  $v_{A1}$  und  $v_{A2} + v_{A3}$  ergibt:

$$\alpha = \tan^{-1} \frac{v_{A2} + v_{A3}}{v_{A1}} = \tan^{-1} \frac{8241 \text{ mm/s}}{6336 \text{ mm/s}} \approx 52,5^\circ$$

$$\sqrt{v_{A1}^2 + (v_{A2} + v_{A3})^2} + v_{A5} \approx 10395 \text{ mm/s} + 785 \text{ mm/s} = 11180 \text{ mm/s} \approx 40 \text{ km/h}$$

## 13 Anhang II: Beschreibung der gewählten Hard- und Software

### 13.1 Hardware

#### 13.1.1 microsonic Ultraschallsensor

Im Rahmen dieser Arbeit wurden für den ersten Demonstrator Sensoren der pico+ Reihe der microsonic GmbH verwendet, die ein Ausgangssignal von 4-20 mA senden. Die Zuordnung Ausgangssignal zu gemessener Distanz ist hierbei im Sensor frei parametrierbar. Ein Vorteil dieses Ausgangssignals ist, dass 0 mA, die bei einem sicherheitskritischen Drahtbruch anliegen, direkt erkannt werden können. Konkret getestet wurden 3 unterschiedliche Modelle mit verschiedenen Reichweiten von 350 mm bis 1300 mm. Für den ersten Demonstrator wurde dann das Modell pico+35/WK/I genutzt. Dieser Sensor wird mit 65 bis 350 mm Betriebstastweite angegeben. Seine Grenzstastweite reicht dabei bis 600 mm, welches die im ersten Demonstrator geplante zu messende Maximaldistanz war.

Die Ultraschallfrequenz dieses Sensors ist mit 400 kHz angegeben, was aufgrund des schnellen Abklingens des Schalls in der Umgebung eine kurze Blindzone von 65 mm und eine schnelle Messfrequenz erlaubt. In den von microsonic angegebenen langsam scheinenden 70 ms Ansprechverzug sind allerdings mehrere Messzyklen kombiniert, um die Genauigkeit des Sensors zu erhöhen. Es ist möglich, die Messwerte einzeln auszulesen, so dass sich wieder eine schnelle Messfrequenz ergibt.

Dies sind somit:

- Eine Messrate von ca 43 Hz, bzw. 23,3 ms pro Messung
- Eine Blindzone von 6,5 cm

Der Messkegel der in Abbildung 74 dargestellten Sensoren ist symmetrisch zur Mittelachse seines Messkegels. Hierdurch ist es unerheblich in welchem Drehwinkel der Sensor montiert wird (siehe auch Abbildung 23 mit schräg auf den Schienen montierten Sensoren).

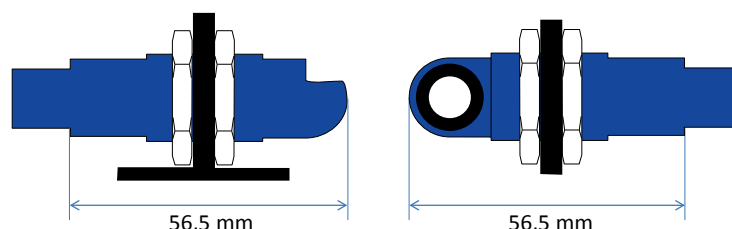


Abbildung 74: Gehäuse pico+ microsonic  
Größenangabe: microsonic GmbH [19]

#### 13.1.2 BOSCH Ultraschallsensor

Der im Rahmen dieser Arbeit im zweiten Demonstrator eingesetzte Bosch-Ultraschall Sensor mit der Modellnummer 0 263 003 331 hat eine Arbeitsfrequenz von ca. 50 kHz (siehe Kapitel 0).

Da nicht alle erforderliche Daten dem Datenblatt [28] zu entnehmen waren, wurden diese Daten von Kirfel ermittelt (siehe hierzu [148], Kapitel 4.1.2). Hierbei ergab sich:

- Eine maximale Messrate von 65 Hz, bzw. 15,3 ms pro Messung (unter idealen Bedingungen)
- Eine Blindzone von 17 cm

Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine Messrate von knapp unter 30 ms eingestellt, um Fehlmessungen durch nachklingende Reflexionen im Raum zu reduzieren.

In dem Sensor selbst ist ein ASIC (anwendungsspezifische integrierte Schaltung) eingebaut, der beim Empfangen des Ultraschallechos die Intensität des empfangenen Schalls gegen eine frei programmierbare Intensitätskennlinie prüft. Bei ausreichend großer Intensität wird ein binäres Ausgangssignal geschaltet.

Auf Basis von, speziell für diese Arbeit von der Bosch Engineering GmbH bereitgestellten, internen Unterlagen bestand im Rahmen dieser Arbeit die Möglichkeit, zwei unterschiedliche Kennlinien für die Empfangscharakteristik einzulernen. Abbildung 75 zeigt die Empfangscharakteristik beider im Rahmen dieser Arbeit genutzter Intensitätskennlinien. Diese entspricht dem, im Datenblatt des Lieferanten InMach angegebenen, horizontalen Erfassungsbereich von  $\pm 60^\circ$  für die Bosch Ultraschallsensoren bei 3dB [28]. Der vertikale Erfassungsbereich ist laut InMach mit  $\pm 30^\circ$  nur halb so groß [28]. Dies ergibt im Gegensatz zu dem microsonic Sensor eine Sensorkeule mit einer ovalen Schnittfläche (siehe Abbildung 40). Deshalb muss die Ausrichtung des Sensors in der Schutzeinrichtung beachtet werden (siehe Kapitel 7.1.5.1).

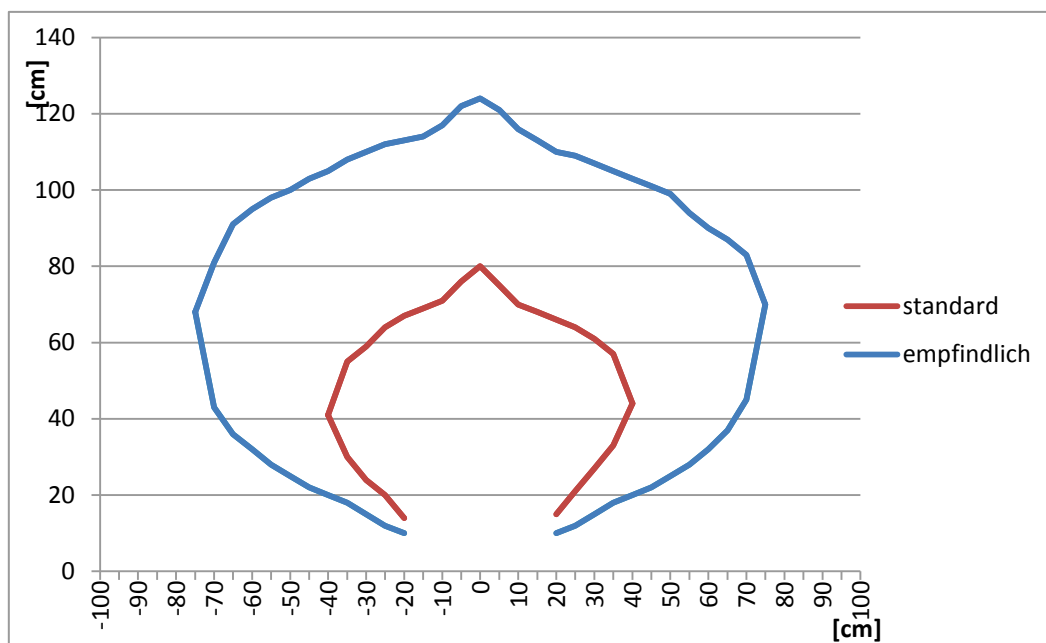


Abbildung 75: „Empfangscharakteristik des Bosch Ultraschallsensors 0 263 003 331“, Quelle: Messung und Grafik von A. Kirfel, [148]

### 13.1.3 Beckhoff EtherCAT-Koppler und Klemmen

Um die Daten der Sensoren von microsonic (Kapitel 13.1.1) an den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten PC zu übermitteln, wurden analoge EtherCAT-Klemmen der Beckhoff Automation GmbH - Beckhoff - zusammen mit einem EtherCAT-Koppler, ebenfalls von Beckhoff eingesetzt.

Als EtherCAT-Koppler wurde der EK1101 ausgewählt. Die Klemme EL2809 wurde als digitale Ausgangsklemme, zum einzelnen Zu-/Abschalten der Sensoren, ausgewählt. Als analoge Eingangsklemmen wurde die Klemme EL3058 gewählt, deren Wandlungszeit von 1,25 ms im System des ersten Demonstrators im Rahmen der Nachlaufzeit des gesamten Systems beachtet werden musste.

### 13.1.4 EtherCAT-Slavekarte

Zur Kommunikation mit der sicheren Steuerung von Baumüller wird, im Rahmen dieser Arbeit, die EtherCAT-Slavekarte FC1100 von Beckhoff eingesetzt. Sie ist in den im Rahmen dieser Arbeit verwendeten PC, auf dem das Programm zur Kommunikation mit der sicheren Steuerung läuft (siehe Kapitel 8.4), eingebaut und kann Daten der Baumüllersteuerung empfangen und dem Programm zur Verfügung halten bzw. neue Daten vom Programm entgegennehmen und für die Baumüllersteuerung bereithalten.

### **13.1.5 Sensorbefestigung**

Zur Sensorbefestigung sind, im Rahmen dieser Arbeit, zwei Aluminiumringe am oberen und unteren Ende des Unterarms des Roboters befestigt. Diese Ringe sind für den ersten Demonstrator über parallel zum Roboterarm laufende Metallschienen verbunden, auf denen die Sensoren von microsonic befestigt sind.

Als Basis für den zweiten Demonstrator wurde ein Stahlblech zur Aufnahme des Ultraschallsensoren gefertigt. Dieses ist als Halbschale ausgestaltet, die zentrisch zur Mittelachse des Roboterarms angebracht ist. Die Halbschale enthält regelmäßige Bohrungen zur Befestigung der Bosch-Ultraschallsensoren (siehe Abbildung 24). Der Radius der Halbschale wurde so gewählt, dass zwischen Blech und Roboterarm mindestens 3 cm Platz sind. Dieser Abstand reicht aus, um die Sensoren von Bosch bündig mit der Oberfläche der Halbschale zu montieren.

### **13.1.6 Knickarmroboter – Reis RV 30-16**

Der im Rahmen dieser Arbeit eingesetzte Roboter ist ein RV30-16 von Reis Robotics.

Dieser 6-Achsen-Knickarmroboter kann an seinem Endpunkt 16 kg als Arbeitslast befördern. Seine Reichweite von 2200 mm und seine Geschwindigkeit von ca. 40 km/h sind in Kapitel 12 beschrieben.

Der Roboter hat eine Wiederholungsgenauigkeit beim Anfahren einer Position von  $\pm 0,08$  mm und ein Eigengewicht von 360 kg.

## **13.2 Software**

### **13.2.1 TwinCAT I/O**

Um die einzelnen Hardwarekomponenten von Beckhoff in dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten PC ansteuern zu können, wurde die Version 2.11 des Echtzeittreibers „TwinCAT I/O“ von Beckhoff im PC installiert. Dieser erlaubt es, eine Netzwerkkarte im PC als EtherCAT Master zu nutzen, um die Messwerte der microsonic Sensoren einzulesen und gleichzeitig die EtherCAT-Slavekarte anzusteuern, um mit der Baumüller Steuerung zu kommunizieren (siehe Kapitel 8.4).

### **13.2.2 Microsoft Visual Studio 2008 / 2010 Express**

Die Umsetzung der Algorithmen im Rahmen dieser Arbeit erfolgte teilweise in C++ und teilweise in C#. Zum Integrieren der Ultraschallsensoren in das in [153] entstandene Programm, sowie für die erweiterte Sensorkalibrierung und die Abschlusspräsentation des Projekts EsIMiP am Roboter, wurde die Umgebung Microsoft Visual Studio 2008 Express genutzt (siehe Kapitel 8.2 bis 8.4). Die in [148] entstandene Arbeit, sowie später erfolgte Anpassungen im Rahmen dieser Arbeit, wurden in der Umgebung Microsoft Visual Studio 2010 Express programmiert (siehe Kapitel 8.5).



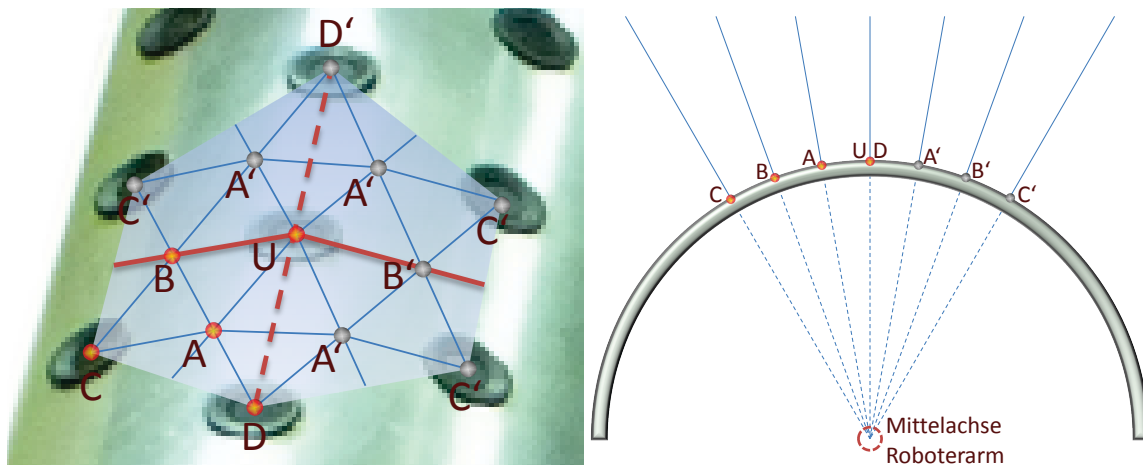


## 14 Anhang III: Mathematische Formeln zur Berechnung der Kollision

### 14.1 Bestimmung der Oberfläche des freien Raums

Zur Erstellung der Oberfläche des freien Raums müssen die Längen der Rasterlinien, die von der Mittelachse des Roboterarms senkrecht durch die Schutzeinrichtung bis zum Erreichen des Endes des Kugelabschnitts des jeweiligen Sensors reichen, bestimmt werden (siehe Kapitel 7.1.5.2.4).

Aus den in Abbildung 49 gezeigten Durchstoßpunkten der Rasterlinien durch die Schutzeinrichtung können „Spiegelpositionen“ in der Berechnung gleichgesetzt werden, da diese wegen des symmetrischen Aufbaus des Erfassungsbereichs eines Sensors gleiche Werte liefern (z.B.  $A = A'$ ). Abbildung 76 zeigt die Symmetrieachsen (rote Linie – BUB' – und rot gestrichelte Linie – DUD' –). Die Spiegelpositionen der Durchstoßpunkte sind durch graue Kreise gekennzeichnet.



**Abbildung 76: Darstellung der symmetrischen Anordnung der Durchstoßpunkte der Rasterlinien durch die Schutzeinrichtung nach Abbildung 49 und Schnitt zur Darstellung der Rasterlinien und Durchstoßpunkte**

Pro Sensor müssen somit nicht alle dreizehn, sondern lediglich fünf unterschiedliche Längen von Rasterlinien (A, B, C, D, U) berechnet werden.

Die Länge der Rasterlinie die durch den Sensor verläuft (U) hat hierbei den vom Sensor gemessenen Wert. Die Länge der anderen vier Rasterlinien (A, B, C, D) kann nach Abbildung 77 über die Berechnung des Dreiecks aus

- dem Ultraschallsensormittelpunkt (U),
- dem jeweiligen Rasterdurchstoßpunkt (R) und
- dem Schnittpunkt (S) von Kugelabschnitt und der jeweiligen Rasterlinie

berechnet werden.

In Abbildung 77 sind die aus dem Sensorsystem bekannten Werte in blau dargestellt, die unbekannt Werte und die Strecke, deren Länge gesucht ist, rot.

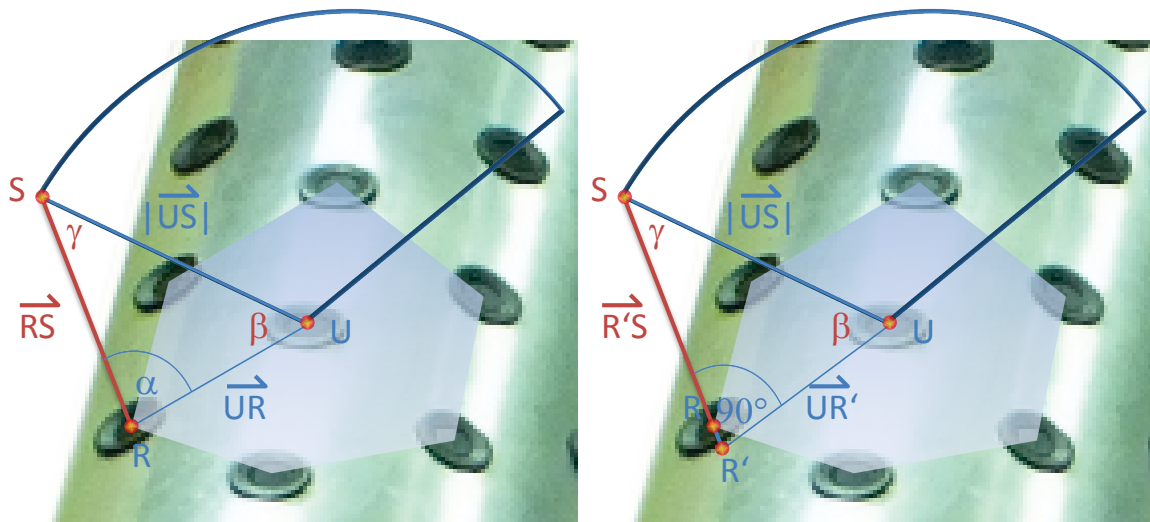


Abbildung 77: Berechnung der Länge des Vektors  $\overline{RS}$

Die Länge der Strecke US  $|\overline{US}|$  entspricht dem Messwert des Sensors und ist die variable Größe im Sensorsystem. Der Abstand UR  $|\overline{UR}|$  ist bekannt, ebenso der Winkel  $\alpha$  zwischen  $\overline{UR}$  und  $\overline{RS}$ .

### 14.1.1 Berechnung der Rasterlinienlänge über den Sinussatz

Aus dem Sinussatz ergibt sich hiermit für  $\gamma$ :

$$\gamma = \sin^{-1} \left( \frac{|\overline{UR}| * \sin \alpha}{|\overline{US}|} \right)$$

Mit dem Winkel  $\gamma$  kann  $|\overline{RS}|$  über den Sinussatz durch eine der folgenden Formeln bestimmt werden:

$$|\overline{RS}| = |\overline{UR}| * \frac{\sin(180^\circ - \alpha - \gamma)}{\sin \gamma}$$

$$|\overline{RS}| = \frac{1}{\sin \alpha} * |\overline{US}| * \sin(180^\circ - \alpha - \gamma)$$

Die in den Formeln blau dargestellten Teile basieren auf Konstanten des Sensorsystems und können daher vorberechnet und als Konstanten abgespeichert werden. Sie benötigen dann zur Laufzeit des Algorithmus keine Rechenzeit. Die zweite Formel für  $|\overline{RS}|$  ist für die Rechenzeit von Vorteil, da die hier enthaltene Division vorberechnet werden kann. Somit ergibt sich die Gesamtformel:

$$|\overline{RS}| = \frac{1}{\sin \alpha} * |\overline{US}| * \sin \left( 180^\circ - \alpha - \sin^{-1} \left( \frac{|\overline{UR}| * \sin \alpha}{|\overline{US}|} \right) \right)$$

Verlängert man die Rasterlinie  $|\overline{RS}|$  durch die Schutzeinrichtung nach innen auf  $|\overline{R'S}|$  bis  $\alpha = 90^\circ$  (Abbildung 77), kann die Berechnung durch das Nutzen dieses Zwischenpunkts R' auf die Formel

$$|\overline{RS}| = |\overline{US}| * \sin \left( 90^\circ - \sin^{-1} \left( \frac{|\overline{UR}|}{|\overline{US}|} \right) \right) - |\overline{RR'}|$$

vereinfacht werden. Die Strecke  $|\overline{RR'}|$  kann hierbei ebenfalls vorberechnet und als Konstanten abgespeichert werden. Dies spart eine Multiplikation auf Kosten einer schnelleren Subtraktion ein.

Sinus und Arkussinus können über Taylorreihen berechnet werden, wofür allerdings multiple Divisionen erforderlich sind. Eine schnellere Methode ist die Nutzung von Lookup-Tabellen,

wodurch die Berechnung von Sinus und Arkussinus auf eine einfache Datenabfrage reduziert wird.

### 14.1.2 Berechnung der Rasterlinienlänge über den Satz des Pythagoras

Alternativ zum Ansatz über den Sinussatz kann der Satz des Pythagoras benutzt werden:

$$\begin{aligned} |\overline{US}|^2 &= (|\overline{RR'}| + |\overline{RS}|)^2 + |\overline{UR}|^2 \\ \equiv 0 &= |\overline{RS}|^2 + 2 * |\overline{RR'}| * |\overline{RS}| + |\overline{RR'}|^2 + |\overline{UR}|^2 - |\overline{US}|^2 \\ \equiv |\overline{RS}| &= \sqrt{|\overline{US}|^2 - |\overline{UR}|^2 - |\overline{RR'}|^2} \end{aligned}$$

Hierbei werden die Lookup-Tabellen von Sinus und Arkussinus eingespart, dafür muss aber eine Wurzel bestimmt werden. Auch hierfür kann allerdings eine Lookup Tabelle in der benötigten Genauigkeit angelegt werden, womit diese Methode schneller ist, als über den Sinussatz.

### 14.1.3 Rechenaufwand zur Bestimmung der Oberfläche des freien Raums

Für die Bestimmung aller Rasterlinienlängen eines Sensors ergeben sich hiermit:

- Berechnungsmöglichkeit 1 (Sinussatz):
  - Eine Division
  - Ein Lookup in der Arkussinustabelle und ein Lookup in der Sinustabelle
  - Eine Multiplikation
  - Zwei Subtraktionen
- Berechnungsmöglichkeit 2 (Pythagoras):
  - Eine Multiplikation
  - Zwei Subtraktionen
  - Ein Lookup in der Wurzeltabelle

Da für eine der vier so zu berechnenden Rasterlinien (D) die Punkte R und R' übereinstimmen, kann für diese Linie je eine Subtraktion wegfallen.

Zum Schluss bleibt noch die Möglichkeit, für die vier verschiedenen, zu berechnenden Rasterlinien (A, B, C, D) direkt eine Lookup-Tabelle von gemessenem Sensorwert zu Länge der entsprechenden Rasterlinien in der benötigten Genauigkeit im Programm abzulegen. Durch die Messungengenauigkeit der Sensoren reicht hierbei eine Tabelle mit einem Tabellensprung von einem Millimeter.

Nach dem Bestimmen der Längen der Rasterlinien jedes einzelnen Sensors müssen die Rasterlinienlängen benachbarter Sensoren untereinander verglichen werden. Hierbei liegen für eine durch einen Sensor verlaufende Rasterlinie (C, D, M) durch die Messergebnisse umgebender Sensoren sieben Längen vor. Hiervon muss die kürzeste gefunden werden, was durch sechs Vergleiche erfolgt. Für die restlichen Rasterlinien (A, B) ergeben sich drei Werte und somit zwei notwendige Vergleiche. Pro Sensor im System existieren eine Rasterlinie durch diesen Sensor selbst und bis zu zwei weitere dem Sensor zuzuordnende Rasterlinien. Somit fügt jeder Sensor, neben dem Aufrufen der Lookup-Tabelle, zur Gesamtlauzeit des Algorithmus noch zehn Vergleiche hinzu.

Hierzu kommt pro Rasterlinie noch das Subtrahieren des Radius der Halbschale nach Kapitel 7.1.5.2.5 (Reduzierung des Roboterarms auf seine Mittelachse), welcher in die Lookup-Tabelle bereits eingerechnet werden kann und das Subtrahieren des notwendigen Sicherheitsabstands nach Kapitel 7.1.5.2.6 bzw. 7.1.5.2.7, welcher nach Kapitel 7.3 dynamisch bestimmt werden kann. Die dynamische Anpassung der Methode nach Kapitel 7.1.5.2.6 erfordert somit drei Subtraktionen (eine pro Rasterlinie) pro Sensor. Die

Methode nach Kapitel 7.1.5.2.7 ist durch die Beachtung der seitlichen Eindringung rechenintensiver, aber auch hier können die benötigten Ergebnisse in Tabellen vorgehalten werden. Durch mehr benötigte Vergleiche entsteht allerdings ein geringfügig höherer Rechenaufwand.

## 14.2 Kollision mit der Oberfläche des freien Raums

In diesem Kapitel wird das Berechnungsverfahren zur Ermittlung ob eine nach Kapitel 7.2.3 zu berechnende Kollision zwischen Roboterarm und Oberfläche des freien Raums vorliegt vorgestellt. Berechnet werden muss, ob ein Durchstoßpunkt der Mittelachse innerhalb eines Dreiecks der Oberfläche des freien Raums liegt.

Abbildung 78 zeigt die zu bestimmenden Durchstoßpunkte (rote Kreise) aus Kapitel 7.2.3.

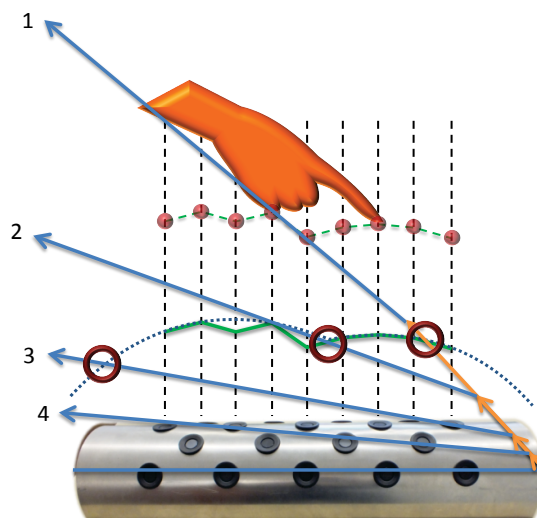
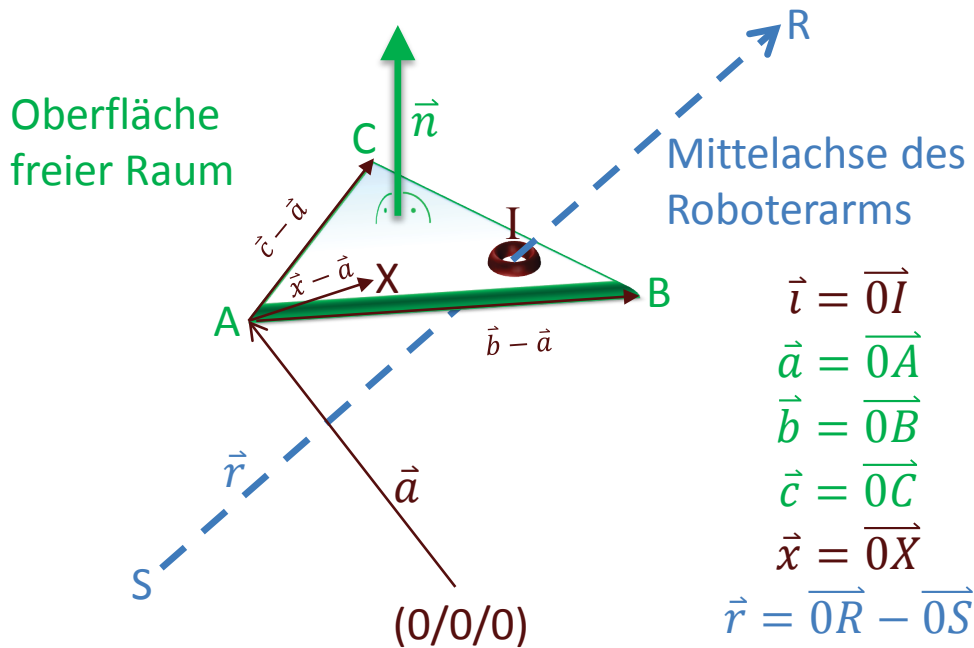


Abbildung 78: Kollision zwischen Roboterarm und Oberfläche  
siehe Abbildung 60

### 14.2.1 Berechnung des Durchstoßpunkts in der Oberfläche des freien Raums

Zur Berechnung eines Durchstoßpunktes durch die Oberfläche des freien Raums sind verschiedene mathematische Ansätze möglich. Ein erster Ansatz, im Rahmen dieser Arbeit, war das Lösen des Problems über die Parameterform der Dreiecksebene. Im Rahmen der Arbeit von Kirfel [148] wurde festgestellt, dass die Berechnung über die Normalenform der Dreiecksebene weniger Rechenaufwand benötigt. Aus diesem Grund wurde der Ansatz über die Normalenform ([148] in Kapitel 5.1.3) in der vorliegenden Arbeit weiter verfolgt. Dabei wurden die von Kirfel gewählten Bezeichnungen aus Gründen der Kompatibilität beibehalten.

Abbildung 79 zeigt eine Dreiecksfläche der Oberfläche des freien Raums beim Schnitt mit der Mittelachse des Roboterarms. Für den Aufwand der gesamten Berechnung aller möglichen Kollisionen muss bedacht werden, dass pro Sensor sechs solcher Dreiecksflächen der Oberfläche des freien Raums zu berücksichtigen sind.



**Abbildung 79: Kollisionsbestimmung mittels Normalenform der Dreiecksebene und dem Vektor der Mittelachse des Roboterarms**

Ein in der Oberfläche des freien Raums liegendes Dreieck hat die Form:

$$E_{\Delta}: (\vec{x} - \vec{a}) \cdot \vec{n} = 0 \text{ mit } \vec{n} = (\vec{b} - \vec{a}) \times (\vec{c} - \vec{a})$$

Der Roboterarm hat die Lage und Orientierung des Vektors:

$$V_R: \vec{s} + k * \vec{r} = \vec{i} \text{ mit } 0 \leq k \leq 1$$

Führt man diesen Ansatz fort, gilt für den Normalenvektor:

$$\begin{aligned} n_x &= [(b_y - a_y) * (c_z - a_z)] - [(b_z - a_z) * (c_y - a_y)] \\ n_y &= [(b_z - a_z) * (c_x - a_x)] - [(b_x - a_x) * (c_z - a_z)] \\ n_z &= [(b_x - a_x) * (c_y - a_y)] - [(b_y - a_y) * (c_x - a_x)] \end{aligned}$$

Aus dem Einsetzen der Vektorgleichung in die Ebenengleichung entsteht

$$\begin{aligned} &((\vec{s} + k * \vec{r}) - \vec{a}) \cdot \vec{n} = 0 \\ \Leftrightarrow k &= \frac{(\vec{a} - \vec{s}) \cdot \vec{n}}{\vec{r} * \vec{n}} \\ \Leftrightarrow k &= \frac{(a_x - s_x) * n_x + (a_y - s_y) * n_y + (a_z - s_z) * n_z}{r_x * n_x + r_y * n_y + r_z * n_z} \end{aligned}$$

Dieses Ergebnis muss dahingehend geprüft werden, ob  $0 \leq k \leq 1$  ist (siehe auch [148]), also ob der Durchstoßpunkt durch die Ebene innerhalb der Länge des Roboterarms liegt.

- Ist dies nicht gegeben, kann die Berechnung der Kollision an dieser Stelle bereits abgebrochen werden, da bewiesen ist, dass keine Kollision der Mittelachse des Roboterarms mit diesem Dreieck der Oberfläche des freien Raums vorliegt.
- Ist die Bedingung  $0 \leq k \leq 1$  erfüllt, wird  $k$  in  $V_R$  eingesetzt und der erhaltene Durchstoßpunkt  $I$  wird mit den Grenzen des Dreiecks der Oberfläche verglichen:

$$\vec{i} = \vec{a} + l_1 * (\vec{b} - \vec{a}) + l_2 * (\vec{c} - \vec{a})$$

Durch Umstellen dieser Formeln (siehe auch [148]) erhält man für den Durchstoßpunkt  $\vec{i}$  im Dreieck die Formeln:

$$l_1 = \frac{(c_y - a_y) * (i_x - a_x) - (c_x - a_x) * (i_y - a_y)}{(b_x - a_x) * (c_y - a_y) - (b_y - a_y) * (c_x - a_x)}$$

und

$$l_2 = \frac{(b_y - a_y) * (i_x - a_x) - (b_x - a_x) * (i_y - a_y)}{(b_x - a_x) * (c_y - a_y) - (b_y - a_y) * (c_x - a_x)}$$

Mit den entstehenden Längen  $l_1$  und  $l_2$  der Vektoren  $\vec{b} - \vec{a}$  und  $\vec{c} - \vec{a}$  muss geprüft werden, ob der Durchstoßpunkt durch die Ebene in der das Dreieck liegt auch innerhalb der Grenzen dieses Dreiecks liegt. Hierbei gilt (siehe auch [148]):

$$\text{schneidet} = (0 \leq l_1) \wedge (0 \leq l_2) \wedge ((l_1 + l_2) \leq 1)$$

### 14.2.2 Optimierung der Rechenzeit

Die in Kapitel 14.2.1 gezeigte Berechnung für den Vergleich eines Vektors mit der Oberfläche des freien Raums muss für jedes einzelne Dreieck der Oberfläche und für beide zu prüfenden Vektoren durchgeführt werden. Dieser Vergleich muss in Echtzeit erfolgen, wobei die maximale Laufzeit möglichst kurz sein muss. Deshalb werden die genutzten Formeln, im Rahmen dieser Arbeit, hinsichtlich der benötigten Rechenzeit weitestgehend optimiert.

Die Formeln aus Kapitel 14.2.1 zur Berechnung von  $\vec{n}$  über das Kreuzprodukt lassen sich nicht weiter optimieren, da ein Abspeichern von redundanten Zwischenergebnissen ähnlich viel Zeit benötigt wie ein Neuberechnen der redundanten Subtraktionen. Somit ergeben sich hier:

- 6 Multiplikationen
- 15 Subtraktionen

Diese Ergebnisse des Normalenvektors jedes Dreiecks der Oberfläche des freien Raums können allerdings gespeichert werden, da jedes Dreiecks im Verlauf der Kollisionsbestimmungen im Rahmen der Iterationen der verschiedenen Robotergergeschwindigkeiten bis zu 20 mal genutzt wird (10 mal mit 2 verschiedenen Vektoren – siehe Kapitel 7.2.3).

Vor der endgültigen Berechnung, ob der Durchstoßpunkt durch die Ebene innerhalb der Länge des Roboterarms liegt ( $k$ ) kann dessen Divident (im Folgenden  $A$ ) und Divisor (im Folgenden  $B$ ) einzeln bestimmt werden.

Es sei:

$$A = (a_x - s_x) * n_x + (a_y - s_y) * n_y + (a_z - s_z) * n_z$$

$$B = r_x * n_x + r_y * n_y + r_z * n_z$$

In der Regel werden nur wenige Ebenen, in denen die Dreiecke der Oberfläche des freien Raums liegen, von dem Vektor der Mittelachse des Roboterarms innerhalb der Länge der Mittelachse geschnitten. Wird die Ebene nicht geschnitten, kann die Berechnung der Kollision an dieser Stelle abgebrochen werden. Es ist daher im Mittel schneller, die Rechentechnisch teure Division von  $A$  und  $B$  nur auf die Fälle zu beschränken, die die Bedingung ( $0 \leq k \leq 1$ ) erfüllen.

Hierzu kann die Bedingung ( $0 \leq k \leq 1$ ) ersetzt werden durch:

$$(0 \leq k \leq 1) \equiv (B \neq 0) \wedge \left\{ (A = 0) \vee \begin{cases} \text{für } (B > 0): (A > 0) \wedge (A \leq B) \\ \text{für } (B < 0): (A < 0) \wedge (A \geq B) \end{cases} \right\}$$

Hiermit sind weitere:

- 6 Multiplikationen
- 7 Subtraktionen/Additionen
- 5 Vergleiche

in jedem Vergleich notwendig. Die maximale Laufzeit gegenüber dem Berechnen der Division und dem direkten Bestimmen von ( $0 \leq k \leq 1$ ) erhöht sich hierdurch allerdings um 2 Vergleiche ( $B \neq 0$  ist auch bei direkter Division zu prüfen). Dies erhöht die später bestimmte Gesamtlaufzeit für 80 Sensoren um 38400 Takte.

Ist  $(0 \leq k \leq 1)$  gegeben, folgen zur Bestimmung des Durchstoßpunkts I durch Berechnen von  $k$  und Einsetzen von  $k$  in  $V_R$  weitere:

- 1 Division
- 3 Multiplikationen
- 3 Subtraktionen/Additionen

Zur Optimierung der Rechenzeit können die Formeln, die bestimmen ob der Durchstoßpunkt innerhalb des Dreiecks der Oberfläche des freien Raums liegt, verkürzt werden.

Die Formeln für  $l_1$  und  $l_2$  stimmen in ihrem Divisor (im Folgenden  $E$ ) überein. Somit muss dieser Divisor nur einmal berechnet werden. Die Dividenden (im Folgenden  $C$  und  $D$ ) müssen separat berechnet werden.

Es sei

$$\begin{aligned} C &= (c_y - a_y) * (i_x - a_x) - (c_x - a_x) * (i_y - a_y) \\ D &= (b_y - a_y) * (i_x - a_x) - (b_x - a_x) * (i_y - a_y) \\ E &= (b_x - a_x) * (c_y - a_y) - (b_y - a_y) * (c_x - a_x) \end{aligned}$$

Die rechentechnisch teure Division, zur Prüfung ob  $V_R E_\Delta$  schneidet

$$(0 \leq l_1) \wedge (0 \leq l_2) \wedge ((l_1 + l_2) \leq 1)$$

kann eingespart werden, da diese Bedingungen durch andere Bedingungen ersetzt werden können:

$$\begin{aligned} (0 \leq l_1) &\equiv [C = 0] \vee \begin{cases} \text{für } (E > 0): (C > 0) \\ \text{für } (E < 0): (C < 0) \end{cases} \\ (0 \leq l_2) &\equiv [D = 0] \vee \begin{cases} \text{für } (E > 0): (D > 0) \\ \text{für } (E < 0): (D < 0) \end{cases} \end{aligned}$$

$$((l_1 + l_2) \leq 1) \equiv \frac{C}{E} + \frac{D}{E} \leq 1 \equiv \begin{cases} \text{für } (E > 0): (C + D) \leq E \\ \text{für } (E < 0): (C + D) \geq E \end{cases}$$

$$(0 \leq l_1) \wedge (0 \leq l_2) \wedge ((l_1 + l_2) \leq 1) \equiv \begin{cases} \text{für } (E > 0): (C \geq 0) \wedge (D \geq 0) \wedge [(C + D) \leq E] \\ \text{für } (E < 0): (C \leq 0) \wedge (D \leq 0) \wedge [(C + D) \geq E] \end{cases}$$

Hierbei ist berücksichtigt, dass immer  $E \neq 0$  gilt. Über diese Erweiterung können weitere Divisionen, die für einen Prozessor die größte Rechenlast bedeuten, vermieden werden.

Hierdurch ergeben sich gegenüber den bisher durchgeführten Berechnungen weitere:

- 6 Multiplikationen
- 16 Subtraktionen/Additionen
- 4 Vergleiche

Dies sind für eine Berechnung, die nicht nach  $(0 \leq k \leq 1)$  abbricht, insgesamt:

- 1 Division
- 15 Multiplikationen
- 26 Subtraktionen/Additionen
- 9 Vergleiche

Sowie, bei 10 Iterationen zur Bestimmung der Geschwindigkeit, alle 20 Durchgänge zusätzliche zur Berechnung des Normalenvektors der Ebene (siehe oben):

- 6 Multiplikationen
- 15 Subtraktionen

Für jedes Dreieck der Oberfläche des freien Raums ergeben sich hieraus für die Bestimmung der zulässigen maximalen Geschwindigkeit durch Berechnung von 10 Kollision zweier Vektoren (Mittelachse und Ortsvektor – siehe Kapitel 7.2.3) mit einem Dreieck:

- $1 * 20 = 20$  Divisionen

- $15 \cdot 20 + 6 = 306$  Multiplikationen
- $26 \cdot 20 + 15 = 535$  Subtraktionen/Additionen
- $9 \cdot 20 = 180$  Vergleiche

Bei 6 Oberflächen-Dreiecken pro Sensor und z.B. 80 Sensoren um den Roboterarm sind dies:

- $20 \cdot 6 \cdot 80 = 9600$  Divisionen
- $306 \cdot 6 \cdot 80 = 146880$  Multiplikationen
- $535 \cdot 6 \cdot 80 = 256800$  Subtraktionen/Additionen
- $180 \cdot 6 \cdot 80 = 86400$  Vergleiche

Unter der Annahme, dass ein moderner Prozessor für eine Subtraktion/Addition 2 Takte, für einen Vergleich ebenfalls 2 Takte, für eine Multiplikation 3 Takte und für eine Division 20 Takte benötigt, ergibt dies:

- 9600 Divisionen = 192000 Takte
- 146880 Multiplikationen = 440640 Takte
- 256800 Subtraktionen/Additionen = 513600 Takte
- 86400 Vergleiche = 172800 Takte

insgesamt 1319040 Takte zur Berechnung der maximal zulässigen Robotergeschwindigkeit bei Nutzung von 80 Sensoren.

Geht man davon aus, dass im Gesamtsystem eine Millisekunde zur Berechnung der Kollision zur Verfügung steht, wäre hierfür bei maximaler Laufzeit ein Prozessor mit ca. 1,3 GHz Taktrate nötig.

Durch die Kollisionsbestimmung der beiden Vektoren gegen einzelne Dreiecke ist dieses Problem allerdings stark parallelisierbar. Es kann also auch mit zwei Prozessoren von je ca. 650 MHz in der gleichen Zeit gelöst werden, wenn beide die Hälfte aller Dreiecke verwalten. Die ungefähre Halbierung der Rechenzeit bei Verdopplung der Prozessoren hat Bestand, bis die Anzahl der Prozessoren die Anzahl der Dreiecke in der Oberfläche erreicht.

Bedacht werden muss, dass hier der theoretisch ungünstigste denkbare Fall dargestellt ist, bei dem für alle Dreiecke ( $0 \leq k \leq 1$ ) gilt. Unter realen Bedingungen ist diese Berechnung schneller, da dieser theoretische Fall in der Praxis mit großer Wahrscheinlichkeit nicht eintreten wird. Hierauf darf man sich in der Sicherheitstechnik allerdings nicht verlassen und muss auch diesen Fall sicherheitstechnisch betrachten. Der hier behandelte Ansatz berücksichtigt diesen Fall. Durch die Iterationen der Berechnung liegt nämlich nach jeder kompletten Iteration eine zulässige maximale Geschwindigkeit vor, die allerdings noch nicht so genau wie gewünscht ist, aber hierbei immer in die sichere Richtung abweicht. Es kann somit ein langsamerer Prozessor eingesetzt werden, bei dem nach Ablauf einer Millisekunde die zuletzt kollisionsfrei berechnete Position als Vorgabe für die Geschwindigkeit genutzt wird, ohne dass das Robotersystem unsicher oder die Echtzeitfähigkeit eingebüßt wird.

Geht man in einem konservativem Ansatz davon aus, dass nur die Hälfte aller Berechnungen nach der Bestimmung von ( $0 \leq k \leq 1$ ) abbricht, ergeben sich für die nicht abbrechenden Berechnungen:

- $1 \cdot 10 = 20$  Divisionen
- $15 \cdot 10 + 6 = 306$  Multiplikationen
- $26 \cdot 10 + 15 = 535$  Subtraktionen/Additionen
- $9 \cdot 10 = 90$  Vergleiche

Sowie für die abbrechenden Berechnungen weitere:

- $6 \cdot 10 + 6 = 66$  Multiplikationen
- $7 \cdot 10 + 6 = 76$  Subtraktionen/Additionen
- $5 \cdot 10 = 50$  Vergleiche



Bei 6 Oberflächen-Dreiecken pro Sensor und z.B. 80 Sensoren um den Roboterarm sind dies:

- $20 \cdot 6 \cdot 40$  = 4800 Divisionen
- $306 \cdot 6 \cdot 40$  +  $66 \cdot 6 \cdot 40$  = 89280 Multiplikationen
- $535 \cdot 6 \cdot 40$  +  $76 \cdot 6 \cdot 40$  = 146640 Subtraktionen/Additionen
- $90 \cdot 6 \cdot 40$  +  $50 \cdot 6 \cdot 40$  = 33600 Vergleiche

Dies sind:

- 4800 Divisionen = 96000 Takte
- 89280 Multiplikationen = 267840 Takte
- 146640 Subtraktionen/Additionen = 293280 Takte
- 33600 Vergleiche = 67200 Takte

Für diese 724320 angenommenen Takte reicht somit ein 725 MHz Prozessor aus, um die Berechnungen in einer Millisekunde durchzuführen, bzw. mit einem immer noch ausreichend genauen Ergebnis nach einer Millisekunde die Bestimmung der zulässigen Geschwindigkeit abzurechnen. Gegenüber dem 1,3 GHz Prozessor sind im theoretisch schlechtesten Fall nur vier von zehn gewünschten Iterationen berechnet. Damit würde die berechnete zulässige maximale Geschwindigkeit in diesem Fall nicht nur um die gewünschten maximalen 0,1% nach unten abweichen, sondern um maximal ca. 6%.

### 14.3 Rechenaufwand zur Bestimmung der Lage des Roboterarms im dreidimensionalen Raum

Zusätzlich zu den oben dargestellten Berechnungen muss bei jeder Iteration auch die aktuelle Position und die anzufahrende Position des Roboterarms im Raum berechnet werden.

Mit der Vorwärtskinematik, bei der aus bekannten Achswinkeln die Position des Roboters bestimmt wird, unter Nutzung der Denavit-Hartenberg-Transformation ergeben sich bei variantem  $\theta$  (dem veränderlicher Parameter bei rotatorischen Achsen) zum Aufbau jeder Matrix

- 2 Lookup in der Sin/Cos Tabelle
- 6 Multiplikationen

Für die Multiplikation der ersten Denavit-Hartenberg-Matrix mit der zweiten ergeben sich

- 33 Multiplikationen
- 20 Subtraktionen/Additionen

Für die nächsten beiden Matrixmultiplikationen ergeben sich

- 37 Multiplikationen
- 24 Subtraktionen/Additionen

Dies sind insgesamt

- $2 \cdot 4$  = 8 Lookup in der Sin/Cos Tabelle
- $6 \cdot 4 + 33 + 2 \cdot 37$  = 131 Multiplikationen
- $20 + 2 \cdot 24$  = 68 Subtraktionen/Additionen

Da dies nur für 10 diskrete Positionen des Roboterarms durchgeführt werden muss, können diese wenigen Berechnungen in der Bestimmung der Laufzeit des Algorithmus der Kollisionsberechnungen vernachlässigt werden.