

---

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Robotik und Echtzeitsysteme

# Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion durch einen biofidelen Bewertungsansatz

Max Robert Kossmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät der Informatik der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Alin Albu-Schäffer

Prüfer der Dissertation: 1. Prof. Dr.-Ing. Alois Knoll  
2. Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Die Dissertation wurde am 11. Februar 2019 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Informatik am 05. Juni 2019 angenommen.



## Zusammenfassung

Steigender Wettbewerbsdruck und der demografische Wandel stellen Unternehmen in den Industrieländern vor wachsende Herausforderungen. Der Einsatz der Mensch-Roboter-Interaktion bietet die Möglichkeit, die Roboter und Menschen stärkenorientiert einzusetzen und wirtschaftliche wie auch ergonomische Potenziale zu heben. Herausfordernd ist dabei die Gewährleistung der Sicherheit des Menschen im Arbeitsraum des Roboters. Die technische Spezifikation ISO TS 15066 als Zusatz zur Robotersicherheitsnorm DIN EN ISO 10218-1/2 befasst sich mit den damit verbundenen Sicherheitsanforderungen und erlaubt für Robotersysteme mit einer Kraft- bzw. Leistungsbeschränkung einen Kontakt zwischen Mensch und Roboter. Dieser ist in Art und Umfang je nach Körperregion des Menschen spezifiziert und wird bei Anlagenabnahme durch den späteren Anlagenbetreiber durch eine physische Messung verifiziert.

Die Integration der Anforderungen der ISO TS 15066 in den Planungsprozess der Anlagen wird in der vorliegenden Arbeit fokussiert. Ausgehend von einer Analyse der Sicherheitsanforderungen werden Einflussgrößen auf die Kollisionskraft und die auftretende Flächenpressung bei einem Kontakt zwischen Mensch und Roboter abgeleitet. Anhand einer theoretischen Analyse der auftretenden Kollisionsmechanik lassen sich Wirkzusammenhänge der Einflussgrößen ableiten. Diese werden in einer Versuchsreihe experimentell in einem Prüfstand untersucht. Es werden in der Folge Gestaltungsprinzipien abgeleitet, welche bereits in der Planungsphase die Anforderungen der ISO TS 15066 berücksichtigen.

Im Hinblick auf die Integration der Anforderungen der technischen Spezifikation in den Planungsprozess wird ein datenbankbasiertes Berechnungsverfahren erarbeitet, mit welchem die auftretende Kollisionskraft entlang einer Trajektorie berechnet werden kann. In der Datenbank sind hierzu einzelne Kollisionen abgespeichert. Diese werden anhand von Filterfunktionen für jeden Punkt der vorliegenden Bewegung gefiltert und finden Eingang in ein Regressionsrechenmodell, welches die Wirkzusammenhänge der erfolgten theoretischen Analyse abbildet. Mit den vorliegenden Einflussgrößen der zu untersuchenden Punkte kann die auftretende Kollisionskraft hinreichend genau entlang der Trajektorie berechnet werden. So lassen sich auch komplexe Roboterbewegungen offline bereits in der frühen Planungsphase beurteilen und durch entsprechende Veränderungen im Anlagendesign die Performance der Anlage im Hinblick auf die Sicherheit und die Produktivität beeinflussen. Der gewinnbringende Einsatz des beschriebenen Berechnungsmodells wird abschließend anhand eines realisierten Industriebeispiels dargestellt.



## Abstract

Increasing competitive pressure and demographic change challenge companies in the industrialized countries. The use of human-robot-interaction offers the opportunity to use robots and people in a strength-oriented manner and to leverage economic as well as ergonomic potentials. Challenging is the guarantee of human safety in the workspace of the robot. The technical specification ISO TS 15066 as an addendum to the robot safety standard DIN EN ISO 10218-1/2 deals with the associated safety requirements and allows robot systems with a force and power restriction a contact between human and robot. This contact is specified depending on the body region of the human. The verification of the required force limits is taking place at the time of final plant acceptance by the operator with a physical measurement.

The integration of the requirements of ISO TS 15066 into the planning process of a human friendly robot cell is focused in this work. On the basis of an analysis of the safety requirements influencing factors on the collision force and the occurring surface pressure are outlined for a contact between a human and a robot. A theoretical analysis of the occurring collision mechanics are giving an indication for the casual relationship of the influencing variables. These are experimentally examined in a test series on a test bench. As a result design principles facing the safety requirements of the ISO TS 15066 can be outlined for the planning process of a human robot interaction cell.

Regarding the integration of the safety requirements of the technical specification into the planning process a database-based calculation method is developed that calculates the occurring collision force along a trajectory. For this purpose individual collisions are stored in the database and is filtered with specific filter functions for each point of the present motion. The resulting database is used in a regression model which integrates the causal relationships of the theoretical analysis. With the present influencing variables of the trajectory the emerging collision force for the investigated points along the trajectory can be calculated with sufficient accuracy. Even complex robot movements can be evaluated offline with this model in the early planning phase. This leads to an increasing systems performance in terms of safety and productivity through appropriate changes in the system design. Finally the profitable use of the described calculation model will be illustrated by a realized industrial example.



## Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit in der Vorentwicklung und dem Innovationsmanagement der Produktion der BMW Group. Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Alois Knoll für die Übernahme der wissenschaftlichen Betreuung des Promotionsvorhabens und die Übernahme des Hauptberichtes. Zudem danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh für die Übernahme des Mitberichtes.

Ebenso danke ich meinen Vorgesetzten auf der Unternehmensseite der BMW Group. Herzlich bedanken möchte ich mich hierbei bei Herrn Dr. Till Werneck und Herrn Stefan Bartscher für die Möglichkeit, im Bereich der kollaborierenden Robotik bei der BMW Group arbeiten zu dürfen. Neben der Promotion konnte ich in vielen spannenden Projekten mitarbeiten. Die Umsetzung des ersten kollaborierenden Roboters im BMW Group Werk Spartanburg oder der Aufbau des Roboterlabors am Anton-Ditt-Bogen seien hier nur beispielhaft erwähnt.

Danken möchte ich auch meinen Promotionskollegen und mittlerweile sehr engen Freunden Johannes Bix, Maxim Taschew und Quirin Tyroller. Ihr ward für mich stets konstruktive Ansprech- und kritische Diskussionspartner. Gemeinsam konnten wir den Weg von kollaborierenden und mobilen Robotern in die Montagen der Autowerke mit beeinflussen und können mit Stolz auf viele realisierte Anwendungsfälle zurückschauen. Im Weiteren möchte ich auch Herrn Ingo Schmiedel für die Unterstützung im Bereich der Konstruktion und des Prototypenbaus während der Projektarbeit danken. Zudem danke ich allen Prozesspartnern innerhalb des Unternehmens, welche den Mut hatten, mit uns potenzielle Anwendungen im Bereich der kollaborierenden Robotik zu entwickeln und in den Fabriken umzusetzen.

Meinen Eltern Ursula und Klaus, meinen Brüdern Hans und Alexander und insbesondere meiner Freundin Anna danke ich herzlich für die Unterstützung während der Anfertigungszeit der Arbeit. Euer Rückhalt, eure Rücksichtnahme und euer Vertrauen waren Voraussetzung für die Schaffung dieser Arbeit.

München, den 11. Februar 2019

Max Kossmann



# Inhaltsverzeichnis

<b>Zusammenfassung</b> .....	<b>III</b>
<b>Abstract</b> .....	<b>V</b>
<b>Vorwort des Autors</b> .....	<b>VII</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>IX</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielsetzung der Arbeit.....	2
1.3 Aufbau der Arbeit.....	3
<b>2 Ausgangssituation</b> .....	<b>5</b>
2.1 Begriffsdefinitionen.....	6
2.2 Absicherungsmethoden kollaborierender Arbeitsplätze.....	9
2.2.1 Globale Absicherung.....	10
2.2.2 Lokale Absicherung.....	12
2.2.3 Thematische Einordnung der Forschungsarbeit.....	14
2.3 Vorschriften und Normen.....	16
2.3.1 Aufbau und Überblick über Normen in der Maschinensicherheit.....	16
2.3.2 DIN EN ISO 10218: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen.....	18
2.3.3 ISO TS 15066: Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter.....	19
2.3.4 DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung.....	21
2.4 Forschungsbedarf.....	23
2.4.1 Ansatzpunkte vor dem Hintergrund der Ausgangssituation.....	23
2.4.2 Ansatzpunkte in dem industriellen Planungsprozess.....	24
2.5 Stand der Technik.....	26
2.5.1 Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt.....	26
2.5.2 Sicherheitstechnische Abnahme von MRI-Arbeitsplätzen durch die Berufsgenossenschaft.....	30
2.5.3 Experimentell gestütztes Planungssystem der BTU Cottbus.....	33
2.5.4 Ableitung von relevanten Einflussfaktoren auf die Sicherheit.....	35
2.6 Zusammenfassung.....	37
<b>3 Dynamische Analyse und experimentelle Betrachtung von Einflussgrößen</b> .....	<b>39</b>
3.1 Einteilung der Einflussgrößen.....	40
3.1.1 Zielgrößen.....	40
3.1.2 Steuergrößen.....	41
3.2 Theoretische Analyse.....	43
3.2.1 Kollisionsmechanik.....	43
3.2.2 Positionsbetrachtung (Hebelarmbetrachtung).....	45
3.3 Methodik.....	46
3.3.1 Robot Safety Evaluation Cell.....	47
3.3.2 Ergebnisinterpretation der erfassten Messdaten.....	53
3.3.3 Vorgehensweise der theoretischen und experimentellen Analyse.....	55
3.3.4 Versuchsplanung.....	59
3.4 Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Analyse.....	60
3.4.1 Kollisionsgeschwindigkeit.....	61
3.4.2 Zusatzmasse.....	63

3.4.3	Hebelarmbetrachtung – Position des Leichtbauroboters.....	65
3.4.4	Trägheitsmoment – Position des Leichtbauroboters .....	70
3.4.5	Biofidele Messgröße – Federkonstante.....	72
3.4.6	Werkzeugdesign – Flächenpressung.....	74
3.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Sicherheit .....	76
3.6	Zusammenfassung.....	80
<b>4</b>	<b>Datenbankbasierter Berechnungsansatz – Robot Safety Calculation.....</b>	<b>81</b>
4.1	Anforderung und Vorgehen.....	82
4.1.1	Anforderungen und Zielsetzung.....	82
4.1.2	Überblick und Ablauf .....	83
4.2	Vorgehen der Robot Safety Calculation im Detail.....	86
4.2.1	Aufbereitung der Trajektorie .....	86
4.2.2	Kollisionsdatenbank.....	89
4.2.3	Regressionsrechenmodell .....	92
4.2.4	Ergebnisdarstellung.....	100
4.3	Abgleich der Anforderungen und Zielsetzung .....	103
4.4	Zusammenfassung.....	105
<b>5</b>	<b>Einsatz der Robot Safety Calculation in einem Anwendungsbeispiel der Automobilindustrie .....</b>	<b>107</b>
5.1	Anwendungsfall und technische Lösungsvarianten .....	108
5.1.1	Montage einer Schallisolierung auf eine Fahrzeughür .....	108
5.1.2	Lösungsalternativen .....	109
5.2	Sicherheitsbeurteilung .....	112
5.2.1	Experimentelle Sicherheitsbeurteilung .....	112
5.2.2	Sicherheitsbeurteilung durch die RSC.....	116
5.2.3	Optimierung der Sicherheit mithilfe der RSC.....	120
5.3	Vergleich der Sicherheitsbeurteilungen .....	126
5.4	Zusammenfassung.....	127
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick .....</b>	<b>129</b>
6.1	Zusammenfassung.....	130
6.2	Ausblick .....	131
	<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>133</b>
	<b>Tabellenverzeichnis .....</b>	<b>139</b>
	<b>Abkürzungsverzeichnis.....</b>	<b>141</b>
	<b>Verzeichnis der Formelzeichen .....</b>	<b>143</b>
	<b>Literaturverzeichnis.....</b>	<b>147</b>

# 1 Einleitung

## 1.1 Motivation

Steigender Wettbewerbsdruck und weiter diversifizierte Produkte stellen etablierte Unternehmen vor allem in Hochlohnländern vor neue Herausforderungen. Die zunehmenden Variantenvielfalten haben insbesondere in der Automobilindustrie mit ihren hoch automatisierten Produktionsstätten und variantenreichen wie auch manuellen Montagen eine erhebliche Veränderung zur Folge [1–3]. Der demografische Wandel mit einer alternden Belegschaft wie auch die Integration elektrifizierter Antriebsstränge in bestehenden Produktionssystemen seien als Beispiele für den derzeitigen Wandel erwähnt [2–5].

Die innovative Robotik zeigt einen Lösungsansatz, um dem Wandel auf technischer Seite zu begegnen. Neuartige Leichtbaurobotersysteme bieten die Möglichkeit, die starren Grenzen zwischen der Automatisierung und der manuellen Fertigung zu beseitigen und Mensch und Maschine kooperierend zusammenarbeiten zu lassen [6]. Die Anzahl der Serviceroboter im privaten Umfeld steigt über die letzten Jahre gesehen kontinuierlich an. So zählen Haushaltsroboter, die den Rasen mähen oder in der Wohnung Staub saugen, bereits heute zu alltäglichen Interaktionspartnern des Menschen [4; 7–9]. In der Industrie werden auch erste hybride Montageszenarien umgesetzt und zeigen so den wirtschaftlichen Nutzen für kooperierende Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter auf [3; 5; 10]. Dabei können die Stärken der jeweiligen Interaktionspartner gewinnbringend eingesetzt werden. Der Mensch bringt mit seiner Intelligenz, seiner Hand-Auge-Koordination und seiner Feinfühligkeit Fähigkeiten in das Zusammenarbeitsszenario ein, welche durch die Automatisierungstechnik nur mit einem hohen technischen Aufwand abgedeckt werden könnten [3; 10–12]. Im Hinblick auf Ausdauer, Präzision und der Einhaltung definierter Prozessvorschriften, wie zum Beispiel einer Kraftüberwachung während eines Fügeprozesses über eine Schicht, kann die Robotik und die Sensorik einen typischen Nachteil manueller Montageoperationen eliminieren [3; 10–12]. Dies führt dazu, dass in der Automobilindustrie über alle Prozessstufen hinweg der Einsatz hybrider Montagesysteme an Bedeutung gewinnt und eine Chance darstellt, den wachsenden Herausforderungen zu begegnen [3; 10; 12; 13].

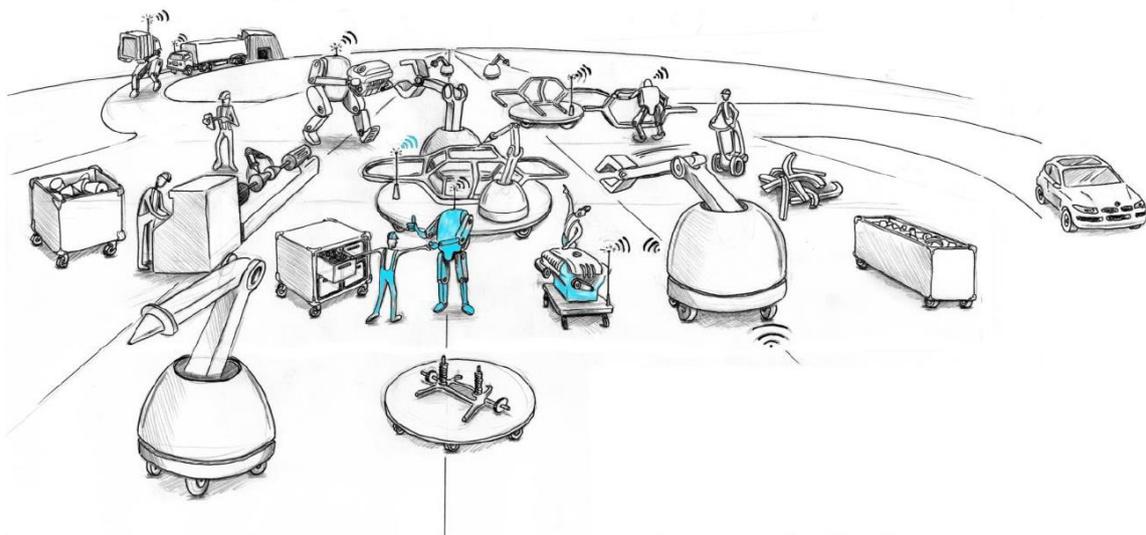


Abbildung 1-1: Produktionsvision der BMW Group für ein hybrides Produktionssystem

Abbildung 1-1 zeigt eine Produktionsvision künftiger Produktionssysteme in der Automobilindustrie. Die Vision legt zugrunde, dass Mensch und Roboter in einer Symbiose Hand in Hand zusammenarbeiten und je nach Anforderung des jeweiligen Arbeitsschrittes gewinnbringend ihre Fähigkeiten dem Produktionssystem und damit letztendlich dem Kunden zur Verfügung stellen. Dabei sind alle Betriebsmittel wie Produkte mobil und folgen nicht mehr der typischen Bandlogik heutiger Produktionssysteme in der Automobilindustrie. Wesentliches Kernelement sind die sich überschneidenden Arbeitsräume zwischen Mensch und Maschine, in welchem die Sicherheit des Menschen zu gewährleisten ist [10; 14–16]. Klassische Automatisierungslösungen sahen im Gegensatz zu der in Abbildung 1-1 gezeigten Produktionsvision separate Arbeitsbereiche für Mensch und Maschine vor [4]. Physische Barrieren und Sicherheitsensoren schlossen einen Kontakt mit dem Menschen gänzlich aus, sodass heutige Produktionssysteme sich fundamental von der Vision unterscheiden [17]. Hybride Automatisierungskonzepte zeigen in Pilotanwendungen erhebliche Potenziale auf, sodass die Forschung und Industrie dem Rechnung tragen und neuartige Produkte und Standards entwickeln, welche das Thema Sicherheit in den Mittelpunkt rücken [18]. Die Umsetzung dieser Standards stellt etablierte Großunternehmen (Original-Equipment-Manufacturer (OEM)) vor neue Herausforderungen. Bei kleinen und mittelständischen Unternehmen (KMU) sind diese aufgrund eines geringeren Erfahrungsschatzes im Anlagenbau und begrenzter Ressourcen weitreichender [16]. Es gilt daher geeignete Prozesse und Verfahren zu entwickeln, welche den komplexen Sicherheitsanforderungen entsprechen und so Anwendern wie auch Anlagenhersteller für die Beherrschung der Sicherheit hybrider Montagesysteme Unterstützung bieten.

## 1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die Sicherheit wird in der heutigen Normung für überschneidende Arbeitsräume weitreichend thematisiert [19–21]. Es wird zwischen unterschiedlichen Absicherungsverfahren von Robotersystemen unterschieden. Der Absicherungsansatz durch leistungs- und kraftbeschränkte Leichtbauroboter stellt eine Lösungsvariante für die enge Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter dar [18; 22; 23]. Die entsprechenden Anforderungen an diese Leichtbaurobotersysteme wurden in den letzten Jahren, ausgehend von dem Beurteilungsleitfaden der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) zu der technischen Spezifikation ISO TS 15066 als Erweiterung der DIN EN ISO 10218-1/2 (Robotersicherheit) entwickelt [18; 20]. Die darin enthaltenen Sicherheitsanforderungen im Hinblick auf den Kontakt zwischen Mensch und Roboter verlangen eine sehr differenzierende Betrachtung der geplanten Anwendung. So gilt es je nach exponierter Körperregion während des Zusammenarbeitsszenarios Grenzwerte für Kräfte und Flächenpressung auf den Körper des Menschen einzuhalten und sicherzustellen, dass nur Belastungen bis zur Schmerzschwelle, nicht jedoch darüber hinaus (reversible oder irreversible Verletzungen) auf den Interaktionspartner einwirken [19; 24]. Zugleich wird die Erfassung der auftretenden Kraftwerte über einen biofidelen Messansatz abgebildet, welcher die Sicherheitsbetrachtung in Art und Umfang erweitert [19]. Die Erfassung der Grenzwerte erfolgt im Rahmen der Anlagenübergabe, sodass derzeit im Planungsprozess die Anforderungen der ISO TS 15066 nur unzureichend berücksichtigt sind [21; 25].

Ziel der Arbeit ist es, einen Ansatz zur Integration des biofidelen Bewertungsschemas der Sicherheit der ISO TS 15066 in den Planungsprozess industrieller Anlagen zu entwickeln. Es gilt die Anforderungen seitens der Norm bereits in der Planungs- und Konstruktionsphase der kollaborierenden Anlage zu in-

tegrieren. Die Grenzwerte des biofidelen Bewertungsschemas haben erheblichen Einfluss auf die Leistungskennwerte einer kollaborierenden Roboteranlage, sodass anhand des zu entwickelnden Verfahrens eine gewinnbringende Integration der Anlage in das Produktionssystem gewährleistet werden soll.

Ausgehend von einer Analyse der Norm und der bestehenden Anforderungen werden die bisherigen Ansätze aus Forschung und Literatur auf mögliche Einflussgrößen analysiert. Diese werden im Anschluss mittels einer theoretischen Betrachtung und einer experimentellen Analyse auf ihren Einfluss bzgl. der Zielgrößen der ISO TS 15066 untersucht. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann anhand eines datenbankbasierten Berechnungsmodells in einen Bewertungsprozess der Sicherheit überführt. Im folgenden Abschnitt wird die Gliederung der vorliegenden Forschungsarbeit vorgestellt.

### 1.3 Aufbau der Arbeit

Die Arbeit gliedert sich nach einer kurzen Einleitung in Kapitel 1 in drei inhaltliche Hauptkapitel. Die Abbildung 1-2 zeigt die Kernkapitel der Arbeit auf und gibt einen kurzen Überblick über die jeweiligen Inhalte.

Kapitel 1: Einleitung
Kapitel 2: Ausgangssituation
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Absicherungen Mensch-Roboter-Interaktion</li> <li>• Normung</li> <li>• Forschungsbedarf</li> <li>• Stand der Technik</li> </ul>
Kapitel 3: Dynamische Analyse und experimentelle Betrachtung von Einflussgrößen
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Einteilung Einflussgrößen</li> <li>• Versuchsaufbau: Robot Safety Evaluation Cell</li> <li>• Analyse der identifizierten Steuergrößen</li> <li>• Handlungsempfehlungen</li> </ul>
Kapitel 4: Datenbankbasierter Berechnungsansatz – Robot Safety Calculation
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Anforderungen und Vorgehen</li> <li>• Vorgehen der Robot Safety Calculation im Detail</li> <li>• Abgleich der Anforderungen</li> </ul>
Kapitel 5: Modellanwendung im Rahmen eines Beispiels aus der Automobilindustrie
Kapitel 6: Zusammenfassung und Ausblick

*Abbildung 1-2: Strukturierung und Aufbau*

Der erste Teil arbeitet detailliert die Ausgangssituation hinsichtlich der Integration und Inbetriebnahme von kollaborierenden Roboteranlagen in der Industrie auf. Ausgehend von den unterschiedlichen Absicherungsvarianten einer Mensch-Roboter-Interaktion (MRI) wird in Kapitel 2 der Fokus auf leistungs- und kraftbeschränkte Leichtbauroboter gelegt, da hier ein expliziter Kontakt zwischen Mensch und Roboter möglich ist. Vor diesem Hintergrund erfolgt eine Darlegung der relevanten Inhalte aus den jeweiligen Sicherheitsnormen des Anlagenbaus. Nach der Darstellung des identifizierten Forschungsbedarfs

wird der derzeitige Stand der Technik vorgestellt und aus diesem mögliche Einflussfaktoren auf die Sicherheit herausgearbeitet.

Der zweite Teil bildet in Kapitel 3 den experimentellen Teil der vorliegenden Forschungsarbeit ab. Um die Wirkzusammenhänge der identifizierten Einflussfaktoren auf die Zielgrößen der Sicherheitspezifikation ISO TS 15066 herauszuarbeiten, wurde ein Prüfstand entwickelt, welcher es erlaubt, die Kollisionen zwischen Mensch und Maschine systematisch zu untersuchen. Es werden zunächst die identifizierten Einflussfaktoren in Steuer- und Störgrößen für eine Versuchsplanung eingeteilt. Im Anschluss erfolgen die Darstellung des Prüfstandes und der innerhalb der Versuche erhobenen Daten. Die Aufarbeitung der festgelegten Steuergrößen erfolgt vor einem theoretischen Hintergrund und einer experimentellen Betrachtung im Anschluss. Ableitungen für die Integration von kollaborierenden Roboteranlagen aus den gewonnenen Erkenntnissen der experimentellen Untersuchungen schließen den zweiten Abschnitt der Arbeit ab.

Der dritte Abschnitt befasst sich mit dem entwickelten Berechnungsansatz auf Basis einer Datenbank, welcher als „Robot Safety Calculation“ (kurz RSC) in der Arbeit bezeichnet wird. Hierzu werden am Anfang des Kapitels 4 Anforderungen an die zu erarbeitende Methodik gestellt. Im Anschluss erfolgt nacheinander eine detaillierte Darlegung der vier Abschnitte der RSC. Sodann werden die an die RSC gestellten Anforderungen mit den erzielten Ergebnissen abgeglichen.

In Kapitel 5 werden die erarbeiteten Ergebnisse anhand eines Industriebeispiels der BMW Group dargestellt. Hierzu wird ein Anwendungsfall aus der Automobilbranche vorgestellt, welcher vor dem Hintergrund der ISO TS 15066 mit dem erarbeiteten Verfahren evaluiert und optimiert wird. Kapitel 6 fasst die Inhalte der Arbeit kurz zusammen und gibt einen kurzen Ausblick auf mögliche weiterführende Forschungsarbeiten im aufgezeigten Forschungsfeld.

## 2 Ausgangssituation

### Inhalt Kapitel 2

2.1	Begriffsdefinitionen.....	6
2.2	Absicherungsmethoden kollaborierender Arbeitsplätze.....	9
2.2.1	Globale Absicherung .....	10
2.2.2	Lokale Absicherung .....	12
2.2.3	Thematische Einordnung der Forschungsarbeit .....	14
2.3	Vorschriften und Normen.....	16
2.3.1	Aufbau und Überblick über Normen in der Maschinensicherheit .....	16
2.3.2	DIN EN ISO 10218: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen .....	18
2.3.3	ISO TS 15066: Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende Roboter .....	19
2.3.4	DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung .....	21
2.4	Forschungsbedarf .....	23
2.4.1	Ansatzpunkte vor dem Hintergrund der Ausgangssituation .....	23
2.4.2	Ansatzpunkte in dem industriellen Planungsprozess .....	24
2.5	Stand der Technik.....	26
2.5.1	Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt .....	26
2.5.2	Sicherheitstechnische Abnahme von MRI-Arbeitsplätzen durch die Berufsgenossenschaft.....	30
2.5.3	Experimentell gestütztes Planungssystem der BTU Cottbus .....	33
2.5.4	Ableitung von relevanten Einflussfaktoren auf die Sicherheit .....	35
2.6	Zusammenfassung.....	37

*Das Kapitel 2 stellt die für die Arbeit relevante Ausgangssituation dar und gliedert sich in fünf inhaltliche Abschnitte. In Abschnitt 2.1 werden die für die Arbeit relevanten Begriffe aus dem Bereich der Robotik und der Arbeitssicherheit eindeutig definiert. Anschließend werden in Abschnitt 2.2 die möglichen Absicherungsmethoden von überschneidenden Arbeitsräumen zwischen Mensch und Roboter vorgestellt und auf die damit verbundenen Herausforderungen bei der Sicherheitsabnahme eingegangen. Abschnitt 2.3 befasst sich mit den in den Normen und Standards festgelegten Anforderungen an überschneidende Arbeitsräume. Abschnitt 2.4 ordnet die vorliegende Forschungsarbeit vor dem dargelegten Hintergrund der Normen und Herausforderungen ein. In Abschnitt 2.5 werden knapp die bereits vorhandenen Forschungsansätze für die Sicherheitsbewertung von überschneidenden Arbeitsräumen beschrieben. Der Abschnitt dient auch der Ableitung von Einflussfaktoren im Hinblick auf die Sicherheit der MRI. Abschnitt 2.6 fasst die Inhalte des Kapitels 2 zusammen.*

### 2.1 Begriffsdefinitionen

Zu Beginn dieser Arbeit sollen zur Einordnung zunächst einige Begriffsdefinitionen vorgenommen werden, da es in der Literatur keine einheitliche Nomenklatur hinsichtlich auftretender Begriffe im Rahmen der kollaborierenden Robotik gibt.

#### **Kollaboration, kollaborierender Roboter, Kollaborationsraum:**

Der Begriff *kollaborierender Roboter* wird nach DIN EN ISO 8373 als „*Roboter, der für das direkte Zusammenwirken mit einem Menschen konstruiert ist*“ definiert. Den Begriff *Kollaboration* definiert die Norm als „*Arbeit, die von (einem) Roboter(n) und (einem) Menschen zur Erfüllung einer Aufgabe gemeinsam erledigt wird*“ [26]. Somit stellt sich jeder direkt mit dem Menschen zusammenarbeitende Roboter als kollaborierender Roboter dar, der Arbeitsraum, in welchem dies geschieht, nennt sich Kollaborationsraum.

Im Weiteren kann zwischen dem Grad der Kollaboration unterschieden werden. Hierzu stellt die Norm DIN EN ISO 10218-2 unterschiedliche Szenarien dar, welche in Abbildung 2-1 dargestellt sind [23].

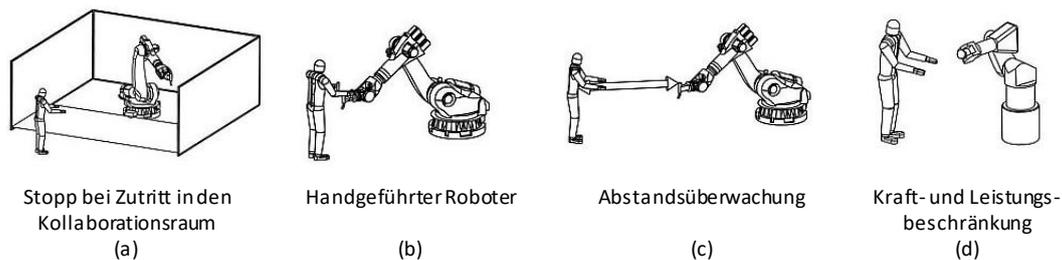


Abbildung 2-1: Grad der Kollaboration nach DIN EN ISO 10218-2 [23]

Das Bild (a) zeigt den Stopp des Roboters beim Zutritt in einen *Kollaborationsraum*. Es wird sichergestellt, dass der Roboter in einem sicheren Halt zum Stillstand kommt und keine Gefahr für den Menschen besteht. Anlagen und Roboterzellen werden mit trennenden und nicht trennenden Schutzeinrichtungen abgesichert [23; 27]. Nicht trennende Schutzeinrichtungen zeichnen sich i.d.R. durch einen durch externe Sensorik wie bspw. Lichtgitter bzw. Laserscanner überwachten Kollaborationsraum aus [28; 29].

Das Bild (b) zeigt einen *handgeführten Roboter*. Bewegungen finden mithilfe einer Zustimmungseinrichtung nach DIN EN ISO 12100 bei reduzierter Geschwindigkeit des Roboters statt [22; 30; 31]. Der Roboter verfährt analog zum Handbetrieb auf einer vorher programmierten Trajektorie und stoppt sofort nach dem Loslassen des Zustimmungstasters durch den Anlagenbediener [22; 29; 32]. Die Bewegung erfolgt immer mit reduzierter Geschwindigkeit [23; 29; 32].

Im Bild (c) in Abbildung 2-1 wird eine *Abstandsüberwachung* dargestellt. Eine Sensorik stellt sicher, dass ein Mindestabstand zwischen Mensch und Roboter zu jedem Zeitpunkt eingehalten wird, andernfalls ist ein sicherer Stopp der Anlage herbeizuführen [23; 33]. Solche Systeme werden unter dem Begriff der *Abstandsüberwachung* von kollaborierenden Robotern zusammengefasst [23].

Nach DIN EN ISO 10218-2 besteht ebenfalls die Möglichkeit der Absicherung über eine *Kraft- und Leistungsbeschränkung des Roboters* [23; 34]. So muss der Roboter im Falle einer Kollision gewisse Kraftgrenzen einhalten und darf den Menschen in keinem Fall verletzen [23; 24; 35]. Diese Art des Betriebs wird in Abbildung 2-1 im Bild (d) dargestellt. Die vorliegende Arbeit fokussiert sich auf diese Art des kollaborierenden Betriebs.

### Mensch-Roboter-Interaktion, Mensch-Roboter-Kooperation, Mensch-Roboter-Koexistenz:

Ausgehend von den unterschiedlichen Kollaborationsformen nach DIN EN ISO 10218-2 sollen in der Folge die Begriffe der *Mensch-Roboter-Interaktion*, *Mensch-Roboter-Kooperation* und *Mensch-Roboter-Koexistenz* definiert werden. Im Wesentlichen unterscheiden sich die Begriffe der Koexistenz und Kooperation hinsichtlich der Aufgabe, welche beide Partner verfolgen. So beinhaltet der Begriff *Kooperation* das lateinische Wort „*cooperatio*“, welches übersetzt „*mitwirken, zusammenwirken*“ heißt [36]. Daher lässt sich der Begriff der *Mensch-Roboter-Kooperation* als ein gemeinsames Wirken von Mensch und Roboter an einem Objekt definieren, welches in Abbildung 2-2 im linken Bild dargestellt wird.

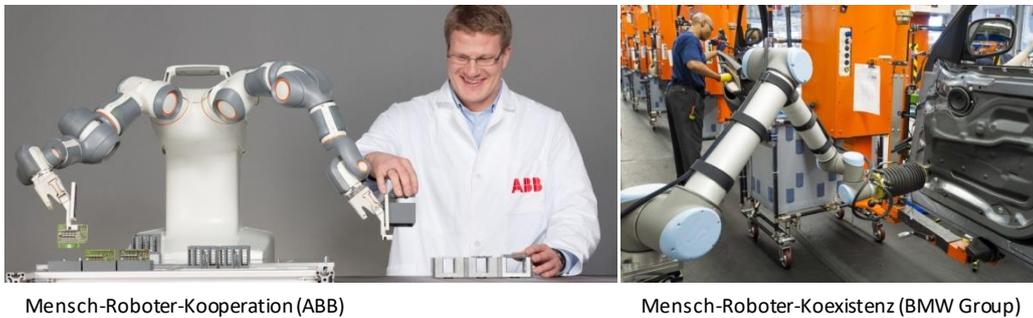


Abbildung 2-2: Unterscheidung zwischen Mensch-Roboter-Koexistenz und Mensch-Roboter-Kooperation [17; 37]

Die DIN EN ISO 8373 definiert die Mensch-Roboter-Kooperation als einen „*Austausch von Informationen und Handlungen zwischen Mensch und Roboter zur Ausführung einer Aufgabe*“ [26]. Es steht auch die Arbeit beider Partner an einem Objekt im Mittelpunkt, sodass sich die getroffene Definition mit der DIN-Norm deckt.

Die *Mensch-Roboter-Koexistenz* wird in Abbildung 2-2 im rechten Bild dargestellt. Im Wesentlichen unterscheidet sich die *Koexistenz* von der *Kooperation* durch den Grad der Interaktion [38]. So findet im Rahmen der *Mensch-Roboter-Koexistenz* keine Interaktion statt, vielmehr verfolgen Mensch und Roboter unterschiedliche Aufgaben im selben Kollaborationsraum. Der Begriff *koexistieren* wird im Duden als „*gleichzeitiges Vorhandensein*“ bzw. als „*nebeneinanderbestehen*“ beschrieben [39]. Daher lässt sich die *Mensch-Roboter-Koexistenz* als „*das gleichzeitige Vorhandensein von Mensch und Roboter in einem Kollaborationsraum zur Ausführung unterschiedlicher Aufgaben*“ definieren.

Während sich die *Mensch-Roboter-Kooperation* und die *Mensch-Roboter-Koexistenz* durch den Grad der Interaktion unterscheiden, bildet die *Mensch-Roboter-Interaktion* die Klammer um beide Begriffe. Somit lässt sich die *Mensch-Roboter-Interaktion* als Zusammenarbeitsszenario von Mensch und Roboter an einem kollaborierenden Arbeitsplatz definieren, welches zum einem als koexistentes, zum anderen als kooperatives Szenario ausgelegt sein kann. In der Folge wird daher das Zusammenarbeitsszenario als *Mensch-Roboter-Interaktion* (MRI) bezeichnet.

### Sicherheit:

Die *Sicherheit* stellt die Grenze zwischen einem vertretbaren und einem unvertretbaren Risiko dar [22; 26; 30]. Hierbei umfasst der Begriff *Sicherheit* den Lösungsraum aller vertretbaren Risiken und wird in der Folge als Lösungsraum aller im Rahmen der Risikoanalyse als vertretbar beurteilten Gefährdungsszenarien definiert.

### **Risiko:**

Das *Risiko* definiert sich aus dem Schadensausmaß eines Negativereignisses im Ablauf einer Aufgabe und der dazugehörigen Eintrittswahrscheinlichkeit nach folgender Formel [30; 40]:

$$\text{Risiko} = \text{Eintrittswahrscheinlichkeit} \times \text{Schadensausmaß}$$

So werden in der Folge mögliche nicht vollständig absicherungsfähige Anwendungen im Bereich des Anlagenbaus nach oben stehendem Schema im Rahmen der DIN EN ISO 12100 bewertet und mit vorgegebenen Standards abgeglichen [30]. Anlagen und Arbeitssysteme lassen sich bzgl. ihrer Sicherheit analysieren und optimieren [30; 41].

### **Eintrittswahrscheinlichkeit:**

Das Risiko setzt sich aus den Bausteinen der *Eintrittswahrscheinlichkeit* und des *Schadensausmaßes* zusammen [30; 40]. Hierbei beschreibt die *Eintrittswahrscheinlichkeit* die Häufigkeit eines auftretenden Szenarios. So lässt sich das Risiko durch die Minderungen des Schadensausmaßes und durch die zu erwartende Häufigkeit minimieren. Als Beispiel dient hierbei die Unterweisung von Mitarbeitern im direkten Umfeld einer Gefährdung, welche die *Eintrittswahrscheinlichkeit* eines Schadensszenarios erheblich senkt.

### **Gefährdung:**

Die DIN EN ISO 12100 definiert den Begriff *Gefährdung* als potenzielle Schadensquelle einer Anlage [30]. Zu diesen zählen vorhersehbare und unvorhersehbare Gefährdungen für den Anlagenbediener im Rahmen der angedachten Aufgabe. Diese *Gefährdungen* gilt es hinsichtlich ihres *Risikos* zu bewerten und diese entsprechend in der Anlagenplanung zu minimieren [30; 42]. Dazu zählen zum einen die Auftretenswahrscheinlichkeit und das mögliche *Schadensausmaß* der jeweiligen Gefährdung.

### **Zuverlässigkeit:**

Die *Zuverlässigkeit* stellt die Fähigkeit einer Maschine oder von deren Teilen oder Ausrüstung dar, eine geforderte Funktion unter festgelegten Bedingungen und für einen vorgegebenen Zeitraum ohne Ausfall zu erfüllen [30; 43]. Als *Zuverlässigkeit* im Anlagenbau beschreibt man eine „*Einheit bezüglich ihrer Eignung, während oder nach einer vorgegebener Zeitspanne bei vorgegebenen Anwendungsbedingungen die Zuverlässigkeitsanforderungen zu erfüllen*“ [44–47]. Dazu zählen auch Sicherheitsfunktionen, welche eine besonders hohe Anforderung hinsichtlich der Zuverlässigkeit haben [46]. Die Zuverlässigkeit ist zudem auch Teil der *Verfügbarkeit* [47].

### **Verfügbarkeit:**

Die *Verfügbarkeit* ist ein Maß der technischen Produktivität einer Anlage. Per Definition beschreibt die *Verfügbarkeit* die „*mittlere Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen dividiert durch die Summe aus mittlerer Betriebsdauer zwischen zwei Ausfällen und mittlerer Störungsdauer*“ [48; 49]. Störungen können außerplanmäßige Unterbrechungen, wie bspw. das Auslösen einer Notaussituation oder ein Anlagenausfall aufgrund eines technischen Defekts (*Zuverlässigkeit*) sein.

### **Globale bzw. lokale Absicherung in der Mensch-Roboter-Interaktion:**

Hinsichtlich des Gefährdungspotenzials einer MRI lassen sich unterschiedliche Absicherungsvarianten für den Menschen im Kollaborationsraum realisieren. Es werden in der Folge *globale Absicherungssysteme* von *lokalen Absicherungssystemen* unterschieden [21; 23; 31].

*Globale Absicherungssysteme* umfassen Absicherungssysteme, welche den Kollaborationsraum durch externe Sensorik absichern. Dieser wird ständig mittels Sensoren überwacht und verhindert so einen Kontakt zwischen Mensch und Roboter.

Die *lokale Absicherung* unterscheidet sich wesentlich [21; 23]. Die Sicherheitstechnik liegt direkt am Robotersystem selbst. So erfolgt ein Stopp des Robotersystems erst in unmittelbarer Nähe des Menschen zum Roboter oder gar erst bei Kontakt.

In Abschnitt 2.2 werden die unterschiedlichen Absicherungsmethoden detailliert vorgestellt und mit Beispielen aus Forschung und Industrie vor dem Hintergrund der Unterscheidungen aus der DIN EN ISO 10218-2 näher beschrieben.

### **Direkte und Indirekte Einflussfaktoren auf die Sicherheit in der Mensch-Roboter-Interaktion:**

Für Absicherungssysteme im Anlagenbau lassen sich unterschiedliche Einflussfaktoren auf die jeweilige Performance des Sicherheitssystems identifizieren. Hierbei kann zwischen direkten und indirekten Einflussfaktoren unterschieden werden.

*Direkte Einflussfaktoren* auf die Sicherheit im Rahmen der MRI stellen beispielsweise Reaktionszeiten von Sicherheitssystemen und Anlagen bzw. programmierbare Parameter dar. So kann der Faktor je nach Anlagendesign und -leistung eingestellt und die Sicherheitsfunktion beeinflusst werden [50–52; 52].

*Indirekte Einflussfaktoren* umfassen Anlagenparameter, welche keinen direkten Einfluss auf die Absicherung der MRI nehmen. Diese Einflussfaktoren stehen weniger im Fokus der Technik, sondern eher im Prozessablauf. Um etwaige Restrisiken hinsichtlich der Sicherheit zu bewerten und einschätzen zu können, stellt sich die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Szenarios nach DIN EN ISO 12100 als entscheidender Parameter dar [30]. Durch eine entsprechende Arbeits- bzw. Prozessorganisation lassen sich diese entscheidend beeinflussen.

## **2.2 Absicherungsmethoden kollaborierender Arbeitsplätze**

Nachdem in Abschnitt 2.1 die wesentlichen Begriffe für den inhaltlichen Fokus der Arbeit erläutert wurden, erfolgt eine Einordnung der vorliegenden Arbeit in Abschnitt 2.2. Es werden unterschiedliche Systeme zur Absicherung einer MRI aufgezeigt. Ausgehend von der zuvor getroffenen Definition lassen sich die Systeme in globale bzw. lokale Absicherungssysteme einteilen.

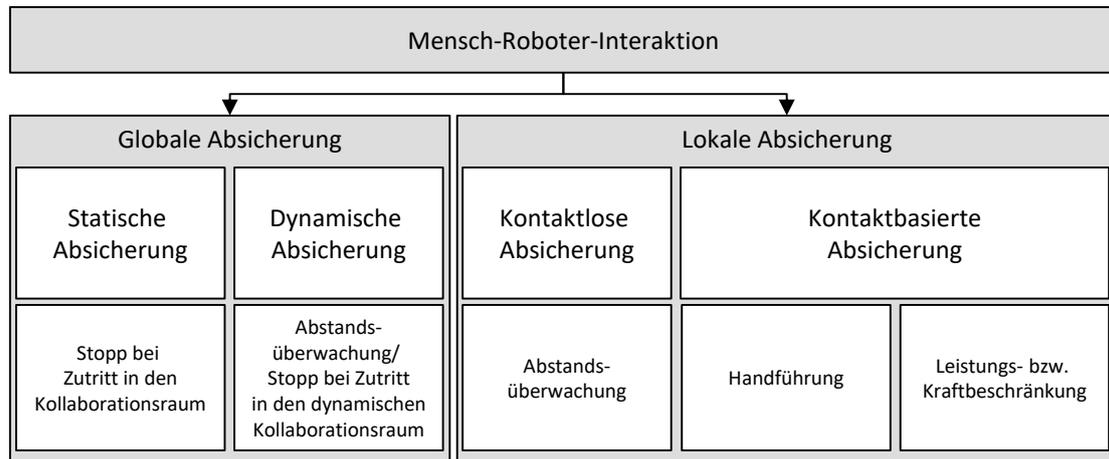


Abbildung 2-3: Unterscheidung zwischen globaler und lokaler Absicherung, mögliche technische Realisierung und Einordnung nach DIN EN ISO 10218-2 [3; 23]

Die Abbildung 2-3 zeigt die Unterteilung der Sicherheitssysteme nach der zuvor getroffenen Definition. Zunächst wird im Rahmen der globalen und lokalen Absicherung zwischen der Art des Aufbaus des Absicherungssystems unterschieden. Der globale Ansatz mit statischer Absicherung verfolgt das Konzept, in welchem ein Robotersystem durch extern aufgestellte Absicherungseinrichtungen wie bspw. Zäune, Lichtschranken usw. zu einer sicheren Anlage aufgerüstet wird [3; 21; 23; 31; 32; 53]. Die dynamische Absicherung verfolgt den Ansatz, Schutzräume um das Robotersystem dynamisch mitzuführen [53]. Diese Art der Absicherung wird nach DIN EN ISO 10218-2 teilweise zu den abstandsüberwachten Absicherungssystemen (vgl. Abbildung 2-1) gezählt [3; 23]. Zielsetzung der globalen Absicherung ist es, einen Kontakt mit dem bewegten Roboter durch eine extern aufgestellte Sensorik auszuschließen [3; 21; 23; 53]. Im folgenden Abschnitt 2.2.1 werden Beispiele für mögliche globale Absicherungen von MRI-Szenarien aufgezeigt.

Die lokale Absicherung unterscheidet sich den globalen Absicherungssystemen im Wesentlichen durch die verwendete Sensorik. Die lokale Absicherung ist direkt am Robotersystem angebracht und überwacht nur einen minimalen Arbeitsraum im direkten Umfeld [3; 27; 53; 54]. Sie umfasst bspw. die nach DIN EN ISO 10218-2 eingeführten Kollaborationsformen der Handführung und der Kraft- und Leistungsbeschränkung [23]. Es lassen sich im ersten Schritt die kontaktlose und die kontaktbasierte Absicherung unterscheiden. Bei der kontaktlosen Absicherung wird eine mögliche Kollision mit dem Menschen im festgelegten Kollaborationsraum erkannt und ein Stopp rechtzeitig eingeleitet [23; 53]. Hier wird ähnlich den global abgesicherten Systemen der Ansatz verfolgt, das System vor einem Kontakt zum Stillstand zu bringen. Der kontaktbasierte Stopp hingegen erfolgt erst nach einer Kollision. Diese kann durch das Robotersystem detektiert werden und leitet im Anschluss einen Stopp ein [21; 53; 55]. Die Handführung wird mithilfe des Kontakts des Anwenders mit einer sogenannten Totmanneinrichtung sichergestellt. Technische Realisierung und weitere Details sind im Abschnitt 2.2.2 dargestellt.

### 2.2.1 Globale Absicherung

Globale Absicherungssysteme sind durch eine Sensorik gekennzeichnet, welche an der Anlage extern und statisch montiert ist und einen fest definierten Absicherungsbereich ständig überwacht [16; 56–59]. Im klassischen Anlagenbau erfolgt eine solche Absicherung auf Basis von Zäunen, Lichtschranken und Laserscannern [54]. Bei einem Betreten durch den Menschen oder einer Störung durch ein Objekt wird

die Roboteranlage in einen sicheren Zustand überführt [16; 56–59]. Im Hinblick auf die technische Ausgestaltung der Sensoren sind Anforderungen in den DIN EN ISO 13849 Richtlinien festgelegt, welche in Abhängigkeit der möglichen Schwere der Verletzung zu erfüllen sind (Performance Level) [23; 50–52; 60]. In der nachfolgenden Abbildung 2-4 sind Beispiele von globalen Absicherungssensoren abgebildet.

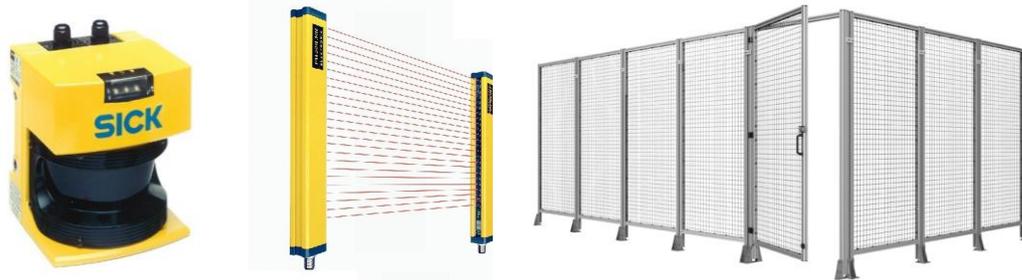


Abbildung 2-4: Globale Absicherungssensoren von Kollaborationsräumen im Anlagenbau, Sicherheitslaserscanner [61], sichere Lichtschranke [62], Anlagenschutzzaun mit Tür

Die Auslegung im Hinblick auf Abstände und Größe des zu überwachenden Bereichs der Sensoren erfolgt nach einem Schema, welches in Normen (bspw. IEC 61496-1 (vgl. Abbildung 2-10)) festgelegt ist [56; 63]. Die Anlagenkonstruktion verfolgt die Zielsetzung, dass die Anlage unter Berücksichtigung aller notwendigen Signalverarbeitungszeiten, wie dem nötigen Bremsweg von bewegten Anlagenteilen und einer normativ vorgegebenen Annäherungsgeschwindigkeit des Menschen, vor einem möglichen Kontakt in einen sicheren Zustand überführt wird [32; 56; 57]. Daher ist ein Kontakt mit beweglichen Anlagenkomponenten für den Interaktionspartner nicht möglich. Weiterentwicklungen der globalen Absicherungssensoren befassen sich mit der dynamischen Anpassung von Sicherheitszonen [53; 64–66]. Beispielhaft sind hier Kamerasysteme und Laserscanner zu nennen, die in der Lage sind, Sicherheitsbereiche dynamisch um den abzusichernden Anlagengegenstand mitzuführen. Am Markt verfügbar sind derzeit Systeme mit zu- und abschaltbaren Sicherheitszonen wie bspw. das sichere Kamerasystem der Firma Pilz „Safety Eye“ oder Laserscanner der Firma Sick (vgl. nachfolgende Abbildung 2-5) [61; 65].

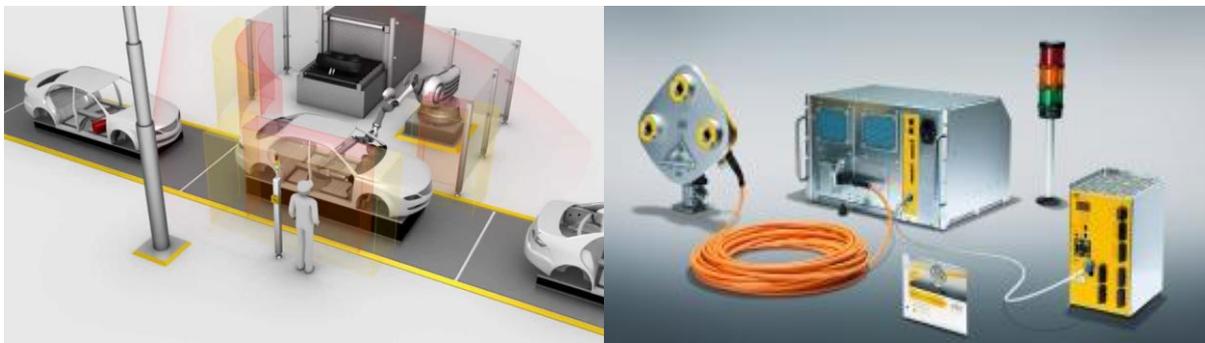


Abbildung 2-5: Globale Absicherungssensoren mit umschaltbaren Sicherheitszonen, sicheres Kamerasystem „Safety Eye“ der Firma Pilz [65]

Die dynamische Mitführung von Sicherheitszonen auf Basis der Bewegungsrichtung und -geschwindigkeit des Roboters ist Gegenstand der Forschung. Beispielhaft werden zwei Systeme vorgestellt. Zu nennen ist zum einen das Kamerasystem SIMERO der Universität Bayreuth, welches auf Basis einer Referenz der Umwelt und eines kinematischen Modells des Roboters den Abstand zwischen dem Annäherungsobjekt und dem Roboter ständig in drei Dimensionen optisch erfasst und berechnet [64]. Wird dieser zu gering, kann eine Reaktion des Systems erfolgen, wie die Reduzierung der Geschwindigkeit des Roboters bis zum Stillstand oder die Anpassung der Trajektorie im Arbeitsraum.

Das Fraunhofer IFF entwickelt ebenfalls ein Absicherungssystem, welches dynamische Schutzbereiche um einen kollaborierenden Roboter mitführt [67; 68]. Mithilfe eines Projektors werden die äußeren Grenzen des Schutzbereiches um den Roboter in den Arbeitsbereich farblich projiziert. Auf Basis der Roboterbewegung (Geschwindigkeit und Richtung) erfolgt eine Anpassung und Mitführung der Grenzen des Sicherheitsbereichs. Ein Kamerasystem überwacht gleichzeitig optisch die projizierte Grenze des Schutzbereichs und schaltet bei Unterbrechung dieser durch ein Objekt den Roboter ab.

### 2.2.2 Lokale Absicherung

Die lokale Absicherung beschreibt Robotersysteme, welche inhärent sicher gestaltet sind und keine externen, fest installierten Sensoren zur Arbeitsplatzabsicherung benötigen. Die Absicherung kann auf Basis von Sensoren auf der Oberfläche des Roboters kontaktlos oder durch eine Kraft- und Leistungsbeschränkung kontaktbasiert erfolgen. Zielsetzung ist es, die Anlage derart zu gestalten, dass zu keinem Zeitpunkt ein Risiko für den Anwender besteht [18; 19; 21; 24; 31; 59; 69–71]. Die Sicherheitsnorm im Anlagenbau erlaubt einen Kontakt zwischen Mensch und Maschine, jedoch gilt es diesen so zu gestalten, dass für den Menschen keine reversiblen als auch irreversiblen Verletzungen entstehen [18; 20]. Gegenüber der globalen Absicherung kann bei lokalen Absicherungssensoren der Abstand beider Interaktionspartner geringer gestaltet werden [57]. Technisch sind derzeit zwei Konzepte verfügbar, welche bereits in der Industrie eingesetzt werden. Diese werden nachfolgend kurz vorgestellt.

- **Inhärent sichere Robotersysteme auf Basis von taktilen Schutzhäuten:**

Robotersysteme können durch einen taktilen Sensor, welcher direkt auf dem Roboter montiert ist, abgesichert werden. Sobald auf der taktilen Oberfläche ein Kontakt detektiert wird, wird ein Not-Aus Signal ausgelöst, welches die Anlage in einen sicheren Stillstand überführt [21; 24; 53; 72]. Analog zu den globalen Absicherungssensoren müssen taktile Sensoren ebenfalls die Anforderungen im Hinblick auf die Ausgestaltung von Sicherheitssensoren der jeweiligen DIN EN ISO Norm erfüllen [30]. In der nachfolgenden Abbildung 2-6 sind zwei Industrieroboter mit taktilen Absicherungssystemen gezeigt.



Abbildung 2-6: Beispielhafte Darstellung von Robotersystemen mit taktilen Schutzhäuten, KR5 Si der Firma MRK Systeme (rechts) [73], Robotersystem der Firma Bosch „APAS“ (links) [74]

Da ein Kontakt zwischen Mensch und Maschine stattfinden muss, um den Menschen im Kollaborationsraum zu erkennen, gilt es zudem diesen näher zu untersuchen. Grenzwerte für den Kontakt sind in der DIN EN ISO 10218-1/2 und in der technischen Spezifikation ISO TS 15066 niedergeschrieben und werden nachfolgend in Abschnitt 2.3.3 detailliert erläutert [18; 20; 23]. Die Auslegung der Anlage im Hinblick auf die Schaltkraft des Sensors, die Trajektorie und die Geschwindigkeit

keit des Roboters obliegen dem Roboterprogrammierer [19; 24; 59]. Für die auftretende Kollisionskraft ist die Robotergeschwindigkeit (bzw. der Bremsweg) und die Schaltzeit des Sensors entscheidend [19; 59]. Zudem müssen alle beweglichen Teile der Anlage mit einer solchen Sensorhaut versehen sein, da nur so die Sicherheit gewährleistet werden kann.

- **Inhärent sichere Leichtbauroboter:**

Inhärent sichere Leichtbaurobotersysteme setzen auf eine Absicherung der MRI auf Basis einer Leistungs- und Kraftbeschränkung des Roboters [20; 21; 23; 30; 30; 31; 70; 75]. Das Konzept legt zugrunde, dass extern einwirkende Kräfte auf den Roboter durch eine interne Sensorik bzw. Regelung in den jeweiligen Roboterachsen erkannt werden und so die Sicherheit für den Interaktionspartner gewährleistet werden kann. Diese Sensorik bzw. diese Regelung stellt ebenfalls ein sicherheitsrelevantes Bauteil des Robotersystems dar und muss daher die gängigen DIN EN ISO Standards im Hinblick auf die sichere Anlagengestaltung erfüllen (siehe Abschnitt 2.3.2) [23; 30]. Leichtbaurobotersysteme zeichnen sich durch ihre erheblich reduzierte Masse und verminderte Größe aus [76]. So können die Antriebe der Achsen des Leichtbaurobotersystems entsprechend schwächer ausgelegt werden, sodass das Verletzungspotenzial gegenüber schweren Industrierobotern niedriger einzuschätzen ist [76; 77]. Beispielhaft sollen in der Folge zwei Leichtbaurobotersysteme vorgestellt werden, welche in der Industrie für MRI-Arbeitsplätze genutzt werden.

Der Leichtbauroboter KUKA LBR iiwa hatte seinen Ursprung in der Luft- und Raumfahrttechnik. Am deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) befasst sich das Institut für Robotik und Mechatronik mit der Konstruktion und dem Bau von Robotersystemen [75; 78]. Hierbei stehen Leichtbauroboter im Mittelpunkt der Bemühungen, da der Einsatz von Roboterarmen im Weltraum mit immensen Kosten im Bereich des Transports verbunden ist. 1993 wurde auf der ROTEX<sup>1</sup>-Mission erstmals ein Leichtbauroboterarm im Weltraum eingesetzt, welcher durch das DLR Kontrollzentrum in Oberpfaffenhofen gesteuert wurde [79; 80]. Weiterführend entwickelte das DLR neue Leichtbaurobotersysteme (DLR LWR I – III), welche zunehmend auch für industrielle Montageanwendung interessant wurden [79; 80]. Alle DLR Leichtbauroboterarme sind analog aufgebaut und basieren auf einer Kinematik mit 7 Achsen (analog zum menschlichen Arm), welche jeweils mit einer Kraft-Momenten-Sensorik ausgestattet sind [79; 80]. So ist neben der klassischen Position- auch eine Kraftregelung des Roboters möglich, welche für Montageanwendungen aufgrund der Feinfühligkeit ein erhebliches Potenzial bietet [79; 80]. Im Hinblick auf Interaktionsszenarien konnte gezeigt werden, dass unvorhergesehene Kontakte auf Basis der Kraftregelung erkannt werden können und diese gleichzeitig ungefährlich für den Menschen sind [69; 76]. Der Forschungsroboter DLR LWR III war Ausgangspunkt der Entwicklung eines sicheren kollaborierenden Leichtbaurobotersystems durch die Firma KUKA [79]. Die nachfolgende Abbildung zeigt die unterschiedlichen Entwicklungsstände der Leichtbauroboter ausgehend von dem DLR LWR III über den KUKA LBR 4 (KUKA LBR4+) bis hin zum KUKA LBR iiwa (intelligent industrial work assistant) [80].

---

<sup>1</sup> Das ROTEX (sensorbasierter Roboterarm) war 1993 Teil der Spacelab-D2-Mission der Columbia. Das Experiment zeigte, dass robotische Anwendungen im Weltraum und die Echtzeitleoperation von einer Bodenstation aus möglich sind [79].



Abbildung 2-7: Weiterentwicklung des DLR Leichtbauroboters, DLR LWR III (links 2003), KUKA LBR 4 (mitte, 2008), KUKA LBR 4+ (2010, nicht gezeigt), KUKA LBR iiwa 14 (rechts, 2013)

Ein prinzipiell vergleichbares Absicherungskonzept entwickelte die Firma Universal Robots. Die auftretenden Kräfte bei einer Kollision werden jedoch nicht durch eine zusätzliche Sensorik in den jeweiligen Robotergelenken erfasst, vielmehr nutzt das Robotersystem die Motorstromregelung, um externe Einflüsse zu erkennen und auf diese zu reagieren [81; 82]. Die Stromaufnahme der Motoren wird ständig überwacht und im Falle einer Kollision der regelungsseitige Anstieg der Stromaufnahme erkannt. Ein Sicherheitskontroller leitet in der Folge einen Sicherheitsstopp ein [82]. In der nachfolgenden Abbildung 2-8 sind die Roboterarme der Firma Universal Robots abgebildet.



Abbildung 2-8: Roboter der Firma Universal Robots, UR 5 (links) [81], Einsatz eines UR 10 im BMW Group Werk Spartanburg (mitte) [17], Einsatz eines UR5 im VW Motoren Werk Salzgitter [83]

### 2.2.3 Thematische Einordnung der Forschungsarbeit

Der Abschnitt dient der thematischen Einordnung der vorliegenden Forschungsarbeit bezogen auf die eingeführte Unterscheidung der globalen und lokalen Absicherung in der MRI. Es wird aufgezeigt, welche Herausforderungen sich für den Anlagenintegrator und -betreiber im Hinblick auf die Arbeitssicherheit darstellen und inwiefern es möglich ist, auf vorhandene Standards und Erfahrungen aus dem klassischen Anlagenbau zurückzugreifen.

Global abgesicherte, kollaborierende Robotersysteme bauen auf den vorhandenen Sicherheitssensoren und deren Integrationserfahrungen auf. Heutige Normen können dabei adaptiert werden, da sich ein digitales Sicherheitsszenario für den Anwender ergibt [16; 24; 59; 84]. Befindet sich ein Mensch im Kollaborationsraum, so ist dieser für das Robotersystem gesperrt. Befindet sich das Robotersystem im Kollaborationsraum, so wird das System bei einer Verletzung des definierten Kollaborationsbereichs gestoppt. Daher gilt es die Abstände zum Menschen in Kombination mit den geplanten Geschwindigkeiten des Robotersystems gemäß den festgelegten Grenzwerten in Einklang zu bringen [18; 23; 30].

Die dynamische Mitführung des Sicherheitsbereichs erlaubt es dem Anwender die Grenzen des Kollaborationsraums um das Robotersystem anzupassen, jedoch bleibt das digitale Sicherheitsszenario erhalten [21]. Es besteht die Möglichkeit, auf physisch trennende Schutzeinrichtungen mit solchen Konzepten gänzlich zu verzichten und dynamisch die Abstände auf Basis der Geschwindigkeit des Roboters anzupassen [56; 64]. Für den Betrieb und die Integration globaler Absicherungssysteme für die MRI lassen sich die vorhandenen Normen und Standards adaptieren, zudem kann auf einen vorhandenen Erfahrungsschatz aus dem herkömmlichen Anlagenbau zurückgegriffen werden [16; 21; 24; 54; 59].

Die lokale Absicherung stellt sich bei der Integration und dem Betrieb von kollaborierenden Robotersystemen wesentlich herausfordernder dar [24; 59]. Gerade der Kontakt zwischen Mensch und Roboter konnte im herkömmlichen Anlagenbau bisher gänzlich ausgeschlossen werden, sodass dieser die wesentliche Neuerung in der Sicherheitsbetrachtung ist [27]. Die in den DIN-Normen enthaltenen Gestaltungsrichtlinien gilt es frühzeitig in der Planung zu berücksichtigen und an der realisierten Anlage zu verifizieren [18; 23]. Die ISO TS 15066 spezifiziert basierend auf der Forschungsarbeit verschiedener Institute den Kontakt zwischen Mensch und Roboter im Hinblick auf die Sicherheit [18]. Die Umsetzung dieser technischen Spezifikation stellt sowohl Anlagenintegratoren als auch -betreiber vor neue Herausforderungen [21; 24; 31; 59]. Zudem besteht gegenüber dem klassischen Anlagenbau nur ein bedingt vorhandener Erfahrungsschatz und die realisierten Anlagen wurden mit dem Expertenwissen weniger einzelner Personen umgesetzt [21; 85]. An diesem Punkt setzt der Forschungsansatz der vorliegenden Arbeit an. Es gilt die Anforderungen bzgl. Kontaktszenarien zwischen Mensch und Roboter aus der Erweiterung der vorhandenen Robotersicherheitsnorm DIN EN ISO 10218-1/2 durch ISO TS 15066 möglichst frühzeitig in der Anlagenplanung zu berücksichtigen. Es werden in der entwickelten Methodik Kontaktszenarien mit leistungs- und kraftbeschränkten Leichtbaurobotersystemen untersucht und in den Mittelpunkt gestellt. Zielsetzung ist es, die durch eine physische Messung erhobenen Kollisionskräfte durch einen Berechnungsansatz frühzeitig in die Anlagenplanung zu integrieren. Abschnitt 2.2.2 zeigt die Anknüpfungspunkte der erarbeiteten Methodik vor dem Hintergrund der Sicherheitsanforderungen auf. Die Abbildung 2-9 dient der Darstellung des in den vorangegangenen Abschnitten aufgezeigten Forschungsgebietes und stellt den gesetzten Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit dar.

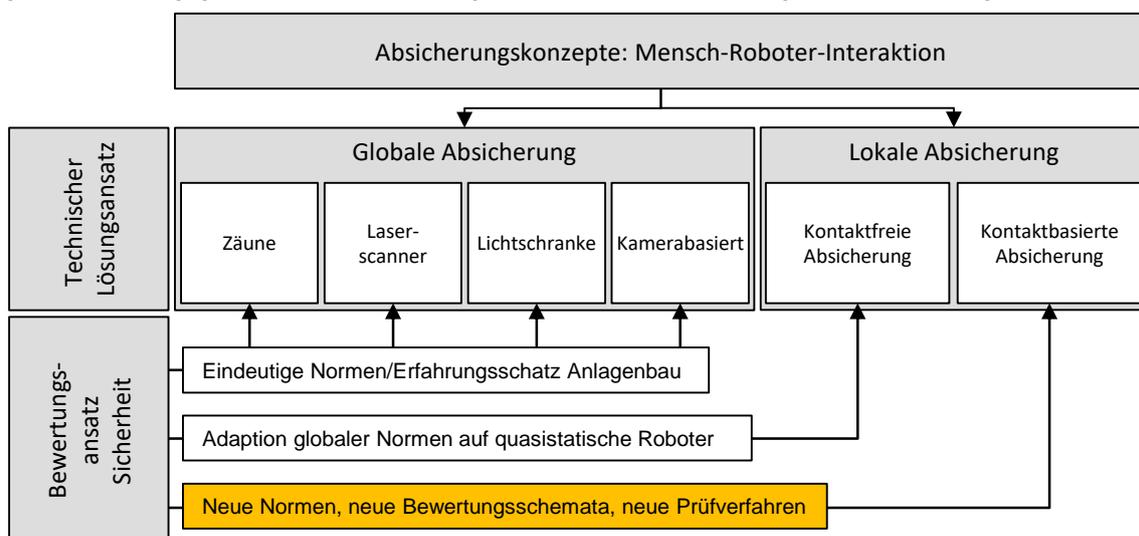


Abbildung 2-9: Thematische Einordnung der Forschungsarbeit vor dem Hintergrund der möglichen Absicherungsformen der MRI

Es zeigt sich, dass auf Basis der kontaktbasierten Absicherung von MRI-Szenarien Herausforderungen bzgl. der Sicherheit bestehen. Aufgrund der neuen Absicherungsarchitektur der Leichtbaurobotersysteme auf Basis einer Leistungs- und Kraftbeschränkung gilt es die durch die ISO TS 15066 festgelegten Anforderungen umzusetzen. Daher werden im nachfolgenden Abschnitt 2.3 die normativen Anforderungen für die Integration und den Betrieb von kollaborierenden Roboteranlagen vorgestellt.

## 2.3 Vorschriften und Normen

In diesem Abschnitt werden alle für die Sicherheit der MRI relevanten Normen und Vorschriften zum Thema Sicherheit dargelegt. Abschnitt 2.3.1 gibt zunächst einen Überblick über den Aufbau und den Zusammenhang gängiger Normen im Bereich der Absicherung von Robotersystemen. In den darauffolgenden Abschnitten werden relevante Punkte der jeweiligen DIN-Normen vorgestellt und detailliert dargelegt.

### 2.3.1 Aufbau und Überblick über Normen in der Maschinensicherheit

DIN-Normen und gesetzliche Vorschriften dienen im Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus der Einhaltung von Mindeststandards [29; 49; 54]. Gerade hinsichtlich sicherheitsrelevanter Aspekte im Bereich des Anlagenbaus dienen Normen dem Schutz der jeweilig beteiligten Person und geben bspw. Aufbau und Design sicherheitsrelevanter Anlagenkomponenten vor [29; 30; 49; 54]. Die Sicherheitsarchitektur im Anlagenbau ging bisher von einer Trennung zwischen Mensch und Maschine aus. Weiterführende technische Spezifikationen lösen zunehmend diese Trennung auf und erlauben unter Berücksichtigung und Einhaltung von Grenzwerten einen kollaborierenden Betrieb [16; 23].

DIN-Normen bzgl. der Anlagensicherheit lassen sich zunächst in drei Typen klassifizieren [3; 30; 49]. Die Typ A-Normen sind Sicherheitsgrundnormen, welche allgemeine Anforderungen und Verfahren zur Erhöhung der Sicherheit enthalten. Einzelne Standardbaugruppen (z.B. Not-Aus Schalter) oder Konstruktionsrichtlinien (z.B. Mindestabstände) werden in Sicherheitsgruppennormen definiert, welche als Typ B-Normen zusammengefasst werden [30; 49]. Typ C-Normen werden als Maschinensicherheitsnormen bezeichnet und enthalten Gestaltungsrichtlinien für einzelne Maschinenteile. Die nachfolgende Tabelle 2-1 stellt die unterschiedlichen Typen detailliert dar und nennt Beispiele.

*Tabelle 2-1: Überblick über unterschiedliche Normtypen [49]*

Typ und Inhalt	Beispiel
<b>Typ A-Normen Sicherheitsgrundnorm:</b> Umfasst Grundbegriffe, Gestaltungsleitsätze und allg. Aspekte, die auf Maschinen angewandt werden können.	DIN EN ISO 12100 (Sicherheit von Maschinen)
<b>Typ B-Normen Sicherheitsfachgrundnorm:</b> Sicherheitsgrundsätze und Standardbaugruppen. Weitere Unterscheidung hinsichtlich Typ-B1-Normen (bestimmte Sicherheitsaspekte) und Typ-B2-Normen (Maschinenteile, Standardbaugruppen).	DIN EN ISO 13849: (Sicherheitsbezogene Teile Maschinen)
<b>Typ C-Normen Maschinensicherheitsnorm:</b> Detaillierte Sicherheitsanforderung an einzelne Maschinenteile, Anforderungen an Maschinenkonstrukteur.	DIN EN ISO 10218 (Industrieroboter)

Die Abbildung 2-10 gibt einen Überblick über relevante Normen ausgehend von der jeweiligen Absicherungsvariante der Roboteranlage. Im Hinblick auf die Normtypen werden die unterschiedlichen Klassifizierungen farblich gekennzeichnet.

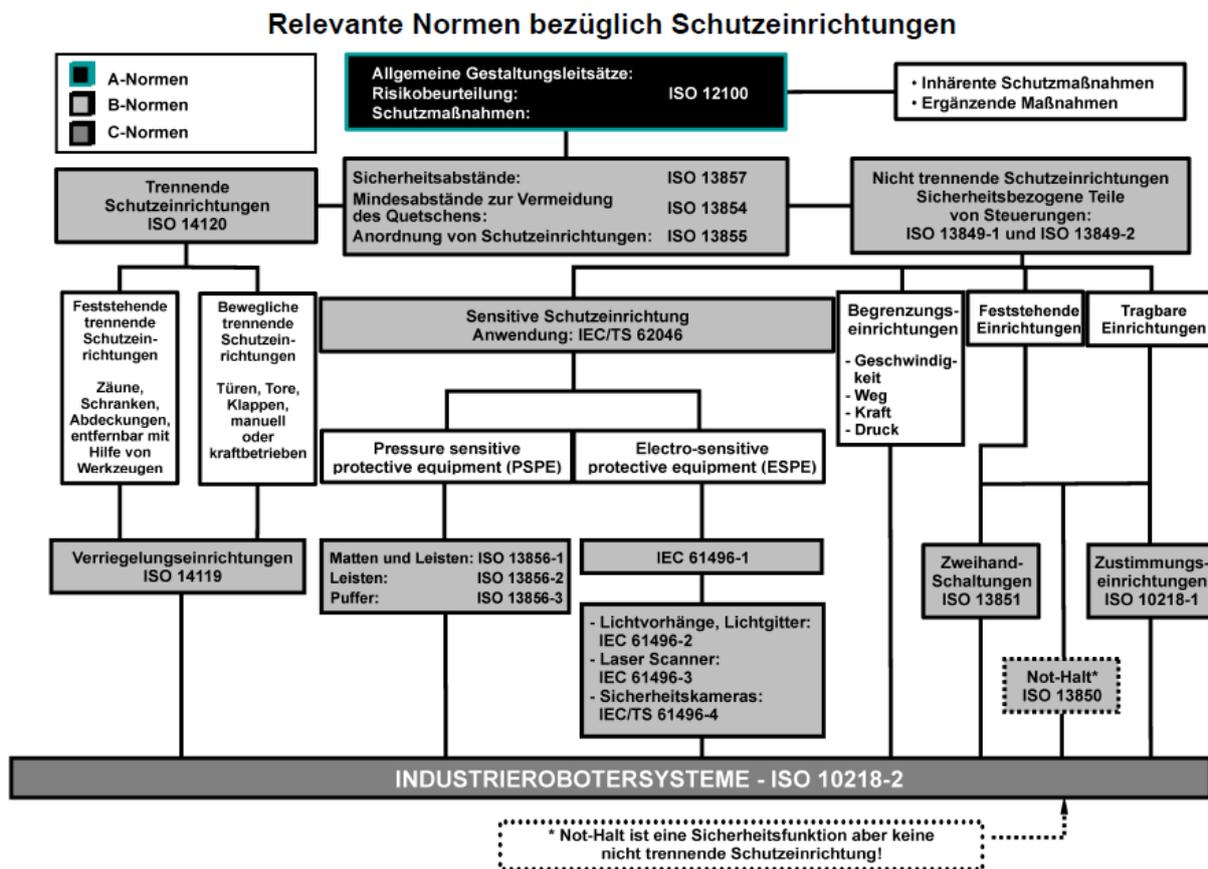


Abbildung 2-10: Überblick über relevante Normen bezüglich Schutzeinrichtungen [23]

Ausgehend von der DIN EN ISO 12100, welche die allgemeinen Gestaltungsleitsätze und das Vorgehen zur Risikobeurteilung von Schutzmaßnahmen thematisiert, stellen sich unterschiedlich Schutzmaßnahmen dar [23; 30]. Hierzu wird wie in Abbildung 2-3 zwischen trennenden, nicht trennenden und begrenzenden Schutzeinrichtungen unterschieden. Die jeweiligen Anforderungen an die Schutzeinrichtungen sind in der Folge anhand jeweiliger Typ B-Normen dargelegt. So lassen sich bspw. trennende Schutzeinrichtungen nach DIN EN ISO 14120 in feststehende und nicht feststehende Schutzeinrichtungen einteilen, welche mit Verriegelungsvorrichtungen nach DIN EN ISO 14119 versehen sein müssen [23]. Kollaborierende Leichtbaurobotersysteme werden in der Abbildung 2-10 im Bereich der nicht trennenden Schutzeinrichtungen in der Rubrik „Begrenzungseinrichtungen“ eingeordnet [23]. Es wird auf die DIN EN ISO 10218-1/2 verwiesen, in welcher die Gestaltungsleitsätze für kraft- und leistungsbeschränkte Robotersysteme enthalten sind und zugleich Anforderungen im Hinblick auf die Integration und den Betrieb gestellt werden [23]. Im nachfolgenden Abschnitt wird auf die relevanten Inhalte der DIN EN ISO 10218-1/2 für den kollaborierenden Betrieb eingegangen. Anschließend werden Teile der technischen Spezifikation ISO TS 15066 vorgestellt, welche die DIN EN ISO 10218-1/2 im Hinblick auf den kollaborierenden Robotereinsatz ergänzt und den Kontakt zwischen Mensch und Roboter spezifiziert.

### 2.3.2 DIN EN ISO 10218: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen

Die DIN EN ISO 10218 befasst sich speziell mit Industrierobotern und stellt eine Typ C-Norm dar. Sie gliedert sich in zwei Teile, wobei der erste Teil die Anforderungen an den Industrieroboter direkt thematisiert, der zweite die Sicherheitsanforderungen im Hinblick auf die Integration und das Robotersystem behandelt [22; 23]. Die nachfolgende Tabelle gibt einen guten Überblick über die thematisierten Inhalte in der jeweiligen Norm.

Tabelle 2-2: Überblick über die Inhalte der DIN EN ISO 10218: Teil 1 und Teil 2 [22; 23]

<b>DIN EN ISO 10218:2012 Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen</b>	
<b>Teil 1: Roboter</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Mechanische und elektrische Auslegung des Manipulators</li> <li>• Sicherheitsbezogene Teile der Steuerung</li> <li>• Außerdem: Bediengeräte, Betriebsmodi (autonom, manuell) etc.</li> </ul>	<b>Teil 2: Robotersystem und Integration</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Bestimmungen für die Integration eines Industrieroboters in einer Anlage</li> <li>• Einbeziehung von Werkzeugen und Werkstücken in die Risikobeurteilung</li> <li>• Anforderungen für einen Betrieb in direkter Kollaboration mit dem Menschen</li> </ul>

Nachfolgend werden die für den kollaborierenden Betrieb relevanten Inhalte der DIN EN ISO 10218-1/2 vorgestellt. Für nicht industrielle Robotersysteme sind ebenfalls Sicherheitsanforderungen in der DIN EN ISO 13482 festgelegt, welche jedoch in diesem Kontext nicht näher erläutert werden [86]:

- **DIN EN ISO 10218-1: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter [22]**  
Die DIN EN ISO 10218-1 spezifiziert Sicherheitsanforderungen hinsichtlich des Industrieroboters. Thematisiert werden Funktionen wie die entsprechend geforderten Standards der Steuerung, die zu beachtenden Sicherheitshinweise und unterschiedlichen Betriebsmodi des Roboters. Relevante Inhalte im Hinblick auf die MRI gibt die Norm unter Abschnitt 5.10 „Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb“. Zunächst werden für die definierten Kollaborationsarten (siehe Kapitel 2.1) Anforderungen formuliert. Diese beziehen sich im Wesentlichen auf die jeweiligen Steuerungskomponenten zur Darstellung einer sicheren Zusammenarbeit. Hinsichtlich der MRI mit leistungs- und kraftbeschränkte Robotern geht die Norm sogar einen Schritt weiter und definiert Anforderungen für auftretende Kollisionskräfte zwischen Mensch und Robotersystem. Diese orientierten sich in älteren Veröffentlichungen der DIN EN ISO 10218-1 an festen Grenzwerten (Kraft max. 150 N und Leistung max. 80 W) und wurden im Zuge der Überarbeitung 2012 durch eine technische Spezifikation (ISO TS 15066) ersetzt [20; 87; 88]. Da der Roboter nur eine Komponente in einem kollaborierenden Robotersystem darstellt und an sich „unzureichend für den sicheren kollaborierenden Betrieb ist“, gilt es die Anforderungen aus DIN EN ISO 10218-2 und der ISO TS 15066 für die Integration und den Betrieb zu berücksichtigen [87; 88].
- **DIN EN ISO 10218-2: Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration [23]**  
Die DIN EN ISO 10218-2 bezieht sich auf das Robotersystem und die damit verbundene Integration. Thematisiert werden Peripheriekomponenten und Anlagenbetriebsmodi, welche bei der Integration von Industrierobotern in einer Anlage berücksichtigt werden müssen. Wesentlich sind definierte Anlagenzustände bei der Inbetriebnahme und Instandhaltung des Robotersystems, trennende und nicht trennende Schutzeinrichtungen, Interaktionsanzeigen und Bediengeräte für den

Anlagenbediener, mögliche Gefährdungen bei Anlagenbetrieb und weitere Hinweise hinsichtlich sicherheitsrelevanter Anlagenkomponenten.

Für die MRI besonders relevant ist das Kapitel 5.11 mit dem Titel „*Kollaborierender Roboterbetrieb*“, in welchem die Anforderungen an die direkte Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter definiert werden. Die Risikobeurteilung muss „*die gesamte gemeinsam durchzuführende Aufgabe (Kollaborationsaufgabe) umfassen und den Arbeitsraum berücksichtigen*“ [23]. Als besonderer Verweis wird die Gefährdung durch das Robotersystem selbst und die Gestaltung des kollaborierenden Arbeitsplatzes herausgestellt. Im Hinblick auf den Betrieb von leistungs- und kraftbeschränkten Robotersystemen erfolgt ein Verweis auf ISO TS 15066, welche zusätzliche Informationen im Hinblick auf Gefährdungen und die Beurteilung derer gibt [18].

### 2.3.3 ISO TS 15066: Roboter und Robotikgeräte – Kollaborierende

#### Roboter

Die ISO TS 15066 befasst sich detailliert mit Gefährdungen und zulässigen Grenzwerten für den kollaborierenden Roboterbetrieb [18]. Fokussiert wird der Ansatz von leistungs- und kraftbeschränkten Robotersystemen, da im Speziellen bei dieser Art der Absicherung ein Kontakt zwischen Mensch und Roboter zu erwarten ist. Im Hinblick auf den in dieser Arbeit thematisierten Forschungsansatz bildet die ISO TS 15066 die Grundlage und die Ausgangsbasis der zu entwickelnden Methodik.

Als Ausgangspunkt der ISO TS 15066 stellt sich die Empfehlung der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) mit dem Titel „*BG/BGIA-Empfehlung für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie – Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern*“ dar, welche durch das Institut für Arbeitsschutz (IFA bzw. BGIA) im Oktober 2009 veröffentlicht wurde [20]. Es wurde erstmals eine differenzierte Betrachtung von Kollisionen zwischen Mensch und Roboter je nach Körperregion auf Basis biomechanischer Grenzwerte veröffentlicht, welche im Hinblick auf die ISO TS 15066 maßgebend ist. Als Grenzwerte für die mögliche Krafteinwirkung auf den Menschen durch einen kollaborierenden Roboterbetrieb werden Kraftgrenzen und Flächenpressungen festgelegt, welche die bisherigen Grenzwerte der DIN EN ISO 10218-2 ersetzen (nach DIN EN ISO 10218-2 – 2009: 150 N bzw. 80 W [89]). Die veröffentlichte technische Spezifikation beinhaltet 29 Körperregionen mit definierten maximalen Kräften für eine freie (transienter Kontakt) und eine klemmende Kollision (quasi-statischer Kontakt). Zudem werden maximale Flächenpressungen für die jeweilige Körperregion festgelegt und eine Körperkompressionskonstante je Körperregion eingeführt, welche ein Maß für die Verformung an der jeweiligen Körperstelle darstellt. In der Tabelle 2-3 sind die biomechanischen Grenzwerte mit der entsprechenden Bezeichnung dargelegt. Die gezeigten Werte sind das Ergebnis einer Literaturrecherche und mehrerer Versuchsreihen, welche durch das IFA in Zusammenarbeit mit Medizinern der Universität Mainz und dem Fraunhofer IFF bei Versuchen mit Menschen ermittelt worden sind [90–92].

Die in Tabelle 2-3 gezeigten Grenzwerte stellen eine erhebliche Neuerung in der Beurteilung von Risiken hinsichtlich des Schutzes von Menschen im Rahmen der Anlagensicherheit dar [89; 93; 94]. So wird explizit ein Kontakt zwischen Mensch und Roboter zugelassen, dieser jedoch gleichzeitig sehr detailliert in Art und Umfang spezifiziert. Die gezeigten Werte stellen Zielgrößen dar, welche in der Anlagenplanung und Realisierung zu erfüllen sind [24]. Daher ist es unerlässlich, die Spezifikationen frühzeitig im Planungs- und Gestaltungsprozess zu berücksichtigen [95]. Die deutsche gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) durch den Fachbereich Holz und Metall wie auch das Institut für Arbeitsschutz waren an der

## Ausgangssituation

Entwicklung der ISO TS 15066 maßgeblich beteiligt. Die DGUV-Information „kollaborierende Robotersysteme“ gibt unter Kapitel 5 eine technische Beschreibung, wie eine Erfassungsmethode der Kollisionskraft aussehen kann [27; 96]. Nähere Informationen zum Aufbau und der technischen Ausgestaltung der Messung der Kollisionskräfte an kollaborierenden Arbeitsplätzen werden sowohl unter Abschnitt 2.5.2 als auch im entwickelten Versuchsaufbau unter Abschnitt 3.3.1 gegeben.

Tabelle 2-3: Biomechanische Grenzwerte der ISO TS 15066 [18]

Lokalisation		Verletzungsgrenzwerte					
Spezifische Lokalisation		Körperregion	Körperkompression [N/mm]	Quasistatischer Kontakt		Transienter Kontakt	
				Maximaler zulässiger Druck [N/cm <sup>2</sup> ]	Maximale zulässige Kraft [N]	Faktor für den max. zul. Druck	Faktor für die max. zul. Kraft
1	Stirnmitte	Schädel/ Hinterkopf	150	130	130	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
2	Schläfe			110		Nicht anwendbar	
3	Kaumuskel	Gesicht	75	110	65	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
4	Nackemuskel	Hals	50	140	150	2	2
5	Siebter Halswirbel			210		2	
6	Schultergelenk	Rücken/ Schulter	35	160	210	2	2
7	Fünfter Lendenwirbel			210		2	
8	Brustbein	Brust	25	120	140	2	2
9	Brustmuskel			170		2	
10	Bauchmuskel	Bauch	10	140	110	2	2
11	Beckenknochen	Becken	25	210	180	2	2
12	Deltamuskel	Oberarm/ Ellenbogen	30	190	150	2	2
13	Oberarmknochen			220		2	
14	Speiche	Unterarm/ Handgelenk	40	190	160	2	2
15	Unterarmmuskel			180		2	
16	Armnerve			180		2	
17	Zeigefingerkuppe D	Hand/ Finger	75	300	140	2	2
18	Zeigefingerkuppe ND			270		2	
19	Zeigefingerendgelenk D			280		2	
20	Zeigefingerendgelenk ND			220		2	
21	Daumenballen			200		2	
22	Handinnenflächen D			260		2	
23	Handinnenflächen ND			260		2	
24	Handrücken D			200		2	
25	Handrücken ND			190		2	
26	Oberschenkelmuskel	Oberschenkel/ Knie	50	250	220	2	2
27	Kniescheibe			220		2	
28	Schienbeinmitte	Unterschenkel	60	220	130	2	2
29	Wadenmuskel			210		2	

Die ISO TS 15066 mit der differenzierten Betrachtung der auftretenden Kollisionskräfte zwischen Mensch und Roboter bildet den wesentlichen Ausgangspunkt für den in dieser Arbeit dargelegten Forschungsansatz.

### **2.3.4 DIN EN ISO 12100: Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung**

Im Mittelpunkt der Arbeit stehen die Integration und der kollaborierende Betrieb von leistungs- und kraftbeschränkten Leichtbaurobotersystemen vor dem Hintergrund der Arbeitssicherheit. Einen wesentlichen Beitrag zur sicherheitstechnischen Beurteilung liefern die vorgestellten Normen und Spezifikationen. In diesem Abschnitt wird das Vorgehen der Risikobeurteilung nach der DIN EN ISO 12100 vorgestellt.

Die DIN EN ISO 12100 mit dem Titel „*Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung*“ bildet die Grundlage für eine sicherheitstechnische Beurteilung von Anlagen [30; 97]. Die Abbildung 2-11 zeigt in einem vereinfachten Schema das Vorgehen der sicherheitstechnischen Beurteilung. Wesentliche Bestandteile bilden zunächst die Risikoanalyse und die -bewertung. Der Begriff Risiko wurde unter Abschnitt 2.1 als das Produkt aus den Folgen eines Negativereignisses und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit definiert [30; 40; 41]. Somit gilt es mögliche Gefahren durch den kollaborierenden Betrieb von Robotersystemen zu identifizieren und diese im Anschluss hinreichend zu bewerten. Das Vorgehen gliedert sich wie folgt: Zunächst werden entsprechende Anlagengrenzen festgelegt, welche anhand der Aufgabe und des benötigten Arbeitsraums der geplanten Anlage festgelegt werden. Im nächsten Schritt werden mögliche Gefährdungen innerhalb der festgelegten Anlagengrenzen identifiziert. Es werden alle Arten von Gefährdungen betrachtet, also neben den rein mechanischen Gefährdungen wie bspw. die Kollision zwischen Mensch und Maschine auch thermische oder elektrische Gefährdungen. Neben der Gefährdung gilt es zudem den dazugehörigen Umfang der Exposition festzulegen. Diese Schritte sind Teil der Risikoanalyse (in Abbildung 2-11 gelb dargestellt). Im Anschluss gilt es das identifizierte Risiko mit geeigneten Skalen im Rahmen der Risikobewertung (roter Kasten in Abbildung 2-11) zu bewerten und entsprechende Maßnahmen bei einer hinreichend schlechten Bewertung zu ergreifen. Zur Bewertung und Einschätzung werden Skalen herangezogen, welche in Typ B- und Typ C-Normen genauer definiert sind. Im ersten Schritt wird versucht, die Anlage derart umzugestalten, dass diese durch inhärente Sicherheitsfunktionen abgesichert werden kann und keine zusätzlichen Maßnahmen zu ergreifen sind [3]. Im zweiten Schritt erfolgt eine zusätzliche technische Schutzmaßnahme, mithilfe derer die Anlage zu einer sicheren Anlage aufgerüstet werden kann [3]. Im dritten und letzten Schritt erfolgt eine Neugestaltung der Grenzen bzw., wenn dies nicht möglich ist, die Absicherung auf Basis von Nutzerinformationen bzw. eine Neukonstruktion der Anlage [3].



## 2.4 Forschungsbedarf

### 2.4.1 Ansatzpunkte vor dem Hintergrund der Ausgangssituation

Die Sicherheit von kollaborierenden Leichtbaurobotersystemen muss ebenfalls nach dem unter Abschnitt 2.3.4 aufgezeigten Vorgehen der DIN EN ISO 12100 beurteilt werden. Die Absicherung erfolgt auf Basis der Leistungs- und Kraftbeschränkung des Robotersystems, welches in Abbildung 2-11 unter der inhärent sicheren Konstruktion einzuordnen ist (grüner Kasten). Zusätzlich zu den gängigen Risiken aus dem klassischen Anlagenbau ist die Gefahr von auftretenden Kollisionen am Arbeitsplatz zwischen Mensch und Roboter zu beurteilen. Unter Kapitel 2.3.3 ist die ISO TS 15066 erläutert worden, in welcher die Bewertungsgrundlagen für einen Kontakt zwischen Mensch und Roboter detailliert spezifiziert sind. Daher gilt es für jede Roboterbewegung zu analysieren, welche Körperteile des Menschen exponiert sind und diese hinsichtlich ihres Risikos zu beurteilen. Die erstmalige Beurteilung einer möglichen Gefahr erfolgt ohne die Berücksichtigung der Sicherheitsfunktion des Robotersystems. Im Anschluss werden auf Basis von Funktionen in der sicheren Steuerung des Leichtbauroboters die Bewegungen in Art und Umfang so limitiert, dass die geforderten Standards eingehalten werden können. Dieses iterative Vorgehen findet derzeit in der letzten Phase der Anlagenintegration bei der Verifikation der Sicherheitsstandards im Produktionsumfeld statt [27; 29; 87; 88; 95]. Zudem erfolgt die Identifikation von möglichen Gefährdungen zu Beginn der Risikoanalyse durch Experten [24; 87]. Dabei sind gewisse potenzielle Gefährdungen relativ offensichtlich anhand der Aufgabe zu erkennen, jedoch existieren bisher nur vereinzelte Ansätze, welche mögliche Gefährdungen entlang einer Robotertrajektorie systematisch analysieren [95]. Im Weiteren erfolgt die Parametrierung der Funktionen der sicheren Steuerung des Leichtbauroboters ebenfalls erst iterativ nach erfolgter physischer Messung der Kollisionskräfte bei Anlagenabnahme. Dabei ist es wichtig, die maximale Performance innerhalb der gesetzten Sicherheitsgrenzen für einen ökonomischen Betrieb der Anlage sicherzustellen [21].

An diesem iterativen Vorgehen der Anlagenabsicherung setzt der Forschungsansatz an. Im ersten Schritt sollen mögliche Einflussfaktoren für kraft- und leistungsbeschränkte Leichtbauroboter identifiziert und in einem Prüfstand evaluiert werden. Durch die Untersuchung dieser Einflussfaktoren auf die Kollisionskraft soll zudem ein Vorgehen entwickelt werden, welches die Roboterbewegung analysiert und Gefährdungen entlang der Trajektorie erkennt. Es wird die Zielsetzung verfolgt, bereits in der Anlagenplanungsphase Rückschlüsse auf die Sicherheit und die Performance der Anlage treffen zu können. Auf Basis der erfolgten Analyse können so im Anschluss Aussagen bzgl. der späteren Leistungsdaten der Anlage getroffen werden und schon in der frühen Anlagenphase wichtige Informationen für den Anwender bzw. Anlagenintegrator geliefert werden.

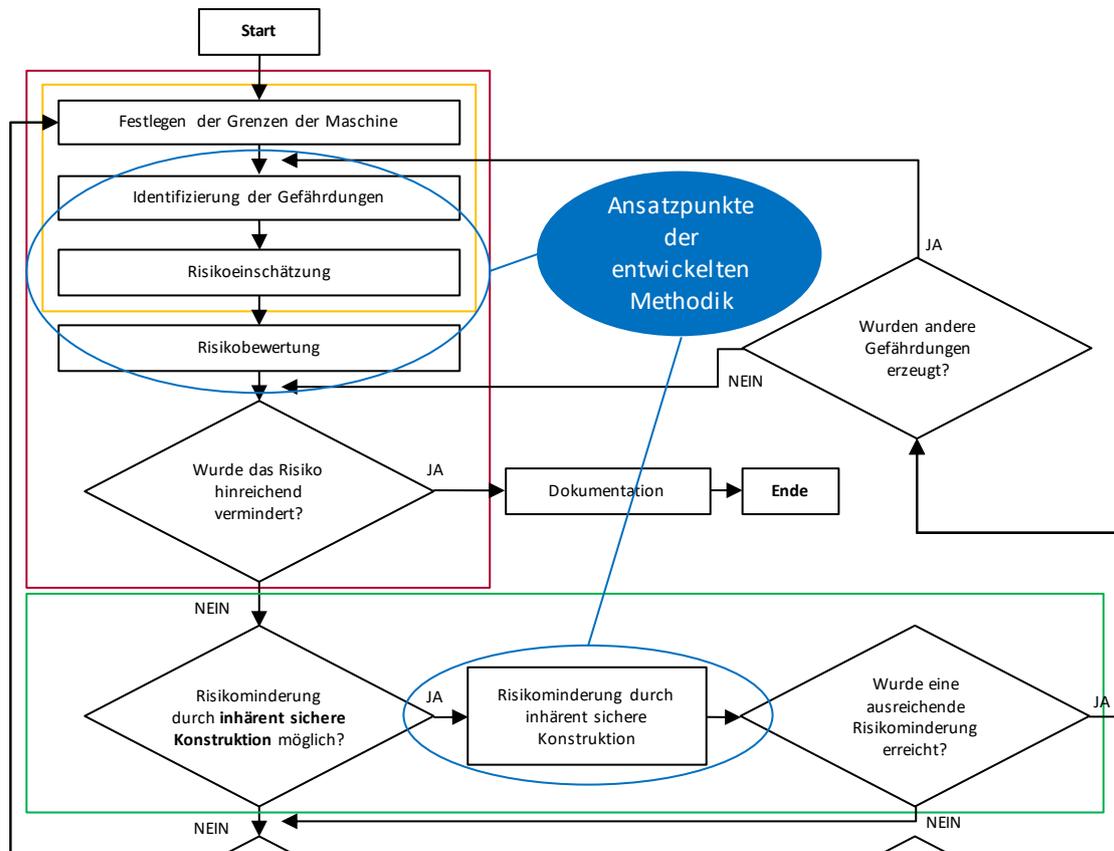


Abbildung 2-12: Ansatzpunkte des Forschungsansatzes der vorliegenden Arbeit im Rahmen des schematischen Vorgehens nach DIN EN ISO 12100 zur Risikoanalyse und Risikobewertung der Anlagensicherheit [30]

Die Abbildung 2-12 zeigt anhand des Vorgehens der DIN EN ISO 12100 in Anlehnung an das gezeigte Vorgehensschema aus Abbildung 2-11 die Ansatzpunkte der entwickelten Methodik. So sollen während der Risikoanalyse und -bewertung für den Anwender entsprechende Funktionen zur Verfügung stehen, welche eine Identifizierung und Beurteilung der Gefährdungen durch das kollaborierende Robotersystem erlauben. Im Weiteren gilt es im Rahmen der Parametrierung des sicheren Teils der Robotersteuerung entsprechende Grenzwerte zu ermitteln, welche einen sicheren Betrieb des MRI-Szenarios erlauben.

Im Hinblick auf einen ökonomischen Betrieb einer MRI sind vor allem Aussagen über die spätere Leistungsfähigkeit der geplanten Anlage für den Anwender von Bedeutung. Die damit verbundenen Herausforderungen werden im nachfolgenden Abschnitt dargelegt.

### 2.4.2 Ansatzpunkte in dem industriellen Planungsprozess

Die vorliegende Arbeit ist im Rahmen einer Industriepromotion bei der BMW Group erarbeitet worden. Es hat sich gezeigt, dass sich vor dem Hintergrund der bisher aufgezeigten Ausgangssituation im Hinblick auf die Sicherheit von MRI-Anlagen Herausforderungen aus dem Planungs-, Entscheidungs- und Realisierungsprozess von kollaborierenden Roboteranlagen ableiten lassen.

Die aufgezeigten Ansatzpunkte aus Abschnitt 2.4.1 lassen sich anhand des industriellen Planungsprozesses darlegen. Die Abbildung 2-13 zeigt das angewandte Phasenmodell der BMW Group für die Planung und Realisierung von Roboteranlagen in der Montage.

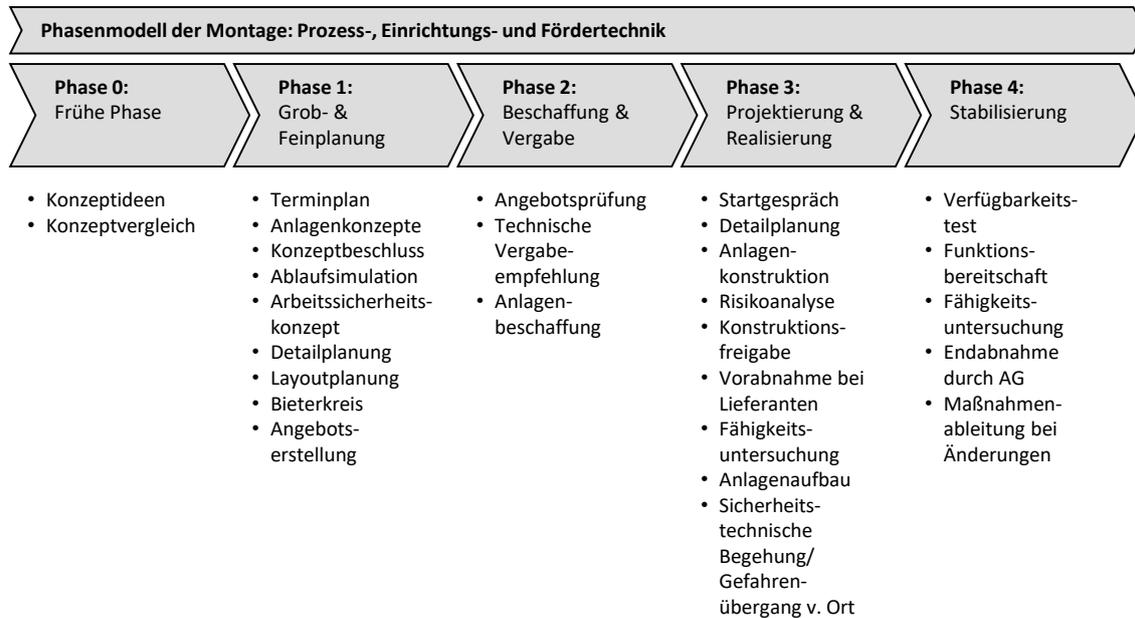


Abbildung 2-13: Phasen des Anlagenbeschaffungsprozesses der BMW Group in der Technologie Montage

Der Prozess gliedert sich in 5 Phasen und bildet alle Planungs- und Entscheidungsschritte der Anlagenrealisierung von klassischen Roboter- bzw. Montageanlagen ab. Für kollaborierende Anlagenkonzepte mit leistungs- und kraftbeschränkten Leichtbaurobotersystemen muss dieser Prozess künftig adaptiert werden. Die aus technischer Sicht zu berücksichtigenden Betrachtungsumfänge im Hinblick auf MRI-Anlagen sollen nachfolgend anhand des Phasenmodells aufgezeigt werden.

Phase 0 befasst sich mit möglichen Anlagenkonzepten auf einer konzeptionellen Ebene, in welcher technische Lösungsmöglichkeiten für die geplante Anwendung untersucht werden. Aufbauend werden diese Konzepte in Phase 1 detailliert. Hierzu zählen Ablaufsimulationen, Festlegung der Leistungsdaten und auch eine vorläufige Betrachtung der Arbeitssicherheit. Das Ergebnis der Phase 1 bildet die Grundlagen für die Angebotserstellung der möglichen Lieferanten. Auf Basis der hier erarbeiteten Ergebnisse erfolgt zudem eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung der Lösungsalternativen. Phase 2 beschreibt den Vergabe- und Einkaufsprozess. Basierend auf einer technischen Bewertung und der vorangegangenen Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wird der entsprechende Vergabeumfang detailliert und in einer Ausschreibungsunterlage festgehalten. Darin sind zu liefernde Leistungsdaten, der Zeitplan und die Kriterien für die in Phase 4 erfolgende Abnahme enthalten. Phase 3 befasst sich mit der Projektierung und Realisierung des zuvor festgelegten Anlagenumfangs. Dazu zählen die Konstruktion der Anlage, die Programmierung, die Erarbeitung des Sicherheitskonzeptes, Testläufe beim Lieferanten bis hin zum Aufbau der Anlage beim Auftraggeber (AG). Phase 4 beschreibt den Übergabeprozess an den AG und die Abnahme vor Ort. Hierbei erfolgen seitens des Lieferanten der Leistungsnachweis sowie der Gefahrenübergang an den Betreiber. Typischerweise erfolgt eine Sicherheitsüberprüfung, bei welcher alle für die Arbeitssicherheit relevanten Funktionen der Anlage getestet und abgenommen werden.

Grundsätzlich kommt das Phasenmodell bei der BMW Group auch für kollaborierende Leichtbaurobotersysteme mit Leistungs- und Kraftbegrenzung zum Einsatz. Da die Sicherheitsarchitektur dieser Robotersysteme doch erheblichen Einfluss auf die Leistungskennwerte der Anlage hat, müssen die Aspekte der Sicherheit bereits in einer frühen Planungsphase der Anlage berücksichtigt werden. Dazu zählt, dass bereits während der Anlagenkonzeptionierung in Phase 0 bzw. Phase 1 sicherheitsrelevante Anforderungen der ISO TS 15066 berücksichtigt werden müssen. Den Zusammenhang zwischen der Anlagenperformance und -sicherheit gilt es bei leistungs- und kraftbeschränkten Robotersystemen frühzeitig in

den Mittelpunkt der Untersuchungen zu stellen. Muss bspw. aufgrund der exponierten Körperstellen des Menschen der Roboter mit einer verminderten Geschwindigkeit betrieben werden, so gilt es dies in der Evaluierung der Lösungsalternativen und im anschließenden Realisierungsprozess zu bewerten. Neben den ökonomischen Aspekten einer Lösungsalternative mit leistungs- und kraftbeschränkten Leichtbaurobotersystemen gilt es zudem auch Randbedingungen eines Produktionssystems zu berücksichtigen [21; 95]. Vorgegebene Arbeitsinhalte müssen in festgelegten Taktzeiten erledigt werden. Eine Evaluierung der Anforderungen der ISO TS 15066 erfolgt heute in Phase 3 bzw. Phase 4 der Anlagenrealisierung durch eine physische Messung vor Ort. Durch eine frühzeitige Berücksichtigung dieser Anforderung kann die Vorleistung erheblich gesteigert werden und so die Basis für eine sinnvolle Konzeptentscheidung in Phase 1 geschaffen werden.

Der in Abschnitt 2.4.1 aufgezeigte Forschungsbedarf setzt hier an und hat zum Ziel, die in der ISO TS 15066 gestellten Anforderungen bereits in Phase 1 der Anlagenrealisierung zu berücksichtigen. Eine mögliche Evaluierung erfolgt daher auf Basis der erarbeiteten Sicherheitskonzepte und Ablaufsimulationen. Abweichungen und Änderungen des Anlagenkonzeptes gilt es während der Realisierungsphasen vor dem Hintergrund des Einflusses auf die Sicherheit zu beurteilen. So kann sichergestellt werden, dass alle Anforderungen im Hinblick auf Sicherheit, Produktivität und Ökonomie ausreichend entlang des Phasenmodells berücksichtigt werden.

## 2.5 Stand der Technik

Der folgende Abschnitt dient der Vorstellung vorangegangener Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Sicherheit und der Ableitung sicherheitsrelevanter Einflussfaktoren bei leistungs- und kraftbeschränkten Leichtbaurobotersystemen.

Abschnitt 2.5.1 stellt die Untersuchungen und Evaluierungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) näher vor. Diese gehen einher mit der in Abschnitt 2.2.2 dargelegten Entwicklung der Leichtbauroboter am DLR und fanden vor der Veröffentlichung und Entwicklung der ISO TS 15066 statt. Es sind Versuche unternommen worden, die Folgen einer Kollision zwischen Mensch und Roboter mit Bewertungsverfahren aus der Automobilindustrie zu untersuchen.

Abschnitt 2.5.2 stellt das Vorgehen der Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM), welche Teil der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) ist, für die Abnahme von Anlagen mit kollaborierenden Robotersystemen vor. Die vorgestellte Vorgehensweise entspricht den derzeit angewandten Verfahren zur Bewertung von Kollisionskräften an kollaborierenden Roboteranlagen. Zudem wird das seitens der DGUV empfohlene Messsystem und -verfahren zur Erfassung der auftretenden Kräfte erläutert.

Das in Abschnitt 2.5.3 vorgestellte Verfahren wurde im Rahmen einer Industriepromotion bei der Daimler AG entwickelt und forciert ebenfalls die Integration von MRI-Leichtbaurobotern in die Produktion. Das vorgestellte Verfahren wurde mithilfe des Leichtbauroboters KUKA LBR iiwa entwickelt und befasst sich mit der Umsetzung der ISO TS 15066 vor dem Hintergrund der industriellen Integration.

### 2.5.1 Untersuchungen des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt

Die aufgezeigte Entwicklung von Leichtbaurobotersystemen am DLR (vgl. Abschnitt 2.2.2) ging einher mit Forschungen und Versuchen hinsichtlich der Sicherheit für den Menschen in einem MRI-Szenario.

Um das Gefährdungspotenzial für den Menschen durch den Roboter zu evaluieren, wurden Kollisionen mit einem Crash-Test-Dummy aus der Automobilindustrie durchgeführt und zur Quantifizierung dessen integrierte Sensorik herangezogen [99–101]. Festgestellt wurde, dass nur eine direkte Kollision zwischen Mensch und Roboter mit einem freien (unconstrained impact) oder einem klemmenden Kontakt (constrained impact) zuverlässig evaluiert werden kann, mögliche weitere Kontaktszenarien sind messtechnisch nicht zuverlässig und reproduzierbar zu erfassen [99].

Um das Schadensausmaß des Crash-Test-Dummy in ein Verhältnis zu setzen, wurden die Ergebnisse [84] mit der Bewertungsskala des Euro NCAP-Crashtestverfahrens für Crash-Versuche mit PKW verglichen [99–101]. Die Abschätzung des Potenzials für eine Absicherung des Leichtbauroboters auf Basis seiner inhärenten Sensorik erfolgte über eine Vergleichsuntersuchung mit Standardindustrierobotern in unterschiedlichen Größen [101]. Die Abbildung 2-14 zeigt den Versuchsaufbau des DLR am ADAC Crashtestzentrum in Landsberg am Lech.

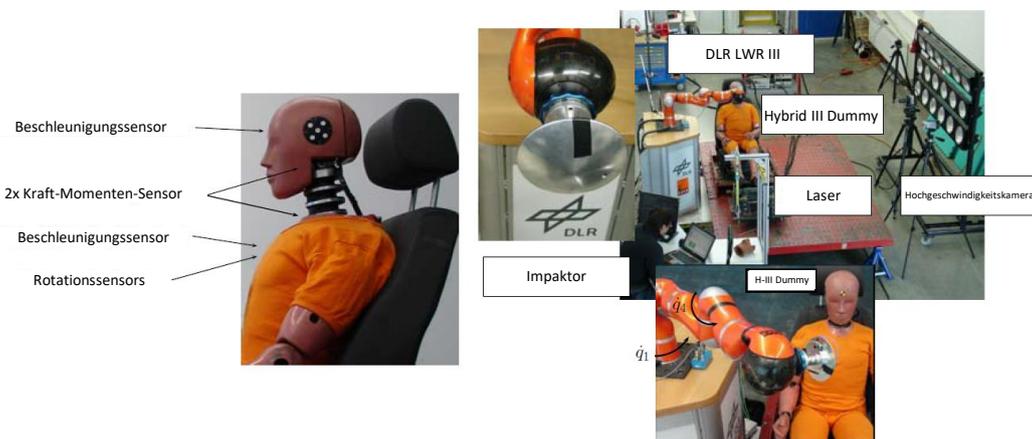


Abbildung 2-14: Versuchsaufbau am ADAC Crashzentrum durch das DLR mit unterschiedlichen Robotertypen zu Evaluierung von Kollisionen in der MRI [84]

In dem Beitrag „*Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing*“ werden die Ergebnisse der Versuche aus dem in Abbildung 2-14 gezeigten Prüfstand dargelegt [84]. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden die Bewertungsskalen für drei unterschiedliche Körperstellen aus dem Euro NCAP-Crashtest herangezogen. Die in Abschnitt 2.3.3 unter Tabelle 2-3 gezeigten Grenzwerte der ISO TS 15066 waren zum Zeitpunkt der aufgezeigten Erhebung durch das DLR noch nicht existent. Vielmehr bilden die Ergebnisse die Grundlage für die Erarbeitung der technischen Spezifikation [16; 34]. In den Versuchsreihen wurden die Belastung auf den Kopf mit dem *Head Injury Criterion* (HIC), die Belastung für den Brustkorb mittels des *Compression Criterion* und des *Viscous Criterion* und die Belastung für den Nacken mittels des *Neck Criterion* näher untersucht [84; 99; 100]. Der Euro NCAP-Crashtest bietet Vergleichsskalen für die genannten Kriterien und setzt die erzielten Messergebnisse in ein Verhältnis möglicher Schäden für den Menschen. Dabei beschreibt das HIC die für den Kopf auftretende Beschleunigung nach erfolgter Kollision über die Zeit ( $HIC_{36}$  entspricht 36 ms). Das *Compression Criterion* beschreibt die Kompression des Brustkorbs, welche durch die maximale Eindringtiefe des Prüfkörpers in den Brustkorb beschrieben wird. Weiteres Bewertungsmerkmal für den Brustbereich ist das *Viscous Criterion*, welches als Produkt der Eindringtiefe und der Eindringgeschwindigkeit definiert ist. Der Nacken wird durch des *Neck Criterion* anhand der maximal einwirkenden Kräfte und Momente evaluiert.

Die Versuche wurden mit unterschiedlichen Robotertypen durchgeführt. Es kamen ein DLR LWR III Leichtbauroboter mit Kollisionsüberwachung, ein KUKA KR 16 und ein KUKA KR 250 zum Einsatz

[101]. Die Kollision selbst wurde stets mit einem Impactor, wie in der Abbildung 2-14 dargestellt, durchgeführt [84]. Zur Datenerfassung wird ein Hybrid III Crash-Test-Dummy mit Sensoren eingesetzt, welcher die genannten Kriterien messtechnisch erfasst [84; 99; 100]. Zudem wurden die Versuche mit mehreren Hochgeschwindigkeitskameras aufgezeichnet. Die Kollisionen wurden mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten des Prüfkörpers in einem Bereich zwischen 0,2 bis 2,0 m/s am TCP (Tool Center Point) evaluiert. Die Kollision untersucht den primären Kontakt zwischen Mensch und Roboter, mögliche Folgeschäden wurden nicht näher betrachtet [84].

Die Ergebnisse liefern erstmals eine Quantifizierung eines möglichen Verletzungsrisikos und einer möglichen Verletzungsschwere durch eine Kollision zwischen einem Menschen und einem Roboter. Die Skala des  $HIC_{36}$  legt bspw. zugrunde, dass bei einem HIC-Level von 650 eine 5% Chance besteht, sich schwer zu verletzen. Die Abbildung 2-15 zeigt zudem, dass bei einem HIC-Level oberhalb von 1000 erhebliche Lebensgefahr besteht [84].

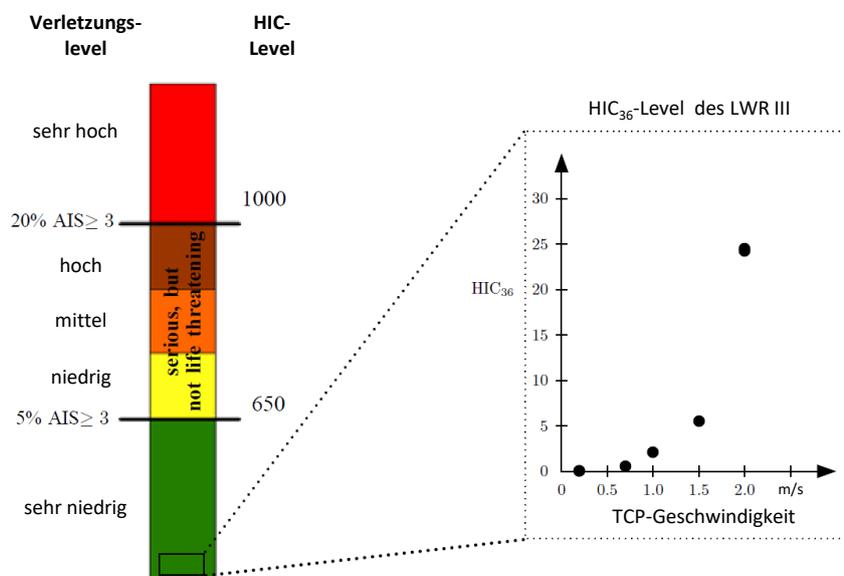


Abbildung 2-15: Rechts:  $HIC_{36}$ -Verletzungsskala und -Ergebnisse für den DLR LWR III Leichtbauroboterarm bei unterschiedlichen Kollisionsgeschwindigkeiten am TCP [84]

In Abbildung 2-15 sind die jeweiligen Ergebnisse für die Kollisionen mit dem DLR LWR III Leichtbauroboterarm über die Auftreffgeschwindigkeit aufgetragen. Es zeigt sich, dass selbst bei sehr hohen TCP-Geschwindigkeiten von ca. 2 m/s lediglich ein  $HIC_{36}$ -Level von ca. 25 erreicht wird, aus welchem sich als Ergebnis der Untersuchung ein „resulting probability of injury severity is  $\approx 0\%$  for all categories“ schlussfolgern lässt [84]. Gleichzeitig lässt sich feststellen, dass die Robotergeschwindigkeit einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse des  $HIC_{36}$ -Levels hat [84; 99; 100]. Dies begründet sich durch die erheblich gesteigerte Beschleunigung des Kopfes bei höheren Geschwindigkeiten. Ähnlich stellen sich auch die Ergebnisse für den Brustkorb und den Nacken dar [84; 99; 100]. Die Ergebnisse bewegen sich jeweils am unteren Rand des Verletzungslevels und stellen nach der Skala keine ernsthafte Gefährdung dar.

Weiterführende Versuche und Untersuchungen hatten bereits mögliche Maximalkräfte im Hinblick auf das Versagen von Knochen in unterschiedlichen Körperregionen zum Gegenstand. So wurde der Einfluss von Masse und Geschwindigkeit und die daraus resultierende Kollisionskraft im Gesichtsbereich des Menschen ebenfalls detailliert untersucht [76; 99; 100]. Neben dem DLR LWR III wurden auch Standardindustrieroboter der Firma KUKA (KR3-Si, KR6, KR500) verwendet [76]. Abbildung 2-16

zeigt die Ergebnisse der auftretenden Kollisionskraft bei einer Simulation in Abhängigkeit von der Roboter­masse (reflektierte Massenträgheit) und der Robotergeschwindigkeit für unterschiedliche Körper­regionen (Frontal Bone, Maxilla) [76]. Zugrunde gelegt wurde eine Kollision mit einer konstanten Ge­schwindigkeit im Kollisionspunkt.

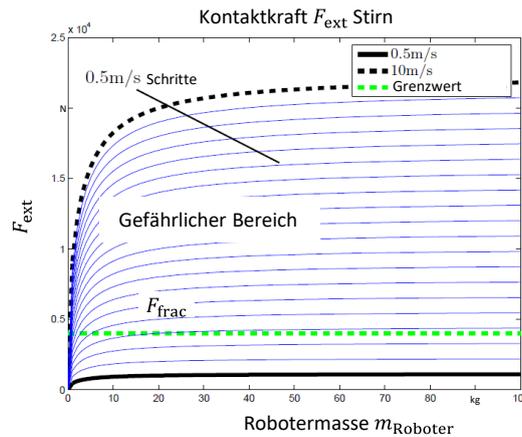


Abbildung 2-16: Ergebnisse einer Simulation einer Kollision zwischen Mensch und Roboter in Abhängigkeit der Robotergeschwindigkeit und Roboter­masse vor dem Hintergrund der Euro NCAP-Crashtest-Verfahren [76]

Die Abbildung 2-16 zeigt, dass die Roboter­masse im Speziellen bei höheren Gewichten nur einen be­dingten Einfluss auf die Höhe der auftretenden Kraft bei der Kollision hat. Bei niedrigen Roboter­massen ist ein signifikanter Einfluss festzuhalten [76]. Es wird schlussgefolgert, dass bei Leichtbaurobotersyste­men aufgrund der niedrigeren bewegten Masse erheblich höhere Geschwindigkeiten gegenüber Stan­dardindustrierobotern denkbar sind, ohne die kritische Kraft  $F_{frac}$ , welche die Kraft für eine Knochen­fraktur in den jeweiligen Körperregionen beschreibt, zu übertreffen [69; 76].

Im Weiteren wurden mögliche Singularitäten einer Roboter­bewegung analysiert [69]. Es wurde ein klemmendes Kollisionsszenario im Gesichtsbereich untersucht, welches für die Kollisionserkennung des DLR LWR III bei Durchfahren der Singularität in der gezeigten Achse schwer zu detektieren ist (vereinfachte Darstellung in Abbildung 2-17). Das Diagramm in Abbildung 2-17 zeigt in der roten Linie die erkannte Kraft im Gelenk des Roboterarms auf Basis der integrierten Kollisionserkennung.  $F_{max}$  beschreibt die maximal auftretende Kraft durch das Robotersystem,  $F_{det}$  beschreibt die Kollisionserken­nung, welche hier auf 5% von  $F_{max}$  eingestellt ist.

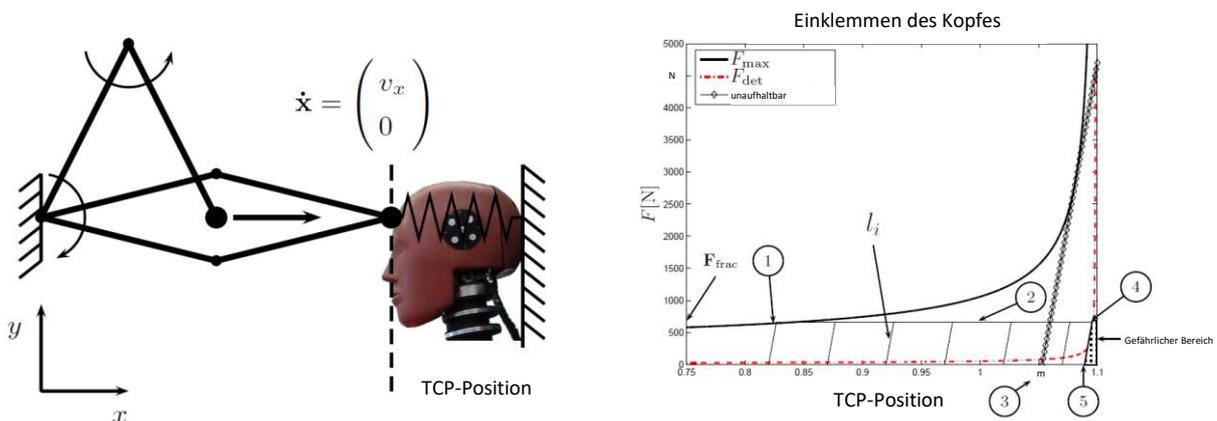


Abbildung 2-17: Untersuchung von Singularität in einer Roboter­bewegung und den abzuleitenden Gefährdungen durch die integrierte Kollisionserkennung des DLR LWR III [69]

Es wird festgehalten, dass in den gezeigten Roboterachsen bei Annäherung an die Singularität eine zuverlässige Erkennung der Kollision nicht mehr möglich ist [69]. Dieser kritische Bereich beginnt beim gezeigten Versuchsaufbau mit dem DLR LWR III bei der der TCP-Position ca. 2 cm vor der Singularität. Bei Durchfahren der Singularität wird der Hebelarm für die Momentenerkennung in den gezeigten Gelenken null, sodass eine zuverlässige Erkennung der auftretenden Kraft am TCP nicht mehr gewährleistet werden kann. Abschließend wird festgehalten, dass eine entsprechende Arbeitsraumbeschränkung für Singularitäten für den sicheren Betrieb von kraft- bzw. leistungsbeschränkten Robotersystemen benötigt wird [69].

Die gewonnenen Erkenntnisse zeigen Indikationen für einen künftigen Einsatz von Leichtbaurobotern und deren Gefährdungspotenzial auf. Es zeigte sich bereits, dass an einen Betrieb der Roboter in direktem Umfeld des Menschen gedacht werden kann und dass die damaligen Standards<sup>2</sup> nicht auf das Gefährdungspotenzial eines Leichtbauroboters wie den DLR LWR III zutreffend sind [84]. Gleichzeitig wird festgehalten, dass die Ergebnisse im Rahmen des Euro NCAP-Crashtests auch mit der erheblich reduzierten Geschwindigkeit des Roboters gegenüber einem typischerweise evaluierten Verkehrsunfall zusammenhängen, da Kollisionen hier erst ab 10 m/s (36 km/h) durchgeführt werden und somit die herangezogenen Skalen nur bedingt eine Aussagekraft haben [77; 84; 100]. In den Versuchen des DLR wurden Kollisionen zwischen Mensch und Roboter bis maximal 2 m/s untersucht. Daher ist eine Evaluierung auf Basis der Verfahren nur bedingt möglich und aussagekräftig und in der industriellen Praxis nicht umsetzbar.

In weiteren Veröffentlichungen werden Schlussfolgerungen für das künftige Design und den Einsatz von kollaborierenden Robotern thematisiert, welche dem Ansatz dieser Forschungsarbeit zugrunde gelegt werden [102–104]. Gerade im Hinblick auf das Gefährdungspotenzial durch die Robotermaße, die entsprechenden Achspositionen und die vorhandenen Gelenks- bzw. TCP-Geschwindigkeiten liefern die Untersuchungen des DLR eine wichtige Grundlage für die normative und industrielle Umsetzung der Gefährdungsanalyse von kollaborierenden Robotern. Sie leisten damit einen wesentlichen Beitrag für die in dieser Arbeit entwickelte Methodik.

### **2.5.2 Sicherheitstechnische Abnahme von MRI-Arbeitsplätzen durch die Berufsgenossenschaft**

Die Berufsgenossenschaft Holz und Metall (BGHM) und das Institut für Arbeitsschutz (IFA) der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV) entwickelten ebenfalls ein Vorgehen zur Beurteilung der Sicherheit von kollaborierenden Arbeitsplätzen auf Basis der bereits vorgestellten DIN EN ISO 12100, DIN EN ISO 10218-1/2 und ISO TS 15066 (vgl. Abschnitt 2.3). Die Forschungsarbeit fokussiert unterschiedliche Facetten. Zum einen steht die Finalisierung der ISO TS 15066 und der darin enthaltenen Grenzwerte im Mittelpunkt der Arbeit, des Weiteren werden geeignete Messverfahren und Vorgehensweisen entwickelt, um die in der ISO TS 15066 enthaltenen Anforderungen in der industriellen Praxis umsetzen zu können.

Im Hinblick auf den biofidelen Körperatlas befassen sich verschiedene Institute im Auftrag des IFA und der DGUV mit der Ermittlung von Grenzwerten. Zunächst wurden für die BGIA-Empfehlung von 2009 Grenzwerte, abgeleitet aus der Literatur der Unfallforschung, herangezogen [20; 24; 27]. Aufbauend

---

<sup>2</sup> Geltende Normative Standards im Jahre 2005/2006

wurden ab 2010 durch die Ethikkommission genehmigte Probandenversuche unternommen. Drei wesentliche Projekte sollen hierzu genannt werden.

Das Institut Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin der Universität Mainz untersuchte bis 2014 unter dem Projektnamen „Schmerzschiwellenkataster“ an 100 Testpersonen an 29 unterschiedlichen Körperstellen Kräfteinwirkungen, um Schmerzschiwellen für den biofidelen Körperatlas abzuleiten [29; 31; 88; 92]. Diese Ergebnisse erweitern die Recherchen, welche der BGIA-Empfehlung zugrunde liegen, und die differenzierte Betrachtung der einzelnen Körperregionen.

Am Fraunhofer IFF wurde eine Studie zur „Bestimmung des Trägheitseinflusses bei Mensch-Roboter-Kollisionen“ durchgeführt, welche den Zusammenhang zwischen einer klemmenden Kollision und einem freien Stoß in einer Korrekturfunktion abbilden soll [53; 90; 91; 105; 106]. Nur der klemmende Stoß ist messtechnisch zuverlässig erfassbar, sodass für den freien Stoß die Messwerte abhängig von der Körperhaltung und der Masse umgerechnet werden müssen. Zielsetzung war eine empirische Erforschung der Grundlagen an 12 Probanden [90].

Im dritten Projekt befasst sich das Fraunhofer IFF gemeinsam mit der Otto-von-Guericke-Universitätsklinik Magdeburg mit einer „Studie zur experimentellen Bestimmung der biomechanischen Belastungsgrenzen bei Mensch-Roboter-Kollisionen“ [105; 107]. Ziel ist die experimentelle Untersuchung von Schmerz- bzw. Verletzungsschiwellen. Testpersonen werden mittels einer Pendelvorrichtung mit Kräften solange beaufschlagt, bis leichte Symptome einer beginnenden Verletzung auftreten. Die Abbildung 2-18 zeigt das zweistufige Risikokzept im Hinblick auf die Belastung des Menschen (Pain Level, Injury Level) und den Versuchsaufbau am Fraunhofer IFF [107; 108].



Abbildung 2-18: Zweistufiges Risikokzept des IFA im Hinblick auf mögliche Grenzwerte, rechts Versuchsaufbau des Fraunhofer IFF zur experimentellen Ermittlung von Grenzwerten [29; 108]

Neben der experimentellen Untersuchung von Schmerz- bzw. Verletzungsschiwellen wird die Integration der Sicherheitsaspekte in den Planungsprozess ebenfalls am Fraunhofer IFF untersucht. Das Planungstool „Computer Aided Safety“ (CAS) verfolgt den Ansatz, die unterschiedlichen Kollaborationsarten der MRI in den Planungsprozess zu integrieren [109–111]. Dabei wird durch eine Verknüpfung der CAS-Anwendung mit Simulationen von MRI-Arbeitsplätzen der Planungsprozess aus sicherheitstechnischer Perspektive unterstützt. Die CAS-Module fokussieren dabei unterschiedliche Ausprägungen im Hinblick auf die möglichen Kollaborationsarten; so stellt bspw. das Modul für die sichere Abstandsüberwachung eine Vermeidung einer Kollision zwischen dem Robotersystem und dem Anwender sicher [110]. Das Modul für kraft- und leistungsbeschränkte Leichtbaurobotersysteme befindet sich derzeit in der Entwicklung [112].

In einem weiteren Projekt mit dem Titel „Digitale Gefahrenprävention für kollaborative Roboterarbeitsplätze mithilfe einer webbasierten Planungshilfe“ entwickelt das Fraunhofer IFF im Auftrag der

BGHM eine Methodik zur Integration der Sicherheitsanforderungen der ISO TS 15066 in den Planungsprozess [113]. Dabei wird der Ansatz verfolgt, durch eine Begrenzung der Geschwindigkeit die Vorgaben der ISO TS 15066 im Hinblick auf die auftretenden Kollisionskräfte einzuhalten. Der Projektabschluss ist für das Jahr 2019 geplant [113].

Am IFA wird die messtechnische Erfassung einer Kollision zwischen Mensch und Roboter näher untersucht. Hierzu wurde das KDMG-KOLROBOT-Messgerät (KDMG – Kraft-Druck-Messgerät) entwickelt, welches auf Basis von Verformungsmodulen die entsprechende Körperregion des Menschen nachbilden kann und so eine differenzierte Betrachtung der einzelnen Körperteile erlaubt [70; 93; 96]. Gemessen werden durch das Messgerät die maximale einwirkende Kraft auf die jeweilige Körperstelle und die auftretende Flächenpressung. Die Abbildung 2-19 zeigt den Aufbau des KDMG-KOLROBOT-Messgerät. Durch die Kompressionselemente KK1 (Dämpfungselement) und KK2 (Feder) kann die jeweilige Körperkompressionskonstante der Tabelle 2-3 (siehe Abschnitt 2.3.3) nachgebildet werden [93]. Die erfassten Werte können zudem mit den festgelegten Grenzwerten verglichen werden, um so zu einer geeigneten Risikoeinschätzung zu gelangen [19; 24; 59; 87]. Wesentlich für eine reproduzierbare Messung sind die feste Positionierung und die exakte Ausrichtung des Messgerätes im Kollaborationsraum des Roboters [19; 21].

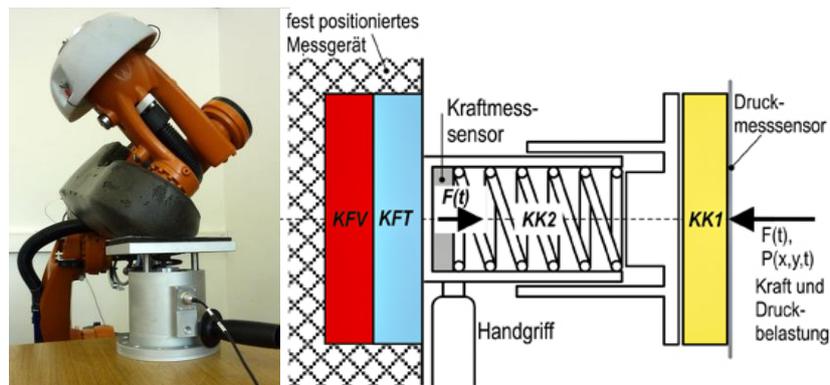


Abbildung 2-19: Aufbau des KDMG-KOLROBOT-Messgerätes zur Erfassung von Kollisionskräften [70]

Das KDMG-KOLROBOT-Messsystem wurde für die Anwendung in der industriellen Praxis entwickelt und wird durch einen Lizenznehmer gefertigt [96]. Zugleich wurden bereits mehrere Anlagen durch die BGHM wie auch das IFA anhand des gezeigten Gerätes evaluiert und zertifiziert [19].

Aus der Arbeit des IFA lassen sich wesentliche Einflüsse auf die Ergebnisse der biomechanischen Kräfteerfassung in der MRI festhalten. Im Hinblick auf die maximal auftretenden Kräfte stellen sich die Auftreffgeschwindigkeit des Prüfkörpers (Roboter bzw. Roboterwerkzeug) auf das Messgerät und die Begrenzung der Kraft des Roboters als Haupteinflussfaktoren dar [24; 87]. Die mechanische Beschaffenheit der Prüfkörper hat ebenfalls für die Flächenpressung eine wesentliche Bedeutung [87; 89]. Scharfe Kanten bzw. kleine Kollisionsflächen haben hinsichtlich der auftretenden Flächenpressung hohe punktuelle Druckbelastungen zur Folge. Um die Anforderungen an die Grenzwerte für die mechanische Beanspruchung des Menschen zu erfüllen, wird zudem auf die entsprechende Parametrierung des Sicherheitskontrollers in der Steuerung des Roboters verwiesen [24; 87].

Das Vorgehen zur sicherheitstechnischen Beurteilung von kollaborierenden Anlagen entspricht dem der DIN EN ISO 12100. Die Risikobeurteilung umfasst die Betrachtung des Kollaborationsraumes und enthält Szenarien möglicher Kollisionen des Menschen mit dem Roboter. Zu berücksichtigen sind die exponierten Extremitäten des Menschen, um den Umfang der zu erfolgenden Messungen festzulegen. Bzgl. der Identifikation möglicher Gefahrenstellen wird auf Experten verwiesen. Es sind mögliche Beispiele für eine Ableitung von Gefahrenstellen genannt [21; 87]. Wesentlich stellt sich die Analyse des

Arbeitsablaufs der Anlage dar. So sind mögliche Gefahrenmomente durch Scherungen bzw. Quetschungen anhand der Arbeitsaufgabe abzuleiten. Zusätzlich wird festgelegt, dass ergonomische Aspekte der Gestaltung des Kollaborationsraumes und der Bahnplanung des Roboters mit berücksichtigt werden müssen. Zielsetzung ist es, den Kollaborationsraum auf ein Minimum zu beschränken und das Risiko für den menschlichen Kollaborationspartner zu minimieren.

In den Veröffentlichungen der BGHM und des IFA sind wesentliche Elemente zur sicherheitstechnischen Beurteilung von Anlagenteilen enthalten. Die Erarbeitung eines geeigneten Messverfahrens und die Erforschung praxisgerechter Grenzwerte zur Beurteilung des physischen Kontakts zwischen Mensch und Roboter in der MRI liefern einen wesentlichen Beitrag für die industrielle Umsetzung der ISO TS 15066.

### 2.5.3 Experimentell gestütztes Planungssystem der BTU Cottbus

In Zusammenarbeit mit der Daimler AG wurde am Lehrstuhl Automatisierungstechnik der BTU Cottbus-Senftberg ein Planungssystem erarbeitet, welche die sicherheitstechnische Beurteilung von MRI-Anlagen bereits im Planungsstadium zum Ziel hat [95]. Dabei standen im Mittelpunkt die Aspekte der Sicherheitsbetrachtung, abgeleitet aus den Anforderungen der DIN EN ISO 10218-1/2 und der ISO TS 15066. Sie sollten in einem virtuellen Planungsmodell abgebildet werden und bereits in der frühen Konzeptphase der Anlagenplanung berücksichtigt werden. Analog zum vorgestellten Phasenmodell der Anlagenplanung der BMW Group in Abschnitt 2.4.2 enthält der entwickelte Ansatz deckungsgleiche Anknüpfungspunkte hinsichtlich der Anlagenintegration von MRI-Anlagen in ein bestehendes Produktionssystem. Es wird ebenfalls auf die Notwendigkeit verwiesen, die sicherheitstechnische Beurteilung des geplanten MRI-Szenarios in die frühe Phase der Anlagenplanung zu integrieren, um die in der ISO TS 15066 geforderten Grenzwerte einzuhalten [21; 95]. Die Abbildung 2-20 zeigt den Bedarf eines frühzeitigen Bewertungsprozesses hinsichtlich der Beurteilung möglicher Kontaktszenarien zwischen Mensch und Maschine auf.

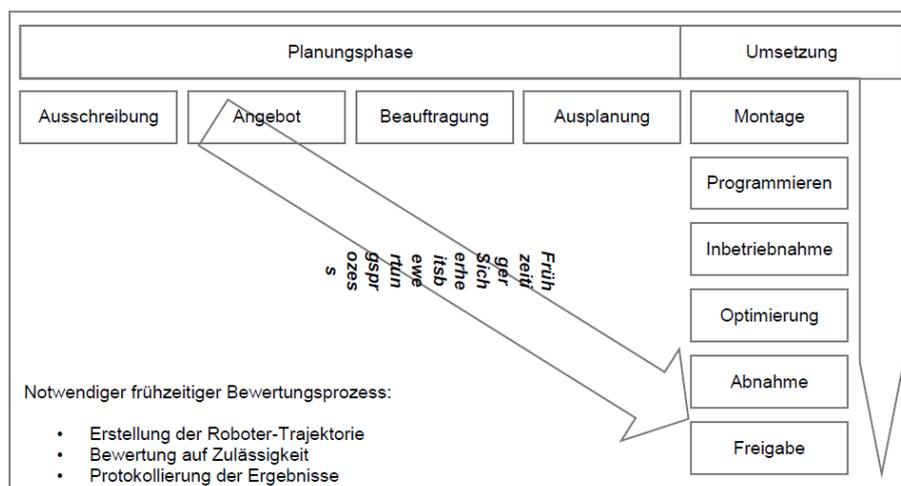


Abbildung 2-20: Erweiterung des Planungsprozesses für die sichere Mensch-Roboter-Kooperation nach [95]

Analog zum Phasenmodell der BMW Group (vgl. Abbildung 2-13) beschreibt der in Abbildung 2-20 dargestellte Ablauf den Beschaffungs- und Integrationsprozess von Roboteranlagen im Kontext der Industrie. Der Ablauf gliedert sich in eine Planungsphase und eine Umsetzungsphase der Anlage. Zielsetzung des entwickelten experimentell gestützten Planungssystems ist es, Sicherheitsaspekte kollaborie-

render Robotersysteme, welche im Rahmen der Anlagenabnahme und -freigabe erst final bewertet werden können, bereits in der Planungsphase zu berücksichtigen. Hierzu wurde ein Verfahren mit 5 Komponenten entwickelt, welches die Aspekte der ISO TS 15066 in den Mittelpunkt der Planung stellt. Dieses fünfteilige Vorgehen wird nachfolgend dargestellt und näher beschrieben:

### **1. Komponente: umgebungsbedingte Sicherheitsfunktion**

Im ersten Teil der Analyse werden die Einflüsse aus der Umgebung näher untersucht. Im Mittelpunkt stehen die Trajektorie des Roboters und das zuvor ausgeplante Anlagenlayout. Zielsetzung ist es, mögliche Gefährdungen, welche durch Scherungen und Quetschungen im Rahmen des Anlagenlayouts entstehen, zu identifizieren.

### **2. Komponente: roboterbedingte Sicherheitsfunktion**

Der zweite Teil der Methodik befasst sich mit den roboterbedingten Sicherheitsfunktionen. Wesentlichen Einfluss auf die auftretenden Kräfte im Rahmen einer Kollision haben die Sicherheitsfunktionen des Robotersystems. Aufgezeigt wird hierbei bspw. der Einfluss der Geschwindigkeit des Roboters auf die Kollisionskraft. Der Ansatz thematisiert als Haupteinflusskomponenten auf die Sicherheit die Geschwindigkeit des auftreffenden Kollisionskörpers, die Masse am TCP des Roboters, die Oberflächenbeschaffenheit bzw. die Geometrie des Kollisionskörpers und die Körperregion mit den zugehörigen Kompressionskonstanten der ISO TS 15066. Analog zu den in Abschnitt 2.5.2 beschriebenen Untersuchungen kommt ein biofideles Messgerät ähnlich der Konstruktion des KDMG-KOLROBOT-Messgeräts der BGHM zum Einsatz.

### **3. Komponente: Rauminduzierung für Sicherheitsräume**

Die 3. Komponente des Ansatzes befasst sich mit der eigentlichen Betrachtung der Sicherheit im Rahmen der MRI vor dem Hintergrund der ISO TS 15066. Es wird anhand eines Menschenmodells und dem Abgleich zu dem geplanten Arbeitsraum eine Korrelation zwischen der möglichen Exposition des Menschen und des Layouts der MRI-Anlage hergestellt. Hierbei wird ein rauminduziertes Modell gewählt, welches die Bahn in einzelne quadratische Blöcke zerlegt. Für jeden Block werden die entsprechenden Körperregionen zugeordnet und so eine Korrelation zwischen Mensch und Roboter hergestellt.

### **4. Komponente: Sicherheitsbewertungsfunktion**

Auf Basis der Zuordnung der 3. Komponente erfolgt in der 4. Komponente die eigentliche Bewertung der Sicherheitsräume. Grundlage bilden die erstellten rauminduzierten Blöcke. Es werden anhand der identifizierten Einflussfaktoren die roboterbedingten Sicherheitsfunktionen in eine Gesamtfunktion integriert und so eine Bewertung für den jeweiligen Punkt abgeleitet. Gleichzeitig werden kinematische Faktoren des Robotermodells mit einbezogen, welche im Rahmen des Ansatzes nicht näher und detaillierter beschrieben werden können. Daher erfolgt im Rahmen der 5. Komponente eine notwendige Überführung der Funktionen in eine reale Messung, welche den legislativen Kontext herstellt.

### **5. Komponente: Überführung in den legislativen Kontext**

Die erstellte Sicherheitsfunktion enthält die relevanten Informationen zur Überführung der jeweiligen Sicherheitsräume in eine reale Messung. Dies erfolgt in einer sogenannten Remote Robot Safety Cell (RRSC), in welcher die Messungen stattfinden. Wesentlich sind die Abbildung der erforderlichen Roboter-Hardware, die Nachbildung der Mechanik des Werkzeuges, die Übernahme des erforderlichen steuerungstechnischen Layouts der geplanten MRI-Anwendung, die messtechnische Erfassung nach dem normativen Stand der Technik und die Verwaltung und Bedienung der RRSC. Die Abbildung 2-21 zeigt den Aufbau der RRSC. Wesentliches Merkmal der Konstruktion ist die

Führung des Messmittels an einem Industrieroboter, um eine freie Positionierung entsprechend den Anforderungen der Bahn im Raum zu gewährleisten.

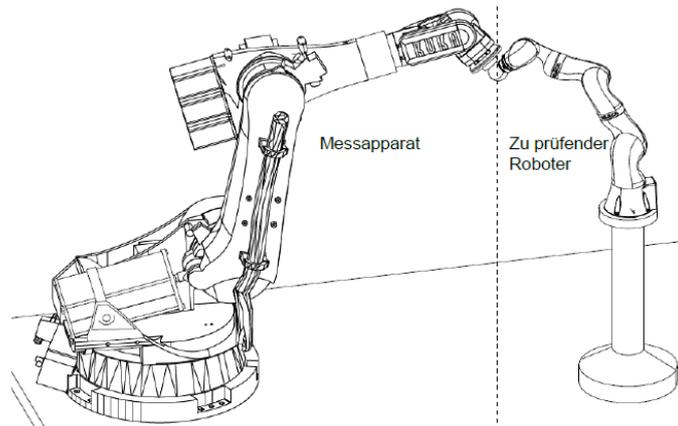


Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der RRSC [95]

Die eigentliche Messung folgt einer standardisierten Prozedur, um ein vergleichbares und reproduzierbares Messergebnis sicherzustellen.

Der aufgezeigte Ansatz bildet ein Vorgehen ab, mit welchem MRI-Anwendungen entlang der normativen Anforderungen bewertet werden können. Der Ansatz bildet gegenüber den aufgezeigten Verfahren in den Abschnitten 2.5.1 und 2.5.2 ein ganzheitliches Vorgehen ab, welches nicht nur eine punktuelle Bewertung einer Trajektorie in den Mittelpunkt stellt, sondern die Zielsetzung verfolgt, entlang der geplanten Aufgabe alle sicherheitsrelevanten Faktoren zu erfassen und zu bewerten. Die eigentliche Bewertung der Robotertrajektorie erfolgt abschließend in einer standardisierten Roboterzelle durch messtechnische Erfassung der Kollisions- bzw. Druckkräfte vor einem biofidelen Hintergrund der ISO TS 15066. Zugleich wurde der messtechnische Stand der Technik seitens der BGHM (Abschnitt 2.5.2) vollständig in das Vorgehen integriert. Die abschließende Bewertung der Sicherheit erfolgt über eine reale Messung in der RRSC. Festzuhalten bleibt, dass für den Ansatz eine umfassende Vorplanung der MRI-Anwendung notwendig ist und dass der Aufwand trotz eines standardisierten Vorgehens gerade bei der messtechnischen Erfassung in RRSC hoch ist. Gleichzeitig erfolgt eine frühzeitige detaillierte Betrachtung der Gefährdungen, wodurch die Zielsetzung der normativen Anforderungen im Planungsprozess gewährleistet werden kann.

## 2.5.4 Ableitung von relevanten Einflussfaktoren auf die Sicherheit

Aus den aufgezeigten Ansätzen zur sicherheitstechnischen Beurteilung von MRI-Anwendungen sollen abschließend die identifizierten Einflussfaktoren auf die Gestaltung sicherer MRI-Szenarien herausgearbeitet werden. Die Tabelle 2-4 zeigt die identifizierten Einflussfaktoren aus den aufgezeigten Ansätzen der vorangegangenen Abschnitte und der dargelegten Ausgangssituation.

Tabelle 2-4: Überblick über die identifizierten Einflussfaktoren aus den aufgezeigten Ansätzen der Wissenschaft und Industrie

Nr.	Einflussfaktor	Quelle				
		DLR	BGHM	BTU Cottbus	Normung	Roboter (Dokumentationen)
1	Geschwindigkeit	X	X	X	X	
2	Masse	X	X	X	X	
3	Werkzeuggestaltung		X	X	X	
4	Singularitäten	X				
5	Roboterregelung (Kollisionsüberwachung)	X	X			X
6	Körperregion (ISO TS 15066)	(X)	X	X	X	
7	Erfassung der Kollisionskräfte (Messverfahren)		X	X	X	
8	Identifikation von Gefährdungsstellen			X	X	X

Als wesentlicher Einflussfaktor stellt sich die **Geschwindigkeit** dar. Die kinetische Energie, welche das Robotersystem im Falle einer Kollision besitzt, ist erheblich durch die Geschwindigkeit der Achsen beeinflusst (vgl. Abschnitt 2.5.1). Je höher die Robotergeschwindigkeit im Kollisionspunkt ist, desto höher sind auch die auftretenden Kräfte. Zudem enthielt die vorhergehende Normungsschrift zur DIN EN ISO 10218-1/2 bereits eine Geschwindigkeitslimitierung, welche der Erhöhung der Sicherheit dienen sollte (siehe Abschnitt 2.3.2).

Im Hinblick auf die **Masse** legt bereits die Bauweise eines Leichtbauroboters deren Einfluss auf die Sicherheit nahe. Folgende Grundregel lässt sich festhalten: je leichter das Robotersystem, desto niedriger die vorhandene kinetische Energie bei einer Bewegung, desto niedriger die auftretende Kollisionskraft. Die Versuche durch das DLR haben Analysen der Roboter- und Gegenstandsmasse gehabt, welche ausführlich in Abschnitt 2.5.1 diskutiert worden sind. Es liegt nahe, dass der Effekt vor allem bei Leichtbaurobotersystemen zum Tragen kommt, da die Gesamtmasse erheblich durch zusätzlich angebrachte Masse am TCP beeinflusst wird. Zugleich berücksichtigt die jeweilige Regelung des Robotercontrollers an einem Leichtbauroboter die Massen (Massenangabe im Rahmen der Programmierung), sodass der Effekt teilweise überlagert wird.

Hinsichtlich der auftretenden Flächenpressung ist die **Gestaltung des Werkzeugs** am Robotersystem von zentraler Bedeutung. Es gilt vor allem eine möglichst große Kollisionsfläche zu schaffen, da sich so die auftretende Kollisionskraft auf einen größeren Bereich verteilt (vgl. Abschnitt 2.5.2). Die MRI-freundliche Gestaltung von Werkzeugen war bereits in der BGIA-Empfehlung 2009 enthalten und gab Empfehlungen im Hinblick auf Radien und Design von MRI-tauglichen Werkzeugen [20].

Der Umgang mit **Singularitäten** wurde ebenfalls durch das DLR betrachtet. Es zeigt sich, dass je nach Design der Sicherheitsfunktion die Betrachtung von Singularitäten einen erheblichen Einfluss auf die Sicherheit des Gesamtsystems hat. Es können in gewissen Grenzlagen Kollisionen nicht mehr zuverlässig erkannt werden, sodass es diese zu vermeiden gilt (vgl. Abschnitt 2.5.1).

Die eigentliche Gestaltung der **Kollisionsüberwachung** des Robotersystems ist wesentlich für die auftretende Kollisionskraft. In Abschnitt 2.2.2 wurde die Funktionsweise von Leichtbaurobotersystemen mit einer kraft- bzw. leistungsbeschränkten Absicherung vorgestellt. Hierbei wird die „Feinfühligkeit“

des Robotersystems erheblich durch dessen verbaute Sensorik und Steuerung beeinflusst. Häufig bieten Leichtbaurobotersysteme die Möglichkeit, im Rahmen der Sicherheitseinstellung Parametrierungen vorzunehmen. Zugleich bleibt jedoch festzuhalten, dass für den Anwender hier nur ein begrenzter Einblick besteht, da der Funktionsumfang differenzierend für den wirtschaftlichen Erfolg des Roboterproduktes und daher in der Regel nur bedingt transparent ist.

Die differenzierte Betrachtung der jeweiligen **Körperregion** ist wesentlicher Bestandteil der ISO TS 15066. Durch die biofidele Erfassung der Kollisionskräfte liegt es nahe, dass je nach Körperregion und Grenzwert der Einfluss auf die Sicherheit gegeben ist und berücksichtigt werden muss. Zudem liegt ebenfalls ein potenzieller Einfluss der biofidelen Messgröße auf die Kollisionserkennung des Roboters nahe, da die Gegenkraft, welche in den Roboter eingeleitet wird, durch die Körperkompressionskonstante beeinflusst wird.

Die **Identifikation von Gefährdungsstellen** ist wesentlich für die Beurteilung der Sicherheit von MRI-Anwendungen. Da eine vollumfängliche Messung aller Kombinationen nur mit großem Aufwand zu bewerkstelligen ist, gilt es nur die wesentlichen Gefährdungen zu identifizieren und zu beurteilen. Der Planungsansatz der BTU Cottbus liefert hier einen Lösungsvorschlag, welcher die ausgeplante Anlage analysiert und mögliche Gefährdungen kenntlich macht. Jedoch erfolgt die Beurteilung auf Basis einer physischen Messung in der vorgestellten RRSC, wodurch die Anzahl möglicher Messungen je Ansatz limitiert sein dürfte (siehe Abschnitt 2.5.3). Im Ansatz der BGHM obliegt die Identifikation von Gefährdungsstellen Expertenwissen bei der Abnahme der Anlage.

Die aufgezeigten Ansätze zeigen die wesentlichen Einflussgrößen auf die biomechanische Betrachtung von Kollisionsszenarien in der MRI. Aus der Darstellung der Tabelle 2-4 lässt sich festhalten, dass bisher keine systematische bzw. experimentelle Analyse der gezeigten Einflussgrößen vor dem Hintergrund der in Abschnitt 2.3.3 vorgestellten ISO TS 15066 erfolgt ist. Die gezeigten Ergebnisse zeigen den Einfluss der Größen teilweise auf, jedoch erfolgte eine systematische Analyse vor einem biofidelen Hintergrund aufgrund der zeitlichen Einordnung nur teilweise nach dem heute festgelegten Messverfahren. Die Aufstellungen der BTU Cottbus und der BGHM bzw. der Normung stellen einen Einfluss der entsprechenden Größen fest, enthalten jedoch keine experimentelle Analyse. An diesem Punkt setzt der experimentelle Teil der vorliegenden Forschungsarbeit in Kapitel 3 an. Die in Tabelle 2-4 aufgezeigten Einflussgrößen werden in der Folge durch eine theoretische Betrachtung der Kollisionsmechanik und eine experimentelle Analyse in einem Prüfstand systematisch auf ihr Verhalten und ihren Einfluss auf die Sicherheit analysiert. Zielsetzung ist es, die in der Kollisionsmechanik abgeleiteten Verhaltensmuster durch die Versuche zu bestätigen und so die Ausgangsbasis für ein datenbankgestütztes Rechenmodell zu bilden.

## 2.6 Zusammenfassung

Kapitel 2 dient der Darlegung der Ausgangssituation und soll zunächst einen Überblick über die Herausforderungen in der industriellen Umsetzung der MRI geben. Zu Beginn wurden die für diese Arbeit relevanten Begriffe aus dem Themengebiet der MRI eindeutig definiert. Im Weiteren wurde eine Unterscheidung im Hinblick auf das Arbeitssicherungskonzept der MRI eingeführt. Es wurde zwischen einem globalen und einem lokalen Absicherungskonzept unterschieden. Die globale Absicherung verfolgt den Ansatz, durch zusätzliche externe Sensorik einen kollaborierenden Arbeitsraum abzusichern, die lokale Absicherung setzt auf eine inhärent sichere Konstruktion, welche ohne zusätzliche externe

Sensorik auskommt. Es wurde aufgezeigt, dass sich für die globale Absicherung ein digitales Absicherungsszenario für den kollaborierenden Betrieb ergibt und daher heutige Sicherheitsstandards aus der Normung und dem klassischen Anlagenbau adaptiert werden können. Für lokal abgesicherte Systeme wurde die Möglichkeit einer Absicherung mit leistungs- und kraftbeschränkten Robotersystemen dargestellt. Es wird ein Kontakt zwischen Mensch und Roboter zugelassen, welcher jedoch in Art und Umfang detailliert spezifiziert ist. Der vorliegende Forschungsansatz fokussiert genau diese Art der Absicherung. Vor diesem Hintergrund wurden die relevanten Normen für den Absicherungsprozess von MRI-Anlagen erläutert, speziell wurde der Fokus auf die ISO TS 15066 gelegt, welche die Kontaktszenarien zwischen Mensch und Roboter konkretisiert. Im Anschluss wurden das Vorgehen zur Risikoanalyse und -bewertung zur Anlagenabsicherung nach DIN EN ISO 12100 dargestellt und die Anknüpfungspunkte für die Planung und den Betrieb von kollaborierenden Leichtbaurobotersystemen aufgezeigt. Bestandteil ist dabei die Bewertung von Kontaktszenarien nach der ISO TS 15066. Zugleich wurde der Integrationsprozess von MRI-Anlagen im industriellen Umfeld anhand des Phasenmodells der BMW Group vorgestellt und dabei die Herausforderungen für die industrielle Umsetzung von MRI-Anwendungen widerspiegelt. Anschließend wurden Ansätze zur Bewertung der Sicherheit in der MRI vorgestellt, fokussiert wurde die Bewertung eines Kontakts zwischen Mensch und Roboter. Zugleich wurden Verfahren aufgezeigt, welche eine industrielle Umsetzung von MRI-Anlagen zum Kern haben und die Umsetzung der ISO TS 15066 berücksichtigen. Abschließend wurden die relevanten Einflussfaktoren auf die Kollisionskraft und Flächenpressung bei einem Kontakt zwischen Mensch und Roboter herausgearbeitet, welche als Ausgangspunkt für die theoretische und experimentelle Betrachtung im Kapitel 3 dienen.

## 3 Dynamische Analyse und experimentelle Betrachtung von Einflussgrößen

### Inhalt Kapitel 3

---

3.1	Einteilung der Einflussgrößen .....	40
3.1.1	Zielgrößen .....	40
3.1.2	Steuergrößen .....	41
3.2	Theoretische Analyse .....	43
3.2.1	Kollisionsmechanik.....	43
3.2.2	Positionsbetrachtung (Hebelarmbetrachtung).....	45
3.3	Methodik .....	46
3.3.1	Robot Safety Evaluation Cell.....	47
3.3.2	Ergebnisinterpretation der erfassten Messdaten.....	53
3.3.3	Vorgehensweise der theoretischen und experimentellen Analyse .....	55
3.3.4	Versuchsplanung.....	59
3.4	Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Analyse.....	60
3.4.1	Kollisionsgeschwindigkeit .....	61
3.4.2	Zusatzmasse .....	63
3.4.3	Hebelarmbetrachtung – Position des Leichtbauroboters.....	65
3.4.4	Trägheitsmoment – Position des Leichtbauroboters .....	70
3.4.5	Biofidele Messgröße – Federkonstante.....	72
3.4.6	Werkzeugdesign – Flächenpressung.....	74
3.5	Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Sicherheit .....	76
3.6	Zusammenfassung .....	80

---

*In Kapitel 3 werden die identifizierten Einflussgrößen auf die auftretenden Kollisionskräfte zwischen Mensch und Roboter in einem MRI-Szenario detailliert analysiert. Ausgehend von den in Kapitel 2 aufgezeigten Einflussgrößen auf die Sicherheit in der MRI gliedert sich das Kapitel in vier inhaltliche Abschnitte. Abschnitt 3.1 befasst sich mit der Einteilung der identifizierten Einflussfaktoren in einem systembasierten Ansatz hinsichtlich Steuer-, Stör- und Zielgrößen. Diese Einteilung bildet die Grundlage für die experimentelle Betrachtung in Abschnitt 3.4. Abschnitt 3.2 stellt die der experimentellen Betrachtung zugrunde gelegte Theorie aus der Dynamik näher vor. Im Weiteren werden in Abschnitt 3.3 der für die Analyse der Einflussgrößen entwickelte Prüfstand, die Robot Safety Evaluation Cell (RSEC), und die angewandte Methodik detailliert vorgestellt. Der Abschnitt 3.4 befasst sich mit der eigentlichen Betrachtung der festgelegten Steuergrößen auf die Zielgröße. Diese erfolgt in einer experimentellen Betrachtung in der RSEC und im Abgleich mit den Modellen und Annahmen der Dynamik. Ausgehend von den erarbeiteten Ergebnissen werden Gestaltungsempfehlungen für die Planung von MRI-Anlagen mit leistungs- und kraftbeschränkten Absicherungsfunktionen aufgezeigt. Abschnitt 3.6 fasst die erzielten Ergebnisse aus Kapitel 3 zusammen.*

### 3.1 Einteilung der Einflussgrößen

Die Sicherheitsfunktion im Falle einer Kollision zwischen Mensch und Roboter eines inhärent sicheren Leichtbaurobotersystems kann mithilfe eines Systemansatzes beschrieben werden [114; 115]. Es gilt die Einflussgrößen auf die Sicherheit des jeweiligen Robotersystems auf die Zielgrößen bzw. Anforderungen des sicheren Betriebs bzw. des Kontakts abzubilden. Der Systemansatz unterscheidet zwischen unterschiedlichen Systemparametern, welche in einer Abhängigkeit zueinander stehen [114; 115]. Es wird zwischen Ziel- und Einflussgrößen unterschieden. Die Einflussgrößen lassen sich im Weiteren in Steuer- und Störgrößen unterteilen. In der Abbildung 3-1 ist der Zusammenhang zwischen den einzelnen Parametern dargestellt.

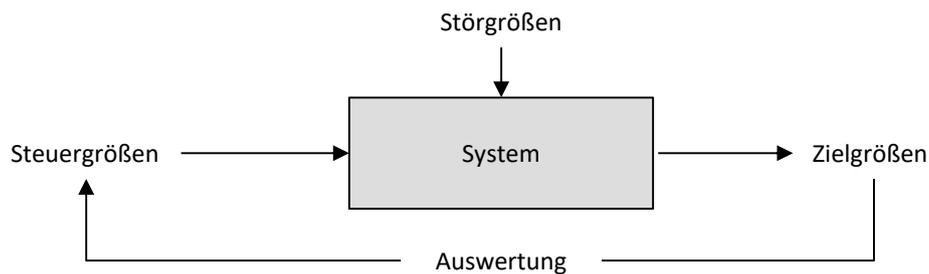


Abbildung 3-1: Zusammenhang zwischen Steuer-, Stör- und Zielgrößen in einem technischen System [114; 115]

Die Steuergrößen bilden die durch den Anwender einstellbaren Parameter ab und können variiert werden. Das System bildet die Eingangsparameter unter dem Einfluss von Störgrößen auf die entsprechenden Zielgrößen ab [114; 115]. Die Störgrößen beschreiben die durch den Anwender nicht beeinflussbaren Eingangsgrößen, welche jedoch den Systemzustand mit bestimmen. Über die Auswertung kann eine Beurteilung der Steuergröße ausgehend vom Zielzustand erfolgen bzw. durch die Variation der Steuergrößen der gewünschte Zielzustand erzielt werden. Im Mittelpunkt der Versuchsplanung steht die Erfassung der Zusammenhänge zwischen den Steuer- und den Zielgrößen [114; 115]. Dies erfolgt über die statistische Auswertung. Es gilt durch eine entsprechende Variation der Eingangsparameter das Wirkprinzip auf die festgelegte Zielgröße vollständig zu erfassen.

Für den sicheren Betrieb von kollaborierenden Leichtbaurobotersystemen mit Leistungs- und Kraftbeschränkung gilt es für den Kontakt zwischen Mensch und Roboter Grenzwerte einzuhalten (vgl. Abschnitt 2.3.3). Der sicherheitsgerichtete Teil der Robotersteuerung dient der Limitierung von Freiheitsgraden und Leistungen des Roboters, sodass durch die entsprechende Parametrierung das Einhalten der Grenzwerte zu gewährleisten ist. In Kapitel 2 wurden aus der Literatur und vorangegangenen Forschungsarbeiten Ziel- und Einflussgrößen abgeleitet, welche nachfolgend dem Systemansatz zugeordnet werden sollen und entsprechend in Ziel-, Steuer- und Störgrößen eingeteilt werden.

#### 3.1.1 Zielgrößen

Wesentlich für den sicheren kollaborierenden Betrieb ist der Einhalt der im Körperatlas der ISO TS 15066 festgelegten Grenzwerte für den Kontakt zwischen Mensch und Roboter. Hierbei gibt die technische Spezifikation unterschiedliche Grenzwerte für den klemmenden Kontakt und die freie Kollision je Körperregion vor [18]. Zugleich gilt es sowohl einen Grenzwert für die maximal auftretende Kraft als auch für die maximale Flächenpressung einzuhalten (vgl. Tabelle 2-3). Diese Grenzwerte müssen durch die Absicherung innerhalb der inhärent sicheren Konstruktion des Leichtbauroboters sichergestellt werden und bei Anlagenabnahme durch eine physische Messung nachgewiesen werden [21; 88; 89; 95]. Da

für den sicheren kollaborierenden Betrieb die Grenzwerte zu jedem Zeitpunkt eingehalten werden müssen, gilt es neben der physischen Messung und dem Einhalten der Grenzwerte des zu untersuchenden Messpunktes auch sicherzustellen, dass entlang der Trajektorie keine Abweichungen bzw. Risiken außer Acht gelassen werden [18; 89]. Dies kann bspw. bei Singularitäten wie unter Abschnitt 2.5.1 aufgezeigt der Fall sein. Daher werden nachfolgend folgende Zielgrößen für die weitere Betrachtung festhalten:

- **Maximal auftretende Kraft (klemmende/freie Kollision):**  
Als Zielgröße stellen sich die festgelegten Grenzwerte in der ISO TS 15066 mit der jeweils anzuwendenden Messkonfiguration für einen quasistatischen und einen transienten Kontakt dar.
- **Maximale auftretende Flächenpressung (klemmende/freie Kollision):**  
Da bei scharfkantigen Kollisionskörpern bereits bei relativ kleinen Kräften erhebliche Verletzungen die Folge sind, gilt es zudem einen Grenzwert für die maximale Flächenpressung einzuhalten. Analog der Kraftlimitierung wird zwischen einem quasistatischen und einem transienten Kontakt unterschieden. Zugleich steht die maximal auftretende Flächenpressung über die Kollisionsfläche in einer Abhängigkeit zur Kollisionskraft.

Nachdem die Zielgrößen der Sicherheitsbetrachtung einer Kollision zwischen Mensch und Roboter festgelegt worden sind, werden nachfolgend die Einflussgrößen festgelegt.

### 3.1.2 Steuergrößen

Die Einflussgrößen lassen sich wie erwähnt in Steuer- und Störgrößen einteilen. Die Steuergrößen stellen alle durch den Anwender beeinflussbaren Eingangsgrößen dar [114; 115]. Die übrigen durch das System bzw. durch die Systemgrenzen kommenden Eingangsgrößen werden unter den Störgrößen zusammengefasst [114; 115]. Die in Abschnitt 2.5.4 dargelegten Einflussgrößen bilden die Grundlage für die betrachteten Einflussgrößen auf die Kollisionskräfte in der MRI. Es werden die nachfolgenden Einflussgrößen als Steuergrößen festgelegt:

- **Geschwindigkeit des Prüfkörpers:**  
Die Geschwindigkeit der Roboterbewegung kann durch den Anwender in einem MRI-Szenario programmiert werden. Hierbei besteht die Möglichkeit, die Geschwindigkeit des TCP des Roboters festzulegen bzw. zu begrenzen. Analog zur Limitierung des TCP kann auch eine Limitierung der Achsgeschwindigkeit des Roboters erfolgen.
- **Masse des Werkzeuges:**  
Die Masse des Werkzeuges, welches an der Flansch des Roboters montiert ist, kann ebenfalls durch den Anwender je nach Aufgabe beeinflusst werden.
- **Position des Roboters:**  
Erweiternd zu den bereits aufgezeigten Herausforderungen im Hinblick auf die Singularität des Roboters lässt sich allgemein die Position des Roboters in dessen Arbeitsraum als Einflussgröße festhalten. Die Position wird dabei innerhalb der nachfolgenden Betrachtung im Konzeptansatz „des wirkenden Hebelarms je Roboterachse“ unter Berücksichtigung des Geschwindigkeitsvektors und der Position betrachtet (vgl. Abschnitt 3.2.2).
- **Biofidele Messgröße:**  
Die ISO TS 15066 legt im Rahmen der Festlegung der einzelnen Grenzwerte für jeden zu betrachtenden Körperbereich eine Kompressionskonstante fest, welche bei der Erfassung durch ein biofideles Messgerät entsprechend zu berücksichtigen ist. Dies geschieht mittels Federn und Kompressionskörpern im Messgerät (siehe Abschnitt 2.5.2 bzw. 3.3.1).

- **Design des Werkzeuges:**

Je nach Ausgestaltung und Design des Werkzeuges lässt sich die jeweilige Kollisionsfläche maximieren und somit die Zielgröße der Flächenpressung beeinflussen.

Die dargestellten Steuergrößen bilden die Einflussgrößen des Anwenders im Hinblick auf die festgelegten Zielgrößen für die Anlagenplanung und Konstruktion von MRI-Anlagen ab. Je nach Aufgabe, Ausgestaltung des Layouts bzw. Anforderung des Produktionsnetzwerkes ergeben sich Gestaltungsspielräume für den Anlagenkonstrukteur. Gleichzeitig werden auch Störgrößen festhalten, auf welche der Anwender nur bedingt Einfluss hat. Diese sind nachfolgend dargelegt:

- **Roboterkenwerte:**

Die durch das Robotersystem festgelegten Kenngrößen stellen für den Anwender zunächst Einflussgrößen dar, in welche nur ein bedingter Einblick möglich ist bzw. für welche nur bedingt Daten vorliegen. Dazu zählen:

- **Roboterregelung (Kollisionsüberwachung)<sup>3</sup>:**

Die detaillierte Funktionsweise der jeweiligen Sicherheitsfunktion innerhalb des Roboters stellt sich für den Anwender nur teilweise dar. Es bleibt festzuhalten, dass Roboterhersteller nicht alle Regelkreise und Funktionen ihrer Steuerung offenlegen, da diese Kerninhalte ihrer Produkte sind. Zugleich lassen sich bei verschiedenen Robotermodellen Einstellungen vornehmen, welche teilweise die Feinfühligkeit des Sicherheitssensors beeinflussen [82; 116].

- **Steifigkeit des Robotersystems:**

Die Steifigkeit des Robotersystems beeinflusst ebenfalls die festgelegten Zielgrößen. Die Steifigkeit kann ebenfalls nicht gesondert erfasst werden bzw. durch den Anwender beeinflusst werden.

- **Interne Parameter des Robotersystems:**

Die innerhalb des Roboters auftretenden Reibungen bzw. vorhandenen Widerstände innerhalb der Getriebe können nicht separat erfasst werden und werden daher als Störgrößen aufgeführt.

- **Erfassungssystem der Kollisionskräfte:**

Je nach Messsystem und dessen Positionierung können etwaige Störgrößen bei der Erfassung der Zielgrößen in Betracht kommen. Die möglichst steife, genaue und reproduzierbare Positionierung des Messmittels im Arbeitsraum des Roboters ist entscheidend, um etwaigen Abweichungen bei der Kollisionskraftermittlung vorzubeugen. Zugleich entstehen bei dem linear geführten Messmittel Reibungsverluste, welche ebenfalls die Zielgrößen beeinflussen. Auch die verwendeten Federn sind i.d.R. auf die Anforderung und Geometrie des biofidelen Messgerätes hin angepasste Sonderanfertigungen, sodass die Federrate minimal von den geforderten Kennwerten abweichen kann.

Die aufgezeigten Steuergrößen werden nachfolgend einer experimentellen Betrachtung in der „Robot Safety Evaluation Cell“ (RSEC) unterzogen und mit Modellen der Dynamik abgeglichen. Zielsetzung ist es, eine mathematische Beschreibung der Steuergröße auf den Wirkzusammenhang mit der Zielgröße zu erstellen und diese anschließend in einem datenbankbasierten Berechnungsmodell abzubilden. Dabei wird zunächst die Zielgröße der maximal zulässigen Kollisionskraft fokussiert. Die Berücksichtigung der Flächenpressung erfolgt nachgelagert durch die entsprechende Ableitung des Roboterwerkzeugdesigns. Die Abbildung 3-2 gibt einen Überblick über die identifizierten Ziel-, Steuer- und Störgrößen.

---

<sup>3</sup> Bei diversen Robotersystemen lassen sich die Kollisionsparameter in der Steuerung parametrieren [82; 116]. Je nach Parametrierung können diese Eingangsgrößen als Steuergröße untersucht werden.

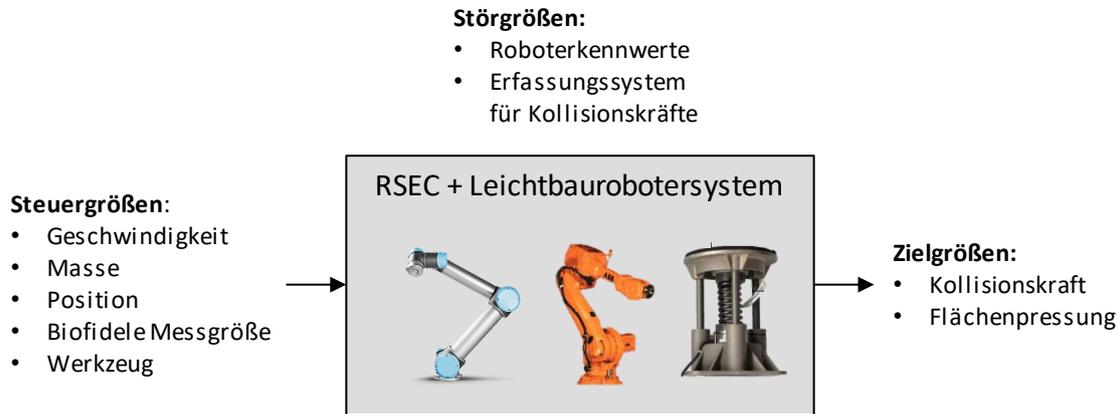


Abbildung 3-2: Festgelegte Steuer-, Stör- und Eingangsgrößen zur Evaluierung von Kollisionskräften

## 3.2 Theoretische Analyse

Dieser Abschnitt befasst sich mit den Grundüberlegungen der Mechanik und Dynamik, welche dem biofidelen Messansatz zu Grunde gelegt werden. So gilt es die Energieumwandlung der kinetischen Energie des Roboters in eine messbare Kollisionskraft anhand der Impulserhaltung herzuleiten. Zusätzlich wird eine Betrachtung der Roboterposition mittels des auftretenden Hebelarms je Achse des Leichtbauroboters eingeführt, anhand derer eine Berücksichtigung der aktuellen Achsposition des Roboters erfolgt. Anschließend erfolgt auf Basis der ermittelten Zusammenhänge eine Versuchsplanung für die experimentelle Analyse der Einflussgrößen.

### 3.2.1 Kollisionsmechanik

Der biofidele Messansatz der ISO TS 15066 hat zum Ziel, die jeweils betroffene Körperregion des Menschen bestmöglich nachzustellen und so die einwirkenden Kräfte unter Berücksichtigung der Beschaffenheit der Körperregion zu erfassen. Hierzu wurde durch die ISO TS 15066 neben den Grenzwerten für die maximale Kollisionskraft und die maximale Flächenpressung eine Körperkompressionskonstante eingeführt, welche die Körperregion durch eine Federkonstante abbildet. Die Feder wird im Rahmen des biofidelen Messansatzes unter die linear geführte Kollisionsfläche montiert, die entsprechend die Kraft auf einen Kraftsensor überträgt (vgl. Abschnitt 2.5.2). Für eine korrekte Abbildung der Körperregion mittels der Federkonstanten und für eine vollständige Erfassung der Kollisionskraft ist es wichtig, eine senkrechte Kollision mit dem Messgerät darzustellen [19; 70; 87; 93].

Die Kollision selbst kann über den Ansatz eines elastischen Stoßes untersucht werden. Der Ansatz wurde bereits in veröffentlichten Arbeiten über die Betrachtung der auftretenden Energien erläutert [95; 117]. Die Betrachtung der Kollision gliedert sich in zwei Abschnitte. Im ersten Abschnitt wird das Auftreffen des Kollisionskörpers auf die Kollisionsfläche des Messgerätes betrachtet. Die Abbildung 3-3 zeigt den theoretischen Ablauf eines elastischen Stoßes.

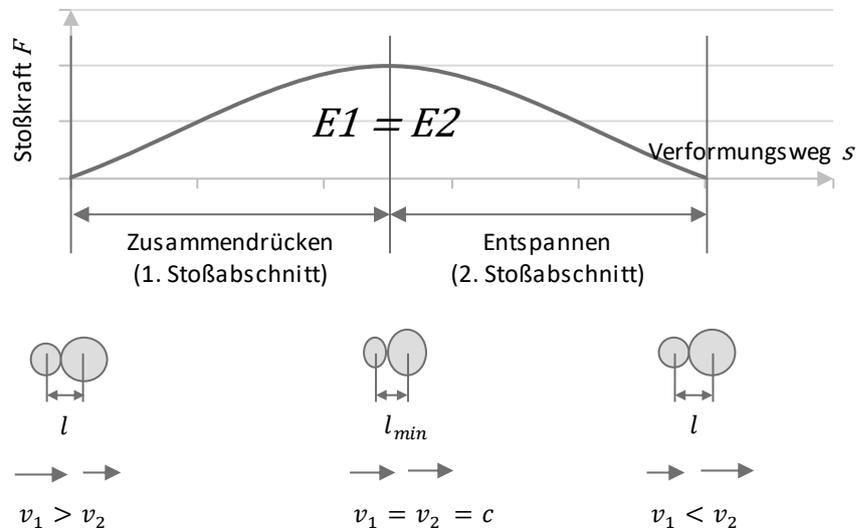


Abbildung 3-3: Theoretischer Ablauf eines elastischen Stoßes zweier Körper,  $v_1$  Geschwindigkeit des Körpers 1,  $v_2$  Geschwindigkeit des Körpers 2,  $c$  Geschwindigkeit beider Körper am Ende der elastischen Kompression nach [118].

Das Auftreffen des Kollisionskörpers kann als elastischer Stoß betrachtet werden, da sich beide Körper nicht plastisch verformen [118]. Der Impaktor wie auch das Kollisionsmessgerät sind derart konstruiert, dass die in der ISO TS 15066 festgelegten Maximalkräfte keine plastischen Verformungen hervorrufen. Die kinetische Energie des Roboters wird verlustfrei auf die Kollisionsfläche des Kollisionsmessgerätes übertragen. Dieses verformt sich solange elastisch über die linear verbaute Feder, bis der Abstand beider Körper zueinander minimal geworden ist. Die notwendige Energie wird dabei dem Impaktor bzw. dem Robotersystem entzogen, da dieser zu Beginn die höhere kinetische Energie besitzt. Am Ende der elastischen Kompression bewegen sich beide Körper mit derselben Geschwindigkeit  $c$  in dieselbe Richtung. Nach dem Impulserhaltungsgesetz bleiben die Impulse vor dem Stoß (I) und nach dem Stoß (II) gleich:

$$(I) \qquad (II)$$

$$m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 c + m_2 c \qquad (3-1)$$

$$c = \frac{m_1 v_1 + m_2 v_2}{m_1 + m_2} \qquad (3-2)$$

Davon ausgehend, dass die Masse des Impaktors bzw. des Robotersystems im Kollisionspunkt wesentlich höher ist als die Masse der Kollisionsfläche ( $m_1 \gg m_2$ ) und die Kollisionsfläche sich zum Zeitpunkt der Berührung in Ruhe befindet ( $v_2 = 0$ ), ergibt sich:

$$c = \frac{m_1}{m_1 + m_2} * v_1 \approx v_1 \qquad (3-3)$$

Entsprechend der Theorie des elastischen Stoßes würden sich die beiden Körper wieder trennen und mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten  $c_1$  und  $c_2$  weiter bewegen [117; 118]. Die Fortsetzung der Bewegung wird jedoch durch die im Kollisionsgerät verbaute Feder beeinflusst. Dabei wird die vorhandene kinetische Energie  $E_{kin}$  in die potentielle Energie  $E_{pot,Feder}$  der Feder umgewandelt. Für die kinetische Energie gilt:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m v^2 \qquad (3-4)$$

Für die potenzielle Energie  $E_{\text{pot,Feder}}$  mit der Federkonstanten  $k$  und der Federauslenkung  $\Delta l$  gilt:

$$E_{\text{pot,Feder}} = \frac{1}{2} k \Delta l^2 \quad (3-5)$$

Durch Gleichsetzen von (3-4) und (3-5) ergibt sich:

$$E_{\text{kin}} = \frac{1}{2} m \Delta v^2 = \frac{1}{2} k \Delta l^2 = E_{\text{pot,Feder}} \quad (3-6)$$

Das Delta  $\Delta v$  beschreibt die durch die Federlänge aufgenommene Geschwindigkeit. Es zeigt sich, dass die Federauslenkung maximal ist, wenn die Geschwindigkeit  $v = 0$  und somit  $\Delta v = v_p$  ist (Geschwindigkeit  $v_p$  beschreibt die vorhandene Geschwindigkeit des Leichtbaurobotersystems im Kollisionspunkt  $P$ ). In diesem Punkt ist die gesamte kinetische Energie des Systems in die potenzielle Federenergie umgewandelt. Um die Feder in dieser Position zu halten, muss auf der Gegenseite die gleiche Kraft aufgebracht werden. Dabei steht die Feder auf dem Kraft-Momenten-Sensor des biofidelen Messgerätes, welcher die anliegende Federkraft und somit die Kollisionskraft erfasst. Es gilt:

$$F_{\text{Feder}} = F_{\text{KMS}} = F_{\text{Kollision}} = k \Delta l \quad (3-7)$$

Aus (3-4), (3-6) und (3-7) ergibt sich:

$$F_{\text{Kollision}} = \sqrt{k m} v_p \quad (3-8)$$

Schlussfolgernd zeigt sich, dass der biofidele Ansatz im Hinblick auf die auftretende Kollisionskraft durch die entsprechende Federkonstante der Körperregion beeinflusst wird. Die kinetische Energie kann über den Ansatz des elastischen Stoßes und über die Energieerhaltung in eine auftretende Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  umgerechnet werden, welche beim Erliegen der Roboterbewegung maximal wird. Ableitend aus der Kollisionsmechanik ist es zudem entscheidend, eine entsprechende Positionierung des Messgerätes sicherzustellen. Im Besonderen ist ein Anschlag vorzusehen, um sicherzustellen, dass die gesamte kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  in die potenzielle Energie der Feder  $E_{\text{pot,Feder}}$  gewandelt wird. Durch eine unzureichend sichergestellte Befestigung wird das Messergebnis zuungunsten eines niedrigeren Messwertes verfälscht und die erzielten Ergebnisse sind nicht aussagefähig.

### 3.2.2 Positionsbetrachtung (Hebelarmbetrachtung)

Aufgrund der Bauweise der Sicherheitsarchitektur von inhärent sicheren Leichtbaurobotersystemen leitet sich grundsätzlich die Frage nach dem Einfluss der vorhandenen Achsstellung zum Zeitpunkt der Kollision ab. Die derzeit verfügbaren Robotersysteme erkennen die Kollision über die Abweichung der geplanten Regelung (Universal Robots UR10) bzw. berechneten Kraft (KUKA LBR iiwa) in den jeweiligen Drehachsen. Die extern eingeleitete Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  wird daher auf Basis der jeweiligen Richtung in den einzelnen Gelenken als ein Momentenanstieg in der jeweiligen Achse erkannt. Dieses externe Moment wird in der Folge als  $M_{\text{Kollision,A}_i}$  beschrieben, wobei der Index  $A_i$  die jeweilige Achse des Leichtbaurobotersystems beschreibt. Grundsätzlich gilt, dass sobald das externe Moment  $M_{\text{Kollision,A}_i}$  einen gewissen Grenzwert  $M_{\text{Grenz,A}_i}$  für die jeweilige Achse  $A_i$  übersteigt, das Sicherheitssystem des Leichtbauroboters diesen Kraftanstieg als Kollision wertet. Dies kann an jeder möglichen Achse des Leichtbaurobotersystems erfolgen, an welcher das Moment  $M_{\text{Kollision,A}_i}$  sichtbar wird.

$$M_{\text{Kollision,A}_i} > M_{\text{Grenz,A}_i} \rightarrow \text{Kollision erkannt} \quad (3-9)$$

Der Grenzwert  $M_{\text{Grenz,A}_i}$  für die jeweilige Achse wird durch die Sicherheitsarchitektur des Leichtbaurobotersystems ermittelt, die jeweilige Parametrierung des Sicherheitskontrollers durch den Anwender

kann dabei einen Einfluss auf die Höhe des Grenzwertes haben. Die in dieser Arbeit erfolgten Versuche wurden mit der durch die Roboterhersteller vorgegebenen Grundeinstellung vollzogen, um eine Vergleichbarkeit zu gewährleisten. In der Folge soll das auftretende Kollisionsmoment  $M_{\text{Kollision,Ai}}$  näher betrachtet werden. Wesentlich wird das Kollisionsmoment  $M_{\text{Kollision,Ai}}$  durch den Hebelarm  $d_{\text{Ai}}$  und die auftretende Kraft  $F_{\text{Kollision,Ai(XY)}}$  der jeweiligen Achse beeinflusst. Die Kraft  $F_{\text{Kollision,Ai(XY)}}$  beschreibt den Teil des Kraftvektors der auftretenden Kollisionskraft  $\vec{F}_{\text{Kollision}}$  in der XY-Ebene des Achskoordinatensystems der jeweiligen Achse  $A_i$  (Z-Achse stellt in der Achse  $A_i$  immer die Drehrichtung der Roboterachse dar). Es lässt sich folgender Zusammenhang festhalten:

$$M_{\text{Kollision,Ai}} = d_{\text{Ai}} * F_{\text{Kollision,Ai(XY)}} \quad (3-10)$$

Es zeigt sich, dass vorbehaltlich der Veränderung des kritischen Grenzmomentes  $M_{\text{Grenz,Ai}}$  in Abhängigkeit von der Achsstellung und Achsgeschwindigkeit die Höhe des Kollisionsmomentes  $M_{\text{Kollision,Ai}}$  entscheidend durch den anliegenden Hebelarm  $d_{\text{Ai}}$  beeinflusst wird. Bei der Betrachtung des Bezugs zwischen der auftretenden Kollisionskraft und dem auftretenden Moment  $M_{\text{Ai,Kollision}}$  kann festgehalten werden:

$$F_{\text{Kollision}} \sim F_{\text{Kollision,Ai(XY)}} \sim \frac{1}{d_{\text{Ai}}} M_{\text{Kollision,Ai}} > \frac{1}{d_{\text{Ai}}} M_{\text{Grenz,Ai}} \quad (3-11)$$

Ausgehend von einem konstanten Grenzmoment  $M_{\text{Grenz,Ai}}$  zum Zeitpunkt der Kollision kann ein polynomialer Zusammenhang zwischen dem Hebelarm  $d_{\text{Ai}}$  und der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  festgehalten werden:

$$F_{\text{Kollision}} \sim \frac{1}{d_{\text{Ai}}} \quad (3-12)$$

Dieser Zusammenhang und die Herleitung der Kraft  $F_{\text{Kollision,Ai(XY)}}$  über den Bewegungsvektor erfolgen detailliert in Abschnitt 3.4.3.

Auf die detaillierte Betrachtung des Trägheitsmomentes aufgrund der zwei- bzw. mehrdeutigen Achsstellung von Leichtbaurobotern wird an dieser Stelle verzichtet, da die genaue Massenverteilung der einzelnen Komponenten der betrachteten Robotersysteme für diese Arbeit nicht zur Verfügung stand. Die theoretische Analyse erfolgt bei der Betrachtung der erzielten Ergebnisse in Abschnitt 3.4.4. Die Untersuchung des Trägheitsmomentes findet jedoch zugleich Eingang in die Versuchsplanung in Abschnitt 3.3.4.

### 3.3 Methodik

Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit der angewandten Methodik für die Analyse der aufgezeigten Einflussgrößen. Im Mittelpunkt steht die Untersuchung der festgelegten Steuergrößen aus Abschnitt 3.1.2 auf die Zielgrößen. Der Versuchsaufbau, die „Robot Safety Evaluation Cell“ (RSEC), wird in Abschnitt 3.3.1 vorgestellt. In Abschnitt 3.3.2 wird auf die während des Versuchs aufgezeichneten Daten und die nachfolgende Auswertung eingegangen. Abschnitt 3.3.3 befasst sich mit dem erarbeiteten Vorgehen im Hinblick auf die theoretische und experimentelle Analyse der einzelnen Steuergrößen. Abschließend wird in Abschnitt 3.3.4 auf die Versuchsplanung für die experimentelle Betrachtung der Steuergrößen eingegangen.

### 3.3.1 Robot Safety Evaluation Cell

Die „Robot Safety Evaluation Cell“ (RSEC) dient der experimentellen Betrachtung der identifizierten Steuergrößen auf die festgelegten Zielgrößen. Bei der RSEC handelt es sich um einen robotergestützten Prüfstand, welcher eine schlanke und hinreichend genaue Analyse der Einflussgrößen gewährleistet. Die RSEC fokussiert zunächst die Zielgröße der Kollisionskraft, da die Flächenpressung für eine generische Untersuchung von der Geometrie des Roboterwerkzeuges abhängt und diese durch den jeweiligen Anwendungsfall beeinflusst ist. Eine Analyse der auftretenden Flächenpressung ist mit der RSEC möglich, bedarf aber einer gesonderten anwendungsbezogenen Betrachtung. Die Abbildung 3-4 zeigt die virtuelle Darstellung der RSEC im Konstruktionsprogramm Catia V5.

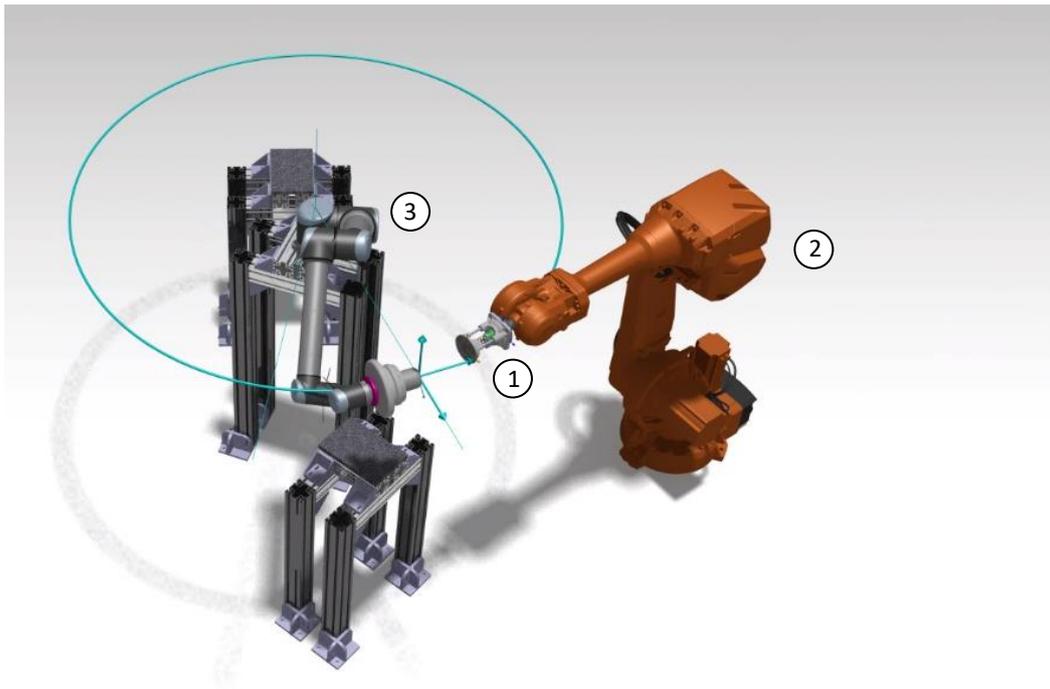


Abbildung 3-4: Virtuelle Darstellung der RSEC zur Ermittlung und Evaluierung von Kollisionskräften

Die RSEC besteht aus vier Kernkomponenten, welche durch eine Softwarearchitektur miteinander verknüpft sind und über eine zentrale Steuerung angesteuert werden. Das Messgerät (1) ist an einen Industrieroboter des Typs ABB IRB 46-4500 (2) montiert, welcher ortsfest im Kern der RSEC positioniert ist. Zugleich besitzt die RSEC verschiedene Montagepunkte für die zu prüfenden Leichtbaurobotersysteme (3), um eine möglichst umfassende und vollständige Analyse der Systeme sicherzustellen. Die Montagepunkte sind zentral vermessen und ebenfalls ortsfest in der Zelle montiert. Die Montage der Leichtbaurobotersysteme erfolgt über eine Adapterplatte an den jeweiligen Montagepunkten und stellt eine exakte und reproduzierbare Positionierung dieser sicher. Über eine übergeordnete Steuerung (nicht dargestellt) werden alle Komponenten miteinander verknüpft, sodass ein automatisierter Ablauf der Messung gewährleistet ist.

Die Komponenten in der RSEC sind alle zueinander vermessen. So lassen sich die Messpositionen bzw. Bewegungsvektoren mittels Koordinatentransformationen in die jeweiligen Koordinatensysteme der Komponenten umrechnen. Die Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die vorhandenen Koordinatensysteme in der RSEC.

Tabelle 3-1: Überblick über die in der RSEC festgelegten Koordinatensysteme

Koordinatensysteme	Bezeichnung
$KS_{LBR\_Base}$	Base Koordinatensystem des Leichtbauroboters
$KS_{LBR\_Ai}$	Koordinatensystem in Achse $A_i$ des Leichtbauroboters ( $i$ beschreibt die Anzahl der Achsen)
$KS_{LBR\_ATCP}$	Koordinatensystem am TCP des Leichtbauroboters (Offsetangabe in Steuerung)
$KS_{MR\_Base}$	Base Koordinatensystem des Messroboters (MR)
$KS_{MR\_TCP}$	TCP Koordinatensystem des Messroboters (MR)
$KS_{MR\_MT}$	Messtool Koordinatensystem am Messroboter (MR), Mittelpunkt der Kollisionsplatte mit Z in Richtung der Feder
$KS_{MPj}$	Messposition $j$ : Montageposition des Leichtbaurobotersystems innerhalb der RSEC

Die Konfiguration eines Messpunktes folgt dabei einem festgelegten Vorgehen. Zunächst wird der Messpunkt durch den Anwender identifiziert und festgelegt. Die eigentliche Kollisionsfläche wird anhand der Bewegung identifiziert und am Leichtbauroboter festgelegt. Für eine Messung wird das Messgerät auf die identifizierte Kollisionsfläche ausgerichtet. Die Positionierung wird aus der geplanten Trajektorie des Leichtbauroboters abgeleitet. Eine Trajektorie lässt sich durch mindestens zwei Bahnpunkte beschreiben. Die geplante Bahn zwischen den Bahnpunkten hängt von der programmierten Bewegungsart des Leichtbauroboters ab. In der RSEC sind bei einem Kollisionsversuch die in Tabelle 3-2 aufgeführten Variablen bekannte Größen und dienen der Ableitung der Messkonfiguration.

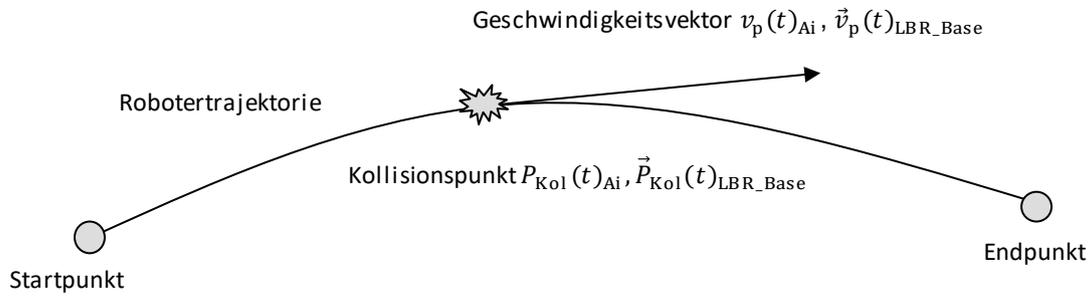
Tabelle 3-2: Konfigurationsdaten der RSEC für eine geplante Kollision auf einer festgelegten Trajektorie für einen Punkt  $P$  zum Zeitpunkt  $t$

Variable	Bezeichnung
$P(t)_{Ai}$	Kollisionspunkt zum Zeitpunkt $t$ in Achspositionen des Leichtbauroboters in [°]
$\vec{P}(t)_{LBR\_Base}$	Kollisionspunkt zum Zeitpunkt $t$ in kartesischen Basekoordinaten des Leichtbauroboters in [mm   °]
$\vec{O}_{TCP}$	Offset zur Beschreibung des TCP (Tool-Center-Point) auf die Werkzeugflanschplatte des Leichtbauroboters im $KS_{TCP}$ in [mm   °]
$\vec{P}_{Kol}(t)_{Ai}$	Kollisionspunkt am Leichtbauroboter ausgehend vom Koordinatensystem $KS_{Ai}$ des jeweiligen Koordinatenabschnitts in [mm   °]
$v_p(t)_{Ai}$	Achsgeschwindigkeit der Achsen $A_i$ im Kollisionspunkt $P(t)$ zum Zeitpunkt $t$ des Leichtbauroboters in [°/sec]
$\vec{v}_p(t)_{LBR\_Base}$	Geschwindigkeitsvektor im Kollisionspunkt $P(t)$ zum Zeitpunkt $t$ des Leichtbauroboters in $KS_{LBR\_Base}$ in [mm/sec   °/sec]
$m_{Zusatz}$	Zusatzmasse am TCP des Leichtbauroboters in [kg]

Aus der Schnittstelle zum Leichtbaurobotersystem können für die bekannte Bahn die entsprechenden Positionsdaten und der Geschwindigkeitsvektor ermittelt werden. Die Datenermittlung für die geplante

Kollisionstrajektorie kann hierbei über eine Softwaresimulation des Leichtbauroboters erfolgen bzw. durch eine reale Aufnahmefahrt mit dem Robotersystem in der RSEC. Die Datenschnittstelle muss für jedes Robotermodell gesondert betrachtet werden und in dem entsprechenden Datenformat bereitgestellt werden. In der RSEC sind Datenschnittstellen für die Robotersteuerung der Robotersysteme der Firma Universal Robots und für die KUKA Sunrise implementiert.

Die Abbildung 3-5 gibt einen Überblick über die jeweiligen Größen und Variablen während einer auftretenden Kollision entlang einer geplanten Robotertrajektorie.



*Abbildung 3-5: Schematische Darstellung einer Kollisionstrajektorie in der RSEC mit eingezeichnetem Startpunkt, Endpunkt, Kollisionspunkt und Richtungsvektor zum Zeitpunkt der Kollision*

Aus den in Tabelle 3-2 aufgezeigten Daten lassen sich für jeden beliebigen Punkt des Robotersystems die entsprechenden Informationen für den Kollisionspunkt ermitteln. Es gilt die Positionsinformationen des Kollisionspunktes im jeweiligen Koordinatensystem des Roboterachsenabschnitts  $KS_{LBR\_Ai}$  vorliegen zu haben. Ausgehend davon lässt sich die Position aus dem Achskoordinatensystem  $KS_{LBR\_Ai}$  über eine Rücktransformation mittels der Transformationsmatrix  $T_{KS_{A(i-1)}}^{KS_{Ai}}$  und der Achsstellung  $P(t)_{Ai}$  des Roboters zum Zeitpunkt  $t$  in das Koordinatensystem  $KS_{LBR\_Base}$  des Leichtbauroboters zurückrechnen, sodass die Kollisionsdaten in der RSEC in einem globalen verankerten Koordinatensystem des Leichtbauroboters vorliegen. Die Rückrechnung des Kollisionspunktes erfolgt über:

$$P(t)_{LBR\_Base} = \begin{cases} T_{KS_{LBR\_Base}}^{KS_{A1}} P(t)_{A1} \left( \prod_{i=2}^{A_i} T_{KS_{A(i-1)}}^{KS_{Ai}} P(t)_{Ai} \right) P_{Kol}(t)_{Ai} & \text{für } i \geq 2 \\ T_{KS_{LBR\_Base}}^{KS_{A1}} P(t)_{A1} P_{Kol}(t)_{Ai} & \text{für } i = 1 \end{cases} \quad (3-13)$$

Der Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}_p(t)_{LBR\_Base}$  des Kollisionspunktes  $\vec{P}(t)_{LBR\_Base}$  lässt sich analog mittels des Produkts der Transformationsmatrizen  $T_{KS_{A(i-1)}}^{KS_{Ai}}$  über die Achsgeschwindigkeiten  $\vec{v}_p(t)_{Ai}$  in der Rücktransformation errechnen:

$$\vec{v}_p(t)_{LBR\_Base} = \begin{cases} T_{KS_{LBR\_Base}}^{KS_{A1}} v_p(t)_{A1} \left( \prod_{i=2}^{A_i} T_{KS_{A(i-1)}}^{KS_{Ai}} v_p(t)_{Ai} \right) P_{Kol}(t)_{Ai} & \text{für } i \geq 2 \\ T_{KS_{LBR\_Base}}^{KS_{A1}} v_p(t)_{A1} P_{Kol}(t)_{Ai} & \text{für } i = 1 \end{cases} \quad (3-14)$$

Die Transformationsmatrizen  $T_{KS_{A(i-1)}}^{KS_{Ai}}$  ergeben sich aus den Roboterkonfigurationsdaten und sind für den jeweiligen Robotertyp im Berechnungsmodell des RSEC hinterlegt.

Nachdem alle Informationen bzgl. des Messpunktes erfasst worden sind, kann das biofidele Messgerät im Punkt  $P(t)_{LBR\_Base}$  positioniert und über den Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}_p(t)_{LBR\_Base}$  entsprechend ausgerichtet werden. Die Positionierung des Messgerätes erfolgt derart, dass eine senkrechte Kollision

mit der Kollisionsfläche des Messgerätes gewährleistet ist. Die Abbildung 3-6 zeigt den Aufbau des in der RSEC verwendeten biofidelen Messgerätes. Vorlage war das in Abschnitt 2.5.2 vorgestellte Messgerät der BGHM. Das in Abschnitt 2.5.3 vorgestellte Messgerät besitzt einen deckungsgleichen Aufbau und deckt ebenfalls den seitens der ISO TS 15066 geforderten biofidelen Ansatz ab [95].

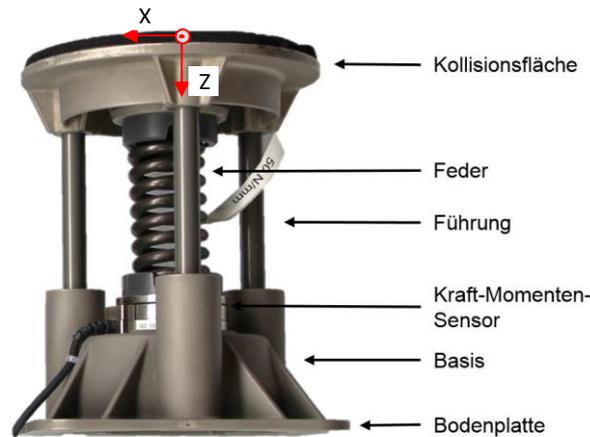


Abbildung 3-6: Biofideles Messgerät der RSEC zur biofidelen Erfassung von Kollisionskräften

Das Messgerät besteht aus drei Teilen. Auf der Basis sind der Kraft-Momenten-Sensor, die dreiteilige Linearführung und die hardwareseitige Anbindung an den Industrieroboter der RSEC integriert. Die oberseitige Kollisionsfläche wird durch drei Stäbe linear durch die Basis geführt und stellt die Beweglichkeit des Systems in Richtung der Z-Achse sicher. Die Federn stellen das dritte Element der Konstruktion dar und sind durch eine Klemmverbindung mit dem Kraft-Momenten-Sensor und der Kollisionsfläche verbunden. Es ist sichergestellt, dass alle auf die Kollisionsfläche einwirkenden Kräfte entsprechend über die Kompressionskonstante direkt in den Sensor eingeleitet werden. In die Kollisionsfläche wurde ein Ultraschallsensor mit Ausrichtung in die negative Z-Richtung integriert, welcher mittels Ultraschall die Annäherungsgeschwindigkeit des Objektes auf die Mitte der Kollisionsfläche erfasst. Dies dient einer doppelten Geschwindigkeitsabfrage und der Sicherstellung der Erfassung der korrekten Kollisionsgeschwindigkeit. Die Position des Koordinatensystems  $KS_{MR\_MT}$  befindet sich mittig auf der Kollisionsfläche, die Z-Achse zeigt in Richtung der Basis. Die durch das biofidele Messgerät erfassten Kraftwerte werden durch die Steuerung der RSEC aufgezeichnet und mit den zur Verfügung gestellten Daten des zu prüfenden Leichtbaurobotersystems abgelegt. In der Tabelle 3-3 sind die technischen Daten des entwickelten Messgerätes aufgeführt und denen durch die BGHM bzw. durch die DGUV formulierten Anforderungen gegenübergestellt [87].

*Tabelle 3-3: Auslegung Biofideles Messgerät in der RSEC*

<b>Merkmal</b>	<b>Werte/Abtastfrequenz</b>	<b>Anforderung ISO TS 15066 BGHM/DGUV</b>
Messfrequenz KMS	7000 Hz	1-10 KHz
Federsteifigkeiten	10, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 75, 150 N/mm	10, 25, 30, 35, 40, 50, 60, 75, 150 N/mm
Federweg	150mm bei 150 N/mm 300 mm bei 10 N/mm	Abdeckung des gesamten Messbereichs
Geschwindigkeitssensor	Bis zu 380 kHz	Nicht gefordert

Für eine korrekte Erfassung der Kraftwerte und Sicherstellung der entsprechend geforderten Messkonfiguration ist die Ausrichtung des Messgerätes innerhalb der RSEC von zentraler Bedeutung. Der Kollisionskörper sollte senkrecht auf die Kollisionsfläche des Messgerätes treffen, sodass sichergestellt ist, dass der Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}_P(t)_{LBR\_Base}$  deckungsgleich mit der Z-Achse des Koordinatensystems  $KS_{MR\_MT}$  ausgerichtet ist (vgl. Abbildung 3-6). Durch die vollständige Vermessung der RSEC kann durch eine weitere Koordinatentransformation der Kollisionspunkt wie bereits aufgezeigt in das Koordinatensystem  $KS_{MR\_Base}$  des Messroboters umgerechnet werden. Die erforderliche Orientierung des biofidelen Messgerätes kann ebenfalls über die Bedingung  $\vec{v}_P(t)_{LBR\_Base} \parallel (0, 0, 1)_{MR\_MT}$  in das Koordinatensystem  $KS_{MR\_Base}$  umgerechnet werden. Der Kollisionspunkt und die zugehörige Orientierung liegen im Koordinatensystem  $KS_{MR\_Base}$  des Messroboters vor, sodass eine senkrechte Ausrichtung der Kollisionsfläche zum Bewegungsvektor  $\vec{v}_P(t)_{LBR\_Base}$  des Kollisionspunktes  $\vec{P}(t)_{LBR\_Base}$  erfolgen kann. Zu prüfen bleibt für jede Messkonfiguration, ob durch die Positionierung des Messroboters mögliche ungewollte Kollisionen mit der Trajektorie des Leichtbauroboters vorhanden sind.

Für die Bestimmung der notwendigen Gegenmasse für die stabile Platzierung des biofidelen Messgerätes in der RSEC wird auf die einachsige Impulserhaltung zurückgegriffen. Diese wird durch die Summe der vorhandenen Impulse  $\sum p$  vor und nach dem Stoß in (3-15) beschrieben.

$$\sum p = m_1 v_1 + m_2 v_2 = m_1 v'_1 + m_2 v'_2 \quad (3-15)$$

Da sich das Messgerät vor der Kollision in Ruhe befindet, stellt sich die Geschwindigkeit  $v_2 = 0$  dar. Zugleich kann die Masse des Gegengewichtes als ein Vielfaches der Masse des Kollisionsgewichtes angenommen werden, sodass  $m_2 = x m_1$  gilt. Die Geschwindigkeit beider Körper ist nach der Kollision gleich ( $v'_1 = v'_2$ ) und strebt gegen 0. Es gilt:

$$v'_1 = \frac{1}{1+x} v_1 \quad (3-16)$$

Nachdem es die Zielsetzung ist, den Roboter zum Stillstand durch das Gegengewicht des Messroboters zu bekommen, strebt im Idealfall  $x \lim_{v_1 \rightarrow 0} \infty$ . Daher gilt es eine Abschätzung zu treffen, ab welchem Faktor  $x$  ein ausreichendes Gegengewicht für die Kollisionsversuche gewährleistet ist. In bereits vorhandenen Prüfständen wird hier ein Faktor von mindestens dem 10-Fachen des maximalen Eigengewichts des Leichtbauroboters empfohlen [95].

Für die Positionierung des Messgerätes kommt innerhalb der RSEC ein ABB Industrieroboter vom Typ IRB 4600-65/2.05 Typ A zum Einsatz, welcher ein Handhabungsgewicht von 65 kg besitzt. Das Gesamtgewicht des Roboters beträgt mindestens 412 kg, sodass unter der Annahme  $\alpha = 10$  für Leichtbauroboter mit einem Eigengewicht von bis zu 41 kg das Gegengewicht ausreichend ist.

Innerhalb der RSEC sind die einzelnen Komponenten über eine Steuerung miteinander vernetzt. Bei jeder Messung werden entlang der Trajektorie und während der Kollision Daten der einzelnen Komponenten aufgezeichnet. Die Daten werden im Anschluss ausgewertet, aufbereitet und in einer zentralen Kollisionsdatenbank gespeichert. Die Erfassung ist im Hinblick auf die Bewegungsdaten des Leichtbauroboters von entscheidender Bedeutung, da für die in Abschnitt 3.4 erfolgten Analysen die Kombination der Roboterpositionsdaten mit den Kraftwerten des biofidelen Messgeräts von Bedeutung ist. Die Abbildung 3-7 zeigt den vorhandenen Informationsfluss innerhalb der RSEC.

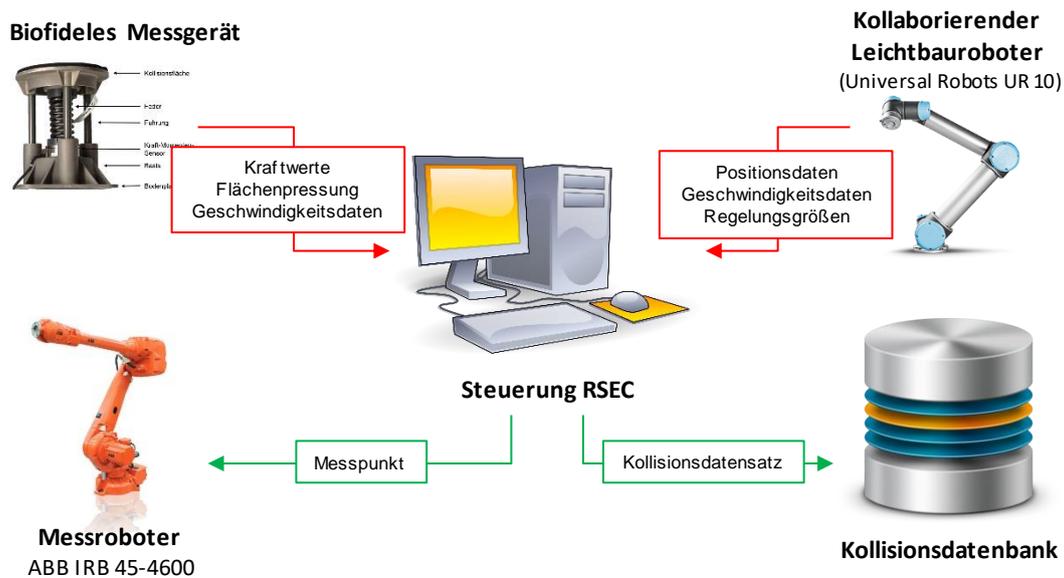


Abbildung 3-7: Informationsfluss in der RSEC während einer Messung

Es wird zwischen einem permanenten Datenaustausch (rote Verbindung) und einem einmaligen Datenaustausch (grüne Verbindung) unterschieden. Die Steuerung der RSEC steht mit dem biofidelen Kollisionsmessgerät und dem Leichtbaurobotersystem in einem permanenten Datenaustausch. Zum Start wird eine einmalige Verbindung zu beiden Komponenten aufgebaut, welche in der Folge mit einer konstanten Frequenz die jeweiligen relevanten Informationen zur Verfügung stellen. Erkennt die Steuerung der RSEC eine Bewegung am Leichtbaurobotersystem, so erfolgt eine Aufzeichnung der Roboterdaten gemeinsam mit den erfassten Informationen des biofidelen Messgerätes. Eine Messung wird beendet, sobald ein Kraftanstieg und -abfall am Messgerät detektiert worden sind und der Roboter in Ruhe ist. Anschließend wird die Messung inkl. der erfassten Roboterdaten als Kollisionsdatensatz abgespeichert. Bei einer fehlerhaften Messung wird der erfasste Datensatz verworfen. Anschließend kann der Datensatz aufbereitet werden und in die Kollisionsdatenbank eingelesen werden. Zugleich besteht die Möglichkeit, Trajektorien durch die Steuerung der RSEC aufzeichnen zu lassen und diese ebenfalls abzuspeichern. Ableitend daraus lassen sich im Datensatz die jeweiligen Kollisionspunkte festlegen, welche dann in die Koordinaten des Messroboters überführt werden können und diesem zur Verfügung gestellt werden.

### 3.3.2 Ergebnisinterpretation der erfassten Messdaten

Nach der Erläuterung der Kollisionsmechanik und der auftretenden Kräfte werden nachfolgend der Ablauf und die erzielten Ergebnisse der RSEC beschrieben. Die Softwarearchitektur der RSEC zeichnet während einer Kollision die erzielten Kraftwerte des biofidelen Messgerätes gemeinsam mit den Roboterinformationen über die Zeit auf.

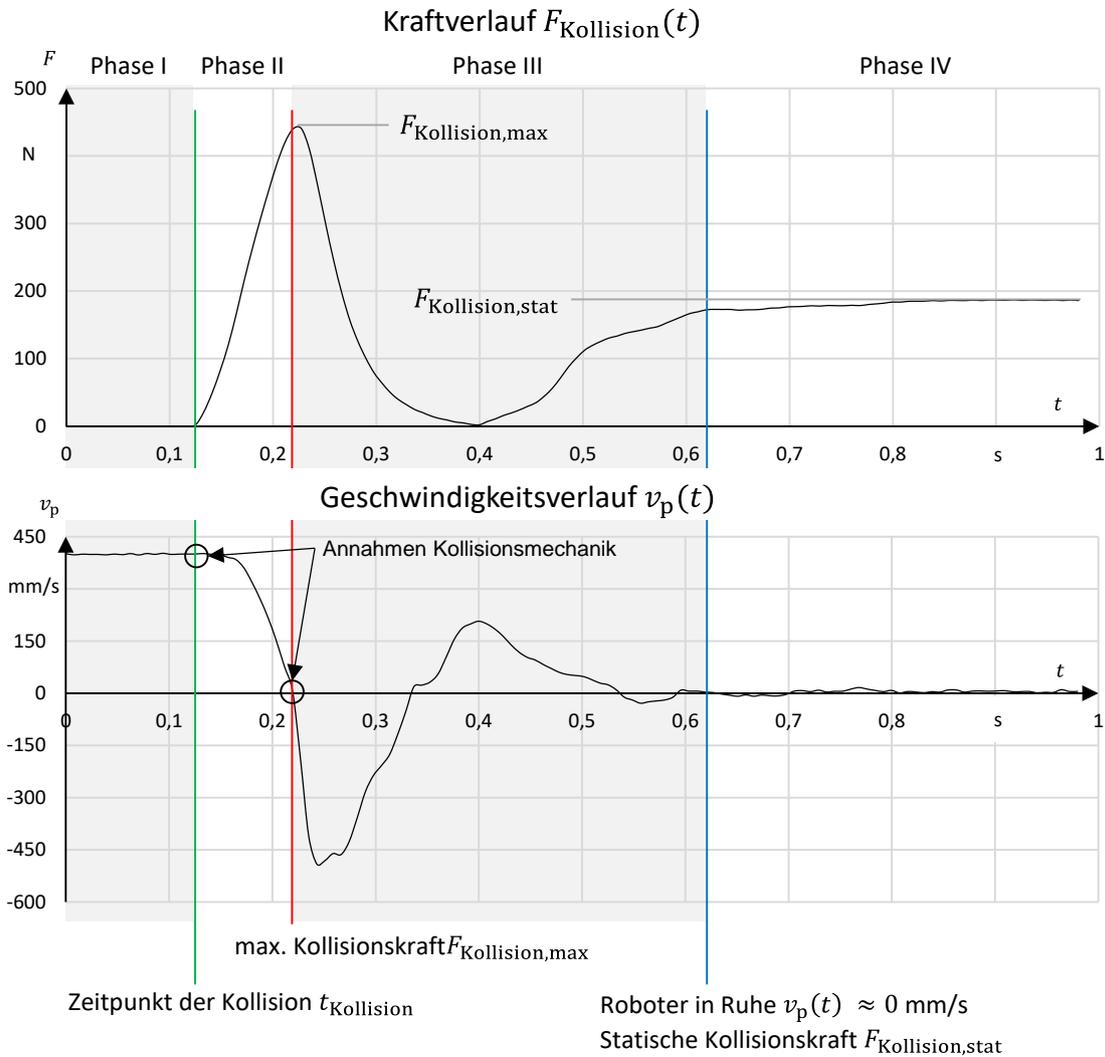


Abbildung 3-8: Darstellung des zeitlichen Ablaufs einer Kollision des Leichtbauroboters Universal Robots UR 10 mit dem Kollisionsmessgerät der RSEC bei 400 mm/s

Die Kollision gliedert sich in vier Phasen. Diese Phasen können über die anhand der in der RSEC gewonnenen Roboterdaten identifiziert werden und sind in der Abbildung 3-8 dargestellt.

In Phase I vor der Kollision nähert sich das Robotersystem mit einer konstanten Geschwindigkeit der Kollisionsfläche des biofidelen Messgerätes an. Zum Zeitpunkt der Kollision wird das Robotersystem durch die Feder gebremst, bis die maximale Kollisionskraft erreicht ist. Hier zeigt sich, dass die maximale Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,max}}$  genau dann erreicht wird, wenn die gesamte kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  durch die Feder als potenzielle Energie  $E_{\text{pot,Feder}}$  aufgenommen ist (rote Linie). Es zeigt sich, dass die Annahmen aus Abschnitt 3.3 im Hinblick auf die Kollisionsmechanik bestätigt werden können. Innerhalb der Phase II erfolgt die Erkennung der Kollision durch die Kollisionsüberwachung des kollaborierenden Leichtbauroboters. Diese erkennt die Kollision am regelungsseitigen Anstieg der Motorströme

bzw. anhand von Kraftsensoren und bricht die vorher geplante Bewegung entlang der Trajektorie ab. Dabei wird das System in den Zustand des sicheren Stillstands überführt. Die Phase III beginnt, wenn das Robotersystem zum Stillstand gebracht worden ist. Je nach Steifigkeit und Reaktionszeit der Robotersteuerung erfolgt im Anschluss ein mögliches Überschwingen des Roboters. Das Überschwingen wird durch die Feder im Kollisionsmessgerät hervorgerufen, welche direkt nach Erreichen der maximalen Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,max}}$  das Robotersystem entgegen der Bewegungsrichtung beschleunigt. Phase IV ist gekennzeichnet durch einen sich einstellenden stationären Zustand. Je nach Höhe der maximalen Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,max}}$  und der zum Kollisionszeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  eingenommenen Achsstellung des Robotersystems fällt die Rückstellung des Roboters stärker bzw. weniger stark aus und nimmt mehr bzw. weniger Zeit in Anspruch. Die BGHM und die ISO TS 15066 betrachten die Kraft  $F_{\text{Kollision,stat}}$  als stationären Zustand, welcher für den quasistatischen Kontakt Gültigkeit hat [87; 89] (siehe Abschnitt 2.3.3). Versuche in der Versuchsanordnung haben gezeigt, dass bei einer hinreichend hohen Kollisionsgeschwindigkeit der aufgezeigte Rückstelleffekt so groß wird, dass nach der Kollision der Kollisionspunkt nicht mehr an der Kollisionsfläche des biofidelen Messgerätes ansteht und daher eine statische Kraft  $F_{\text{Kollision,stat}}$  nach der Kollision nicht messbar ist.

Im Hinblick auf die Auswertung der RSEC können aus der Abbildung 3-8 alle relevanten Daten gewonnen werden. Der Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  des Kraftanstieges des biofidelen Messgerätes wird erkannt, sodass die aktuellen Positionsdaten des Kollisionszeitpunktes sowohl in kartesischen Koordinaten  $P_{\text{LBR\_Base}}(t_{\text{Kollision}})$  als auch in Achswinkeln  $P_{\text{Ai}}(t_{\text{Kollision}})$  aus der RSEC ausgelesen werden können. Zugleich werden die zum Zeitpunkt der Kollision vorhandenen Geschwindigkeiten des Leichtbaurobotersystems erkannt, welche ebenfalls für die folgende Analyse zur Verfügung stehen. Aus diesen lässt sich die Geschwindigkeit im Kollisionspunktes  $P_{\text{LBR\_Base}}(t)$  errechnen. Die Ermittlung der Roboterachse, welche die Kollision erkennt, erfolgt in der RSEC über die Auswertung des vorhandenen Fehlercodes des Robotersystems nach der Kollision.

Neben den ermittelten Werten zum Kollisionszeitpunkt sind alle zeitlichen Verläufe der in Tabelle 3-4 aufgezeigten Daten bekannt. Zugleich werden die durch den Nutzer angegebenen Eingangsgrößen wie bspw. die Zusatzmasse  $m_{\text{Zusatz}}$ , die Federkonstante  $k_{\text{mess}}$  bzw. der Offset  $\vec{O}_{\text{TCP}}$  am TCP des Leichtbauroboters für jede Messung ebenfalls abgespeichert. Die Tabelle 3-4 zeigt die in der RSEC gewonnenen Daten nach einem Kollisionsversuch. Für den Vergleich mit den festgelegten Grenzwerten aus der ISO TS 15066 für den transienten und den quasistatischen Kollisionsfall wird die erzielte maximale Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,max}}$  ausgewertet. Die statische Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,stat}}$  wird aus Gründen des erläuterten Rückstelleffektes nicht herangezogen, jedoch ebenfalls abgespeichert.

*Tabelle 3-4: Aufgezeichnete Daten während der Kollision in der RSEC*

Variable	Erläuterung
$t_{\text{Kollision}}$	Zeitpunkt, sobald der Kollisionspunkt die Kollisionsfläche des biofidelen Messgerätes berührt und eine Kraft messbar wird.
$\vec{P}_{\text{LBR\_Base}}(t_{\text{Kollision}})$	Kartesische Koordinaten des Kollisionspunktes zum Zeitpunkt der Kollision
$P_{\text{Ai}}(t_{\text{Kollision}})$	Achsstellung zum Zeitpunkt der Kollision
$\vec{v}_p(t_{\text{Kollision}})_{\text{LBR\_Base}}$	Geschwindigkeitsvektor des Kollisionspunktes zum Zeitpunkt der Kollision
$v_p(t_{\text{Kollision}})_{\text{Ai}}$	Achsgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt der Kollision
$F_{\text{Kollision,max}}$	Maximale erreichte Kraft während der Kollision
$F_{\text{Kollision,stat}}$	Stationäre anliegende Kraft nach der Kollision
<i>Roboter (Fehlercode)</i>	Fehlercode des Roboters zur Detektion; welche Achse die Kollision erkannt hat.

### 3.3.3 Vorgehensweise der theoretischen und experimentellen Analyse

Die Versuchsvorbereitung und -durchführung folgen in der RSEC einem festgelegten Schema. Hierzu wurde die RSEC mit zwei unterschiedlichen Leichtbaurobotern ausgestattet, welche in der experimentellen Betrachtung zum Einsatz kamen. Zunächst kommt der Leichtbauroboter UR10 der Firma Universal Robots zum Einsatz. Mit diesem Robotersystem erfolgt die vollständige Analyse der Einflussfaktoren. Der Roboter besitzt eine Kinematik mit sechs Achsen und ähnelt in seiner Bauart heute verfügbaren Industrierobotern. Im Weiteren wurden anschließende Untersuchungen mit dem Leichtbaurobotersystem KUKA LBR iiwa R820 unternommen. Die Versuche mit dem Robotersystem der Firma KUKA dienen im Wesentlichen der Verifizierung der erzielten Ergebnisse des Universal Robots UR10. Die Abbildung 3-9 zeigt die eingesetzten Robotersysteme.



*Abbildung 3-9: Eingesetzte kollaborierende Robotersysteme, Universal Robots UR10 (links), KUKA LBR iiwa 14 R820 (rechts)*

Die in den Untersuchungen eingesetzten Robotersysteme sind für den kollaborierenden Betrieb zugelassen, unterscheiden sich jedoch wesentlich im Aufbau und Funktionsumfang. Der Leichtbauroboter der Firma Universal Robots besitzt eine Kinematik mit sechs Achsen, welche sich in drei Hauptachsen

und drei Handachsen aufteilt [82]. Die Sicherheitsfunktion basiert auf einer Motorstromüberwachung der einzelnen Achsen. Eine Kollision wird über den regelungsbedingten Anstieg der Leistung der Motoren über den sicheren Teil der Robotersteuerung detektiert, welche in der Folge die Bewegung unterbindet und den Roboter in einen sicheren Stillstand überführt. Die weiteren technischen Daten des Robotersystems der Firma Universal Robot sind in der Tabelle 3-5 aufgeführt.

Der KUKA LBR iiwa 14 R820 unterscheidet sich wesentlich von den herkömmlichen Industrierobotern. Das Robotersystem besitzt eine Kinematik mit sieben Achsen, welche eine verbesserte Beweglichkeit aufgrund der kinematischen Überbestimmtheit sicherstellen sollen [80]. Die Kollisionsüberwachung erfolgt über in den Achsen verbaute Drehmomentsensoren, welche es dem sicheren Teil der Steuerung erlauben, extern einwirkende Kräfte zu erkennen und so eine Kollision zu detektieren [69; 104]. Die verbauten Kraftsensoren sind zweikanalig ausgelegt und erfüllen so die Anforderungen seitens der Normung für einen kollaborierenden Betrieb. Neben der Positionsregelung ist eine kraftgeregelte Ansteuerung des Robotersystems mit einem simulierten Feder-Dämpfer-System ebenfalls möglich, sodass der Roboter auf Basis der extern einwirkenden Kräfte bzw. intern bereitgestellter Kräfte feinfühlig Montageoperationen erfüllen kann. Die Abmessungen und weitere technische Daten sind in Tabelle 3-5 aufgeführt.

*Tabelle 3-5: Technische Daten der für die Untersuchung eingesetzten kollaborierenden Robotersysteme in der RSEC [82]*

Eigenschaft	Universal Robots UR10	KUKA LBR iiwa 14 R820
Anzahl Achsen	6 Drehachsen	7 Drehachsen
Eigengewicht	28,9 kg	29,9 kg
Traglast	10 kg	14 kg
Reichweite	1300 mm	820 mm
Wiederholgenauigkeit	$\pm 0,1$ mm	$\pm 0,15$ mm
Sicherheitsfunktion	Motorstromüberwachung	Kollisionserkennung mit Drehmomentüberwachung in jeder Achse

Für die Simulation der unterschiedlichen Zusatzmassen am TCP des Roboters wurde ein Impaktor konstruiert, welcher bei den Versuchen zum Einsatz kommt. Am Impaktor ist eine Kollisionsfläche vorgesehen, welche im Robotersystem als TCP konfiguriert hinterlegt ist, sodass die durch den Roboter bereitgestellten Positions- und Geschwindigkeitsinformationen am TCP mit den errechneten Werten über die Achskinematik identisch sind. Die Abbildung 3-10 zeigt den Aufbau des Impaktors mit den entsprechend unterschiedlich konfigurierten Zusatzmassen zur Ermittlung des Einflusses der zusätzlichen Masse am TCP des Leichtbauroboters. Die vorgesehene Kollisionsfläche stellt die Unterseite des schwarzen Schraubzylinders dar, welche am unteren Bildrand der Abbildung 3-10 zu sehen ist.



Abbildung 3-10: Aufbau des Impaktors in der RSEC, welcher an der Flanschplatte des Leichtbaurobotersystems montiert wird (hier Universal Robots UR10) und für unterschiedliche Gewichtskonfigurationen ausgelegt ist

Die Versuchsvorbereitung und -durchführung folgen einem festgelegten Schema. Die Abbildung 3-11 zeigt das angewandte Vorgehen bei der experimentellen Betrachtung der Einflussfaktoren auf die Kollisionskraft.

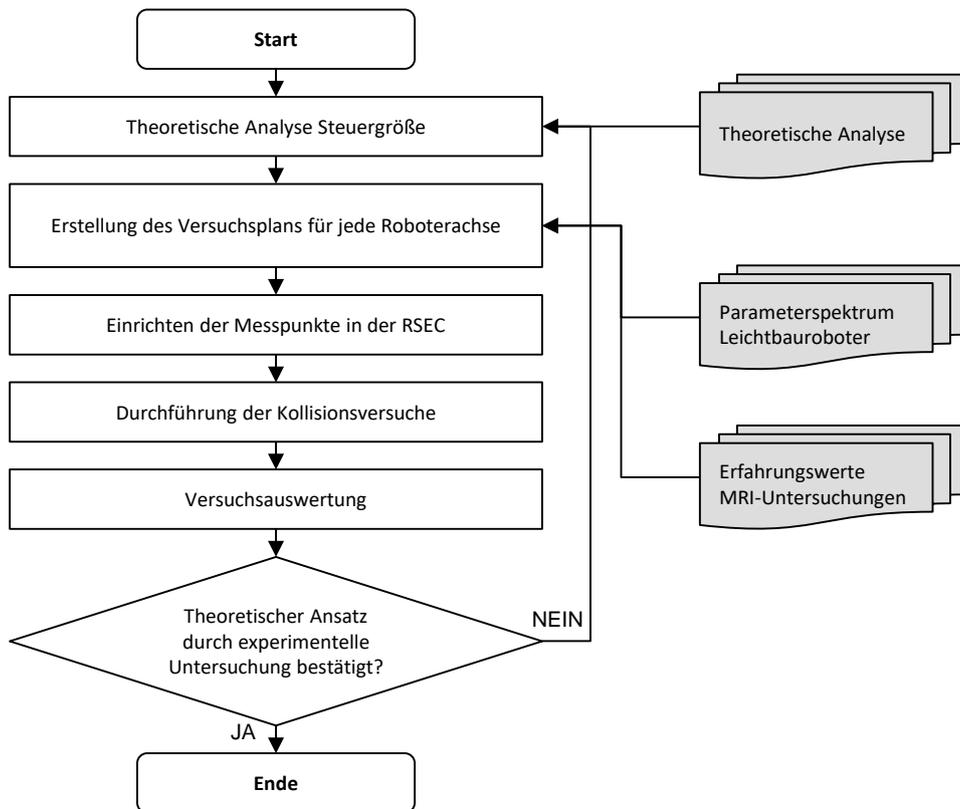


Abbildung 3-11: Angewandtes Vorgehen für die Versuchsplanerstellung und Durchführung der experimentellen Analyse der identifizierten Einflussfaktoren auf die Kollisionskraft in der RSEC

Zunächst wird für jede Steuergröße eine theoretische Betrachtung vorgenommen. Anhand der Prinzipien der Dynamik analog zur Betrachtung der Kollisionsmechanik in Abschnitt 3.2 wird zunächst der Einfluss der Steuergröße auf die Kollisionskraft untersucht. Zielsetzung ist die Bestimmung des Verhaltens der Steuergröße gegenüber der Zielgröße der Kollisionskraft. Anschließend wird ausgehend von der theoretischen Betrachtung Art und Umfang der Versuche bestimmt. Hierbei dienen die identifizierte Korrelation aus der theoretischen Betrachtung, das entsprechende Parameterspektrum des Robotersystems und die Erfahrungswerte aus den Umsetzungen von MRI-Anwendungen in der Praxis als Eingangsgrößen für die Versuchsplanerstellung. Im Anschluss folgt die Versuchsdurchführung auf Basis des erstellten Versuchsplans. Nach der folgenden Auswertung werden die Ergebnisse beurteilt und auf Basis der gewonnenen Daten gegebenenfalls zusätzliche Versuche durchgeführt.

Für eine differenzierte Betrachtung der identifizierten Steuergrößen werden in der RSEC unterschiedliche Kollisionsszenarien untersucht. Hierzu finden Versuche in unterschiedlichen Koordinatenrichtungen und Positionen statt. Aufgrund der Rotationssymmetrie um die Achse  $A_1$  beider Robotersysteme wird der Arbeitsraum zylindrisch betrachtet. Ausgehend von der zylindrischen Betrachtung werden Versuche in die Koordinatenrichtungen X, Y und Z vorgenommen. Die Abbildung 3-12 zeigt den entsprechenden Betrachtungsumfang.

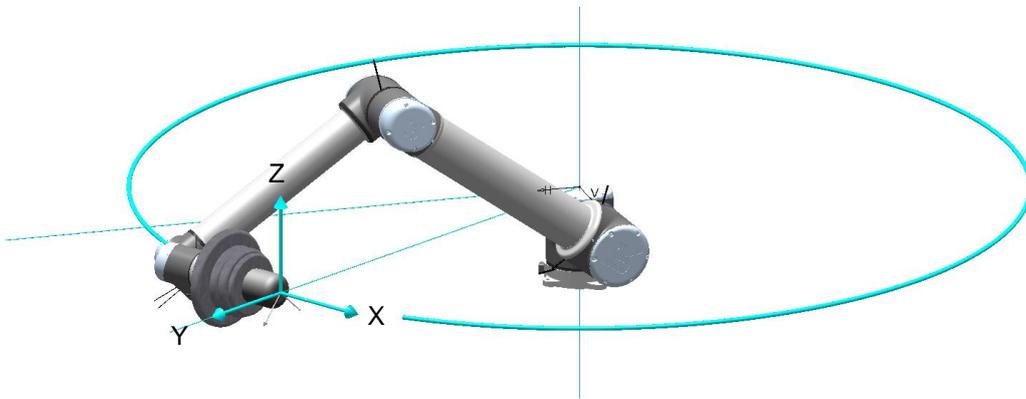


Abbildung 3-12: Rotationssymmetrische Betrachtung der Kollisionsszenarien am Beispiel des Leichtbauroboters Universal Robots UR10, eingezeichnetes Koordinatensystem für die jeweilige Richtung der Kollisionsuntersuchungen am TCP des Impaktors

Für die Kalibrierung und Reproduzierbarkeit der Versuche in der RSEC wurden diverse Versuche durchgeführt, die einen belastbaren Messwert sicherstellen. Die Abbildung 3-13 zeigt die Normalverteilung der Messwerte für einen Messpunkt des Leichtbauroboters Universal Robots UR10 für eine Stichprobe von 100 Messungen. Die Abbildung zeigt, dass bei einer Segmenteinteilung von 20 Segmenten die Häufigkeit der Streuung der Messwerte der rot eingezeichneten Normalverteilungslinie folgt.

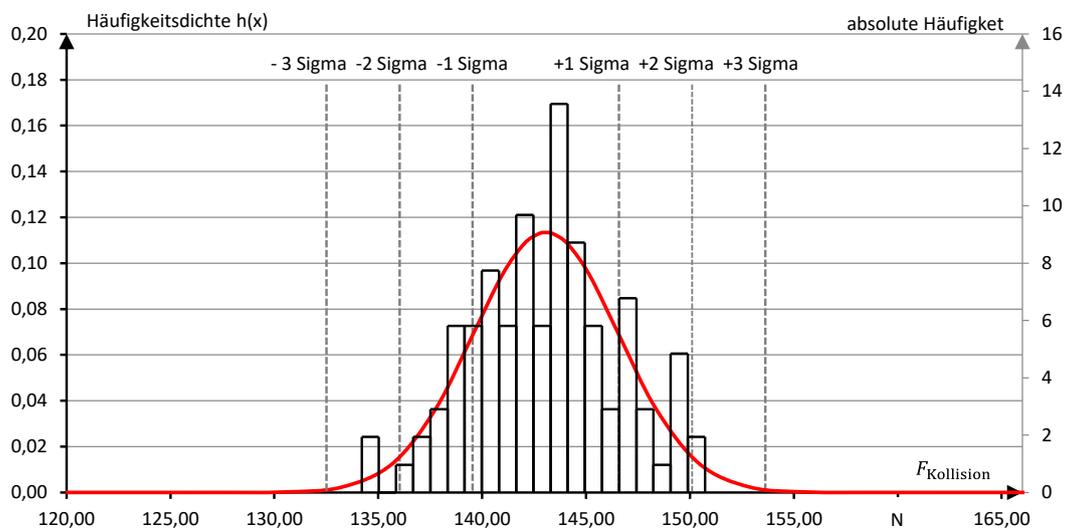


Abbildung 3-13: Normalverteilung Kollisionskraft des Universal Robots UR10 bei einem Mittelwert von 143,06 N und einer Stichprobe von 100 Messungen

### 3.3.4 Versuchsplanung

Auf Basis der in den Abschnitten 3.2.1 und 3.2.2 aufgezeigten Zusammenhänge wird nachfolgend ein Versuchsplan erstellt, anhand dessen die experimentelle Betrachtung erfolgt. Es gilt die jeweiligen Einflussgrößen mittels des in Abschnitt 3.3.3 vorgestellten Versuchsaufbaus zu untersuchen. Die Versuche werden mit den Leichtbaurobotersystemen Universal Robots UR10 und KUKA LBR iiwa 14 durchgeführt, anhand derer die Parameterspreizung für die jeweiligen Einflussgrößen festgelegt wird. Da eine einzelne Analyse aller Roboterachsen sehr umfangreich wäre, beziehen sich die Untersuchungen auf die Hauptachsen des Robotersystems (Achse  $A_1$  bis Achse  $A_3$ ) [82]. Diese stellen im Wesentlichen die Positionierung des TCP im Raum dar und sind für die Geschwindigkeit des TCP bedeutend. Die Handachsen der Leichtbaurobotersysteme dienen der Orientierung des TCP und haben in der Regel einen geringeren Einfluss auf die Geschwindigkeit des Robotersystems. Bei linear ausgeführten Bewegungen sind alle Achsen des Roboters in Bewegung. Die Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Handachsen der Robotersysteme ist aufgrund des analogen Aufbaus und der vergleichbaren Regelungstechnik gewährleistet.

Die Versuche mit dem Leichtbaurobotersystem UR10 der Firma Universal Robots dienen dem Nachweis der aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den Steuer- und Zielgrößen. Die Versuche mit dem KUKA LBR iiwa 14 werden zur Bestätigung der Ergebnisse durchgeführt und erfolgen in einem kleineren Umfang. Das erarbeitete Parameterspektrum wurde aus der Kinematik des Leichtbaurobotersystems abgeleitet. Um mögliche Messfehler auszuschließen und einen statistisch belastbaren Messwert zu erzielen, werden je Messkonfiguration 10 Messungen durchgeführt, aus welchen der Mittelwert gebildet wird. Aufgrund der begrenzten Anzahl an Messpunkten und -konfigurationen wurde auf einen teilfaktorischen Versuchsplan verzichtet, um eine erleichterte Auswertung der Messergebnisse zu gewährleisten [119].

Die nachfolgende Tabelle 3-6 zeigt den erarbeiteten Versuchsplan für den Universal Robots UR10 auf.

*Tabelle 3-6: Versuchsumfang für die experimentelle Untersuchung der aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den festgelegten Ziel- und Steuergrößen für den Universal Robots UR10*

Roboter-system	Steuergrößen				
	Geschwindigkeit	Zusatzmasse	Hebelarm	Trägheitsmoment	Biofidele Messgröße (Kompressionskonstante)
Universal Robots UR10	Achse A1 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A1 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A1 5 Messpunkte 3 Parameter (LIN)	Achse A1 2 Messkonfig. 9 Parameter (PTP)	Achse A1 2 Messpunkte 5 Parameter (PTP)
	Achse A2 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A2 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A2 5 Messpunkte 3 Parameter (LIN)		Achse A2 2 Messpunkte 5 Parameter (PTP)
	Achse A3 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A3 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A3 5 Messpunkte 3 Parameter (LIN)		Achse A3 2 Messpunkte 5 Parameter (PTP)
Parameter-spektrum	140 – 300 mm/sec	0,8 – 7,8 kg	A1: 600 – 1000 mm A2: 880 – 1350 mm A3: 450 – 680 mm	Vgl. Abbildung 3-22	10 – 150 N/mm
Versuchs-konfigurationen	30	30	45	18	30

Der erarbeitete Versuchsplan ist ein vollständig faktorieller Versuchsplan und bildet 153 Messkonfigurationen ab. Es werden Versuche für jede einzelne Steuergröße durchgeführt, wobei die Parameter der übrigen Steuergrößen konstant bleiben. Typischerweise werden für jede Hauptachse je Steuergröße zwei Messpunkte gewählt, in welchen anschließend die Parameter der Steuergröße variiert werden. Für die Hebelarmbetrachtung erfolgt die Messung an 5 unterschiedlichen Messpunkten zur Variation des Hebelarms. Zugleich werden je Messpunkt Kollisionstests mit drei Geschwindigkeiten zur Hebelarmbetrachtung durchgeführt. Das Trägheitsmoment lässt sich bei einer 6-Achsenkinematik nur für die Achse A1 überprüfen. Hierbei wurden wie in Abschnitt 3.4.4 aufgezeigt zwei Messkonfigurationen überprüft, um den grundsätzlichen Einfluss zu bestätigen.

Ein analoger Versuchsplan wurde für den KUKA LBR iiwa 14 entwickelt, welcher zur Bestätigung der erzielten Ergebnisse mit dem Universal Robots UR10 herangezogen wird. Die Tabelle 3-7 zeigt die entsprechenden Versuchskonfigurationen auf. Aufgrund des geringeren Arbeitsraums des KUKA LBR iiwa 14 ist das Parameterspektrum enger gewählt. Zugleich lässt das Robotersystem aufgrund möglicher Quetschungen innerhalb der Roboterkinematik nur einen begrenzten Arbeitsbereich zu, weshalb das Parameterspektrum enger gewählt wurde.

*Tabelle 3-7: Versuchsumfang für die experimentelle Untersuchung der aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den festgelegten Ziel- und Steuergrößen für den KUKA LBR iiwa 14 R820*

Roboter-system	Steuergrößen				
	Geschwindigkeit	Zusatzmasse	Hebelarm	Trägheitsmoment	Biofidele Messgröße (Kompressionskonstante)
KUKA LBR iiwa 14 R820	Achse A1 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A1 2 Messpunkte 5 Parameter (LIN)	Achse A1 5 Messpunkte 3 Parameter (LIN)		Achse A1 2 Messpunkte 5 Parameter (PTP)
Parameter-spektrum	140 – 300 mm/sec	0,8 – 3,8 kg	A1: 600 – 1000 mm A2: 880 – 1350 mm A3: 450 – 680 mm		10 – 150 N/mm
Versuchs-konfigurationen	30	30	30		30

### 3.4 Ergebnisse und Diskussion der experimentellen Analyse

Nach der Identifikation der Steuergrößen in Abschnitt 3.1 und der Erläuterung des Versuchsaufbaus in der RSEC in Abschnitt 3.2 werden nachfolgend die identifizierten Steuergrößen detailliert betrachtet. Zielsetzung ist es, den Effekt und den Einfluss jeder Steuergröße auf die Kollisionskraft eines Leichtbauroboters zu bestimmen. Daher wird zunächst eine theoretische Betrachtung für jeden Einflussfaktor vorgenommen, welche anschließend anhand von Versuchen in der RSEC verifiziert wird. Die Störgrößen werden nicht gesondert behandelt, sind jedoch in den Untersuchungen der Steuergrößen ebenfalls

vorhanden und daher in den Ergebnissen berücksichtigt. Aus den in Abschnitt 3.4 ermittelten Ergebnissen lassen sich Handlungsempfehlungen für die Anlagengestaltung ableiten, welche in Abschnitt 3.5 dargelegt werden.

### 3.4.1 Kollisionsgeschwindigkeit

Der Einfluss der Geschwindigkeit auf die Zielgröße der Kollisionskraft wurde bereits in der MRI früh berücksichtigt [18; 22; 23; 99; 100]. Die Begrenzung der maximalen TCP-Geschwindigkeit für MRI-Szenarien in früheren Veröffentlichungen der DIN EN ISO 10218-1/2 gaben bereits erste Indikationen. Im Hinblick auf die dargelegten Vorarbeiten in Abschnitt 2.5 fokussiert jeder Ansatz eine Begrenzung der maximalen Geschwindigkeit in der MRI zur Sicherstellung der Sicherheit [87; 95].

Die in Abschnitt 3.2.1 aufgezeigte Kollisionsmechanik legt bereits den Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit des Kollisionspunktes  $P(t)$  und der auftretenden Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  nahe. Durch die Annahme, dass die gesamte kinetische Energie  $E_{\text{kin}}$  des Robotersystems durch die potenzielle Energie der Feder des biofidelen Messgeräts  $E_{\text{pot,Feder}}$  aufgenommen wird, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$F_{\text{Kollision}} = \sqrt{k_{\text{mess}} m_{\text{Zusatz}} v_p} \quad (3-8)$$

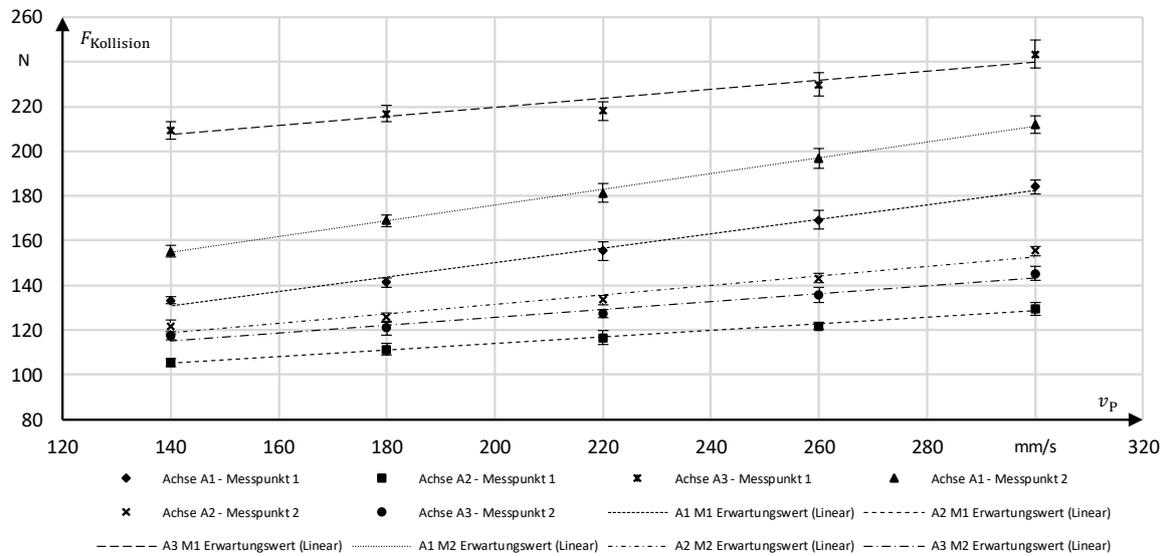
Nachdem die Federkonstante  $k_{\text{mess}}$  wie auch die Masse  $m_{\text{Zusatz}}$  nicht durch die Geschwindigkeit beeinflusst werden, stellt sich der Zusammenhang der Kollisionskraft gegenüber der Auftreffgeschwindigkeit  $v_p$  als linear dar:

$$F_{\text{Kollision}} \sim v_p \quad (3-17)$$

Die Achsgeschwindigkeiten stehen ebenfalls in einem linearen Zusammenhang, da die einzelnen Gelenke nur rotatorische Bewegungen ausführen und die Abmessungen der Achsen des Roboters zueinander konstant sind. Es wird ebenfalls ein linearer Zusammenhang zwischen der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  und der jeweiligen Achsgeschwindigkeit  $v_{Ai}$  festgehalten:

$$F_{\text{Kollision}} \sim v_{Ai} \quad (3-18)$$

Nachfolgend sind Versuchsergebnisse in unterschiedlichen Kollisionspunkten für unterschiedliche Kollisionsrichtungen aufgezeigt. Es wurde ein Parameterraum zwischen 140 mm/s und 300 mm/s für die anliegende TCP-Geschwindigkeit untersucht. Die dargestellten Versuche wurden mit einer Federkonstanten von  $k_{\text{mess}} = 50 \text{ N/mm}$  durchgeführt.

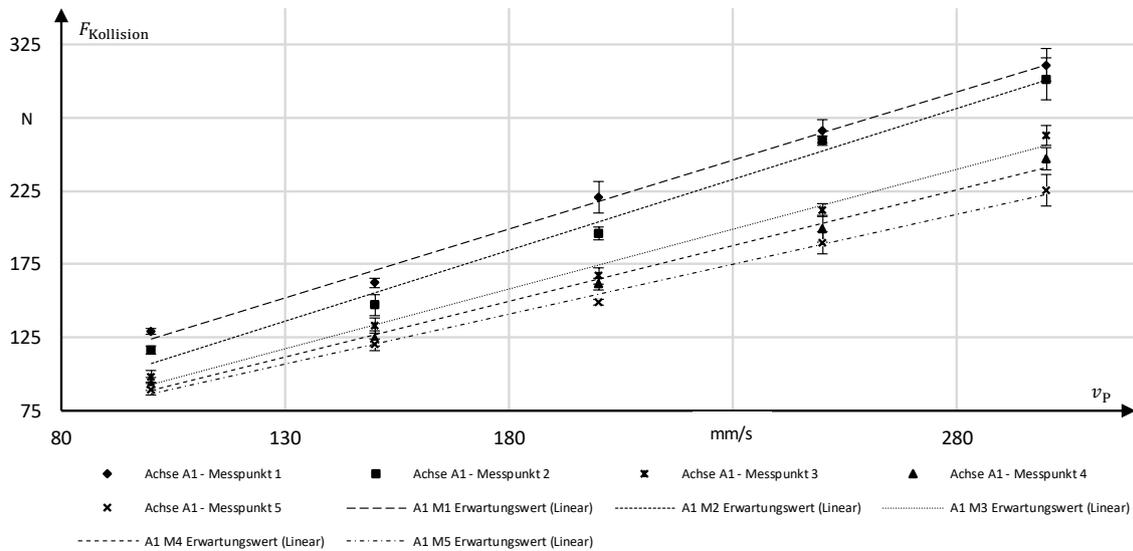


Auswertung	A1 M1	A1 M2	A2 M1	A2 M2	A3 M1	A3 M2
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,990	0,998	0,995	0,969	0,928	0,973
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	2,3	1,1	0,7	2,8	4,1	2,2
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	1,49%	0,62%	0,64%	2,05%	1,84%	1,67%

Abbildung 3-14: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Geschwindigkeit  $v_p$  für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR 10

Die Abbildung 3-14 zeigt die erzielten Versuchsergebnisse des Universal Robots UR10 für die drei Hauptachsen. Dargestellt sind unterschiedliche Kollisionspositionen und Geschwindigkeiten der einzelnen Hauptachsen. Die Zuordnung der Kollision zu der jeweiligen Achse  $A_i$  erfolgt über das Auslesen der Fehlercodes aus der Robotersteuerung. Es zeigt sich, dass die eingezeichneten linearen Trendlinien die Annahmen eines linearen Zusammenhang zwischen Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  und Kollisionsgeschwindigkeit  $v_p$  bestätigen. Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  liegt relativ nah dem maximalen Wert 1, woraus sich für die Geschwindigkeit ein fast linearer Zusammenhang schlussfolgern lässt. Die Standardabweichung der Messreihe bezogen auf den linearen Erwartungswert zeigt, dass die Werte der Messreihe nah an dem linearen Erwartungswert liegen. Für die Achse  $A_3$  ergibt sich eine größere Streuung der gezeigten Werte, da hier der Hebelarm bei einer eindimensionalen Bewegung um die Achse  $A_3$  relativ gering ist und daher im Kollisionsverlauf ein senkrechter Bewegungsverlauf des Kollisionskörpers gegenüber der Kollisionsfläche nur teilweise gewährleistet werden kann. Dieser Zusammenhang erklärt die geringere Streuung um die Achse  $A_1$ , da hier der Hebelarm erheblich größer ist.

Die Abbildung 3-15 zeigt die erzielten Ergebnisse mit dem Leichtbauroboter KUKA LBR iiwa 14 R820. Es werden die Ergebnisse von Kollisionen um die Achse  $A_1$  gezeigt. Analog zu Abbildung 3-14 sind zu den einzelnen Messergebnissen die linearen Erwartungswerte eingezeichnet. Es zeigt sich, dass analog zu den Ergebnissen mit dem Universal Robots UR10 das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  für die jeweiligen Messreihen nahe 1 liegt. Daraus lässt sich analog schlussfolgern, dass die Annahme eines linearen Zusammenhangs zutrifft. Die Abweichung der Messergebnisse gegenüber den linearen Erwartungswerten ist ebenfalls relativ gering und bewegt sich für die aufgezeigten Ergebnisse bei  $<5\%$ . Die erhöhte Streuung gegenüber dem Universal Robots UR10 lässt sich wiederum auf den kleineren Arbeitsbereich und den damit verbundenen kleineren Hebelarm bei den Kollisionen zurückführen.



Auswertung	A1 M1	A1 M2	A1 M3	A1 M4	A1 M5
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,995	0,988	0,992	0,994	0,996
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	6,0	9,6	6,9	5,5	4,1
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	2,78%	4,68%	3,95%	3,33%	2,63%

Abbildung 3-15: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den KUKA LBR iiwa 14 R820 für den Einfluss der Geschwindigkeit  $v_p$  auf die Kollisionskraft  $F_{Kollision}$

Abschließend wird festgehalten, dass der unter (3-17) und (3-18) angenommene lineare Zusammenhang zwischen der Geschwindigkeit  $v_p$  bzw.  $v_{Ai}$  und der auftretenden Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  durch die Versuche in der RSEC nachgewiesen werden konnte. Die Werte  $>0,98$  des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  und die relativ geringe Standardabweichung der Messergebnisse gegenüber dem Erwartungswert spiegeln dies bei beiden Robotertypen wider. Zugleich bleibt festzuhalten, dass aufgrund der erzielten Ergebnisse die Geschwindigkeit je nach Position einen erheblichen Einfluss auf die Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  besitzt und daher im Rahmen der Beurteilung von Kollisionskräften zwingend in der Sicherheitsbewertung zu berücksichtigen ist.

### 3.4.2 Zusatzmasse

Im Hinblick auf den Einfluss der Zusatzmasse am TCP des Leichtbauroboters gaben ebenfalls die durch das DLR erzielten Ergebnisse erste Aufschlüsse auf deren Einfluss auf die auftretende Kollisionskraft  $F_{Kollision}$ . Unter Abschnitt 2.5.1 wurden bereits Simulationsergebnisse aufgezeigt, welche den Einfluss einer gesteigerten Masse  $m_{Zusatz}$  am TCP des Roboters zum Gegenstand hatten. Es wurde dargelegt, dass mit steigender Zusatzmasse  $m_{Zusatz}$  am Roboter bzw. mit steigender Masse  $m_{Roboter}$  des Robotersystems selbst die erzielten Kollisionskräfte  $F_{Kollision}$  steigen. Zugleich gibt die unter Abschnitt 3.3 aufgezeigte Kollisionsmechanik (3-8) ebenfalls Aufschluss auf den Einfluss der Masse  $m_{Zusatz}$ :

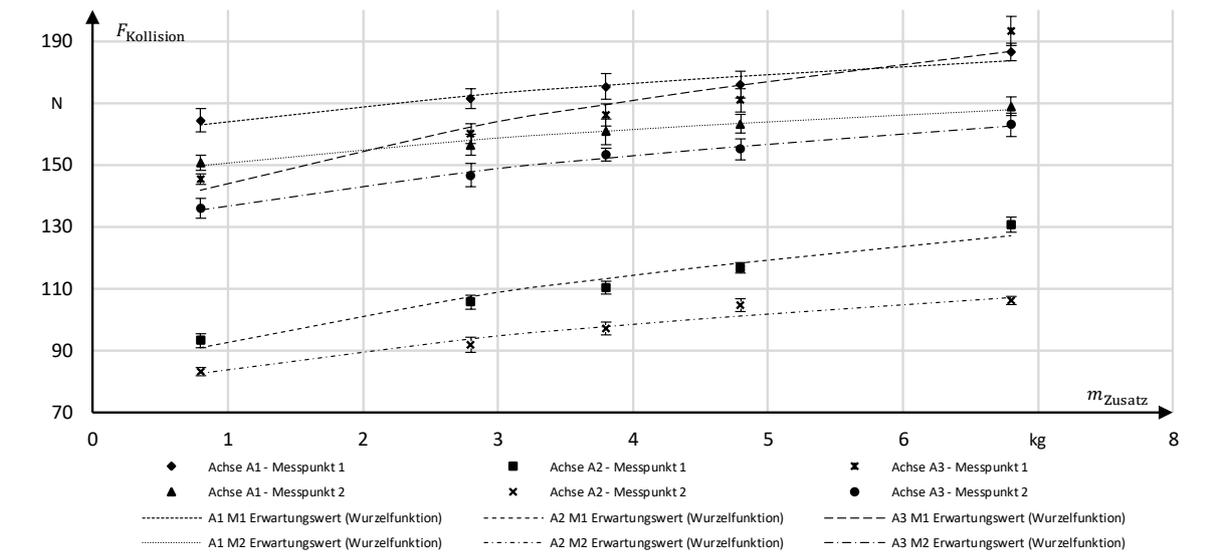
$$F_{Kollision} = \sqrt{k_{mess} m_{Zusatz}} v_p \quad (3-8)$$

Nachdem die Federsteifigkeit  $k_{mess}$  am Messgerät und die Geschwindigkeit  $v_p$  des Leichtbauroboters durch die Masse  $m_{Zusatz}$  nicht beeinflusst werden, ergibt sich für den Zusammenhang zwischen der Zusatzmasse  $m_{Zusatz}$  und der Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  ein polynomischer Zusammenhang:

$$F_{\text{Kollision}} \sim \sqrt{m_{\text{Zusatz}}} \quad (3-19)$$

Die nachfolgend dargestellten Versuchsergebnisse der Leichtbauroboter UR10 und KUKA LBR iiwa 14 wurden mit dem unter Abbildung 3-10 dargestellten Impaktor durchgeführt. Hierbei besitzt der Grundkörper des Impaktors eine Grundgewicht vom 0,8 kg, die variierenden Massen wurden mittels Gewichtsscheiben zwischen 1 kg und 5 kg umgesetzt. Das Gesamtgewicht wurde zugleich in der Steuerung des Leichtbauroboters wie durch den Hersteller gefordert hinterlegt.

Die in Abbildung 3-16 dargestellten Ergebnisse zeigen die auftretenden Kollisionskräfte  $F_{\text{Kollision}}$  für die Hauptachsen des Universal Robots UR10 bei variierenden Zusatzmassen  $m_{\text{Zusatz}}$ . Es ist neben den einzelnen Messwerten auch die entsprechende Trendlinie nach dem in (3-19) identifizierten Zusammenhang eingezeichnet.

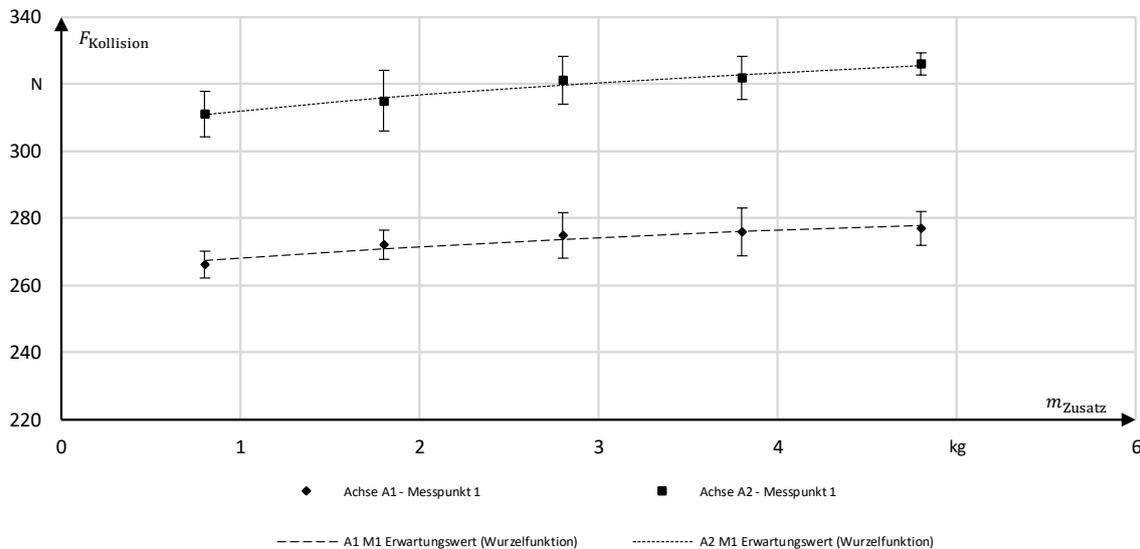


Auswertung	A1 M1	A1 M2	A2 M1	A2 M2	A3 M1	A3 M2
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,930	0,977	0,959	0,952	0,923	0,991
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	2,5	1,2	3,3	2,4	5,6	1,1
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	1,41%	0,75%	2,93%	2,50%	3,35%	0,73%

Abbildung 3-16: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Zusatzmasse  $m_{\text{Zusatz}}$  für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR10

Die Auswertungen der Versuche zeigen, dass sich der Zusammenhang zwischen der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  und der Zusatzmasse  $m_{\text{Zusatz}}$  durch eine Wurzelfunktion beschreiben lässt. Das Bestimmtheitsmaß, welches eine Aussage über die Übereinstimmung mit der in (3-19) aufgezeigten Beziehung beschreibt, bewegt sich über alle drei Hauptachsen hinweg oberhalb von  $R^2 > 0,9$ . Die Versuche um die Achse  $A_1$  bewegen sich horizontal zur Schwerkraft und zeigen hohe Übereinstimmungswerte. Die Versuche um die Achsen  $A_2$  und  $A_3$  erfolgten in Schwerkraftrichtung und sind daher durch die Erdbeschleunigung in der Regelung und Kollisionsüberwachung beeinflusst. Es kann festgehalten werden, dass aufgrund des relativ flachen Verlaufs aller Messkurven die Standardabweichung gegenüber dem Schätzwert durchgängig niedrig ausfällt.

Die in Abbildung 3-17 gezeigten Ergebnisse zeigt analoge Resultate des KUKA LBR iiwa 14 im Hinblick auf den Einfluss der Zusatzmasse  $m_{\text{Zusatz}}$ . Je nach Bewegungsrichtung der erfolgten Bewegung je Achse kann hierbei ebenfalls auf den Einfluss der Schwerkraft verwiesen werden. Zugleich besitzt der KUKA LBR iiwa 14 mit der integrierten Drehmomentregelung in seinen Achsen die Möglichkeit, die verbaute Zusatzmasse  $m_{\text{Zusatz}}$  in der Kollisionserkennung feinfühlig zu berücksichtigen.



Auswertung	A1 M1	A2 M1
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,939	0,972
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	1,2	1,1
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	0,45%	0,36%

Abbildung 3-17: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Zusatzmasse  $m_{\text{Zusatz}}$  für den KUKA LBR iiwa 14 R820

Die zwei dargestellten Kurven zeichnen den in (3-19) aufgezeigten Zusammenhang nach. Die Bestimmtheitswerte für die Achse  $A_1$  und Achse  $A_2$  liegen oberhalb von 0,9. Grundsätzlich zeigen Ergebnisse einen relativ flachen Verlauf der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  über die steigende Masse  $m_{\text{Zusatz}}$ . Dies ist bedingt durch die Regelungstechnik des KUKA LBR iiwa 14, welcher die Massen und den Massenschwerpunkt durch seine integrierte Sensorik automatisiert ermitteln kann und diese in der Regelung berücksichtigt. Die Standardabweichung bezogen auf den Erwartungswert ist aufgrund der relativ flach verlaufenden Krüven entsprechend gering.

Bezugnehmend auf die Ergebnisse des DLR in Abbildung 2-16 und die erzielten Ergebnisse mit dem Universal Robots UR10 und dem KUKA LBR iiwa konnten die in (3-19) getroffenen Überlegungen weitestgehend bestätigt werden [76]. Zugleich bleibt festzuhalten, dass der Einfluss der Schwerkraft teilweise durch die Robotersteuerungen kompensiert wird und daher der Einfluss gegenüber der Kollisionsgeschwindigkeit  $v_p$  bzw.  $v_{Ai}$  wesentlich niedriger ist. Im Hinblick auf die Gestaltung von kollaborierenden Arbeitsplätzen sollten schlussfolgernd die verbauten Zusatzmassen  $m_{\text{Zusatz}}$  möglichst gering gehalten werden, da die vorhandene kinetische Energie des Leichtbaurobotersystems geringer ist und die Kollisionskräfte  $F_{\text{Kollision}}$  kleiner sein sollten.

### 3.4.3 Hebelarmbetrachtung – Position des Leichtbauroboters

In Abschnitt 3.2.2 wurde bereits die Hebelarmbetrachtung zur Berücksichtigung der Roboterposition eingeführt. Ausgehend von der Annahme, dass ein konstantes Grenzmoment  $M_{\text{Grenz},Ai}$  in der Achse  $A_i$  vorliegt, welches für das Erkennen einer Kollision überschritten sein muss, wurde bereits in (3-9) nachfolgender Zusammenhang aufgezeigt.

$$M_{\text{Kollision},Ai} > M_{\text{Grenz},Ai} \rightarrow \text{Kollision erkannt} \quad (3-9)$$

Das anliegende Moment  $M_{\text{Kollision},A_i}$  kann über den Zusammenhang der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision},A_i(XY)}$  und den vorliegenden Hebelarm  $d_{A_i}$  nach (3-10) beschrieben werden.

$$M_{\text{Kollision},A_i} = d_{A_i} * \vec{F}_{\text{Kollision},A_i(XY)} \quad (3-10)$$

Auf eine Herleitung der anliegenden Kraft  $F_{\text{Kollision},A_i(XY)}$  wurde in Abschnitt 3.2.2 verzichtet, welche nachfolgend dargelegt werden soll. Die Kraft  $F_{\text{Kollision},A_i(XY)}$  beschreibt den Teil des Kraftvektors der auftretenden Kollisionskraft  $\vec{F}_{\text{Kollision}}$  in der XY-Ebene der jeweiligen Achse  $A_i$  des Koordinatensystems  $KS_{A_i}$ . Der Vektor der Kollisionskraft lässt sich aus der in Abschnitt 3.3.1 dargestellten Ausrichtung des Kollisionsmessgerätes ableiten. Es gilt aufgrund des senkrechten Auftreffens des Leichtbauroboters auf der Kollisionsfläche des Messgerätes (siehe Abschnitt 3.2.1):

$$\vec{F}_{\text{Kollision}} = \frac{1}{|\vec{v}_p(t)_{\text{LBR\_Base}}|} \vec{v}_p(t)_{\text{LBR\_Base}} * F_{\text{Kollision}} \quad (3-20)$$

Für die Sichtbarkeit des Kollisionsmomentes  $M_{\text{Kollision},A_i}$  ist die Komponente des Kraftvektors  $\vec{F}_{\text{Kollision}}$ , welcher in der Achse  $A_i$  sichtbar wird, relevant. In der Folge wird in (3-21) der Kraftvektor  $\vec{F}_{\text{Kollision}}$  in das Koordinatensystem  $KS_{A_i}$  der jeweiligen Achse  $A_i$  umgerechnet.

$$\vec{F}_{\text{Kollision},A_i} = \begin{cases} \left( \prod_2^i T_{KS_{A_{(i-1)}}}^{KS_{A_i}} \right) T_{KS_{A_1}}^{KS_{\text{LBR\_Base}}} \vec{F}_{\text{Kollision}} & \text{für } i \geq 2 \\ T_{KS_{A_1}}^{KS_{\text{LBR\_Base}}} \vec{F}_{\text{Kollision}} & \text{für } i = 1 \end{cases} \quad (3-21)$$

Die Koordinatensysteme  $KS_{A_i}$  in den jeweiligen Achsen sind derart festgelegt, dass sich die rotatorische Achse des Leichtbauroboters um die Z-Achse des Koordinatensystems bewegt. Da die Sicherheitssysteme der Leichtbauroboter ebenfalls um diese Rotation die Kraftregelung überwachen, ist die XY-Ebene des Vektors die relevante Komponente der Kollisionskraft  $\vec{F}_{\text{Kollision},A_i}$  in der Achse  $A_i$  und für die Betrachtung des anliegenden Kollisionsmomentes  $M_{\text{Kollision},A_i}$  von Bedeutung. Nach (3-21) liegt der Kraftvektor  $\vec{F}_{\text{Kollision},A_i}$  der Kollision im Koordinatensystem der jeweiligen Achse  $A_i$  vor, sodass der Betrag der Kraft in der XY-Ebene des Koordinatensystems berechnet werden kann:

$$F_{\text{Kollision},A_i(XY)} = \left| \vec{F}_{\text{Kollision},A_i} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right| \quad (3-22)$$

Für den in Kapitel 4 dargestellten Ansatz ist der Quotient des Betrages der auftretenden Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  und der für die jeweilige Achse betrachteten Kraft  $F_{\text{Kollision},A_i(XY)}$  von Relevanz. Daher wird dieser nachfolgend als Faktor  $\delta_{A_i}$  festgehalten:

$$\delta_{A_i} = \frac{F_{\text{Kollision},A_i(XY)}}{|\vec{F}_{\text{Kollision}}|} \quad (3-23)$$

Neben der eingeleiteten Kraft  $F_{\text{Kollision},A_i(XY)}$  in die jeweilige Achse  $A_i$  ist der anliegende Hebelarm  $d_{A_i}$  für die Höhe des Kollisionsmomentes  $M_{\text{Kollision},A_i}$  nach (3-10) von Bedeutung. Dieser ist abhängig vom Kollisionspunkt  $P(t_{\text{Kollision}})_{\text{LBR\_Base}}$  und dem Vektor der Krafteinleitung  $\vec{F}_{\text{Kollision}}$ . Wie bereits in (3-21) wird in (3-24) zunächst der vorliegende Kollisionspunkt in das Koordinatensystem der Achse  $A_i$  umgerechnet:

$$\text{für } i \geq 2 \quad (3-24)$$

$$P_{\text{Kollision,Ai}} = \begin{cases} \left( \prod_{i=2}^i T_{KS_{Ai}}^{KS_{A(i-1)}} \right) T_{KS_{A1}}^{KS_{LBR\_Base}} P(t_{\text{Kollision}})_{LBR\_Base} & \text{für } i = 1 \\ T_{KS_{A1}}^{KS_{LBR\_Base}} P(t_{\text{Kollision}})_{LBR\_Base} & \end{cases}$$

Analog der Betrachtung der Kraft in der XY-Ebene des jeweiligen Koordinatensystems  $KS_{Ai}$  erfolgt die Betrachtung des Hebelarmes über die gleiche Ebene. So lässt sich der Hebelarm  $d_{Ai}$  des Kraftvektors über den Abstand des Kraftvektors  $\vec{F}_{\text{Kollision,Ai}}$  im Kollisionspunkt  $P_{\text{Kollision,Ai}}$  zum Ursprung  $(0|0|0)$  des Koordinatensystems  $KS_{Ai}$  bestimmen. Zunächst gilt für eine Gerade  $g_{Ai}$  in der XY-Ebene des Koordinatensystems  $KS_{Ai}$ , wobei  $\gamma$  die Variable auf der Position der Geraden beschreibt:

$$g_{Ai}: \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \left( \frac{1}{|\vec{F}_{\text{Kollision}}(t)_{Ai}|} \vec{F}_{\text{Kollision}}(t)_{Ai} \gamma + P_{\text{Kollision,Ai}} \right) \quad (3-25)$$

Der Abstand  $d_{Ai}$  lässt sich über den Abstand der Geraden  $g_{Ai}$  zum Ursprung  $(0|0|0)$  des jeweiligen Achskoordinatensystems  $KS_{Ai}$  ermitteln:

$$d_{Ai} = d\left(\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, g_{Ai}\right) \quad (3-26)$$

Nach (3-21), (3-24) und (3-26) lässt sich für jede Achse  $A_i$  der wirkende Hebelarm  $d_{Ai}$  in Abhängigkeit der Bewegungsrichtung  $\vec{v}_p(t)_{LBR\_Base}$  und des Kollisionspunktes  $P(t_{\text{Kollision}})_{LBR\_Base}$  bestimmen. Es zeigt sich, dass vorbehaltlich der Veränderung des kritischen Grenzmomentes  $M_{Ai,Grenz}$  in Abhängigkeit der Achsstellung  $P(t_{\text{Kollision}})_{Ai}$  und -geschwindigkeit  $v_p(t_{\text{Kollision}})_{Ai}$  die Höhe des Kollisionsmomentes  $M_{\text{Kollision,Ai}}$  entscheidend durch den anliegenden Hebelarm  $d_{Ai}$  beeinflusst wird. Bei der Betrachtung des Bezugs zwischen der auftretenden Kollisionskraft und dem ermittelten Hebelarm kann nach (3-10) folgendes festgehalten werden:

$$F_{\text{Kollision}} \sim \frac{1}{d_{Ai}} M_{\text{Kollision,Ai}} \geq \frac{1}{d_{Ai}} M_{\text{Grenz,Ai}} \quad (3-27)$$

Ausgehend von einem konstanten Grenzmoment  $M_{\text{Grenz,Ai}}$  zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  kann nachfolgender Zusammenhang zwischen dem Hebelarm  $d_{Ai}$  und der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  festgehalten werden:

$$F_{\text{Kollision}} \sim \frac{1}{d_{Ai}} \quad (3-28)$$

Die nachfolgende Abbildung 3-18 zeigt die ermittelten Größen für die Hebelarmbetrachtung der Hauptachsen des Universal Robots UR10. Zu sehen sind der anliegende Kraftvektor  $\vec{F}_{\text{Kollision}}$  der Krafteinleitung in den Leichtbauroboter, der projizierte Vektor  $\vec{F}_{\text{Kollision,Ai(XY)}}$  in die XY-Ebene der Achse  $A_i$ , die Gerade  $g_{Ai}$  für die Ermittlung des Hebelarms  $d_{Ai}$ . Zudem sind die jeweiligen Koordinatensysteme  $KS_{Ai}$  für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR10 eingezeichnet.

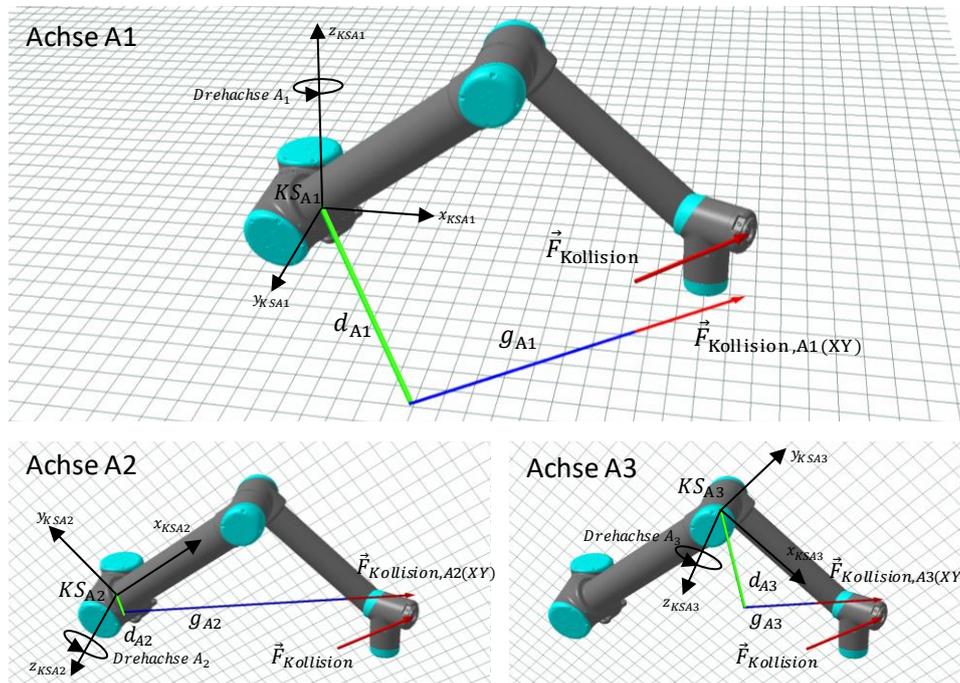
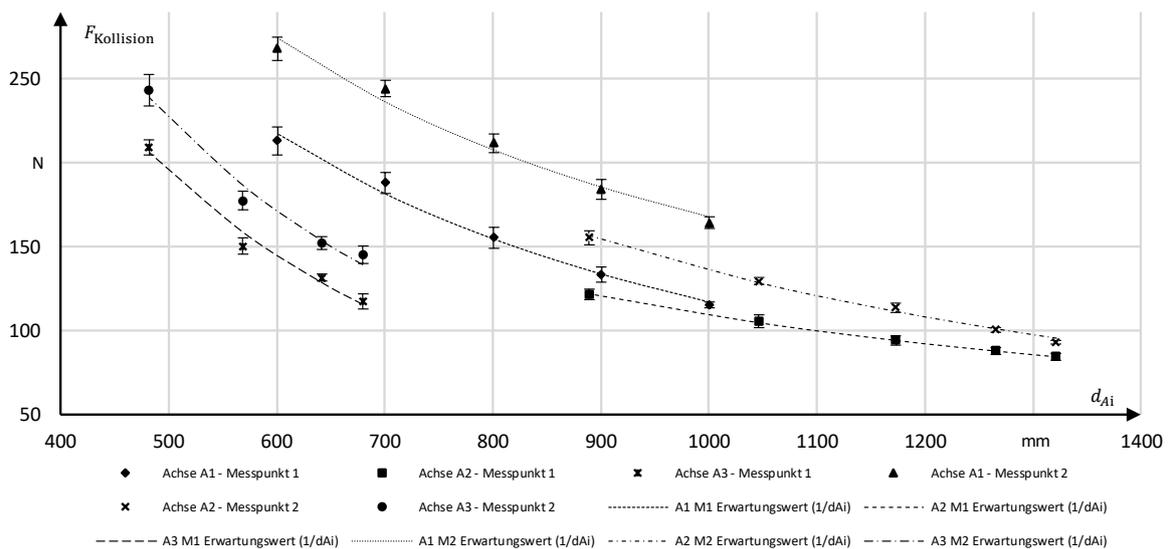


Abbildung 3-18: Hebelarmbetrachtung in Abhängigkeit des Kollisionspunktes und der Kollisionsrichtung für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR10

Analog zu den bereits untersuchten Steuergrößen wurden in der RSEC Versuche zur Betrachtung des Hebelarms  $d_{A_i}$  unternommen. In der Abbildung 3-19 sind die erzielten Ergebnisse in der RSEC für den Universal Robots UR10 dargestellt.

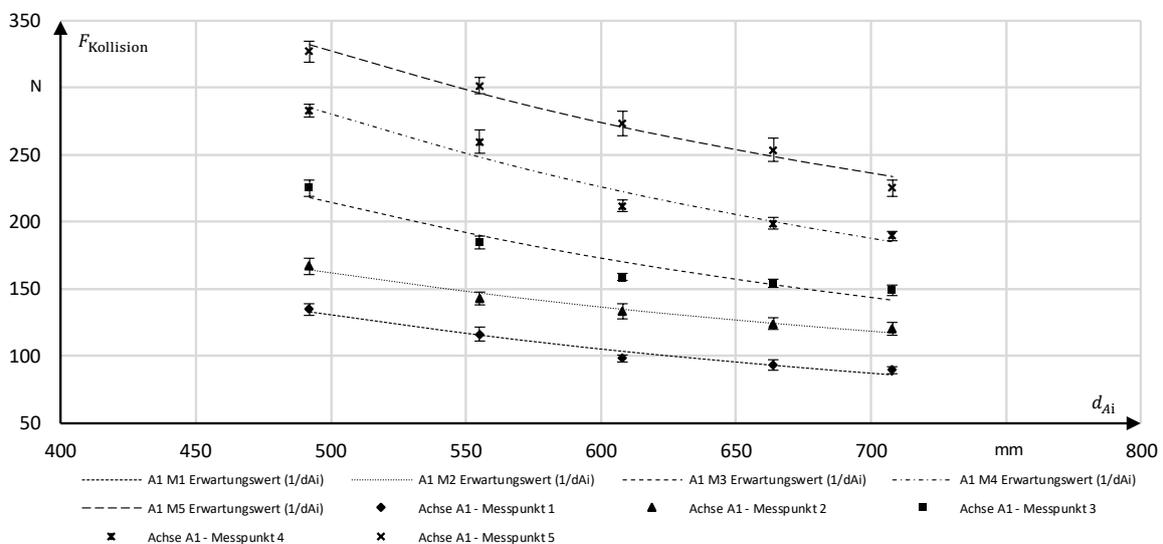


Auswertung	A1 M1	A1 M2	A2 M1	A2 M2	A3 M1	A3 M2
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,990	0,981	0,999	0,995	0,982	0,976
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	4,6	6,7	0,5	2,1	6,7	8,5
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	2,85%	3,11%	0,52%	1,79%	4,40%	4,75%

Abbildung 3-19: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss des Hebelarms  $d_{A_i}$  für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR10 bei konstanten Kollisionsgeschwindigkeiten im Kollisionspunkt

Die aufgezeigten Versuchsergebnisse zeigen Messreihen mit gleichen Kollisionsgeschwindigkeiten im Kollisionspunkt für die drei Hauptachsen. Dabei sinkt die anliegende Achsgeschwindigkeit  $v_{Ai}$  mit zunehmendem Hebelarm  $d_{Ai}$ . Es wurden für jeden Messpunkt Versuche mit zwei unterschiedlichen Kollisionsgeschwindigkeiten dargestellt. Die eingezeichneten Erwartungswerte für den in (3-28) aufgezeigten Zusammenhang bestätigen grafisch den Zusammenhang zwischen dem Hebelarm  $d_{Ai}$  und der Kollisionskraft  $F_{Kollision}$ . Die Auswertung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  weist durchgängig Werte oberhalb von 0,95 auf. Dies zeigt, dass der hergeleitete Zusammenhang zwischen dem anliegenden Hebelarm  $d_{Ai}$  und der auftretenden Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  nicht nur grafisch sondern auch durch die statistische Auswertung belegt werden kann. Die Standardabweichung bezogen auf den Erwartungswert der Messreihe bewegt sich in einem relativ engen Korridor von  $< 5\%$  um den Erwartungswert, sodass auch hier die Messwerte nur gering um den Erwartungswert aus (3-28) streuen. Für den KUKA LBR iiwa 14 wurden bereits mit den Vorgängerversionen des Robotersystem (siehe Abschnitt 2.2.2) ähnliche Versuche durch das DLR unternommen (Abbildung 2-17). Hierbei zeigte sich bereits, dass sobald in Singularitäten der Hebelarm gegen den Wert 0 strebt, die auftretenden Kollisionskräfte sehr hohe Werte annehmen [101]. Schlussfolgerung wurde auf mögliche Gefahren in diesem Bereich verwiesen und empfohlen, die entsprechenden Arbeitsräume in MRI-Szenarien zu meiden.

Die nachfolgende Abbildung 3-20 zeigt die erzielten Ergebnisse der RSEC für den Einfluss des Hebelarms  $d_{Ai}$  des KUKA LBR iiwa 14 auf. Gezeigt werden Versuchsergebnisse für fünf Kollisionsgeschwindigkeiten  $v_p$  um die Achse A1.



Auswertung	A1 M1	A1 M2	A1 M3	A1 M4	A1 M5
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,969	0,976	0,934	0,960	0,974
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	3,9	3,3	9,4	9,4	7,4
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	3,64%	2,43%	5,37%	4,10%	2,69%

Abbildung 3-20: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss des Hebelarms  $d_{Ai}$  für die drei Hauptachsen des KUKA LBR iiwa 14 bei konstanten Achsgeschwindigkeiten in der jeweiligen Kollisionsachse und konstanten Kollisionsgeschwindigkeiten im Kollisionspunkt

Die Ergebnisse zeigen, dass auch hier der in (3-28) aufgezeigte Zusammenhang nachgewiesen werden kann. Die durchgängig hohen Werte für das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  von  $> 0,9$  zeigen ein ähnliches Verhaltensmuster für den Einfluss des Hebelarms  $d_{Ai}$ , wenn auch die Werte nicht ganz das Niveau des Universal Robots UR10 erreichen. Die Standardabweichung der Messwerte bezogen auf den Erwartungswert bewegt sich mit Werten  $< 6\%$  in einem ähnlichen Rahmen wie zuvor die Messungen mit dem

Universal Robots UR10. Aufgrund von Singularitäten in den Randbereichen des nutzbaren Arbeitsraums des KUKA LBR iiwa 14 war eine Vergrößerung des Parameterspektrums für die Versuche nicht darstellbar, sodass die Ausprägungen in diesen Bereichen des Spektrums nur teilweise mit den Versuchen aufgezeigt werden konnten.

Abschließend wird festgehalten, dass der anliegende Hebelarm  $d_{Ai}$  bezogen auf die kritische Achse  $A_i$ , welche die Kollision erkennt, ein wesentlicher Einflussfaktor für die auftretende Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  ist. Es zeigen die Versuche mit den Robotertypen Universal Robots UR10 und KUKA LBR iiwa 14, dass bei sehr klein werdenden Hebelarmen  $d_{Ai}$  die Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  erheblich steigt. Die Versuchsreihen konnten die in der theoretischen Betrachtung aufgestellten Zusammenhänge bestätigen. Zielsetzung des Roboterprogrammierers muss es daher sein, die Hebelarme  $d_{Ai}$  für die in der Anwendung vorliegende Aufgabe zu maximieren, sodass zugleich auch die anliegenden Achsgeschwindigkeiten  $v_{Ai}$  minimiert werden können. Die Hebelarme sind zugleich auch in der mechanischen Konstruktion einer MRI-Anlage wie bspw. bei der Platzierung des Leichtbauroboters in der Anlage zu berücksichtigen.

### 3.4.4 Trägheitsmoment – Position des Leichtbauroboters

Neben der Betrachtung des Hebelarmes gilt es bei der Position des Roboters das anliegende Trägheitsmoment zu betrachten. Dieses ist maßgeblich durch das Design des Roboters und die Anzahl der vorhandenen Drehachsen des Robotersystems bestimmt. Für eine 6-Achsen-Kinematik gilt, dass die vorhandene TCP-Position durch zwei mögliche Achskonfigurationen zu erreichen ist, in Singularitäten sind zudem mehr als zwei mögliche Achsstellungen möglich [82]. Eine 7-Achsen-Kinematik besitzt hingegen vieldeutige Achskonfigurationen bei gleicher TCP-Ausrichtung im Arbeitsraum [69]. Die Abbildung 3-21 zeigt die Mehrdeutigkeit möglicher Achskonfigurationen bei gleichbleibender TCP-Ausrichtung für die 6-Achsen-Kinematik des Universal Robots UR10 und die 7-Achsen-Kinematik des KUKA LBR iiwa 14.

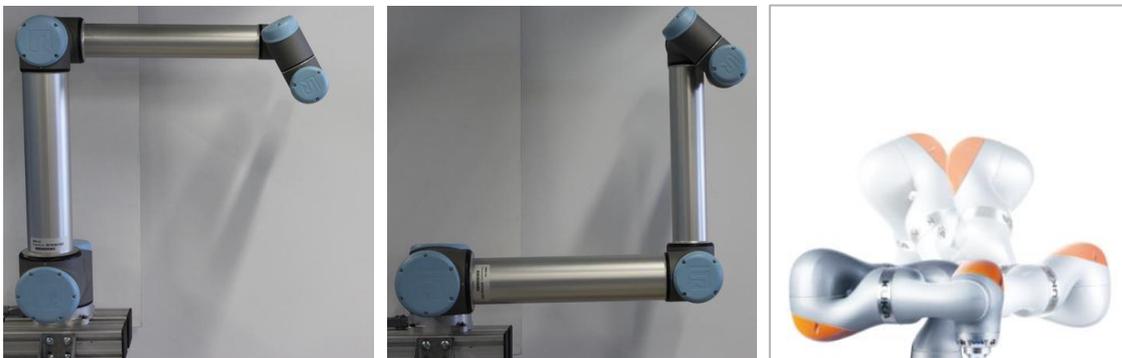


Abbildung 3-21: Mehrdeutige Achsstellung für eine Leichtbauroboterkinematik mit 6 Achsen am Beispiel des Universal Robots UR10 und mit 7 Achsen am Beispiel des KUKA LBR iiwa 14

Im Hinblick auf die auftretende Kollisionskraft liegt eine Betrachtung des durch die mehrdeutigen Achsstellungen beeinflussten Trägheitsmomentes nahe. Grundsätzlich gilt für das durch das Trägheitsmoment entstehende Drehmoment bei einer Geschwindigkeitsveränderung [117]:

$$M_{\text{Träg,P}} = I_{P,Ai} \dot{v}_{Ai} \quad (3-29)$$

Das aufzubringende Trägheitsmoment lässt sich durch das Integral der senkrecht um die Drehachse verteilten Massen berechnen:

$$I_{P,A_i} = \int_V r_{\perp}^2 \rho(\vec{r}) dV \quad (3-30)$$

Nach (3-30) steigt das Trägheitsmoment, je weiter die Massen von der Drehachse entfernt liegen. Dies impliziert, dass je nach Stellung der jeweiligen Drehachse des Roboters die erzielte Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  höher ist. Ausgehend von einer relativ konstanten Veränderung der Geschwindigkeit  $v_{A_i}$  während der Kollision kann ein linearer Zusammenhang zwischen dem Trägheitsmoment  $M_{\text{Träg,P}}$  und der anliegenden Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  festgehalten werden:

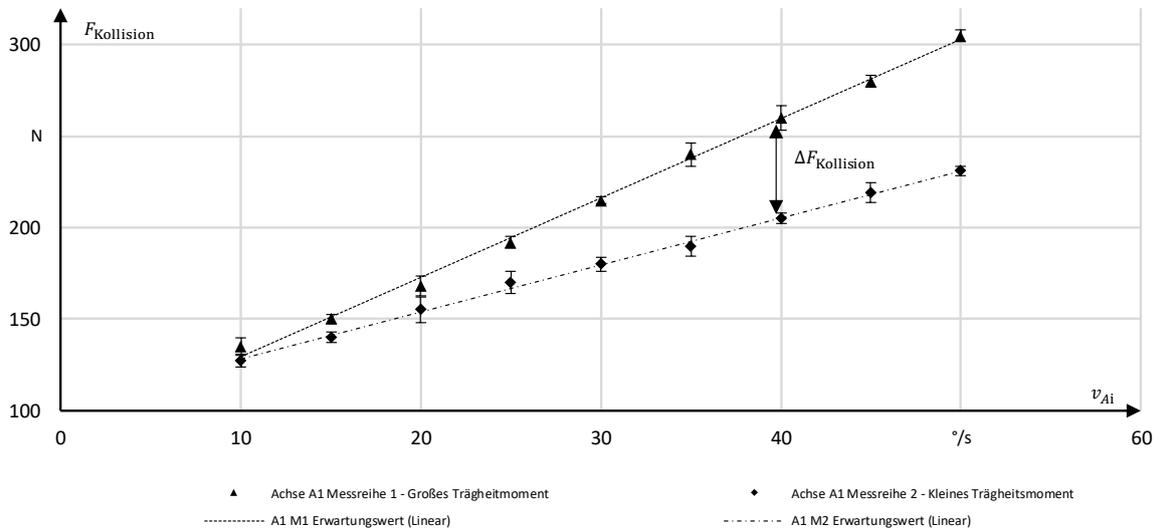
$$F_{\text{Kollision}} = \frac{1}{d_{A_i}} M_{\text{Träg,P}} = \frac{1}{d_{A_i}} I_{P,A_i} \dot{v}_{A_i} \quad (3-31)$$

Der Hebelarm  $d_{A_i}$  kann für die eindeutige Stellung des TCP als konstant angenommen werden, sodass folglich gilt:

$$F_{\text{Kollision}} \sim I_{P,A_i} \quad (3-32)$$

Da die genaue Massenverteilung der Roboterkomponenten mit ihren jeweiligen Schwerpunkten für die vorliegenden Untersuchungen nicht bekannt waren, wurden Prinzipversuche unternommen, welche den Effekt des Trägheitsmomentes näher betrachten sollen.

Abbildung 3-21 zeigt eine Untersuchung von mehrdeutigen Achsstellungen bei gleicher TCP-Ausrichtung. Die in Abbildung 3-22 gezeigten Versuche beleuchten Bewegungen um die Achse  $A_1$  des Universal Robots UR10. Es zeigt sich in den Versuchsergebnissen, dass die Kollisionskräfte  $F_{\text{Kollision}}$  durch eine Steigerung der Entfernung der vorliegenden Massen zum Drehpunkt der jeweiligen Achse  $A_i$  eine Erhöhung der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  zur Folge haben. Die in Abbildung 3-22 aufgezeigten Daten zeigen zwei Versuchsreihen zur Bestimmung des Einflusses des Trägheitsmoments. Zunächst wurden für die jeweiligen Trägheitsmomente Versuche mit unterschiedlichen Achsgeschwindigkeiten  $v_{A_i}$  unternommen. Hierbei zeigt sich u.a., dass der in Abschnitt 3.4.1 aufgezeigte Zusammenhang zwischen der Achsgeschwindigkeit  $v_{A_i}$  aus Formel (3-18) bestätigt werden kann. Zudem wird in dem Diagramm für die aufgezeigte Achsstellung die Differenz beider Messwerte entlang einzelner Achsgeschwindigkeiten  $v_{A_i}$  ausgewertet. Mit steigenden Achsgeschwindigkeiten  $v_{A_i}$  zeigt sich ein steigender Einfluss des Trägheitsmoments  $I_{A_i}$ . Es bleibt zu beachten, dass die Verzögerung  $\dot{v}_{A_i}$  aufgrund der erhöhten Geschwindigkeit ebenfalls linear ansteigt, da diese in einem linearen Zusammenhang zur Achsgeschwindigkeit  $v_{A_i}$  steht. Die Auswertung des Deltas der Kollisionskraft  $\Delta F_{\text{Kollision}}$  zeigt anhand des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  einen nahezu linearen Zusammenhang. Ebenfalls liegt die Streuung des Deltas der Messwerte der Kollisionskraft  $\Delta F_{\text{Kollision}}$  gegenüber dem linearen Erwartungswert in einem sehr kleinen Bereich. Die in Abbildung 3-22 gezeigten Versuchsergebnisse spiegeln daher die in (3-32) angestellten Überlegungen wider.



Auswertung	A1 M1	A1 M2	$\Delta F_{Kollision}$
Bestimmtheitsmaß $R^2$ bezogen auf den linearen Anstieg	0,998	0,976	0,970
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	3,2	1,7	4,6
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	3,64%	2,43%	3,50%

Abbildung 3-22: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss des Trägheitstensors  $I_{Ai}$  um die Achse  $A_1$  des Universal Robots UR10 für unterschiedliche Achsgeschwindigkeiten

Festzuhalten bleibt, dass gerade im Hinblick auf das anliegende Trägheitsmoment die Roboterachsstellung so zu wählen ist, dass die in den Komponenten vorliegenden Massen möglichst im Drehpunkt der jeweiligen Achse liegen. Dies ist speziell bei der 6-Achsen-Kinematik nur bedingt möglich. Zugleich gilt es die jeweils möglichen Achskonfigurationen im Hinblick auf weitere Gefährdungen wie bspw. potenzielle Scherstellen zwischen den einzelnen Gelenken und potenziellen Scherstellen mit der Anlagenperipherie abzuwägen.

### 3.4.5 Biofidele Messgröße – Federkonstante

Neben den roboterseitigen Steuergrößen gibt die differenzierte Betrachtung der einzelnen Körperregionen Anlass für eine detailliertere Untersuchung. Der in der ISO TS 15066 vorgestellte Körperatlas (vgl. Tabelle 2-3) stellt eine differenzierte Betrachtung der gefährdeten Körperregionen des Menschen dar. Je nach Federkonstante  $k_{mess}$ , welche im Kollisionsmessgerät für die vorliegende Messung verwendet wird, kann es zu unterschiedlichen Ergebnissen für die vorliegende Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  kommen. Die unter Abschnitt 3.2.1 vorgestellte Kollisionsmechanik gibt in (3-8) Rückschlüsse auf den Einfluss der Federkonstante:

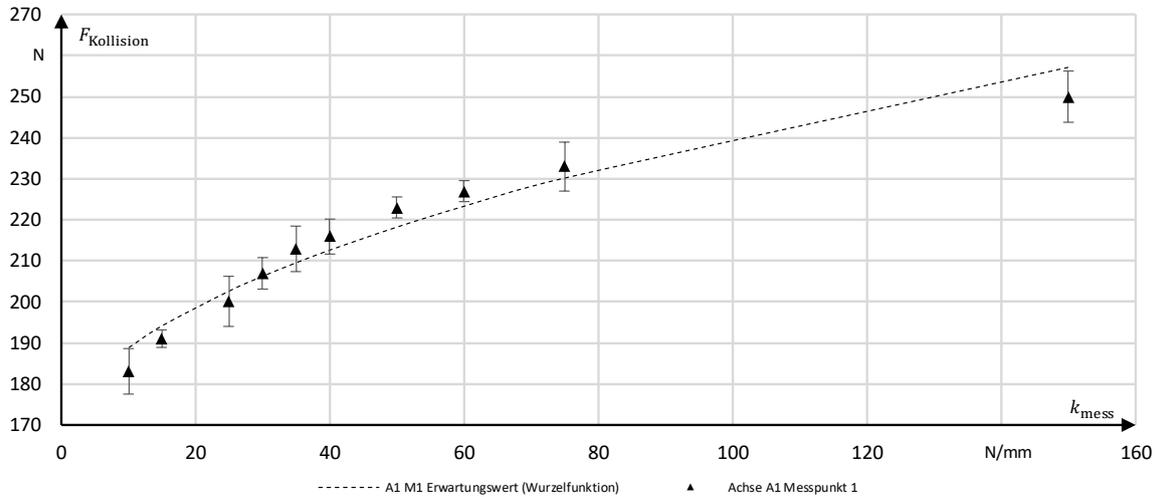
$$F_{Kollision} = \sqrt{k_{mess} m_{Zusatz}} v_p \quad (3-8)$$

Ausgehend von einer konstanten Zusatzmasse  $m_{Zusatz}$  am TCP des Roboters und einer konstanten Kollisionsgeschwindigkeit  $v_p$  im Kollisionspunkt  $P_{Kollision}$  ergibt sich ein polynomischer Zusammenhang zwischen der Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  und der im Messgerät verbauten Federkonstanten  $k_{mess}$ .

$$F_{Kollision} \sim \sqrt{k_{mess}} \quad (3-33)$$

Analog zu den bereits vorgestellten Messgrößen wurden ebenfalls in der RSEC Versuche unternommen, die den Einfluss der Federkonstanten näher untersuchen sollten. Es wurden die Kollisionsversuche im

selben Kollisionspunkt  $P_{\text{Kollision}}$  und bei gleichbleibender Kollisionsgeschwindigkeit  $v_p$  ausgeführt, lediglich die Federkonstante  $k_{\text{mess}}$  im Messgerät wurde entsprechend variiert.

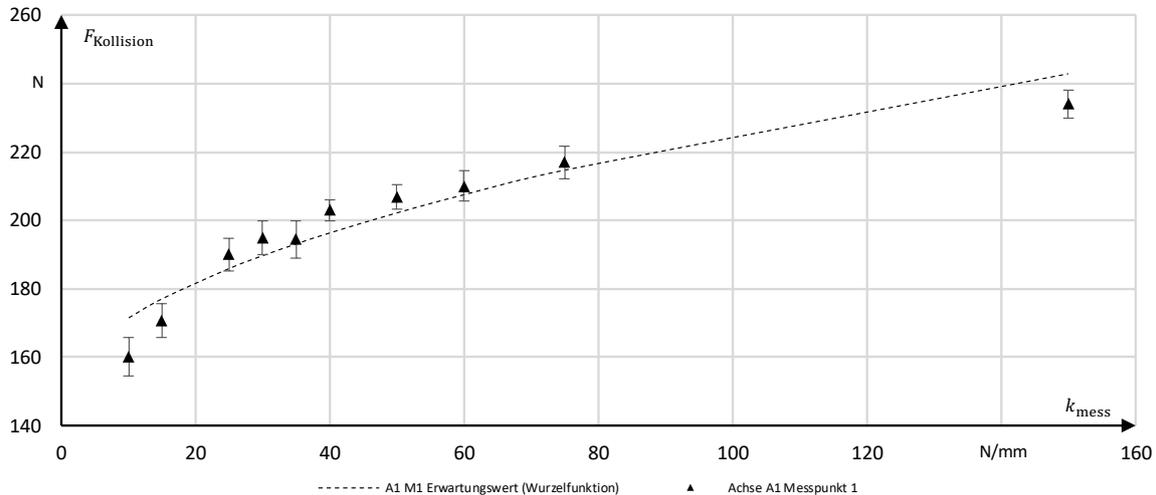


Auswertung	A1 M1
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,953
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	4,6
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	2,16%

Abbildung 3-23: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Federkonstanten  $k_{\text{mess}}$  um verschiedene Achsen des Universal Robots UR10

Die Abbildung 3-23 zeigt die erzielten Messergebnisse einer Versuchsreihe um die Achse  $A_1$  des Leichtbauroboters Universal Robots UR10 in der RSEC. Zugleich ist aufbauend auf dem Zusammenhang aus (3-33) eine für die Messergebnisse errechnete Erwartungskurve aufgetragen. Die Auswertung dieser Kurve gegenüber den Messergebnissen zeigt, dass der Zusammenhang aus (3-33) mithilfe des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  von 0,95 weitgehend bestätigt werden kann. Abweichungen bzw. Streuungen der Messwerte lassen sich über die Eigenschaften der Regelung des Leichtbauroboters erklären. Bei einer Taktung von 125 HZ im Regler des Universal Robots UR10 kann je nach Federkonstante  $k_{\text{mess}}$  und entsprechend auftretender Rückstellkraft der Feder die Kollision früher bzw. später erkannt werden. Die erzielten Messwerte liegen in einem relativ engen Korridor um den Erwartungswert der Funktion.

Analoge Versuche wurden mit dem KUKA LBR iiwa 14 R820 durchgeführt. Die nachfolgende Abbildung 3-24 zeigt die erzielten Messergebnisse aus der RSEC. Es zeigt sich ein analoges Verhalten des Messergebnisse wie bereits für den Universal Robots UR10. Die Auswertung des Bestimmtheitsmaßes  $R^2$  erzielt ebenfalls Werte oberhalb von 0,9. Es lässt sich folglich ebenfalls der in (3-33) ermittelte Zusammenhang zwischen der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  und der Federkonstanten  $k_{\text{mess}}$  nachweisen. Der eingezeichnete Erwartungswert auf Basis der erzielten Messergebnisse bildet den Erwartungswert ab. Die erzielten Messergebnisse liegen mit einer Standardabweichung von  $<5\%$  ebenfalls in einem sehr engen Korridor um den Erwartungswert.



Auswertung	A1 M1
Bestimmtheitsmaß $R^2$	0,910
Stbw. der Messreihe vom Erw.-Wert in [N]	6,9
Stbw. bezogen auf Messreihe (Mittelwert) in [%]	3,46%

Abbildung 3-24: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Federkonstanten  $k_{mess}$  um verschiedene Achsen des KUKA LBR iiwa 14

Abschließend wird festgehalten, dass die verwendete Federkonstante  $k_{mess}$  einen erheblichen Einfluss auf die erzielte Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  besitzt. Grundsätzlich zeigt sich, dass je niedriger die Federkonstante  $k_{mess}$  ist, die erzielte Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  abnimmt. Desweiteren zeigt sich, dass aufgrund der differenzierten Grenzwerte für die jeweilige Federkonstante eine weichere Feder nur bedingt bessere Ergebnisse im Hinblick auf die Sicherheit in der MRI erzielt, da die geforderten Grenzwerte erheblich niedriger liegen. Die differenzierte Betrachtung der einzelnen Körperregionen stellt daher bereits in der Planungsphase der Anlage erhebliche Anforderungen an die Konstruktion, da sich keine klare „worst case“ Konfiguration ableiten lässt und alle möglichen Gefährdungen betrachtet werden müssen.

### 3.4.6 Werkzeugdesign – Flächenpressung

Neben der Zielgröße der auftretenden Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  ist die erzielte Flächenpressung  $\rho_{Kollision}$  ebenfalls Gegenstand der zu betrachtenden Sicherheit nach der ISO TS 15066 (vgl. Abschnitt 2.3.3). Es gilt mögliche Spitzen der Flächenpressung  $\rho_{Kollision}$ , hervorgerufen durch das Werkzeugdesign bzw. Roboterdesign, bei der auftretenden Kollision zu betrachten. Es gilt die auftretende Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  möglichst flächig auf den Kollisionskörper zu übertragen. So lässt sich die auftretende Flächenpressung  $\rho_{Kollision}$  aus der auftretenden Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  und der relevanten Kollisionsfläche  $A_{Kollision}$  errechnen:

$$\rho_{Kollision} = \frac{F_{Kollision}}{A_{Kollision}} \quad (3-34)$$

Ausgehend von einer konstanten Kollisionskraft  $F_{Kollision}$  kann ein polynomischer Zusammenhang zwischen der Flächenpressung  $\rho_{Kollision}$  und der Kollisionsfläche  $A_{Kollision}$  festgehalten werden.

$$\rho_{Kollision} \sim \frac{1}{A_{Kollision}} \quad (3-35)$$

Es wird daher festgestellt, dass bei sehr flächigen Kollisionen eine minimale Flächenpressung sichergestellt ist.

*Tabelle 3-8: Mindestkollisionsflächen in Abhängigkeit von der maximalen statischen Kraft*

Körperregion		Verletzungsgrenzwerte			
Spezifische Lokalisation	Körperregion	Maximaler zulässiger Druck [N/cm <sup>2</sup> ]	Maximale zulässige Kraft [N]	Mindest Kollisionsfläche [cm <sup>2</sup> ]	
1	Stirnmitte	130	130	1	
2	Schläfe	110		1,18	
3	Kaumuskel	110	65	0,59	
4	Nackemuskel	140	150	1,07	
5	Siebter Halswirbel	210		0,71	
6	Schultergelenk	160	210	1,31	
7	Fünfter Lendenwirbel	210		1	
8	Brustbein	120	140	1,17	
9	Brustmuskel	170		0,82	
10	Bauchmuskel	140	110	0,79	
11	Beckenknochen	210	180	0,86	
12	Deltamuskel	190	150	0,79	
13	Oberarmknochen	220		0,68	
14	Speiche	190	160	0,84	
15	Unterarmmuskel	180		0,89	
16	Armnerve	180		0,89	
17	Zeigefingerkuppe D	300	140	0,47	
18	Zeigefingerkuppe ND	270		0,52	
19	Zeigefingerendgelenk D	280		0,5	
20	Zeigefingerendgelenk ND	220		0,64	
21	Daumenballen	200		0,7	
22	Handinnenflächen D	260		0,54	
23	Handinnenflächen ND	260		0,54	
24	Handrücken D	200		0,7	
25	Handrücken ND	190		0,74	
26	Oberschenkelmuskel	250	220	0,88	
27	Kniescheibe	220		1	
28	Schienbeinmitte	220	130	0,59	
29	Wadenmuskel	210		0,62	

Aus den in der ISO TS 15066 aufgezeigten Grenzwerten lassen sich zudem nach (3-34) die Anforderungen an die Mindestgröße der Kollisionsfläche ableiten. Die Tabelle 3-8 zeigt die für die jeweilige Körperregion errechneten Mindestflächen in Abhängigkeit der maximalen statischen Kraft nach der ISO TS 15066 auf.

Es bleibt zu beachten, dass in den meisten Fällen Kollisionen nicht rechtwinklig zur geplanten Kollisionsfläche stattfinden, sodass i.d.R. die aufgezeigten Mindestflächen nicht ausreichen und diese daher

größer vorzusehen sind. Es zeigt sich zudem anhand der Mindestkollisionsflächen, dass auf scharfkantige Konstruktionen bzw. Designs an Leichtbaurobotern bzw. Werkzeugen gänzlich verzichtet werden sollte, da hier die Mindestgrößen nur schwer erreichbar sind. Zugleich kann die Kollisionsfläche kleiner sein, wenn sichergestellt ist, dass die maximalen Grenzwerte für die Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision}}$  nicht erreicht werden.

Häufig ist das Design durch die jeweilige MRI-Anwendung beeinflusst, sodass es gilt geeignete Schutzvorrichtungen in der Applikation vorzusehen, um den Anforderungen im Hinblick auf die maximale dynamische Flächenpressung gerecht zu werden. Des Weiteren kann die Ausrichtung des Werkzeuges entlang der jeweiligen Bahn programmiert werden, sodass eine optimierte Bahnplanung einen erheblichen Beitrag zur Minimierung der Flächenpressung  $\rho_{\text{Kollision}}$  leisten kann. Es hat sich in der Praxis gezeigt, dass durch geeignete Verfahren maßgeschneiderte Schutzvorrichtungen gefertigt werden können, welche die Gefahren möglicher Flächenpressungen minimieren. Die Abbildung 3-25 zeigt mögliche Absicherungen für MRI-gerechte Werkzeugdesigns auf.



Abbildung 3-25: Maßgefertigte Schutzvorrichtungen für MRI-gerechte Werkzeugdesigns

Mittig wird ein Anrollwerkzeug für Kleberaupen gezeigt, welches typischerweise in der Automobilindustrie für das Andrücken von Schallisierungen an KFZ-Bauteilen wie der Tür verwendet wird (vgl. Kapitel 5). Im linken Teil ist eine maßgefertigte Schutzhülle zu sehen, welche durch ein in der BMW Group patentiertes Verfahren additiv gefertigt wird [120]. Es wird unter der Hülle eine rautenförmige Stützstruktur gefertigt, welche sich über die Strukturstärke in ihren Eigenschaften parametrieren lässt. So entsteht eine schaumstoffartige Schutzhülle, welche sich aufgrund des additiven Fertigungsverfahrens beliebig auf mögliche Konturen anpassen lässt und aufgrund der schaumstoffartigen Eigenschaften ein Maximieren der Kollisionsfläche im Kollisionsfall sicherstellt. Rechts im Bild ist eine Gummihülle zu sehen, welche durch ein Gießverfahren gefertigt wurde und analoge Eigenschaften aufweist.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die Flächenpressung  $\rho_{\text{Kollision}}$  für jede Anwendung speziell betrachtet werden muss. Zielsetzung dabei ist es, die Kollisionsfläche  $A_{\text{Kollision}}$  zu maximieren. Die Tabelle 3-8 gibt einen Überblick über die Anforderungen im Hinblick auf ein MRI-gerechtes Werkzeugdesign. Zugleich gilt es die auftretende Flächenpressung  $\rho_{\text{Kollision}}$  experimentell anwendungsbezogen zu erfassen. Im Falle von zu hoher Flächenpressung gibt es geeignete Lösungsvarianten, die Kollisionsflächen  $A_{\text{Kollision}}$  entsprechend zu maximieren und so eine Minimierung der auftretenden Flächenpressung  $\rho_{\text{Kollision}}$  herbeizuführen.

### 3.5 Ableitung von Handlungsempfehlungen für die Sicherheit

Nach der erfolgten theoretisch und experimentellen Betrachtung der Steuergrößen auf die Sicherheit von MRI-Anlagen können nachfolgend Gestaltungsrichtlinien abgeleitet werden, welche einen Beitrag

für die sichere MRI leisten. Die Ergebnisse aus Abschnitt 3.4 zeigen, dass eine Variation der Steuergrößen erheblichen Einfluss auf die Zielgrößen der Sicherheit haben kann und daher eine detaillierte Dokumentation der Parameter für eine reproduzierbare Messung nötig ist. Im Rahmen der vorliegenden Forschungsarbeit wurde hierzu in der RSEC ein Standardprotokoll für eine Kollision erarbeitet, welches nachfolgend vorgestellt wird.

Im Hinblick auf die Anlagengestaltung gilt es die aufgezeigten Steuergrößen gewinnbringend im Anlagendesign umzusetzen. Es zeigt sich, dass aufgrund der Vielzahl an Steuergrößen auf die Kollisionskraft der Anlagenkonstrukteur bereits in der Planungsphase einen entscheidenden Einfluss auf die Sicherheit der Anlage nehmen muss. Die Tabelle 3-9 gibt einen Überblick über die einzelnen diskutierten Steuergrößen und stellt gleichzeitig mögliche unterstützende Gestaltungshinweise im Hinblick auf die Anlagengestaltung vor.

*Tabelle 3-9: Überblick über die identifizierten Steuergrößen auf die Kollisionskraft in der MRI und Ableitung von Gestaltungsgrundsätzen für eine sichere Gestaltung einer MRI*

Steuergröße	Mathematischer Zusammenhang bezogen auf die Zielgröße der Kollisionskraft	Gestaltungsgrundsätze für eine sichere Gestaltung einer MRI
Kollisionsgeschwindigkeit	$F_{\text{Kollision}} \sim v_p$ $F_{\text{Kollision}} \sim v_{Ai}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung der vorliegenden Geschwindigkeiten</li> <li>• Einteilung von Sicherheitszonen – differenzierte Betrachtung der Risiken in den Zonen – versch. maximale Geschwindigkeitsgrenzwerte</li> <li>• Maximierung der Hebelarme bzw. Minimierung der Achsgeschwindigkeiten</li> <li>• Parametrierung achsbezogener maximaler Geschwindigkeitsgrenzen</li> </ul>
Zusatzmasse	$F_{\text{Kollision}} \sim \sqrt{m_{\text{Zusatz}}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduzierung der zusätzlichen Masse am TCP des Leichtbauroboters</li> </ul>
Hebelarmbetrachtung	$F_{\text{Kollision}} \sim \frac{1}{d_{Ai}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximierung der Hebelarme bzw. Minimierung der Achsgeschwindigkeiten</li> <li>• Überarbeitete Bahnplanung zur Maximierung der Hebelarme</li> </ul>
Trägheitsmoment	$F_{\text{Kollision}} \sim I_{p,Ai}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Konzentration der Massen auf der Hauptdrehachse der Roboterbewegung</li> </ul>
Biofidele Messgröße (Federkonstante)	$F_{\text{Kollision}} \sim \sqrt{k_{\text{mess}}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Detaillierte Betrachtung möglicher Gefährdungen – Vermeidung von möglichen Quetschungen mit der Anlagenperipherie</li> </ul>
Werkzeugdesign	$\rho_{\text{Kollision}} \sim \frac{1}{A_{\text{Kollision}}}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maximierung der Kollisionsflächen am Werkzeug</li> <li>• Einsatz von dämpfenden Materialien wie bspw. Schaumstoff</li> </ul>

Es kann festgehalten werden, dass bereits in der Planungsphase einer Anlage wesentliche Parameter im Hinblick auf die Sicherheit der MRI-Anlage festgelegt werden. Besonders ist der Zusammenhang zwischen der Positionierung des Roboters und der geplanten Aufgabe hervorzuheben. Je nach Arbeitsbereich und Bewegungsrichtungen des Roboters und dessen Werkzeug lassen sich die Hebelarme entsprechend der Positionierung des Roboters maximieren. Dies hat zwei Effekte zur Folge. Zum einen lassen sich aufgrund der vergrößerten Hebelarme die eingeleiteten Momente in den jeweiligen Achsen des Roboters steigern, sodass der in Abschnitt 3.4.3 aufgezeigte Hebelarmeffekt zum Tragen kommt. Zum Zweiten werden aufgrund der großen Hebelarme die Achsgeschwindigkeiten bei gleichbleibender TCP-

Geschwindigkeit geringer, sodass auch hier ein positiver Effekt im Hinblick auf die auftretende Kollisionskraft zu erwarten ist. Je nach programmierter Bahn kann zudem die Höhe der RoboterMontageposition einen positiven Effekt auf das anliegende Trägheitsmoment erzielen. Analog zur Positionierung des Leichtbauroboters im geplanten MRI-Szenario hat die Bahnplanung ebenfalls einen entscheidenden Effekt auf die Sicherheit. Je nach Aufgabe kann die Trajektorie im Hinblick auf die Hebelarme und die anliegenden Achsgeschwindigkeiten optimiert werden und so positive Effekte auf die Kollisionskraft erzielen. Gleiches gilt für die Ausrichtung des Werkzeuges entlang der geplanten Bewegungsbahn des Leichtbauroboters. Grundsätzlich sollten möglichst große Flächen senkrecht zur Bewegungsbahn des Roboters vorhanden sein, sodass die Flächenpressung minimiert wird. Gleichzeitig lässt sich die Flächenpressung durch den Einsatz dämpfender Materialien verringern. Schäume bzw. schaumähnliche Strukturen ermöglichen ein Maximieren der Kollisionsfläche und somit ein Minimieren der Flächenpressung, zugleich kann durch das dämpfende Material ein Effekt analog einer weicheren Feder erzielt werden. Dies dient wiederum einer Minimierung der auftretenden Kollisionskraft bei gleichbleibendem Grenzwert und senkt zudem die auftretende Flächenpressung.

Es zeigt sich, dass die unter Abschnitt 2.4 aufgezeigten Herausforderungen im Hinblick auf die Sicherheit erheblich durch die dargelegten und diskutierten Steuergrößen beeinflusst werden und daher geeignete Methoden für die Anlagenplanung zu entwickeln sind. So kann durch eine frühzeitige Berücksichtigung der Steuergrößen ein erheblicher Beitrag zur sicheren Anlagengestaltung erzielt werden.

Für die experimentelle Abnahme von Anlagen zeigen die aufgezeigten Ergebnisse ebenfalls Anforderungen auf, welche es zu beachten gilt. Bei komplexen Roboterbahnen können sich die Parameter der aufgezeigten Steuergrößen entlang der Trajektorie rasch ändern, sodass die exakte Dokumentation der vorliegenden Steuergrößen für ein reproduzierbares Ergebnis der Kollisionsmessung unabdingbar ist. Dies gilt sowohl für Messungen innerhalb der RSEC als auch für Messungen bei einer Anlagenabnahme. Beispielfhaft sei hier auf den Hebelarm verwiesen, der bei einer minimalen Veränderung des Bewegungsvektors entlang der Trajektorie sich erheblich verändern kann. Zur Gewährleistung der Reproduzierbarkeit und zu Dokumentationszwecken wurde eine Ausleitung der Kollisionsparameter in der RSEC programmiert. Die Abbildung 3-26 zeigt das dreiseitige Messprotokoll aus der RSEC.



Auf der ersten Seite werden alle relevanten Daten der Roboterzelle, wie bspw. die Sicherheitseinstellungen, die Angaben zum Prüfer oder die Anlagendaten der zu messenden Anlage erfasst. Zugleich sind alle Kraftverläufe der erfolgten Messung aufgezeichnet. Typischerweise erfolgen bei der BMW Group pro Messpunkt 10 Messungen, aus denen der Mittelwert gebildet wird, um ein reproduzierbares und belastbares Messergebnis zu erhalten. Auf der zweiten Seite hat der Anwender die Möglichkeit, ein Bild in die Dokumentation zu laden, welches bspw. den Messaufbau, die Kollisionsfläche des Roboters oder Ähnliches zeigt. Dies dient der Dokumentation und Veranschaulichung der erfolgten Messungen. Die dritte Seite des Messprotokolls dokumentiert die einzelnen Messungen im Detail. Es werden der Kollisionspunkt und die Kollisionsgeschwindigkeit in Achskoordinaten und in kartesischen Koordinaten dokumentiert. Somit kann die jeweilige Messung genau nachgestellt werden und eine Messung zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt werden.

Aufbauend auf den Ergebnissen der theoretischen und experimentellen Betrachtung der dargelegten Steuergrößen wird in Kapitel 4 ein datenbankbasiertes Berechnungsmodell entwickelt, welches zum Ziel hat, die Kollisionskräfte entlang einer Robotertrajektorie zu beurteilen. Die frühzeitige Berücksichtigung der dargelegten Steuergrößen zeigen in Kapitel 5 anhand eines Industriebeispiels die in diesem Kapitel dargelegten Einflüsse anschaulich auf. Nachfolgend erfolgt eine Zusammenfassung der Inhalte des Kapitels 3.

### 3.6 Zusammenfassung

In Kapitel 3 wurden die in Kapitel 2 identifizierten Einflussgrößen auf die Sicherheit von MRI-Applikationen näher betrachtet. Hierzu wurden in Abschnitt 3.1 zunächst alle identifizierten Einflussgrößen in Steuer- und Störgrößen eingeteilt. Zugleich wurden die relevanten Zielgrößen für die Sicherheit, die auftretende Kollisionskraft und die auftretende Flächenpressung, bei einem physischen Kontakt zwischen Mensch und Roboter genau spezifiziert. In Abschnitt 3.2 wird die Theorie, welche einer Kollision zwischen Mensch und Roboter zugrunde liegt, näher betrachtet. Zum einen wird anhand der Theorie des elastischen Stoßes der Zusammenhang zwischen der Kollisionskraft und den identifizierten Einflussgrößen näher vorgestellt. Zum anderen wird zur Berücksichtigung der Roboterpositionen eine Hebelarmbetrachtung eingeführt, welche auf dem anliegenden Kollisionsmoment in den jeweiligen Achsen des Leichtbauroboters aufbaut. Abschnitt 3.3 beschreibt den für die Untersuchung erfolgten Versuchsaufbau. Hierzu wurde die „Robot Safety Evaluation Cell“ – kurz RSEC – entworfen, welche eine detaillierte Untersuchung der dargelegten Steuergrößen auf die entsprechenden Zielgrößen vor dem Hintergrund der ISO TS 15066 ermöglicht. Die auftretenden Kollisionskräfte werden über die Zeit aufgezeichnet, sodass im Anschluss die notwendigen Daten aus den einzelnen Messungen gewonnen werden können. Abschnitt 3.4 befasst sich mit den Ergebnissen und der Diskussion der identifizierten Steuergrößen. Die gewonnenen Versuchsdaten werden den erfolgten Betrachtungen des elastischen Stoßes und der Hebelarmbetrachtung gegenübergestellt und diskutiert. Es zeigt sich, dass die in Kapitel 2 identifizierten Einflussgrößen einen erheblichen Einfluss auf die auftretenden Kollisionskräfte in einem MRI-Szenario haben und diese frühzeitig bei der Anlagenkonstruktion zu berücksichtigen sind. Abschließend wurden daher die Ergebnisse der Steuergrößen im Hinblick auf mögliche Handlungsempfehlungen für die sichere Gestaltung von MRI-Anlagen diskutiert. Zugleich wurden Anforderungen für die Erfassung und Dokumentationen von Kollisionen vor dem Hintergrund der ISO TS 15066 in der MRI aufgezeigt. Zudem erfolgte eine Darstellung der Dokumentation der Kollisionen der RSEC.

## 4 Datenbankbasierter Berechnungsansatz – Robot Safety Calculation

### Inhalt Kapitel 4

---

4.1	Anforderung und Vorgehen.....	82
4.1.1	Anforderungen und Zielsetzung.....	82
4.1.2	Überblick und Ablauf .....	83
4.2	Vorgehen der Robot Safety Calculation im Detail.....	86
4.2.1	Aufbereitung der Trajektorie .....	86
4.2.2	Kollisionsdatenbank.....	89
4.2.3	Regressionsrechenmodell .....	92
4.2.4	Ergebnisdarstellung.....	100
4.3	Ableich der Anforderungen und Zielsetzung .....	103
4.4	Zusammenfassung.....	105

---

*Aufbauend auf den erfolgten Betrachtungen des Kapitel 3 wird in Kapitel 4 ein Verfahren aufgezeigt, anhand dessen sich die Sicherheit von Trajektorien von MRI-Anlagen vor dem Hintergrund der ISO TS 15066 evaluieren lässt. Zielsetzung ist eine frühzeitige und umfassende Betrachtung der Kollisionskräfte im Hinblick auf die geforderten Grenzwerte der ISO TS 15066. Hierzu wurden in Kapitel 3 Steuergrößen sowohl theoretisch als auch experimentell untersucht. Diese Ergebnisse sind die Ausgangsbasis des nachfolgend vorgestellten Berechnungsmodells. Das Kapitel 4 gliedert sich in drei Abschnitte. Abschnitt 4.1 stellt zunächst die Anforderungen an die entwickelte Methodik dar und gibt einen Überblick über die Vorgehensweise. Die Vorgehensweise wird als „Robot Safety Calculation“ bezeichnet und gliedert sich in vier einzelne Elemente, welche nachfolgend in Kapitel 4.2 vorgestellt werden. In Abschnitt 4.3 erfolgt der Abgleich mit den zuvor festgelegten Anforderungen und Zielsetzungen. Der Abschnitt 4.4 fasst die Inhalte des Kapitels 4 abschließend zusammen.*

### 4.1 Anforderung und Vorgehen

Aufbauend auf den in Kapitel 3 erfolgten Betrachtungen wurde ein Vorgehen entworfen, anhand dessen eine Trajektorie eines MRI-Szenarios unter Betrachtung der identifizierten Steuergrößen beurteilt werden kann. Dieses Vorgehen wird nachfolgend als „Robot Safety Calculation“ (RSC) bezeichnet. In dem vorliegenden Abschnitt soll zunächst ein Überblick über die entwickelte Vorgehensweise der RSC gegeben werden. Die Vorgehensweise findet aufbauend auf den in der RSEC erfolgten Untersuchungen statt und nutzt die erhobenen Daten, welche in einer Kollisionsdatenbank gespeichert werden (vgl. Abbildung 3-7). Es werden zunächst die Anforderungen an das entwickelte Verfahren aufgezeigt. Anschließend wird ein kurzer Überblick über das gesamte Vorgehen zur Beurteilung der Sicherheit entlang einer Trajektorie gegeben.

#### 4.1.1 Anforderungen und Zielsetzung

In diesem Abschnitt sollen die Anforderungen und die Zielsetzung an das entwickelte Berechnungsmodell der RSC dargelegt werden. Zielsetzung der Methodik ist es, Trajektorien von inhärent sicheren Leichtbaurobotersystemen anhand der in Kapitel 3 aufgezeigten Steuergrößen zu analysieren und zu bewerten.

Als Zielgröße der sicheren Gestaltung von MRI-Arbeitsplätzen stellt sich die auftretende Kollisionskraft dar, da diese erheblich durch die angedachte Aufgabe und die programmierte Bahn beeinflusst wird. Art und Umfang der Prüfung werden durch eine Risikoanalyse festgelegt. Diese zeigt auf, welche Körperteile des Menschen sich in Gefahr befinden und in einer Kollisionskraftuntersuchung zu betrachten sind (vgl. Abschnitt 2.3). Ausgehend von dem Kollisionsfall (klemmende oder freie Kollision) werden zugleich die Grenzwerte für den betrachteten Umfang und die entsprechende Messkonfiguration festgelegt. Die auftretende Flächenpressung ist ebenfalls im Rahmen der RSC zu berücksichtigen, jedoch kann diese durch den Konstrukteur und geeignete Verfahren beeinflusst werden (vgl. Abschnitt 3.4.6 und Abschnitt 3.5). Es bleibt festzuhalten, dass die maximal zulässige Kollisionskraft die Kernzielgröße für die RSC darstellt. Aufbauend auf den in Abschnitt 3.4 erfolgten Untersuchungen wird zudem als weitere Zielgröße die Identifikation von Gefährdungen für die Risikoanalyse festgehalten. Dabei kann ableitend aus den aufgezeigten Steuergrößen durch eine systematische Analyse ein Rückschluss auf potenzielle Gefahren entlang der Trajektorie erfolgen. Dies ist insofern relevant, da so eine faktenbasierte Festlegung der in der Anlagenabnahme zu untersuchenden Gefährdungen erfolgen kann, welche anschließend durch eine physische Messung verifiziert werden kann.

Die Anforderungen an die Methodik lassen sich zunächst in die drei Kategorien technische, inhaltliche und nutzerseitige Anforderungen gliedern:

##### 1. Technische Anforderungen:

Unter den technischen Anforderungen können alle Anforderungen im Hinblick auf die Aussagekraft und die Übertragbarkeit der in der RSC generierten Ergebnisse auf den realen Anwendungsfall zusammengefasst werden. Hierzu gehört die Genauigkeit der Kalkulation als auch die statistische Untersuchung des datenbankbasierten Berechnungsmodells. Im Weiteren soll die generische Umsetzung und die Anwendbarkeit des Verfahrens auf unterschiedliche Robotertypen gewährleistet werden.

**2. Inhaltliche Anforderungen:**

Hierbei gilt es die inhaltlichen Aspekte und die aufbauenden Verfahren, wie bspw. die Erfassung der Kollisionskräfte nach der ISO TS 15066, vollständig umzusetzen. Die erzielten Erkenntnisse des Verhaltens der Steuergrößen auf die Zielgröße der Kollisionskraft sollen innerhalb der RSC Anwendung finden. Weiterhin sind anhand der Steuergrößen Erkenntnisse für die Risikoanalyse zu identifiziert, welche in der Sicherheitsbetrachtung der Anlage zu berücksichtigen sind. Als Ergebnis stellt sich die Transparenz der Steuergrößen entlang der Trajektorie dar.

**3. Nutzerseitige Anforderungen:**

Weitere Anforderungen sind im Umgang mit der RSC für den Anwender zu suchen. Zunächst gilt es die Ergebnisse im Hinblick auf die Zielgröße anschaulich darzulegen. Zugleich sollen Anforderungen im Hinblick auf eine Ableitung von Gefährdungen dem Anwender möglichst einfach dargelegt werden. Neben der Nutzerschnittstelle stellt sich zudem ein möglichst schlankes Verfahren mit einer entsprechenden Nutzerperformance als Anforderung dar.

Die Tabelle 4-1 gibt einen Überblick über die an das Vorgehen gestellten Anforderungen und dient als Ausgangsbasis für das in den nachfolgenden Abschnitten dargelegte Verfahren. Zugleich sind den aufgezeigten Anforderungen auch die festgelegten Zielgrößen gegenübergestellt, welche es in der RSC abzubilden gilt.

*Tabelle 4-1: Gegenüberstellung der Zielgrößen und der Anforderungen an die Robot Safety Calculation (RSC)*

<b>Anforderungen</b>			<b>Zielgröße</b>
Technische Anforderungen	Inhaltliche Anforderungen	Nutzerseitige Anforderungen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Genauigkeit der Aussage im Hinblick auf die Zielgröße</li> <li>• Statistische Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielgröße</li> <li>• Generische Umsetzung unabhängig vom verwendeten Robotersystem</li> <li>• Übertragbarkeit der Ergebnisse auf reale Versuchsaufbauten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Umsetzung der Anforderungen der TS-15066</li> <li>• Abbildung des Verhaltens der Steuergrößen</li> <li>• Identifikation von Gefährdungen für die Risikoanalyse auf Basis der Steuergrößen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• User Interface für den Anwender (softwareseitige Umsetzung)</li> <li>• Ergebnisdarstellung</li> <li>• Systemperformance</li> <li>• Schnittstelle der RSC zum Versuchsaufbau der RSEC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kollisionskraft</li> <li>• (Flächenpressung)</li> <li>• Identifizierte Gefährdungen für die Risikoanalyse des MRI Szenarios</li> </ul>

**4.1.2 Überblick und Ablauf**

In diesem Abschnitt wird das entwickelte Vorgehen der RSC schematisch dargelegt. Das Vorgehen gliedert sich in vier Abschnitte, welche anschließend im Detail in Abschnitt 4.2 beschrieben werden. Die RSC bildet die in Abschnitt 3.4 erzielten Ergebnisse und Beobachtungen ab. Die vorhandenen Kol-

lisionsuntersuchungen werden in einer Datenbank gespeichert und der RSC entsprechend gefiltert zugänglich gemacht, sodass eine Untersuchung und Kalkulation der Kollisionskraft für ein Kollisionszenario auf Basis der Datenbank erfolgen kann.

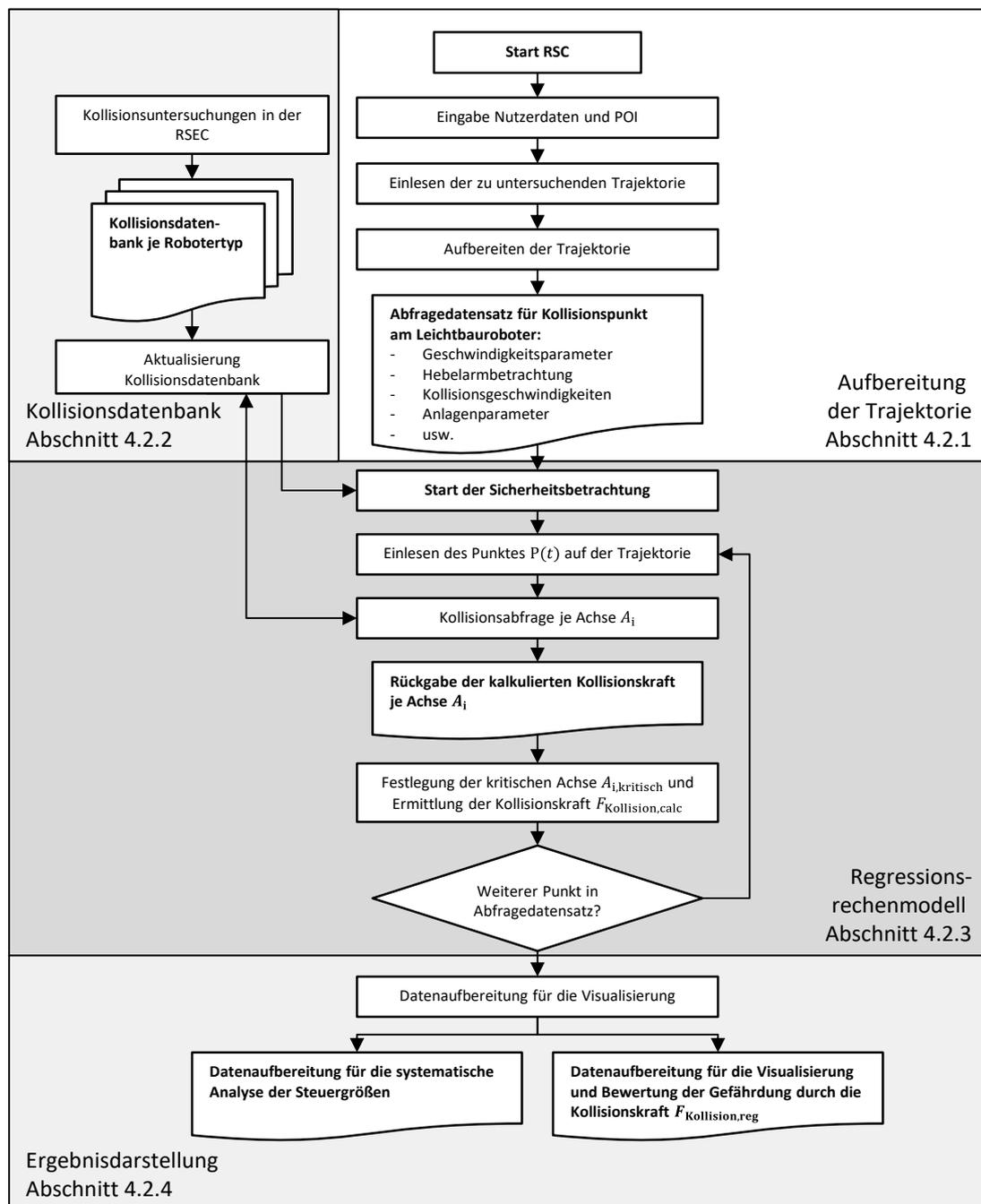


Abbildung 4-1: Überblick über den schematischen Ablauf der RSC mit Einteilung in die vier Abschnitte des Ablaufs

Die Abbildung 4-1 gibt einen Überblick über das Vorgehen der RSC und zeigt die einzelnen Abschnitte auf, welche in Abschnitt 4.2 detailliert erläutert werden. Der Ablauf gliedert sich in vier Abschnitte:

### 1. Aufbereitung der Trajektorie für die Robot Safety Calculation:

Der Ablauf der RSC startet mit Eingaben durch den Anwender, welcher in der RSC die zu untersuchende Robotertrajektorie und weitere Informationen, wie bspw. den Robotertyp oder die Zu-

satzmasse am TCP, angibt. Die Trajektorie wird durch eine Simulation bzw. durch eine real programmierte Bahn erzeugt und liegt als zeitliche Aufnahme der einzelnen Bahnpunkte und Bewegungsparameter vor. Im Weiteren gibt der Anwender auch die zu untersuchenden Kollisionspunkte am Roboter als Positionsinformation in den jeweiligen Roboterkoordinatensystemen an, sodass die für den Kollisionspunkt relevanten Informationen berechnet werden können. Es werden ausgehend von den anliegenden Achspositionen die entsprechenden Koordinaten des Kollisionspunktes, dessen Bewegungsvektor, die anliegenden Hebelarme je Achse und weitere Daten berechnet. Diese Berechnung erfolgt für jeden Punkt entlang der Trajektorie, sodass abschließend aus dem ersten Abschnitt des Ablaufes der RSC alle entlang der Trajektorie anliegenden Steuergrößen des Robotersystems bekannt sind. Diese werden in der Folge als Datensatz an den dritten Abschnitt des Ablaufes der RSC übergeben. Die Vorgehensweise und der Ablauf der Aufbereitung der Trajektorie für den durch den Anwender festgelegten Kollisionspunkt werden in Abschnitt 4.2.1 beschrieben.

### **2. Kollisionsdatenbank der Robot Safety Calculation:**

In der Kollisionsdatenbank der RSC werden alle in der RSEC erfolgten Kollisionen gespeichert, sodass auf Basis der vorhandenen Messungen im dritten Abschnitt des Ablaufes die auftretende Kollisionskraft kalkuliert werden kann. Die abgespeicherten Kollisionen enthalten alle relevanten Informationen, welche innerhalb der Versuche in der RSEC errechnet werden. Neben dem Kollisionspunkt einer Messung sind die entsprechenden Steuergrößen für jede Kollision aufbereitet, sodass auf Basis von Datenbankfiltern die relevanten Datensätze für das folgende Regressionsrechenmodell der RSC bereitgestellt werden können. Die Datenbank ist so gestaltet, dass sie jederzeit um weitere Steuergrößen erweitert werden kann, sodass nachfolgende Forschungsvorhaben auf diese aufgesetzt werden können. Der Abschnitt 4.2.2 beschreibt die für die RSC erstellte Kollisionsdatenbank.

### **3. Berechnungsmodell der Robot Safety Calculation:**

Der dritte Abschnitt befasst sich mit dem Berechnungsmodell der RSC. Hierbei bilden die in der ersten Teil der RSC aufbereitete Trajektorie und die durch die Datenbanken bereitgestellten Kollisionen die Ausgangsbasis des Berechnungsablaufs. Entlang der Trajektorie erfolgt für jeden in dem Datensatz enthaltenen Punkt eine Kalkulation der Kollisionskraft auf Basis des entworfenen Regressionsrechenmodells. Es werden zunächst die zu dem Kollisionspunkt passenden Kollisionsdaten aus der Datenbank gefiltert. Anschließend wird für jede einzelne Achse des Leichtbauroboters auf Basis der Daten eine Berechnungsfunktion erstellt, welche einen Rückschluss auf die Kollisionskraft auf Basis der Kollisionsdatenbank zulässt. In dem Berechnungsmodell sind die in Abschnitt 3.4 analysierten Funktionsweisen der entsprechenden Steuergrößen enthalten. Zugleich findet eine Prüfung der Daten- und Modellqualität auf Basis einer statistischen Auswertung statt, um Rückschlüsse im Hinblick auf die Genauigkeit und die Gültigkeit der Berechnung zu erlangen. Die Vorgehensweisen für das Filtern der Daten aus der Kollisionsdatenbank und für die Aufstellung des Regressionsrechenmodells werden detailliert in Abschnitt 4.2.3 erläutert.

### **4. Ergebnisdarstellung der Robot Safety Calculation:**

Der letzte Abschnitt der RSC befasst sich mit der Ergebnisdarstellung der errechneten Steuer- und Zielgrößen. Hierbei gilt es die relevanten Informationen dem Nutzer für die weitere Bearbeitung der Sicherheitsarchitektur der geplanten MRI-Anlage zur Verfügung zu stellen. Ausgehend von der erfolgten Berechnung können abschließend die entsprechenden Steuer- und Zielgrößen dem Anwender bereitgestellt werden. Es sind zwei Nutzerschnittstellen zur Darlegung der Ergebnisse der RSC implementiert. Die erste Schnittstelle befasst sich mit der systematischen Analyse der untersuchten Trajektorie. Hierbei werden die Kollisionskraftverläufe den entsprechenden Verläufen der

Steuergrößen über die Zeit gegenübergestellt. Anhand dieser Ausleitung kann der Nutzer entsprechend Einfluss auf die Steuergrößen nehmen und so Optimierungen an der Trajektorie vornehmen. Die zweite Schnittstelle bedient eine Ergebnisdarstellung anhand einer Simulationsumgebung über ein definiertes Ausleitungsformat aus der RSC. Es wird eine Datei im XML-Datenformat generiert, die entsprechend in einer Simulationsumgebung ausgelesen und visualisiert werden kann. So wird die Trajektorie im untersuchten Kollisionspunkt dargestellt und über eine Ampelfarbenindikation die entsprechenden Ergebnisse dargestellt. Neben der diagrammbasierten Ausleitung dient vor allem die Simulationsumgebung einer schnellen und anschaulichen Visualisierung der Ergebnisse. Die Darstellung der Nutzerschnittstelle erfolgt in Abschnitt 4.2.4.

Nachfolgend werden im Abschnitt 4.2 die einzelnen Abschnitte detailliert in ihrem Vorgehen und Ablauf dargelegt. Die einzelnen Abschnitte sind in Abbildung 4-1 entsprechend kenntlich gemacht. Die Anwendung des dargelegten Vorgehens erfolgt anhand eines Industriebeispiels der BMW Group in Kapitel 5.

## 4.2 Vorgehen der Robot Safety Calculation im Detail

In diesem Abschnitt erfolgt die Betrachtung des Vorgehens der RSC im Detail. Es werden die vier Abschnitte des entwickelten Vorgehens nacheinander in einzelnen Abschnitten vorgestellt. Im anschließenden Abschnitt 4.3 erfolgt ein Abgleich des Vorgehens mit den an die RSC formulierten Anforderungen aus dem Abschnitt 4.1.1.

### 4.2.1 Aufbereitung der Trajektorie

Ausgangspunkt des Vorgehens bildet das durch den Anwender vorgegebene MRI-Szenario. Die Trajektorie wird zunächst für die zu erfolgende Betrachtung in der RSC aufbereitet. Dies erfolgt nach einem festgelegten Schema, welches in der Abbildung 4-2 dargestellt wird.

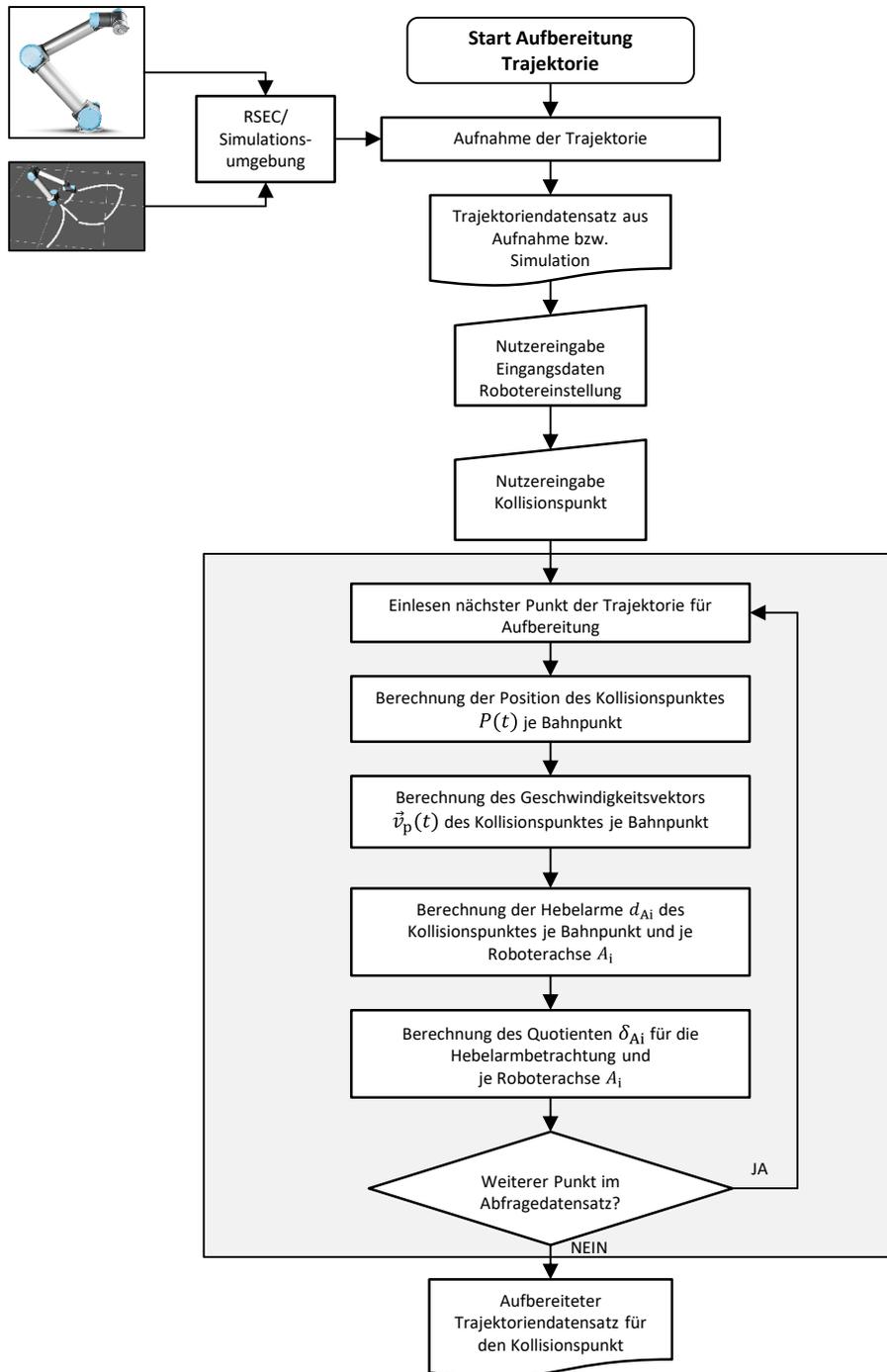


Abbildung 4-2: Vorgehen zum Aufbereiten der Trajektorie für die folgende Sicherheitsberechnung der RSC

Der Ablauf der Aufbereitung der Trajektorie erfolgt ausgehend von der durch den Nutzer festgelegten Robotertrajektorie. Ausgangspunkt ist eine zeitliche Aufnahme der Roboterbahn, sodass die Bahn in Form der Achsstellung  $P_{Ai}(t)$  und der entsprechenden Achsgeschwindigkeiten  $v_{Ai}(t)$  über die Zeit  $t$  vorliegt. Diese Aufnahme kann durch eine Simulationsumgebung bereitgestellt oder direkt in der Versuchsumgebung am Leichtbaurobotersystem in der RSEC aufgenommen werden. Die gewünschte Frequenz der Aufnahme kann in der RSEC festgelegt werden, sodass der Nutzer die Granularität der Untersuchung wählen kann. Zumeist kann eine Aufnahme in der RSEC bis auf den Roboterregeltakt erfolgen, sodass bspw. im Falle des Universal Robots UR10 eine Aufnahme der Trajektorie mit ca. 125 Hz erfolgen kann. In der Praxis hat sich gezeigt, dass eine Aufnahme mit ca. 10 Hz ausreichend ist, welche

als Richtwert für die RSC festgehalten werden soll. Die zeitliche Datenaufnahme der Roboterbewegung stellt die Ausgangsbasis für die Aufbereitung der Trajektorie dar.

Im weiteren Verlauf erfolgen für die Trajektorienaufbereitung notwendige Nutzerangaben. Zu diesen zählt die Angabe der geplanten Roboterkonfiguration, wie bspw. die Handhabungsmasse oder die zu erfolgenden Sicherheitseinstellungen, welche für die im dritten Abschnitt der RSC erfolgte Regressionsrechnung von Bedeutung ist. Zugleich gibt der Nutzer den zu betrachtenden Kollisionspunkt  $\vec{P}_{\text{Kollision,A}_i}$  am Robotersystem bzw. Werkzeug an, damit für diesen der entsprechende Datensatz nachfolgend aufbereitet wird. Die Angabe des Kollisionspunktes  $\vec{P}_{\text{Kollision,A}_i}$  erfolgt im Koordinatensystem  $KS_{A_i}$  des jeweiligen Achsenabschnitts  $A_i$ , in welchem der entsprechende Punkt liegt.

Die Steuergrößen sind teilweise durch die entsprechende Trajektorienaufnahme bereits vorhanden, weitere werden in der Folge auf Basis der Nutzereingabe errechnet. Es werden zunächst die Koordinaten des Kollisionspunktes  $\vec{P}_{\text{Kol}}(t)_{A_i}$  jedes Koordinatensystems  $KS_{A_i}$  über die Zeit  $t$  und dessen dazugehöriger Bewegungsvektor  $\vec{v}_p(t)_{A_i}$  ermittelt:

$$\vec{P}_{\text{Kol}}(t)_{A_i} = \begin{cases} \left( \prod_{i=2}^i T_{KS_{A_{i-1}}}^{KS_{A_i}} P(t)_{A_i} \right) \vec{P}_{\text{Kollision,A}_i} & \text{für } i \geq 2 \\ \vec{P}_{\text{Kollision,A}_i} & \text{für } i = 1 \end{cases} \quad (4-1)$$

$$\vec{v}_p(t)_{A_i} = \begin{cases} \left( \prod_{i=2}^i T_{KS_{A_{i-1}}}^{KS_{A_i}} v_p(t)_{A_i} \right) P_{\text{Kol}}(t)_{A_i} & \text{für } i \geq 2 \\ \vec{P}_{\text{Kollision,A}_i} & \text{für } i = 1 \end{cases} \quad (4-2)$$

Sind die Positionsinformationen  $P_{\text{Kol}}(t)_{A_i}$  und der Geschwindigkeitsvektor  $\vec{v}_p(t)_{A_i}$  für den Kollisionspunkt bekannt, können in der Folge die relevanten Steuergrößen errechnet werden. Zu diesen zählt der Verlauf der Hebelarme  $d_{A_i}(t)$  je Achse  $A_i$  und die Berechnung des Quotienten  $\delta_{A_i}(t)$  je Achse  $A_i$  über die Zeit  $t$ . Die Berechnung erfolgt analog zu den bereits aufgezeigten Punkt- und Geschwindigkeitsberechnungen mit der in Abschnitt 3.4.3 eingeführten Berechnungslogik. Zunächst wird für die zu erfolgende Abstandsbetrachtung die Geradengleichung  $g_{A_i}(t)$  mit (3-25) aufgestellt, welche für die Ermittlung des minimalen Abstands zum Ursprung in der XY-Ebene des jeweiligen Koordinatensystems  $KS_{A_i}$  in (3-26) herangezogen wird.

$$g_{A_i}(t): \vec{x} = \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \left( \frac{1}{|\vec{v}_p(t)_{A_i}|} \vec{v}_p(t)_{A_i} \gamma + P_{\text{Kol}}(t)_{A_i} \right) \quad (3-25)$$

$$d_{A_i} = d\left( \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, g_{A_i} \right) \quad (3-26)$$

Zudem wird für jede Achse der Quotient  $\delta_{A_i}$  errechnet, da dieser ebenfalls für die im dritten Abschnitt der RSC erfolgten Berechnung herangezogen wird. Für den Quotienten  $\delta_{A_i}$  wurde in Abschnitt 3.4.3 die entsprechende Berechnungsformel eingeführt, welche in (4-3) auf Basis des Bewegungsvektors ermittelt wird:

$$\delta_{A_i} = \frac{\left| \vec{v}_p(t)_{A_i} * \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \right|}{|\vec{v}_p(t)_{A_i}|} \quad (4-3)$$

Die Aufbereitung erfolgt nacheinander für jeden einzelnen Bahnpunkt der zu untersuchenden Trajektorie. Die Tabelle 4-2 zeigt die vorliegenden Informationen in Abhängigkeit der Zeit  $t$ .

*Tabelle 4-2: Ergebnis der Datensatzaufbereitung des ersten Abschnitts der RSC*

<b>Steuergröße der Trajektorie</b>	<b>Beschreibung</b>
$P(t)_{Ai}$	Positionsinformation der Achsen entlang der Trajektorie
$P_{Kol}(t)_{Ai}$	Positionsinformation des Kollisionspunktes entlang der Trajektorie im jeweiligen Achskoordinatensystem $KS_{Ai}$
$v_P(t)_{Ai}$	Geschwindigkeitsinformation der Achsen entlang der Trajektorie
$\vec{v}_p(t)_{Ai}$	Geschwindigkeitsvektor des Kollisionspunktes entlang der Trajektorie im jeweiligen Achskoordinatensystem $KS_{Ai}$
$m_{Zusatz}$	Zusatzmasse am TCP des Roboters (Werkzeug und Werkstück)
$d_{Ai}(t)$	Hebelarm je Achse entlang der Trajektorie
$\delta_{Ai}(t)$	Berechnungsquotient für die Orthogonalität des Bewegungsvektors zur XY-Ebene der jeweiligen Roboterachse entlang der Trajektorie.
<i>div.</i>	Diverse Informationen bzgl. der Sicherheitskonfiguration des verwendeten Leichtbauroboters.

Der aufbereitete Datensatz für die geplante Robotertrajektorie des MRI-Szenarios stellt das Ergebnis des ersten Abschnitts der RSC dar. Er bildet die Ausgangsbasis für die im dritten Abschnitt erfolgten Kollisionskraftberechnungen mithilfe eines datenbankbasierten Regressionsrechenmodells.

Es gilt abzuwägen, mit welcher Frequenz der Datensatz aufgenommen wird, da die einzelnen Steuergrößen sich bei einer hinreichend langsamen Bewegung des Leichtbaurobotersystems kaum über die Zeit ändern und sich nur bedingt eine sehr feine Auflösung vor dem Hintergrund der erzielbaren Systemperformance lohnt. Die vorliegende Trajektorie bildet auch die Ausgangsbasis für die in Abschnitt 2.3.4 dargelegte Risikoanalyse. Auf Basis des zeitlichen Verlaufes der Steuergrößen der Trajektorie für den zu untersuchenden Kollisionspunkt lassen sich Gefährdungen entlang der Bahn ableiten. Es dienen die unter Abschnitt 3.5 eingeführten Handlungsempfehlungen als Ausgangsbasis der Ableitung. Die Ergebnisdarstellung der vorliegenden Informationen wird im letzten Abschnitt der RSC in Abschnitt 4.2.4 näher vorgestellt.

## **4.2.2 Kollisionsdatenbank**

Das zweite Element der RSC stellt die Kollisionsdatenbank dar und ist sehr eng mit der RSEC verknüpft, da sie die in der RSEC aufgenommenen Kollisionen und alle dazugehörigen Informationen abspeichert. Die Kollisionsdatenbank erfasst alle Steuergrößen einer Kollision zwischen einem Leichtbauroboter und dem in der RSEC verwendeten Kollisionsmessgerät. Ausgangsbasis bilden die in Abschnitt 3.3.2 in Tabelle 3-4 aufgezeichneten Informationen. Die Datensatzaufbereitung erfolgt analog zu der Aufbereitung der Trajektorie, wie in Abschnitt 4.2.1 geschildert. Es werden neben den Positionsinformationen des Kollisionspunktes  $P(t_{\text{Kollision}})_{LBR\_Base}$  auch die anliegenden Hebelarme  $d_{Ai}$  je Roboterachse  $A_i$

und der Quotient  $\delta_{A_i}$  nach den in Abschnitt 3.4.3 eingeführten Formeln zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  errechnet. Zugleich sind die zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  vorliegenden Roboterkonfigurationsdaten in der Datenbank erfasst.

Der Aufbau der Datenbank folgt einem festgelegten Schema und ist der Anwendung in der RSC angepasst. Die Datenbank ist in verschiedene Verzeichnisse gegliedert. Die Verzeichnisse bilden die einzelnen Roboterachsen  $A_i$  ab und sind flexibel je nach Aufbau des Leichtbauroboters erweiterbar. Innerhalb der jeweiligen Achsen werden die entsprechenden Informationen der einzelnen Kollisionen abgespeichert. Die Zuordnung der Kollisionen zum jeweiligen Verzeichnis erfolgt über die Auswertung der Fehlermeldungen in der Steuerung des Leichtbaurobotersystems bzw. durch die manuelle Eingabe des Nutzers. Es wird erfasst, welche Roboterachse den Stopp der Roboterbewegung ausgelöst hat. Die Daten werden dann in das jeweilige Verzeichnis der Roboterachse gespeichert. Die nachfolgende Abbildung 4-3 gibt einen Überblick über den Aufbau der Datenbank.

In der Kollisionsdatenbank werden in den Kopfdaten die grundlegenden Informationen bzgl. des Robotertyps und der verwendeten Softwareversion der Steuerung erfasst. Hierbei ist auch das kinematische Modell des Roboters hinterlegt, um auf Basis der Achskoordinaten die entsprechenden kartesischen Informationen des Kollisionspunktes zu berechnen. Um etwaige Veränderungen aufgrund möglicher Softwarestände der Steuerung des Leichtbauroboters in Bezug auf die Kollisionskraft auszuschließen, gilt es die jeweilige Softwareversion durch Versuche mit der vorgehenden Softwareversion zu vergleichen und Rücksprache mit dem Hersteller zu halten.

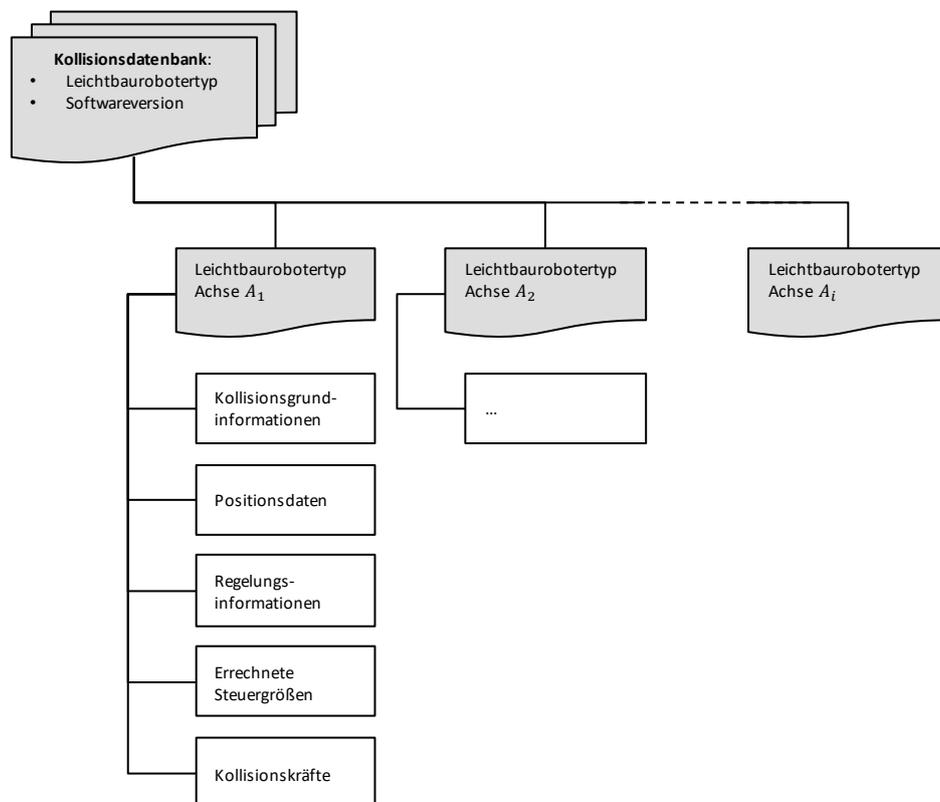


Abbildung 4-3: Aufbau der Kollisionsdatenbank zur Dokumentation der erfolgten Kollisionsuntersuchungen in der RSEC

Die abgespeicherten Kollisionsdaten lassen sich in fünf Gruppen strukturieren, welche nacheinander in der Datenbank abgespeichert sind:

### 1. Kollisionsgrundinformationen:

Die Kollisionsgrundinformationen umfassen alle wesentlichen Einstellungen der erfolgten Kollision in der RSEC. Zu den Informationen zählen Datum, Ort und Prüfer der Kollision, die verwendete Konfiguration des Kollisionsmessgerätes (biofidele Messgröße), die anliegende Zusatzmasse am TCP des Leichtbauroboters und die verwendete Sicherheitskonfiguration in der Steuerung des Leichtbauroboters.

### 2. Positionsdaten:

Die Positionsdaten umfassen die achsspezifischen Koordinaten  $P(t_{\text{Kollision}})_{A_i}$  wie auch die kartesischen Koordinaten  $\vec{P}(t_{\text{Kollision}})_{\text{LBR\_Base}}$  bezogen auf den Kollisionspunkt zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$ . Gespeichert wird der Punkt, an dem ein Anstieg der Kollisionskraft am Messgerät registriert wird. Die Positionsdaten werden über die Roboterschnittstelle in der RSEC bereitgestellt. Des Weiteren werden die anliegenden Geschwindigkeiten zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  gespeichert. Dies umfasst die anliegenden achsspezifischen Geschwindigkeiten  $v(t_{\text{Kollision}})_{A_i}$  und die aufgezeichnete Geschwindigkeit im TCP des Roboters  $\vec{v}(t_{\text{Kollision}})_{\text{TCP}}$  zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$ . Zusätzlich erfolgt innerhalb der Auswertung der RSEC des einzelnen Kollisionsfalls die Bestimmung der Koordinaten des Punktes, bei welchem die maximale Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,max}}$  erreicht wurde. Diese Daten werden ebenfalls bei jeder Kollision mitprotokolliert (vgl. Abbildung 3-8). Die Positionsdaten werden unabhängig vom verwendeten Robotertyp und Roboterhersteller erfasst.

### 3. Regelungsinformationen:

In der dritten Datengruppe erfolgt die Protokollierung der Regelungsinformationen der einzelnen Robotersteuerungen. Es ist zu beachten, dass je nach Roboterhersteller und -typ die Möglichkeit der Erfassung und Protokollierung sich erheblich unterscheiden kann. Die erfassten Daten werden im dritten Abschnitt der RSC nicht weiter verwendet, dienen aber einer möglichen Weiterführung der Forschungsarbeit. Vor allem die Auswertung der erfassten Regelungsinformationen im Hinblick auf die Weiterentwicklung der Kollisionsüberwachung kann für die Roboterhersteller von Bedeutung sein. Da wie bereits angedeutet die Regelungsinformationen für die RSC nicht weiter von Bedeutung sind, wird auf die hier gespeicherten Daten nicht näher eingegangen.

### 4. Errechnete Steuergrößen zum Kollisionszeitpunkt $t_{\text{Kollision}}$ :

Zu den aufgezeichneten Kollisionen werden alle relevanten Steuergrößen errechnet und gespeichert. Die RSEC zeichnet die Steuergrößen für den durch den Anwender angegebenen Kollisionspunkt auf. Die entsprechenden Daten werden durch die in Abschnitt 3.4.3 und in Abschnitt 4.2.1 eingeführten Formeln zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  errechnet. Herangezogen für die Steuergrößen wird der Kollisionspunkt mit dem Kollisionsmessgerät, wie in Abbildung 3-8 aufgezeigt. Zu den relevanten Steuergrößen gehören die errechneten Hebelarme  $d_{A_i}$  zum Zeitpunkt  $t_{\text{Kollision}}$  und der entsprechende Quotient  $\delta_{A_i}$  im Hinblick auf die Orthogonalität des Kraftvektors zur XY Koordinatenebene der jeweiligen Achse  $A_i$ . Die Koordinaten des Kollisionspunktes wie auch der Bewegungsvektor wurden bereits unter den Positionsdaten erfasst. Die Zusatzmasse am TCP des Roboters wurde in den Kollisionsgrundinformationen durch den Nutzer angegeben.

### 5. Kollisionskräfte:

Im letzten Teil der Datenbank werden die erfassten Kollisionskräfte durch die RSEC abgespeichert. Es wird der am Kollisionsmessgerät gemessene Kraftverlauf herangezogen, von welchem zwei Messwerte abgespeichert werden. Zum einen wird die maximal auftretende Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,max}}$  herangezogen, welche durch das Maximum im aufgezeichneten Kraftverlauf gekennzeichnet ist. Zum anderen wird der am Ende der Messung statisch anliegende Kraftwert  $F_{\text{Kollision,stat}}$  abgespeichert, welcher nach dem Stillstand des Roboters anliegt. Beide Kraftwerte

sind im aufgezeichneten Kraftverlauf in Abbildung 3-8 ersichtlich. Des Weiteren werden zusätzliche Kraftwerte errechnet, welche für die im dritten Teil der RSC erfolgende Regressionsrechnung herangezogen werden. Es gilt auf Basis des errechneten Quotienten  $\delta_{A_i}$  den Anteil des Kraftvektors in der XY-Ebene der jeweiligen Achse  $A_i$  zu berechnen. Die Berechnung erfolgt über die Formeln (4-4) und (4-5):

$$F_{\text{Kollision,max},A_i(XY)} = \delta_{A_i} F_{\text{Kollision,max}} \quad (4-4)$$

$$F_{\text{Kollision,stat},A_i(XY)} = \delta_{A_i} F_{\text{Kollision,stat}} \quad (4-5)$$

Die Kraftwerte der einzelnen Kollisionmessungen bilden den Abschluss in der Kollisionsdatenbank und die Grundlage für das Regressionsrechenmodell der RSC.

Da für jeden Robotertyp eine eigene Datenbank vorgesehen ist, wird durch den Nutzer eine entsprechende Auswahl getroffen und die Datenbank in die Softwareumgebung der RSC geladen. Dies dient einerseits einer möglichst schlanken Gestaltung und begrenzt die zu untersuchende Datenmenge erheblich. Grundsätzlich ist die Zielsetzung, dass jede erfolgte Messung in der RSEC Eingang in die Kollisionsdatenbank findet. Je mehr Kollisionen in der Datenbank gespeichert sind, desto umfangreicher ist die Datenbasis für eine Kalkulation der Kräfte im dritten Abschnitt der RSC.

Wie bereits in Abschnitt 3.3.1 aufgezeigt lässt sich die RSEC automatisiert konfigurieren, sodass eine Messung mit minimalem Aufwand erfolgen kann. Der gegenhaltende Messroboter und das biofidele Messgerät werden automatisch positioniert, um eine möglichst genaue Ausrichtung des Messgerätes zum Bewegungsvektor im Kollisionspunkt sicherzustellen. Dies dient der aufgenommenen Datenqualität und spart dem Nutzer zusätzlich erhebliche Einrichtungszeit für jeden geplanten Messpunkt. Je nach Anwendungsfall und untersuchtem Kollisionsszenario können zudem nicht untersuchte Bewegungsmuster in der Datenbank identifiziert werden und so die Datenmenge gezielt erhöht werden. Durch die Analyse der fehlenden Bewegungsmuster anhand der Steuergrößen lassen sich zudem die Anzahl der Messungen auf die „worst case“ Betrachtungen reduzieren, was wiederum den Aufwand im Hinblick auf die zu erfolgenden Messungen reduziert. Zugleich dient die Dokumentation der einzelnen Messungen in der Datenbank der Reproduzier- und Vergleichbarkeit verschiedener Roboterkonfigurationen. Dies stellt eine praxisnahe Anwendung und einen vertretbaren Aufwand der Kollisionsuntersuchungen sicher.

### 4.2.3 Regressionsrechenmodell

Der dritte Abschnitt der RSC bildet das Regressionsrechenmodell zur Berechnung der Kollisionskraft auf Basis der in Abschnitt 4.2.2 vorgestellten Kollisionsdatenbank. Das Regressionsrechenmodell bildet den Kern der RSC und dient dem Nutzer bereits in einer frühen Phase der Anlagenplanung zur Berücksichtigung der normativen Sicherheitsanforderungen. Die Abbildung 4-4 zeigt das angewandte Vorgehen im Regressionsrechenmodell der RSC.

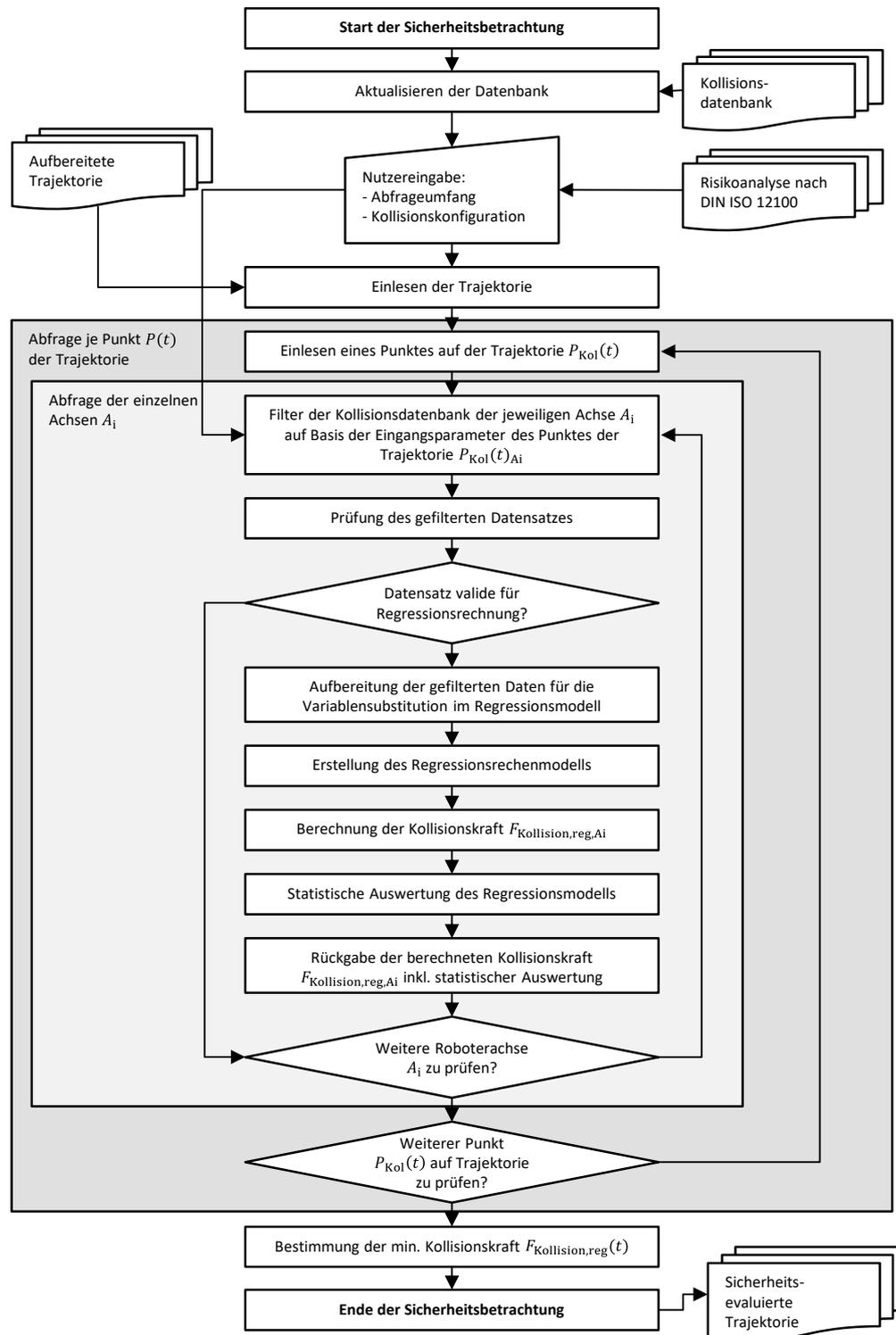


Abbildung 4-4: Ablauf des Regressionsrechenmodells für eine festgelegte Trajektorie innerhalb des dritten Abschnitts der RSC

Die Sicherheitsbetrachtung baut auf dem ersten und zweiten Abschnitt der RSC auf. Ausgehend von der für den Kollisionspunkt festgelegten und entsprechend aufbereiteten Trajektorie wird für den Robotertyp die angelegte Datenbank aktualisiert. Zugleich erfolgt über eine Nutzerschnittstelle die Eingabe relevanter Eingangsgrößen für das nachfolgende Regressionsrechenmodell. So wird anhand der erfolgten Risikoanalyse die erforderliche Kollisionskonfiguration festgelegt, über welche die entsprechende bio-

fidele Messgröße wie auch der Grenzwert für die maximal zulässige Kollisionskraft und Flächenpressung festgelegt wird. Der Nutzer gibt auch Filtergrenzen für das auf der Datenbank aufbauende Regressionsrechenmodell an.

Anschließend erfolgt ein zyklischer Ablauf für jeden Bahnpunkt auf der Trajektorie. Der aufbereitete Bahnpunkt wird hierfür in ein Abfrageinterface kopiert, in welchem für jede einzelne Achse eine entsprechende Berechnung erfolgt. Auf Basis der Achspositionsinformationen  $P(t)_{A_i}$  und Steuergrößen des Kollisionspunktes  $P_{Kol}(t)$  erfolgt eine Filterung der vorhandenen Kollisionen innerhalb der Datenbank. Im Anschluss daran erfolgt aufbauend auf den gefilterten Daten eine nicht lineare Regressionsrechnung, welche durch eine Variablensubstitution die entsprechenden Verhaltensmuster der Steuergrößen abbildet. Die so erstellte Regressionsformel bildet die Grundlage für die folgende Ermittlung der berechneten Kollisionskraft  $F_{Kollision,reg,A_i}$  je Achse  $A_i$ . Wenn die Datenbank für den Bahnpunkt  $P(t)_{A_i}$  nicht die hinreichende Datenqualität enthält, ist eine Berechnung der Kollisionskraft  $F_{Kollision,reg,A_i}$  mit dem Regressionsrechenmodell nicht möglich. Dies ist dann der Fall, wenn nicht ausreichend viele Kollisionsmessungen in der Datenbank hinterlegt sind. Anhand des gefilterten Datensatzes wird in der Regressionsrechnung eine statistische Auswertung vorgenommen, welche Rückschlüsse auf die Daten- und Modellqualität des Regressionsmodells liefert. Diese Auswertung wird analog zur ermittelten Kollisionskraft  $F_{Kollision,reg,A_i}$  je Roboterachse  $A_i$  mit dem Bahnpunkt der Trajektorie gespeichert. Die angewendete Filterfunktion, das nicht lineare Regressionsrechenmodell und die statistische Auswertung werden im Anschluss detailliert vorgestellt. Ist für einen Bahnpunkt  $P(t)_{A_i}$  die entsprechende Berechnung der Kollisionskraft  $F_{Kollision,reg,A_i}$  für jede Roboterachse  $A_i$  erfolgt, so wird der nächste Bahnpunkt  $P(t+1)_{A_i}$  in das Abfrageinterface kopiert und der Ablauf beginnt erneut, bis alle Bahnpunkte der Trajektorie entsprechend berechnet wurden.

Kern des Berechnungsmodells bilden das angewendete nicht lineare Regressionsrechenmodell, die vorgenommene Filterung des Datensatzes und die statistische Beurteilung des erstellten Regressionsrechenmodells anhand des zu untersuchenden Bahnpunktes  $P(t)_{A_i}$  der Trajektorie, welche nachfolgend vorgestellt werden:

- **Datenbankfilter bezogen auf den zu untersuchenden Bahnpunkt  $P(t)_{A_i}$ :**

Die im Berechnungsmodell hinterlegte Funktion filtert die in Abschnitt 4.2.2 vorgestellte Kollisionsdatenbank. Die Funktion sieht einen dreistufigen Filter vor, um die vorhandene Datenbank je Roboterachse  $A_i$  nach Nutzeranforderungen relativ eng oder weit um den zu untersuchenden Bahnpunkt  $P(t)_{A_i}$  einzugrenzen. Die Einstellung des Datenbankfilters erfolgt im Interface des Anwenders und wird einmalig vor der Evaluierung der Trajektorie angegeben. In der RSC kommen zwei unterschiedliche Arten von Filtern zum Einsatz. Die erste Art von Filter legt um den durch den Bahnpunkt  $P(t)_{A_i}$  vorgegebenen Eingangswert der Steuergröße einen Korridor oberhalb und unterhalb des Wertes fest. Die entsprechenden Werte des Korridors werden durch die Einstellung der Filterstufe des Anwenders festgelegt. Je nach Robotertyp und Roboterachse  $A_i$  ist die Abweichung entsprechend sinnvoll zu wählen. Der zweite Datenbankfilter baut auf den durch den Bahnpunkt  $P(t)_{A_i}$  vorgegebenen Eingangswert der Steuergröße auf und orientiert sich an dem Vorzeichen des vorgegeben Wertes. Dies dient bspw. der Eingrenzung der Geschwindigkeitsszenarien, um die entsprechende Bewegungsrichtung des Leichtbauroboters im Regressionsrechenmodell abzubilden und nur Datenmuster analog des Bahnpunktes heranzuziehen. Neben den zwei vorgestellten Arten von Filtern sind zudem noch weitere Filter vorhanden, welche jedoch bereits vor dem Start des Regressionsrechenmodells angewendet werden. So werden für die Berechnung nur deckungsgleiche Montagepositionen herangezogen, um den Einfluss der Schwerkraft und den damit verbundenen

Berechnungsfehler zu minimieren. Im Hinblick auf die Datenqualität gilt es die Aktualität der Kollisionen in der Datenbank zu berücksichtigen. Über die Kopie des Bahnpunktes  $P(t)_{Ai}$  in das Abfrageinterface des Regressionsrechenmodells wird für jeden Bahnpunkt der Filter entsprechend neu konfiguriert, sodass die herangezogenen Daten sich je Bahnpunkt  $P(t)_{Ai}$  verändern. Entsprechend findet je Bahnpunkt eine neue Datengrundlage Eingang in die Regressionsrechnung der Kollisionskraft  $F_{Kollision,reg,A_i}$  je Roboterachse  $A_i$ . Die nachfolgende Tabelle 4-3 zeigt, welche Filter auf welche Steuergröße der Datenbank angewendet werden.

*Tabelle 4-3: Datenfilter der Steuergrößen der Trajektorie innerhalb des Regressionsrechenmodells der RSC*

Steuergröße der Trajektorie	Filter
$P(t)_{Ai}$	$\pm$ um den angegebenen Bahnpunkt, je nach Nutzereinstellung
$\vec{P}_{Kol}(t)_{Ai}$	Kein Filter
$v_p(t)_{Ai}$	Vorzeichenfilter
$\vec{v}_p(t)_{LBR\_Base}$	Kein Filter
$m_{Zusatz}$	$\pm$ um den angegebenen Bahnpunkt, je nach Nutzereinstellung
$d_{Ai}(t)$	$\pm$ um den angegebenen Bahnpunkt, je nach Nutzereinstellung
$\delta_{Ai}(t)$	$\pm$ um den angegebenen Bahnpunkt, je nach Nutzereinstellung
$k_{mess}$	$\pm$ um den angegebenen Bahnpunkt, je nach Nutzereinstellung

- **Regressionsrechenmodell:**

Der zweite Teil der RSC bildet das angewendete nicht lineare Regressionsrechenmodell auf Basis der vorgefilterten Daten des Kollisionspunktes  $\vec{P}_{Kol}(t)_{Ai}$ . Zielsetzung ist es, auf Basis der gefilterten Daten ein Regressionsmodell zu generieren, welches das identifizierte Verhalten der Steuergrößen abbildet und mit welchem für den Kollisionspunkt  $\vec{P}_{Kol}(t)_{Ai}$  eine Kalkulation der auftretenden Kollisionskraft  $F_{Kollision,reg,A_i}$  der Roboterachse  $A_i$  erfolgen kann. Angewendet wird ein nicht lineares Regressionsmodell, welches die vorhandenen Daten der Kollisionsdatenbank auf die entsprechenden Verhaltensweisen der Steuergröße abbildet. Die Nichtlinearität wird über die Substitutionsmethode dargestellt, sodass aufbauend auf der Methode der kleinsten Quadrate ein lineares Regressionsrechenmodell erstellt werden kann. Im Berechnungsmodell werden die in der nachfolgenden Tabelle 4-4 aufgezeigten und in Abschnitt 3.4 untersuchten Steuergrößen abgebildet.

Tabelle 4-4: Identifizierter physikalischer Zusammenhang zwischen den Steuergrößen und der Zielgröße der Kollisionskraft in der MRI

Steuergröße	Mathematischer Zusammenhang bezogen auf die Zielgröße der Kollisionskraft
Kollisionsgeschwindigkeit	$F_{\text{Kollision}} \sim v_{\text{Ai}}$
Zusatzmasse	$F_{\text{Kollision}} \sim \sqrt{m_{\text{Zusatz}}}$
Hebelarm betrachtung	$F_{\text{Kollision}} \sim \frac{1}{d_{\text{Ai}}}$
(Trägheitsmoment)	$(F_{\text{Kollision}} \sim I_{\text{p,Ai}})$
Biofidele Messgröße (Federkonstante)	$F_{\text{Kollision}} \sim \sqrt{k_{\text{mess}}}$
(Werkzeugdesign)	$(\rho_{\text{Kollision}} \sim \frac{1}{A_{\text{Kollision}}})$

Durch die Eingrenzung der Positionsdaten im Datenbankfilter wird auf die Abbildung des Trägheitsmomentes im Regressionsrechenmodell verzichtet, da nicht für jeden Robotertyp die genauen Massenschwerpunkte und -verteilung entlang der Kinematik bekannt sind. Durch die Eingrenzung der Datenbank über die in Tabelle 4-3 aufgezeigten Filter erfolgt eine entsprechende Abgrenzung der einzelnen Positionen anhand der ermittelten Hebelarme  $d(t)_{\text{Ai}}$  und der Position  $P(t)_{\text{Ai}}$  der einzelnen Achsstellungen, sodass der Einfluss des Trägheitsmoments entsprechend minimiert werden kann, da zweideutige Positionen eingeschränkt werden. Die Flächenpressung  $\rho_{\text{Kollision,reg,Ai}}$  baut auf den Ergebnissen der berechneten Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,Ai}}$  auf und wird daher im Anschluss auf Basis des Werkzeugdesigns beurteilt.

Zur Ermittlung der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,Ai}}$  der Roboterachse  $A_i$  kommt ein lineares Regressionsrechenmodell zum Einsatz, in welchem mithilfe der Substitutionsmethode die Verhaltensmuster der entsprechenden Steuergrößen abgebildet werden [121]. Dem Regressionsmodell liegt zugrunde, dass die einzelnen Variablen unabhängig voneinander sind, sodass für ein lineares Verhalten der Einflussgrößen entsprechend die nachfolgende Funktion Eingang in die Berechnung findet [121]:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_i) = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + \dots + b_ix_i \tag{4-6}$$

Die in (4-6) aufgezeigte Formel dient der Beschreibung einer Funktion, welche ein lineares Verhaltensmuster einer Datenmenge unter Einfluss der jeweiligen Variablen  $x_i$  auf die Zielgröße  $y$  abbildet. Durch Substitution der entsprechenden Variablen lässt sich ein nicht lineares Verhalten unabhängiger Variablen abbilden, sodass sich für die Berechnung der in der XY-Ebene der jeweiligen Roboterachse  $A_i$  auftretenden Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,Ai}(XY)}$  nachfolgende Formel aufstellen lässt:

$$F_{\text{Kollision,reg,Ai}(XY)} = f(t)_{v_{\text{p,Ai}}} v_{\text{p}(t)_{\text{Ai}}} + f(t)_{d_{\text{Ai}}} \frac{1}{d(t)_{\text{Ai}}} + f(t)_{m_{\text{Zusatz}}} \sqrt{m_{\text{Zusatz}}} + f(t)_{k_{\text{mess}}} \sqrt{k_{\text{mess}}} + b \tag{4-7}$$

Die einzelnen Konstanten  $f(t)$  werden auf der Basis entsprechender Eingangsdaten berechnet und ergeben sich aus den zum Zeitpunkt  $t$  gefilterten Daten der Kollisionsdatenbank. Aus der in (4-8) aufgestellten Funktion lässt sich die zum Zeitpunkt  $t$  anliegende Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  je Roboterachse  $A_i$  bezugnehmend auf die in Abschnitt 3.4.3 eingeführte Formel (3-23) berechnen:

$$F_{\text{Kollision,reg,A}_i} = \frac{F_{\text{Kollision,reg,A}_i(XY)}}{\delta_{A_i}} \quad (4-8)$$

Die Konstanten  $f(t)$  werden mit der Methode der kleinsten Quadrate für die entsprechend gefilterte Datenmenge auf Basis der Steuergrößen zum Zeitpunkt  $t$  errechnet. Es gilt die entsprechende quadratische Abweichung der approximierten, mehrdimensionalen und linearen Funktion unabhängiger Variablen  $x_i$  zu minimieren. Ausgehend von dem allgemeinen Funktionsansatz in (4-6) ergibt sich durch das Minimierungsproblem bei  $j$  gegebenen Messpunkten eine optimal angepasste lineare Modellfunktion:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_i) = \sum_{j=1}^m b_j x_i \quad (4-9)$$

Mit den gegebenen Messpunkten  $j$  lässt sich für jeden Messpunkt die Abweichung  $r_j$  des berechneten Wertes  $f(x_1, x_2, \dots, x_i)$  von dem gemessenen Wert  $y_j$  berechnen:

$$r_j = f(x_1, x_2, \dots, x_i) - y_j \quad (4-10)$$

Es gilt in der Folge die Werte für die linear eingehenden Eingangsparameter  $b_i$  (bzw.  $f(t_j)$ ) so zu bestimmen, dass die Summe der quadratischen Abweichung  $r_j^2$  für die Anzahl der eingehenden Messungen  $j$  minimiert wird:

$$\min_x \sum_{j=1}^m r_j^2 = \min_x \|f(x_1, x_2, \dots, x_i) - y_j\|_2^2 \quad (4-11)$$

Nach der Bestimmung der berechneten Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  auf Basis des erläuterten Regressionsrechenmodells für jede Roboterachse  $A_i$  erfolgt die Bestimmung der minimalen Kollisionskraft, welche den Stopp auf Basis der Kraft- und Leistungsbeschränkung des Leichtbauroboters herbeiführen wird. Es finden alle Kraftwerte  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  zum Zeitpunkt  $t_j$  Eingang in die Berechnung:

$$F_{\text{Kollision,reg}} = \min_{A_i} (F_{\text{Kollision,reg,A}_i}) \quad (4-12)$$

Zu beachten bleibt, dass bei sehr ähnlichen Kraftwerten  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  die Kollisionsüberwachung des Leichtbauroboters die Kollision ggf. an einer anderen Achse erkennt. Durch das aufgezeigte Verfahren kann für jeden Bahnpunkt der zu untersuchenden Trajektorie ein Kraftwert  $F_{\text{Kollision,reg}}(t)$  für eine mögliche Kollision bestimmt werden, welche Eingang in die Risikoanalyse der zu untersuchenden Anwendung findet.

- **Statistische Beurteilung des erstellten Regressionsmodells:**

Für die aufgezeigte Berechnung soll eine statistische Auswertung durchgeführt werden, um Rückschlüsse auf die Qualität der Eingangsdaten und des Berechnungsmodells zu erlangen. Wesentlichen Einfluss auf die Genauigkeit und Güte des Berechnungsmodells haben die aufgezeigten Filterfunktionen der Kollisionsdatenbank. Zum einen gilt es ausreichend viele Messpunkte für den zu untersuchenden Kollisionspunkt  $\vec{P}_{\text{Kol}}(t)_{A_i}$  einzubeziehen, zum anderen nur relevante Daten für die Eingangsgrößen bereitzustellen. Im Berechnungsmodell der RSC sind daher Funktionen implementiert,

welche die statistische Güte der Eingangsdaten auf Basis der erstellten Regressionsrechenfunktion überprüfen und dem Anwender Rückschlüsse auf die Ergebnisqualität erlauben. Zunächst wird das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  untersucht und die Signifikanz der in die Untersuchung eingehenden Variablen. Diese Werte dienen der Beurteilung der Modellqualität und werden mit den durch den Anwender festgelegten Mindestgrenzen verglichen. Sollten die Grenzen entlang einer Trajektorie mehrfach unterschritten werden, so kann der Anwender durch Überarbeitung der Filterfunktion eine Veränderung der statistischen Kenngrößen auf Basis der in die Berechnung eingehenden Messpunkte herbeiführen und so die Ergebnisqualität des Modells steigern. Die Standardabweichung  $s_{\text{Kollision,reg,Ai}}$  untersucht ebenfalls die einbezogenen Messwerte und beschreibt die Abweichung der Messpunkte entlang der erstellten Funktion im untersuchten Kollisionspunkt  $\vec{P}_{\text{Kol}}(t)_{\text{Ai}}$ . Mithilfe der Standardabweichung kann ein Grenzmaß für den Anwender ermittelt werden, welches zur Beurteilung im Hinblick auf die Grenzwerte der ISO TS 15066 herangezogen werden kann.

Ausgehend von der in (4-7) erstellten Funktion lässt sich das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  für die zum Zeitpunkt  $t$  erstellte Funktion berechnen. Dabei kann über das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  die Annahme der Unabhängigkeit der linearen Variablen im Regressionsrechenmodell untersucht werden. So lässt sich das errechnete Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zum Zeitpunkt  $t$  mit einem durch den Anwender festgelegten Mindestwert vergleichen und ein Mindestgütemaß für die Berechnung der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,Ai}}$  je Roboterachsen  $A_i$  einhalten. Es bleibt festzuhalten, dass das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  wesentlich durch die entsprechenden Datenbankfilter beeinflusst wird und daher der Anwender durch die entsprechenden Filtergrenzen Einfluss auf die statistischen Kenngrößen nehmen kann. Der Wert des Bestimmtheitsmaßes bewegt sich zwischen 0 und 1, wobei der Wert 0 einen nicht vorhandenen linearen Zusammenhang und 1 einen perfekten linearen Zusammenhang beschreibt:

$$0 \leq R^2 \leq 1 \quad (4-13)$$

Errechnet wird das Bestimmtheitsmaß auf Basis der in (4-14) gezeigten Formel, wobei  $y_i$  den Messwert der Reihe beschreibt,  $\hat{y}_i$  den Schätzwert durch die erstellte Rechenfunktion und  $\bar{y}_i$  den Mittelwert des Messwertes der Messreihe.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (4-14)$$

Je nach Einsatz des Berechnungsmodells können unterschiedliche Grenzwerte für das Bestimmtheitsmaß festgelegt werden. Zielsetzung sollte ein Maß  $R^2 > 0,9$  sein. Für den Einsatz der RSC bei Anlagenabnahmen empfiehlt sich ein höherer Wert. In der frühen Anlagenplanungsphase kann das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  ggf. auch niedriger angesetzt werden, da es hier um konzeptionelle Vorplanungen geht und daher eine Optimierung der Sicherheitsparameter in der Robotersteuerung bzw. eine detaillierte Festlegung der Trajektorie noch nicht erfolgt sind.

Neben dem Bestimmtheitsmaß  $R^2$  erfolgt eine Untersuchung der Signifikanz der einzelnen Steuergrößen auf Basis der aus der Datenbank herausgefilterten Kollisionsmessungen. So lässt sich jeweils auf Basis der Kollisionsmessungen der  $p$ -Wert für jede Steuergröße des Regressionsmodells bestimmen und dieser mit einem durch den Nutzer im Voraus festgelegten Signifikanzniveau  $\alpha$  vergleichen. Unterschreitet der  $p$ -Wert das festgelegte Signifikanzniveau, so würde man die Nullhypothese, also die durch das Regressionsrechenmodell aufgestellte Korrelation zwischen der Steuer- und Zielgröße, nicht verwerfen. Der  $p$ -Wert wird mittels des statistischen Modells durch ein Computerprogramm ermittelt, sodass explizit auf die Darstellung der Berechnung verzichtet wird.

$$p_{\text{Steuergröße}} \leq \alpha \quad (4-15)$$

Der Wert des Signifikanzniveaus wird durch den Anwender und den zu untersuchenden Anwendungsfall festgelegt. Wird eine Voruntersuchung eines MRI-Szenarios mit dem Modell beurteilt, so kann der  $p$ -Wert relativ hoch sein. Hier wäre ein Niveau von  $p_{\text{Steuergröße}} = 5 - 10\%$  angemessen. Wird das Modell bei einer Anlagenabnahme verwendet, sollte  $p_{\text{Steuergröße}} < 5\%$  angesetzt werden. Je nach Filterfunktion müssen die entsprechenden Ergebnisse der  $p$ -Wert-Analyse interpretiert werden. Dies gilt vor allem bei den Steuergrößen der Federkonstanten und der Zusatzmasse. Je nach Umfang der Datenbasis ist die Bandbreite der Eingangsdaten relativ klein, sodass die Signifikanzanalyse einen relativ hohen  $p$ -Wert für die Variablen ergeben kann. Es bleibt dem Nutzer überlassen, in solchen Fällen die Berücksichtigung der Steuergröße im Berechnungsmodell zu exkludieren bzw. die Filterfunktion entsprechend so zu verändern, dass nur ein Eingangswert der Steuergröße in der Berechnung berücksichtigt wird.

Im Weiteren erfolgt eine Betrachtung der Streuung der einzelnen Kollisionsmessungen um die auf Basis des Regressionsmodells ermittelte Funktion. Die einbezogenen Messpunkte dienen als Stichprobe und sind daher nicht repräsentativ für die allgemeine Gültigkeit der Funktion im untersuchten Bahnpunkt  $P(t)$  der Trajektorie. Daher gilt es die Abweichung der Stichprobe zu ermitteln, um Rückschlüsse auf die Genauigkeit der Aussage im Messpunkt zu erlangen. Die Standardabweichung  $s_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  wird für jede erstellte Funktion in der jeweiligen Roboterachse  $A_i$  zum Zeitpunkt  $t$  bestimmt:

$$s_{\text{Kollision,reg,A}_i} = \sqrt{\frac{\sum (F_{\text{Kollision,max,A}_i} - F_{\text{Kollision,reg,A}_i})^2}{j}} \quad (4-16)$$

In (4-16) wird hierzu die quadrierte Summe aller Abweichungen der einbezogenen Messwerte vom Erwartungswert der ermittelten Funktion ermittelt und durch die Anzahl der Messungen  $j$  geteilt. Zielsetzung ist es, dass die ermittelte Standardabweichung  $s_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  möglichst klein ist, d.h. dass die Funktion nah an den einbezogenen Messpunkten der Kollision liegt. Mithilfe der Standardabweichung  $s_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  lassen sich die Grenzen bestimmen, in welchen die zu erwartenden Messwerte liegen. So beschreibt die einfache Standardabweichung eine Wahrscheinlichkeit von 68%, dass bei normalverteilten Messwerten die Messung innerhalb des Korridors  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i} \pm s_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  um die erstellte Funktion liegt, bei der doppelten Standardabweichung  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i} \pm 2 s_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  liegt die Wahrscheinlichkeit bereits bei 95,5%. Für das aufgezeigte Berechnungsmodell kann durch den Nutzer im zu untersuchenden Kollisionspunkt der jeweiligen Roboterachse  $A_i$  zum Zeitpunkt  $t$  mithilfe der Standardabweichung ein Korridor festgelegt werden, in welchem sich der Messwert  $F_{\text{Kollision,max,A}_i}$  abweichend zum ermittelten Kollisionskraftwert  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  bewegen soll. Für den Korridor gilt:

$$F_{\text{Kollision,reg,A}_i,2s} = F_{\text{Kollision,reg,A}_i} + 2 s_{\text{Kollision,reg,A}_i} \quad (4-17)$$

Der ermittelte Grenzwert  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i,2s}$  beschreibt eine Grenzlinie, welche durch den Nutzer zusätzlich mit den Grenzwerten aus der ISO TS 15066 verglichen werden kann und auf Basis derer eine Abschätzung für die Sicherheit und mögliche Gefährdungen des beteiligten Menschen im MRI-Szenario erfolgen kann.

Aufbauend auf der ermittelten Kollisionskraft kann eine Ableitung für die auftretende Flächenpressung auf Basis des Designs des Roboterwerkzeuges erfolgen. Hierzu lässt sich die Flächenpressung aufbauend auf der Formel (3-34) aus Abschnitt 3.4.6 ermitteln.

$$\rho_{\text{Kollision,reg}} = \frac{F_{\text{Kollision,reg}}}{A_{\text{Kollision}}} \quad (4-18)$$

Es bleibt zu beachten, dass der Anwender die Flächenpressung in vielerlei Hinsicht beeinflussen kann und daher eine Beurteilung dieser zu einem frühen Zeitpunkt der Anlagenplanung nur bedingt notwendig ist. Vielmehr gilt es grundsätzliche Gestaltungsrichtlinien in Bezug auf Flächen und Kanten bzw. Phasen aus der Literatur zu beachten [20; 21]. Durch eine entsprechende Ausrichtung des Roboterwerkzeuges entlang der Trajektorie kann zudem die Kollisionsfläche  $A_{\text{Kollision}}$  maximiert werden, wodurch ein positiver Effekt im Hinblick auf die auftretende Flächenpressung  $\rho_{\text{Kollision,reg}}$  erzielt werden kann. Zugleich können maßgeschneiderte Schaumstoffhüllen ebenfalls die auftretende Flächenpressung  $\rho_{\text{Kollision,reg}}$  maßgeblich reduzieren (vgl. Abschnitt 3.4.6).

Nach der Darstellung des nicht linearen Regressionsansatzes der RSC zur Ermittlung der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg}}$  sind die entsprechenden Kennwerte für die Beurteilung der Sicherheit einer Trajektorie in einem MRI-Szenario erfolgt. Neben der eigentlichen Berechnung der Kollisionskraft wurde auch eine statistische Auswertung des Berechnungsansatzes vorgenommen, auf Basis derer eine Beurteilung der Qualität des erstellten Modells erfolgen kann. In der Folge gilt es im vierten Abschnitt der RSC dem Anwender die ermittelten Daten anschaulich aufzubereiten und die richtigen Schlüsse für die Sicherheitsplanung der MRI-Anwendung abzuleiten.

### 4.2.4 Ergebnisdarstellung

Der vierte Abschnitt der RSC befasst sich mit der Anwenderschnittstelle und der Darstellung der Ergebnisse des Regressionsrechenmodells. Zum einen gilt es möglichst einfach die ermittelten Daten dem Nutzer zugänglich zu machen, zum anderen dienen die aufbereiteten Steuer- und die berechneten Zielgrößen einer datenbasierten Analyse der untersuchten Trajektorie, welche es gilt in der Folge zu optimieren bzw. zu verifizieren. Die Nutzerschnittstelle besitzt daher zwei wesentliche Komponenten.

Die erste Schnittstelle stellt eine diagrammbasierte Auswertung der ermittelten Steuer- und Zielgrößen dar. Dabei werden die Verläufe der Hebelarme und die anliegende Geschwindigkeit entlang der Trajektorie kenntlich gemacht und der ermittelten Kollisionskraft gegenübergestellt. Die Darstellung erfolgt roboterachsbezogen und enthält daher neben der ermittelten Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg}}$  auch die entsprechenden Werte  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  für die einzelnen Achsen  $A_i$ . Neben diesen ermittelten Werten können die aus der statistischen Auswertung errechneten Standardabweichungen  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i,2s}$  je ermittelter Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  kenntlich gemacht werden. Zudem werden in den Diagrammen die aus der ISO TS 15066 festgelegten Grenzwerte dargestellt, sodass dem Anwender die kritischen Stellen im Szenario aufgezeigt werden und entsprechende Gegenmaßnahmen anhand der Diagramme abgeleitet werden können. Mögliche Gegenmaßnahmen wurden bereits in Abschnitt 3.5 erläutert. Die Abbildung 4-5 und Abbildung 4-6 zeigen die Gegenüberstellung der Steuergrößen mit der Zielgröße der Kollisionskraft und dienen dem Anwender als Analyse des zu untersuchenden Szenarios.

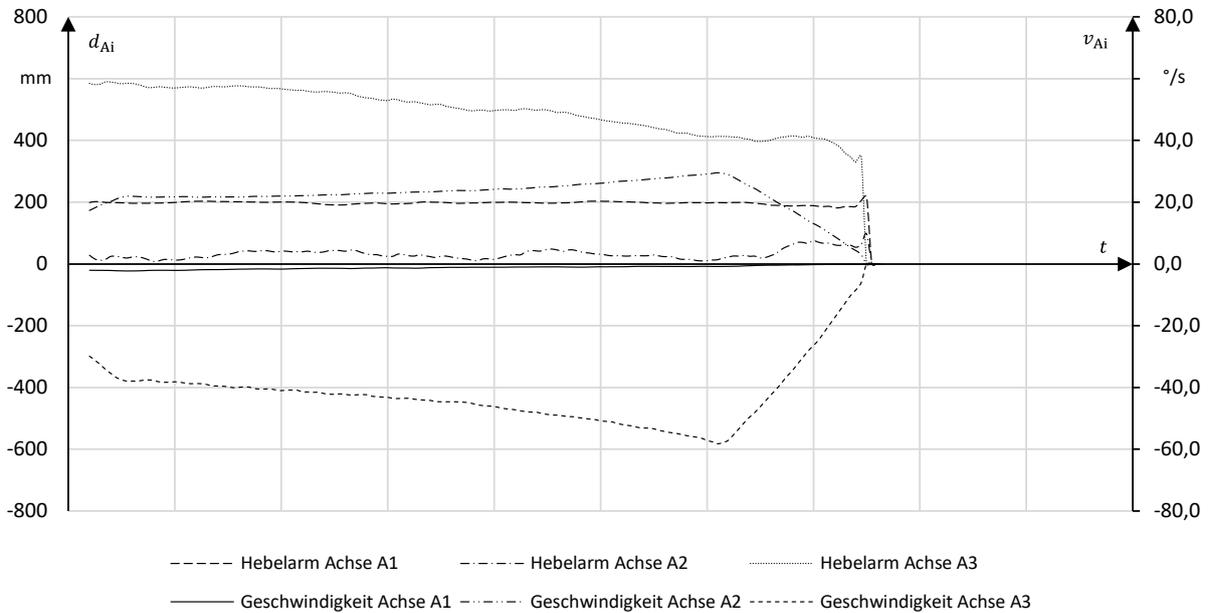


Abbildung 4-5: Diagrammbasierte Darstellung der Steuergrößen der RSC zur Analyse der vorliegenden Trajektorie vor dem Hintergrund der biofidelen Kollisionskraftuntersuchung in der MRI

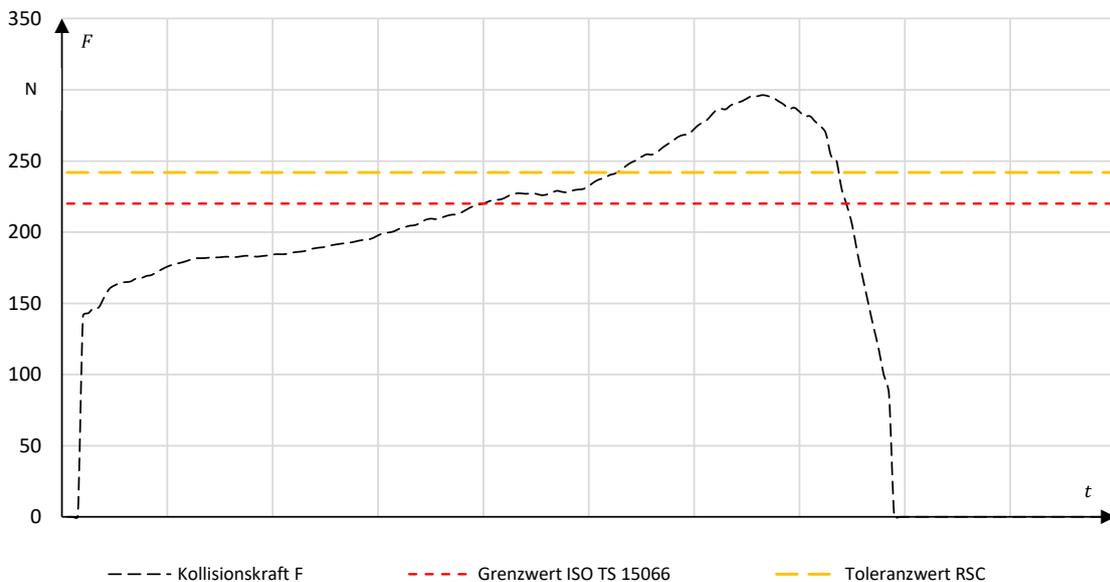


Abbildung 4-6: Diagrammbasierte Darstellung der errechneten Kollisionskraft der RSC mit Darstellung des Grenzwerts der ISO TS 15066 und des Toleranzwertes der RSC (Ampellogik)

Relevant für den Anwender sind insbesondere die Steuergrößen der anliegenden Achsgeschwindigkeit und des auftretenden Hebelarms. Durch eine gezielte Limitierung der maximal zulässigen Achsgeschwindigkeit je Achse  $A_i$  können mögliche sicherheitsgefährdende Elemente der Trajektorie derart gestaltet werden, dass eine Minimierung der Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,A}_i}$  die Folge ist. In Bezug auf die Hebelarme gilt es grundsätzlich eine Maximierung herbeizuführen, wodurch die Geschwindigkeiten reduziert werden und die Kollisionskraft minimiert wird. Zugleich lassen sich aus der diagrammbasierten Darstellung mögliche Messpunkte für eine messtechnische Untersuchung der Trajektorie festlegen. Es wird dem Anwender die Möglichkeit gegeben eine „worst case“ Konfiguration zu identifizieren und diese im Anschluss durch eine Messung mit den in der RSC ermittelten Werten zu verifizieren.

Die zweite Schnittstelle stellt eine visuelle Darstellung der untersuchten Trajektorie in einer Simulationsumgebung dar. Für die visuelle Darstellung muss die Trajektorie erneut aufbereitet werden. Hierzu wird eine Ampellogik eingeführt, welche für den Anwender die kritischen Elemente einer Bewegung kenntlich machen soll. Aufbauend auf dem Grenzwert der ISO TS 15066 werden die Grenzen für die Farblogik durch den vom Anwender angegebenen Grenzwert  $h$  in % des maximalen festgelegten Grenzwertes  $F_{\text{Grenz}}$  angegeben:

$$F_{\text{Kollision,reg}} < F_{\text{Grenz}} \rightarrow \text{grün} \quad (4-19)$$

$$F_{\text{Grenz}}(1 + h) > F_{\text{Kollision,reg}} > F_{\text{Grenz}} \rightarrow \text{gelb} \quad (4-20)$$

$$F_{\text{Kollision,reg}} > F_{\text{Grenz}}(1 + h) \rightarrow \text{rot} \quad (4-21)$$

Nach (4-19), (4-20) und (4-21) kann in der Folge jeder Punkt  $P(t)$  der Trajektorie mit einer Farbgebung in Ampellogik versehen werden, welche somit die entsprechenden kritischen Punkte der Trajektorie kenntlich macht. Eine analoge Auswertung kann auch für die um die doppelte Standardabweichung erweiterte Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg,Ai,2s}}$  erfolgen. Die Bereitstellung der Trajektorie erfolgt im XML-Datenformat und kann so von gängigen Simulationsprogrammen visuell dargestellt werden. Im Vorgehen wurde hierzu das Programm RVIZ des Robot Operating System (ROS) genutzt [122]. Die Abbildung 4-7 zeigt die erarbeitete Visualisierung in RVIZ am Beispiel des Universal Robots UR10. Dort zeigt sich, dass es je nach Bewegungsrichtung und -verlauf kritische Elemente in der geplanten Trajektorie der Anwendung gibt. Der Hebelarm der Achse A3 nimmt bei der gezeigten Bewegung von dem Montageflansch des Leichtbauroboters weg kontinuierlich ab, sodass die Kollisionskraft zur Singularität hin erheblich ansteigt.

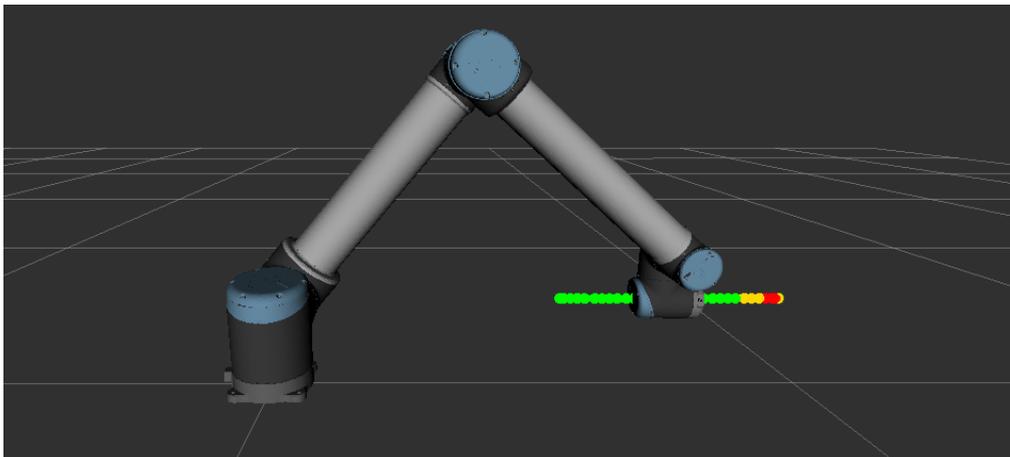


Abbildung 4-7: Darstellung der Ergebnisse der RSC über RVIZ in der ROS Umgebung am Beispiel des Universal Robots UR10

Die geplante Bahn kann auf Basis der in Tabelle 3-9 aufgezeigten Optimierung so angepasst werden, dass eine durchgängig grüne Bewertung der Trajektorie ermöglicht wird. Zugleich können gängige Robotersysteme durch unterschiedliche Sicherheitsbereiche entsprechende Grenzwerte im Hinblick auf die zulässige TCP-Geschwindigkeit wie auch die zulässigen Achsgeschwindigkeiten festlegen, sodass auch bei gleichbleibender Bahn eine zulässige Kollisionskraft  $F_{\text{Kollision,reg}}$  über die Zeit  $t$  durch Anpassung der Geschwindigkeit erreicht werden kann. Nach der Darstellung der Ergebnisse der RSC hat der Nutzer die Möglichkeit, die entsprechenden Steuer- und Zielgrößen im Hinblick auf eine Umgestaltung der Anlage gewinnbringend zu nutzen. Die Ergebnisdarstellung bildet den Abschluss der RSC und stellt

nach Eingabe der Nutzerdaten zu Beginn das Ergebnis der RSC dar. Im Anschluss erfolgt der Abgleich der an die RSC gestellten Anforderungen zu Beginn des Kapitels 4 in Abschnitt 4.1.1.

### 4.3 Abgleich der Anforderungen und Zielsetzung

Der vorliegende Abschnitt dient dem Abgleich der gestellten Anforderungen und Zielsetzungen an die RSC. In Abschnitt 4.1.1 wurden die Anforderungen in drei Kategorien eingeteilt, welche nachfolgend vor dem Hintergrund des aufgezeigten Ansatzes evaluiert werden. Diese befassen sich mit technischen, inhaltlichen und nutzerseitigen Anforderungen an die RSC:

- **Technische Anforderungen:**

Die technischen Anforderungen zielen vor allem auf die erzielte Genauigkeit im Hinblick auf die Zielgröße der Kollisionskraft ab. Diese hängt wesentlich mit den Eingangsgrößen aus der Datenbank der RSEC zusammen. Festzuhalten bleibt, dass durch das statistische Auswertungsverfahren der erzielten Ergebnisse eine Optimierung im Hinblick auf die Genauigkeit mittels der Datenbankfilter erfolgen kann und so die Genauigkeit der Ergebnisse der RSC gesteigert werden kann. Zugleich kann durch eine gezielte Steigerung des Umfangs der Datenbank eine genauere Kalkulation der Zielgrößen erfolgen. Hinsichtlich der Unabhängigkeit des generischen Ablaufs der RSC vom verwendeten Robotersystem lässt sich festhalten, dass der Ansatz entsprechend adaptiv gestaltet ist. Je nach Bauart lässt sich die Datenbank der RSEC erweitern. Die Regressionsrechnung nutzt die erzielten Ergebnisse des jeweiligen Robotersystems in der RSEC und verwendet die in Abschnitt 3.4 aufgezeigten Wirkprinzipien der Steuergrößen. Daher kann die Regressionsrechnung an jedes weitere Robotersystem einfach adaptiert werden. Gleichzeitig bleibt ein Aufwand für den Anwender im Hinblick auf die Integration und die Datenerhebung in der RSEC festzuhalten. Aufgrund der Datenbasis der RSEC ist eine Durchgängigkeit zwischen den realen Ergebnissen und den erzielten Berechnungswerten in der RSC gewährleistet.

- **Inhaltliche Anforderungen:**

Hinsichtlich der inhaltlichen Anforderungen steht zunächst die Durchgängigkeit zu den in der ISO TS 15066 gestellten Anforderungen im Mittelpunkt. Der gewählte Ansatz mit einer datenbankbasierten Regressionsrechnung auf Basis der Versuche in der RSEC stellt den Bezug zu den Anforderungen sicher. Die RSEC wurde auf Basis der Anforderungen der ISO TS 15066 entwickelt (vgl. Abschnitt 2.5.2, 3.2 und 3.3.1). Der Regressionsansatz auf Basis der Substitutionsmethode bildet das identifizierte Verhalten der jeweiligen Steuergrößen vollständig ab. Hinsichtlich der Darstellung der Ergebnisse werden alle Steuergrößen entlang der Trajektorie auf Basis von Diagrammen dargelegt, damit dessen Gefährdungen identifiziert werden können. Zugleich erfolgt über die Ampellogik eine visuelle Darstellung der gefährdeten Bereiche der Trajektorie.

- **Nutzerseitige Anforderungen:**

Die nutzerseitige Schnittstelle ist bisher nur teilweise dargestellt worden. Die Abbildung 4-8 zeigt die Nutzerschnittstelle zur Dateneingabe vor der Regressionsrechnung der RSC. Die Schnittstelle ist derart gestaltet, dass die entsprechenden Eingaben schnell und einfach erfolgen können. Dazu zählen die Angabe des entsprechenden Kollisionspunktes durch den Nutzer im jeweiligen Koordinatensystem  $KS_{Ai}$  der Achsen des Leichtbauroboters, die zu untersuchende Geschwindigkeit des TCP und die Ausgabeform der entsprechenden Ergebnisse. Zugleich kann der Nutzer über den Statusgraphen und die Log-Register den Status während der Kalkulation nachvollziehen. Die Ausgabe erfolgt über diagrammbasierte Darstellungen mit zu- und abschaltbaren Graphen, sodass eine

entsprechende Übersichtlichkeit der Ergebnisse gewährleistet werden kann (Darstellung analog Abbildung 4-5). Die Darstellung der Trajektorie in Ampellogik innerhalb einer Simulationsumgebung zeigt zugleich anschaulich die Ergebnisse der RSC auf. Die Systemperformance wird erheblich durch die entsprechende Frequenz der Aufnahme der Trajektorie beeinflusst und stellt sich je nach zur Verfügung stehenden Rechenleistung aufgrund des schlanken Ansatzes als ausreichend dar.

Abbildung 4-8: Nutzerschnittstelle der RSC zur Eingabe der relevanten Daten für die Regressionsrechnung  
Die Tabelle 4-5 fasst die diskutierten Ergebnisse des Abgleichs hinsichtlich der gestellten Anforderungen an die RSC zusammen.

Tabelle 4-5: Abgleich der Anforderungen an die RSC

Anforderungen					
Technische Anforderungen		Inhaltliche Anforderungen		Nutzerseitige Anforderungen	
<ul style="list-style-type: none"> <li>Genauigkeit der Aussage im Hinblick auf die Zielgröße</li> <li>Statistische Beurteilung der Ergebnisse im Hinblick auf die Zielgröße</li> <li>Generische Umsetzung unabhängig vom verwendeten Robotersystem</li> <li>Übertragbarkeit auf der Ergebnisse auf reale Versuchsaufbauten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●</li> <li>●</li> <li>◐</li> <li>●</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Umsetzung der Anforderungen der TS-15066</li> <li>Abbildung des Verhaltens der Steuergrößen</li> <li>Identifikation von Gefährdungen für die Risikoanalyse auf Basis der Steuergrößen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●</li> <li>●</li> <li>●</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>User Interface für den Anwender (softwareseitige Umsetzung)</li> <li>Ergebnisdarstellung</li> <li>Systemperformance</li> <li>Schnittstelle der RSC zum Versuchsaufbau der RSEC</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>●</li> <li>●</li> <li>●</li> <li>●</li> </ul>

Hinsichtlich der Zielsetzung wurden drei Zielgrößen für die RSC festgelegt. Kern der Berechnung ist die Kalkulation der auftretenden Kollisionskraft vor dem Hintergrund der ISO TS 15066. Diese erfolgt über das dargelegte Berechnungsmodell für jede Roboterachse auf Basis erzielter Versuchsergebnisse in der RSEC. Die Vorhersehbarkeit der Flächenpressung ist nur bedingt möglich, da hierfür eine genaue Analyse der Beschaffenheit der jeweiligen Kollisionsfläche nötig ist. Diese kann jedoch über die in Abschnitt 3.3.6 aufgezeigten Zusammenhänge bewertet werden. Zugleich sind für die Gestaltung und Minimierung der Flächenpressung Lösungsansätze aufgezeigt worden, welche zur Einhaltung der Grenzwerte einen Beitrag liefern. Hinsichtlich der Identifikation der Gefährdungen innerhalb des MRI-Szenarios liefert der aufgezeigte Ansatz eine systematische Analyse der Steuergrößen vor dem Hintergrund der ISO TS 15066. Die aufgezeigten Graphen lassen eine Festlegung der Messpunkte als „worst case“ Konfiguration zu, sodass auch für die physische Abnahme einer Anlage der Ansatz einen wesentlichen Beitrag liefert. Die Tabelle 4-6 stellt abschließend den Abgleich des Ansatzes mit der festgelegten Zielsetzung der RSC dar.

*Tabelle 4-6: Abgleich der Zielsetzung an die RSC*

Zielgröße	
• Kollisionskraft	
• (Flächenpressung)	
• Identifizierte Gefährdungen für die Risikoanalyse des MRI Szenarios	

Nach der erfolgten Vorstellung des Vorgehens der RSC wird in Kapitel 5 im Anschluss eine kurze beispielhafte Anwendung des Ansatzes vorgestellt. Zuvor erfolgt die Zusammenfassung des Kapitels 4.

## **4.4 Zusammenfassung**

In Kapitel 4 wurde aufbauend auf den in Kapitel 3 analysierten Einflussgrößen auf die Kollisionskräfte ein Berechnungsansatz entwickelt, welcher auf Basis einer Datenbank eine Vorhersage über die auftretenden Kollisionskräfte entlang einer Trajektorie erlaubt. Das Berechnungsverfahren namens „Robot Safety Calculation“ – kurz RSC – bildet die einzelnen Einflussgrößen und deren Wirkprinzipien in einem Regressionsrechenmodell ab. Zunächst wurden in Abschnitt 4.1 Anforderungen an die RSC definiert, welche maßgeblich für das Vorgehen der RSC sind. Zudem wird ein makroskopischer Überblick über den entwickelten Ablauf der RSC gegeben.

Abschnitt 4.2 erläutert das Vorgehen der RSC im Detail. Dieses gliedert sich in vier Abschnitte. Im ersten Abschnitt werden aufbauend auf der Position und den Geschwindigkeitsparametern der zu untersuchenden Trajektorie alle relevanten Einflussgrößen für den durch den Anwender festgelegten Kollisionspunkt berechnet. Im zweiten Abschnitt wird die Kollisionsdatenbank der RSEC näher vorgestellt. Die untersuchten Kollisionen werden im Prüfstand analog der Trajektorie aufbereitet und nach einem festgelegten Schema abgespeichert. Es werden die Kollisionen in der RSEC entsprechend der stoppenden Roboterachse ausgewertet und in der Kollisionsdatenbank zugeordnet. Dieser Kollisionsdatensatz wird im Anschluss entsprechend den Einflussgrößen der zu untersuchenden Trajektorie gefiltert und findet Eingang in das Regressionsrechenmodell der RSC. Die Filterung der relevanten Informationen

der Kollisionsdatenbank erfolgt für jeden zu untersuchenden Bahnpunkt entlang der Trajektorie, sodass ein individueller Datensatz Eingang in das Berechnungsmodell findet. Den dritten Abschnitt der RSC bildet das Regressionsrechenmodell. Es erfolgt eine Berechnung der Kollisionskraft für jede einzelne Achse des Leichtbauroboters. Angewendet wird ein nicht lineares Regressionsmodell, welches die vorhandenen Daten der Kollisionsdatenbank auf die entsprechenden Verhaltensweisen der Einflussgrößen abbildet. Die Nichtlinearität der einzelnen Einflussgrößen wird über die Substitutionsmethode dargestellt, sodass aufbauend auf der Methode der kleinsten Quadrate ein lineares Regressionsmodell erstellt werden kann. Anhand der einbezogenen Kollisionsdaten der Datenbank lässt sich für jede Achse eine kritische Kollisionskraft berechnen, welche für einen Sicherheitsstopp im untersuchten Bahnpunkt an der jeweiligen Achse nötig wäre. Das Berechnungsmodell wird im Anschluss statistisch ausgewertet, um eine Bewertung der Qualität der einbezogenen Kollisionsdaten zu erhalten. Anschließend wird die entsprechende minimale Kollisionskraft über alle vorhandenen Achsen des Leichtbauroboters ermittelt. Im letzten Abschnitt der RSC werden die errechneten Einflussgrößen und die kalkulierten Kollisionskräfte für den Anwender aufbereitet. Zum einen werden entlang der Trajektorie alle errechneten Eingangsdaten und kalkulierten Kollisionskräfte über die Zeit in einem Diagramm ausgegeben. Zum anderen erfolgt eine Visualisierung der Ergebnisse mittels einer Simulationsumgebung. Die errechneten Kräfte werden mit den Grenzwerten der ISO TS 15066 verglichen und in eine Ampellogik überführt, sodass für den Anwender die kritischen Elemente der geplanten Trajektorie ersichtlich werden.

Im letzten Abschnitt 4.3 erfolgt für das aufgezeigte Vorgehen ein Abgleich mit den in Abschnitt 4.1 zuvor festgelegten Anforderungen. Diese umfassen eine Bewertung der Genauigkeit und Adaptionfähigkeit des entwickelten Vorgehens sowie eine Bewertung der implementierten Benutzerschnittstellen.

## 5 Einsatz der Robot Safety Calculation in einem Anwendungsbeispiel der Automobilindustrie

### Inhalt Kapitel 5

---

5.1	Anwendungsfall und technische Lösungsvarianten .....	108
5.1.1	Montage einer Schallisolierung auf eine Fahrzeughür .....	108
5.1.2	Lösungsalternativen .....	109
5.2	Sicherheitsbeurteilung .....	112
5.2.1	Experimentelle Sicherheitsbeurteilung .....	112
5.2.2	Sicherheitsbeurteilung durch die RSC .....	116
5.2.3	Optimierung der Sicherheit mithilfe der RSC.....	120
5.3	Vergleich der Sicherheitsbeurteilungen .....	126
5.4	Zusammenfassung .....	127

---

*Kapitel 5 gliedert sich in vier Abschnitte. Abschnitt 5.1 stellt den Anwendungsfall „Schallisolierung auf einer Autotür anrollen“ vor. Abschnitt 5.1.1 befasst sich mit den technischen Anforderungen der Montageoperation. Abschnitt 5.1.2 stellt mögliche Lösungsvarianten für den Anrollprozess vor. Hierbei wird neben der MRI-Variante auch die Möglichkeit einer Automatisierung mit klassischen Schutzzäunen diskutiert und eine Abgrenzung zu einem rein manuellen Prozess des Anrollprozesses der Schallisolierung vorgenommen. Abschnitt 5.2 befasst sich mit der Sicherheitsbeurteilung der MRI-Anlage. Es wird zunächst in 5.2.1 die experimentelle Sicherheitsbeurteilung aufbauend auf dem in Kapitel 2 beschriebenen Stand der Technik aufgezeigt. In den folgenden Abschnitten wird der Anwendungsfall mittels der im Kapitel 4 vorgestellten RSC untersucht. Dabei wird in Abschnitt 5.2.2 zunächst die Trajektorie nach den in der experimentellen Sicherheitsbeurteilung festgelegten Parametern beurteilt. Nachfolgend erfolgt in Abschnitt 5.2.3 eine Optimierung der Trajektorie vor dem Hintergrund der Steuergrößen der RSC. Zur Darstellung des Mehrwerts der Beurteilung mit der RSC werden in Abschnitt 5.3 die Ergebnisse der Sicherheitsbeurteilungen ausgewertet und verglichen. Eine Zusammenfassung der Inhalte des Kapitels 5 schließt das Kapitel ab.*

### 5.1 Anwendungsfall und technische Lösungsvarianten

Das aufgezeigte Vorgehen der RSC aus Kapitel 4 soll anhand eines industriellen Anwendungsfalls exemplarisch angewandt werden. Nachfolgend wird dazu eine MRI-Anwendung aus der Türenmontage der BMW Group vorgestellt. Hierzu werden zunächst die Montageanwendung selbst und die damit verbundenen technischen Anforderungen aufgezeigt. Anschließend erfolgt eine Betrachtung möglicher Lösungsalternativen im Kontext der Automatisierungstechnik, anhand deren die Vorteile einer MRI-Lösung dargestellt werden sollen. Der vorgestellte Anwendungsfall stellt ein Industriebeispiel der BMW Group dar, welche im Kontext der erfolgten Forschungsarbeit bei der BMW Group in München entwickelt wurde. Die nachfolgend vorgestellte Anwendung stellt die erste MRI-Applikation im Produktionsnetzwerk der BMW Group dar und wurde im Jahr 2012 erstmals im BMW Group Werk Spartanburg in den USA installiert und im Rahmen der „What’s Next“-Kampagne veröffentlicht [12; 17].

#### 5.1.1 Montage einer Schallisolierung auf eine Fahrzeugtür

Die Montage der Tür in einem Automobilwerk erfolgt in einer getakteten Montagelinie. Nach erfolgter Befestigung des Fensterhebers und des Türschlosses wird die Tür zum Fahrzeuginnenraum mittels einer Schaumstoffschallisolierung verschlossen. Die Schallisolierung dient einerseits als akustische Abschirmung der Fahrzeugaußenwelt zum Fahrgastraum, andererseits erfolgt mittels der Schallisolierung eine Abdichtung des Türinnenraums zum Fahrgastraum. Die Dichtungsfunktion wird mithilfe einer umlaufenden Klebstoffraupe auf der Schallisolierung sichergestellt, die nach dem Fügen die Isolierung in Position hält und abdichtet. Die Positionierung des Bauteils erfolgt über vordefinierte Löcher im Innenblech der Tür und über die in der Isolierung vorhandenen Zentrierdorne. Die Abbildung 5-1 zeigt die Schallisolierung mit aufgetragener Kleberaupe und die gefügte Schallisolierung auf dem Türinnenblech eines BMW X3.



*Abbildung 5-1: Schallisolierung für die akustische Isolierung und Abdichtung des Türinnenraumes zum Fahrgastinnenraum des BMW X3*

Nach der Montage muss die auf dem Bauteil bei Anlieferung bereits applizierte Kleberaupe mittels eines Anrollwerkzeuges mit einer definierten Kraft von 50 N angerollt werden. Dies kann wahlweise durch einen manuellen bzw. automatisierten Prozess erfolgen. Entscheidend für die Dichtigkeit der Tür ist, die geforderte Prozesskraft im unteren Teil der Tür sicherzustellen, da hier ggf. bei starkem Regen in der Tür befindliches Wasser an der Kleberaupe anstehen kann. Im Falle einer unzureichenden Dichtungsfunktion kann Wasser in den Fahrzeuginnenraum gelangen. Die Abbildung 5-2 zeigt den manuellen Anrollprozess der Schallisolierung des BMW X3 im BMW Group Werk Spartanburg.

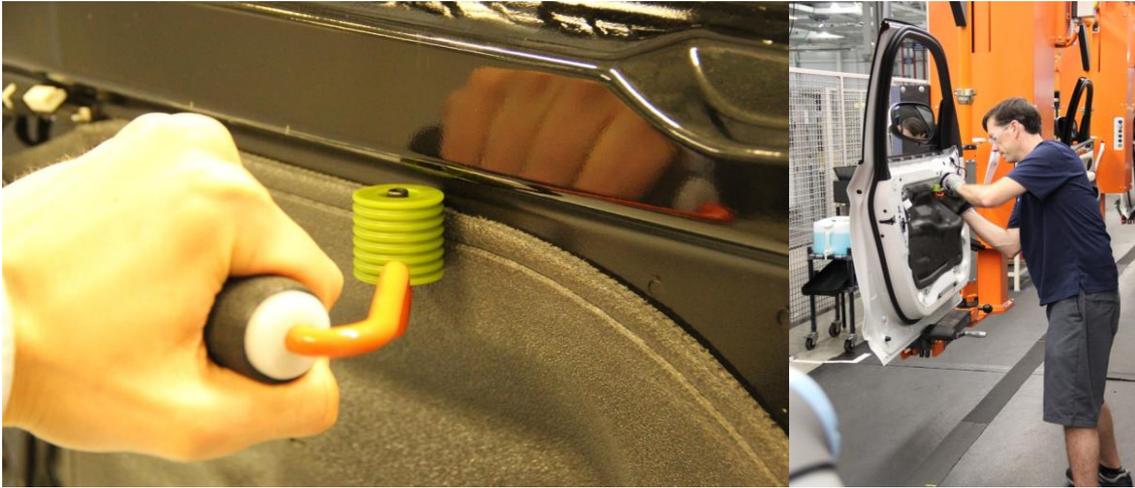


Abbildung 5-2: Manueller Anrollprozess der Schallisolierung im BMW Group Werk Spartanburg

### 5.1.2 Lösungsalternativen

Für den in Abschnitt 5.1.1 aufgezeigten Anwendungsfall werden nachfolgend drei mögliche Lösungsvarianten dargestellt. Es wird zum einen die Variante des manuellen Anrollens der Schallisolierung wie in Abbildung 5-2 beschrieben. Im Weiteren wird eine vollautomatisierte Variante des Anrollprozesses mit einem klassischen Industrieroboter vorgestellt. Diese Variante ist im BMW Group Werk München für den BMW 3er umgesetzt. Zuletzt wird eine MRI-Variante des gezeigten Anwendungsfalls vorgestellt, welche anstatt des manuellen Prozesses im Jahr 2012 im BMW Group Werk Spartanburg implementiert wurde. Anhand der drei nachfolgend beschriebenen Varianten werden abschließend die in Kapitel 1 aufgezeigten Motivationen einer MRI-Lösung bezogen auf den vorgestellten Anwendungsfall aufgezeigt:

- **Manueller Anrollprozess der Schallisolierung:**

Der manuelle Anrollprozess erfolgt über ein handgeführtes Anrollwerkzeug, wie in Abbildung 5-2 aufgezeigt. Es bestehen hinsichtlich des manuellen Prozesses vor allem zwei Herausforderungen. Zum einen sind die ergonomischen Anforderungen des Prozesses an den Mitarbeiter zu beachten. Es gilt die vorgegebene Kraft von 50 N aus dem Unterarm bereitzustellen. Zugleich muss der Mitarbeiter das Werkzeug entlang der Raupe mitdrehen, sodass sich hier im Speziellen für die Muskulatur im Unterarm eine erhebliche Belastung ergibt. Je nach vorhandenem Arbeitsmodell in der Montagelinie (Job-Rotation) müssen mehrere hundert Türen pro Schicht angerollt werden. Zudem sind die qualitativen Anforderungen an den Prozess erheblich. Es gilt das Anrollwerkzeug während des umlaufenden Anrollens exakt über der Kleberaupe zu positionieren und die vorgegebene Kraft von 50 N zu applizieren. Erfolgt dies im unteren Teil der Schallisolierung unzureichend, besteht die Gefahr einer undichten Feuchtigkeitsbarriere. Eine spätere Prüfung der Dichtigkeit ist nur auf Basis einer Stichprobe möglich.

- **Vollautomatisierter Anrollprozess der Schallisolierung:**

Das Anrollen der Schallisolierung erfolgt im BMW Group Werk München für die BMW 3er Serie durch eine Roboteranlage mit Schutzzaun. Nachdem die Tür über die Fördertechnik in den mit Sicherheitszäunen umschlossenen Montagetakt eingefahren ist, erfolgt mittels einer Lichtschranke eine exakte Vermessung der Position der Tür. Im Anschluss wird die entsprechende Korrektur aufgrund der ungenauen Positionierung der Fördertechnik berechnet und der Roboter rollt entlang der

programmierten Bahn die Schallisolierung an. Mittels eines Kraftzylinders wird eine konstante Anrollkraft von 50 N sichergestellt. Die Abbildung 5-3 zeigt die im BMW Group Werk München installierte Anlage.



*Abbildung 5-3: Vollautomatisierte Lösungsvariante zum Anrollen der Schallisolierung im BMW Group Werk München für die Tür der BMW 3er Serie*

Mittels der automatisierten Variante können die ergonomischen Herausforderungen für den Mitarbeiter vollständig eliminiert werden, zugleich können die Prozessparameter wie die Anrollkraft während des Ablaufs überwacht werden. Es zeigt sich jedoch, dass im vorhandenen Montagesystem ein Fixpunkt aufgrund der vollständigen Umbauung des Taktes in der Montage entsteht, welcher für künftige Integrationen weiterer Modellvarianten bzw. für eine mögliche Stückzahlsteigerung hinderlich ist.

- **MRI-Anrollprozess der Schallisolierung:**

Im Wesentlichen entspricht der MRI-Lösungsansatz dem der bereits vorgestellten Lösung der vollautomatisierten Variante. Hauptunterschied ist, dass statt eines Industrieroboters, wie er aus den Karosseriebau der Automobilindustrie bekannt ist, ein Leichtbaurobotersystem zum Einsatz kommt (vgl. Abschnitt 2.2.2). Das Leichtbaurobotersystem UR10 der Firma Universal Robots ist ein inhärent sicherer Leichtbauroboter mit Kraft- und Leistungsbeschränkung und für die Zusammenarbeit mit dem Menschen zugelassen. Es kann daher auf zusätzliche Schutzeinrichtungen um die MRI-Anlage vollständig verzichtet werden, wenn die Anforderungen im Hinblick auf den Kontakt zwischen Mensch und Roboter nach der ISO TS 15066 erfüllt sind. Für das Vermessen des Roboters an der Tür und das Anrollen der Schallisolierung kommt ein für die MRI-Anwendung angepasstes Werkzeug zum Einsatz. So können die ergonomischen Aspekte des Anwendungsfalles ebenfalls vollständig eliminiert werden und eine Überwachung der Prozesskräfte entlang des gesamten Anrollprozesses ist sichergestellt. Die Abbildung 5-4 zeigt die für das BMW Group Werk Spartanburg erarbeitete Lösungsvariante für den Anrollprozess der Schallisolierung.



Abbildung 5-4: MRI-Anrollprozess mit dem Leichtbaurobotersystem Universal Robots UR10  
im BMW Group Werk Spartanburg

Anhand der drei aufgezeigten Lösungsvarianten lassen sich die Vorteile eines kollaborierenden Arbeitsplatzes aufzeigen. Für den Anwendungsfall bietet sich nur eine Automatisierung des Anrollvorgangs der Schallisolierung an. Die eigentliche Fügeoperation der Schallisolierung auf die Tür erfolgt mittels der in Abschnitt 5.1.1 abgebildeten Zentrierdorne. Da die Schallisolierung bereits mit applizierter Kleberaupe im Fahrzeugwerk angeliefert wird, wäre ein vollautomatisierter Fügeprozess nur mit erheblichen Aufwand darstellbar. Zugleich gilt es den vorhandenen Kabelbaum während der Fügeoperation exakt in einer dafür vorgesehenen Aussparung zu positionieren. Es werden zudem je nach Anzahl der Fahrzeugderivate auf der Montagelinie unterschiedliche Geometrien der Schallisolierung verbaut. Der Mitarbeiter ist für die Fügeoperation der Automatisierung überlegen. Die Aufnahme der biegeschlaffen Schallisolierung, die Positionierung dieser über die Zentrierdorne auf dem Türinnenblech und das Handling des Kabelbaumes während des Fügevorgangs sind für den Menschen einfacher zu vollziehen und erfordern eine gute Hand-Auge-Koordination. Zugleich stößt die Automatisierung bei biegeschlaffen Bauteilen wie der Schallisolierung und dem Kabelbaum an ihre Grenzen und ist unter vertretbaren wirtschaftlichen Gesichtspunkten nicht realisierbar.

Für den Anrollprozess bietet sich aufgrund der qualitativen Aspekte eine automatisierte Lösung an. Die konstante Anrollkraft von 50 N entlang der Kleberaupe ist für eine korrekte Dichtungsfunktion der Schallisolierung unabdingbar. Zugleich stellt die Anrollkraft für den Mitarbeiter eine erhebliche ergonomische Belastung dar. Herausfordernd für eine Automatisierung ist das Abbilden einzelner Varianten. Diese führen im Falle des Anrollprozesses nur zu einem vertretbaren Mehraufwand, da die Roboterhardware (Anrollwerkzeug, Einmessvorrichtung) für den Prozess dieselbe ist und lediglich eine neue Programmierung der Roboterbahn für eine Variantenintegration benötigt wird. Eine vollautomatisierte Variante wie im BMW Group Werk München besitzt Vorteile bei der Leistungsfähigkeit und ein einfaches binäres Sicherheitskonzept. Gleichzeitig bedeutet die Vollautomatisierung eine eingeschränkte Zugänglichkeit zum Robotertakt, sodass außer dem Anrollprozess keine weiteren Tätigkeiten an der Tür in dem Takt vollzogen werden können. Bewegungsgeschwindigkeiten des Roboters und benötigter Arbeitsraum können hinter dem Sicherheitszaun frei gewählt werden. Eine MRI-Lösung besitzt in dieser Hinsicht nicht dieselben Freiheitsgrade, hat aber erhebliche Vorteile bzgl. der Wandlungsfähigkeit und Flexibilität der Automatisierung in der Türenmontagelinie. Die gezeigte MRI-Anlage für den Anrollprozess im BMW Group Werk Spartanburg mit einem Universal Robots UR10 ist an vier Stellen im Boden verankert und kann daher sehr leicht entlang der Montagelinie verschoben werden. Schutzzäune klassischer Industrieroboter bieten nicht dieselbe Flexibilität. Zugleich ist der Takt während und nach dem Anrollprozess für die Mitarbeiter der Montagelinie zugänglich, sodass neben dem Anrollen weitere Montagetätigkeiten an der Tür vollzogen werden können. Dies spart Fläche direkt am Montageband und

verkürzt die Laufwege der Mitarbeiter entlang der Linie. Aufgrund der Kraft- und Leistungsbeschränkung des Leichtbauroboters kann auf die Integration weiterer Sicherheitssensoren verzichtet werden, sodass der hardwareseitige Integrationsaufwand der Steuerungstechnik erheblich vereinfacht wird. Dies spart dem Anlagenbetreiber hohe Anschaffungskosten und senkt die steuerungsseitige Komplexität. Zu beachten ist, dass die Sicherheitsabnahme nach der DIN EN ISO 10218-1/2 und der ISO TS 15066 einen Mehraufwand darstellt, den Anlagenintegrator und Betreiber leisten müssen. Die nachfolgende Tabelle 5-1 fasst die diskutierten Vor- und Nachteile der aufgezeigten Lösungsvarianten zusammen.

*Tabelle 5-1: Überblick über die Vor- und Nachteile der Lösungsvarianten des Montageprozesses „Anrollen der Schallisolierung auf dem Türinnenblech“*

<b>Handgeführter manueller Anrollprozess</b>	<b>Anrollprozess mit Industrieroboter</b>	<b>MRI-Anrollprozess mit Leichtbauroboter</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Geringe Anschaffungskosten für manuelles Werkzeug</li> <li>+ Einfache Variantenintegration</li>   <li>- Ergonomische Belastung der Mitarbeiter</li> <li>- Qualitätsüberwachung: Sicherstellung der Anrollkraft</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Qualitätsüberwachung: Sicherstellung der Anrollkraft</li> <li>+ Einfaches binäres Sicherheitskonzept</li> <li>+ Relativ einfache Variantenintegration</li>   <li>- Hohe Anschaffungskosten für Roboteranlage</li> <li>- Fixpunkt im Montageband</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>+ Qualitätsüberwachung: Sicherstellung der Anrollkraft</li> <li>+ Relativ einfache Variantenintegration</li> <li>+ Wandlungsfähiger Fixpunkt im Montageband</li> <li>+ Moderate Anschaffungskosten</li>   <li>- Aufwendiger Absicherungsprozess nach ISO TS 15066</li> </ul>

## 5.2 Sicherheitsbeurteilung

Der vorliegende Abschnitt befasst sich mit der Sicherheitsbeurteilung der in Abschnitt 5.1.2 vorgestellten MRI-Lösung für den Anrollprozess der Schallisolierung. Ausgehend von der im BMW Group Werk Spartanburg installierten Anlage mit einem kraft- und leistungsbeschränkten Leichtbauroboter wird zunächst die erfolgte Sicherheitsbeurteilung auf Basis einer Expertenmeinung in Abschnitt 5.2.1 vorgestellt. Hierbei wurden diverse Messpunkte zur Ermittlung der Kollisionskraft festgelegt, welche anschließend experimentell untersucht wurden. Im nachfolgenden Abschnitt 5.2.2 wird die Analyse desselben Anwendungsfalls mithilfe der RSC aus Kapitel 4 vorgestellt. Dabei werden anhand des Verlaufs der Steuergrößen „worst case“ Konfigurationen identifiziert, welche für die experimentelle Beurteilung der Kollisionskräfte herangezogen werden können. Zudem erfolgt eine vollumfängliche Beurteilung der Kollisionskraft auf Basis des Regressionsrechenmodells der RSC. Der Abschnitt 5.2.3 befasst sich mit der Optimierung der Anlage hinsichtlich der Performance und Sicherheit mithilfe der RSC.

### 5.2.1 Experimentelle Sicherheitsbeurteilung

Die experimentelle Sicherheitsbeurteilung möglicher Kollisionen erfolgt nach einem festgelegten Vorgehen. Der Beurteiler analysiert sehend die Roboterbahn und legt mögliche Kollisionsszenarien fest. Hierzu dienen die Mitarbeiter im direkten Umfeld des Roboters, der künftige Betreiber und Experten als Berater, sodass in der Regel alle möglichen Kollisionsszenarien für eine kollaborierende Aufgabe

diskutiert werden. Im Anschluss werden für die aufgezeigten Kollisionsszenarien einzelne biofidele Messungen (vgl. Abschnitt 2.5.2) durchgeführt, welche mit den in der ISO TS 15066 festgelegten Grenzwerten verglichen werden. Die Untersuchungen zeigen immer nur einen Ausschnitt der Bahn, welcher durch die Experten vorher festgelegt wurde, die komplette Trajektorie wird nicht beurteilt.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die getroffene Einteilung der experimentellen Beurteilung der geplanten Trajektorie des Anrollprozesses. Die Abbildung 5-5 zeigt die Anfahrt des Leichtbauroboters von der Startposition nahe der Base des Leichtbauroboters an die Tür und das festgelegte Kollisionsszenario.

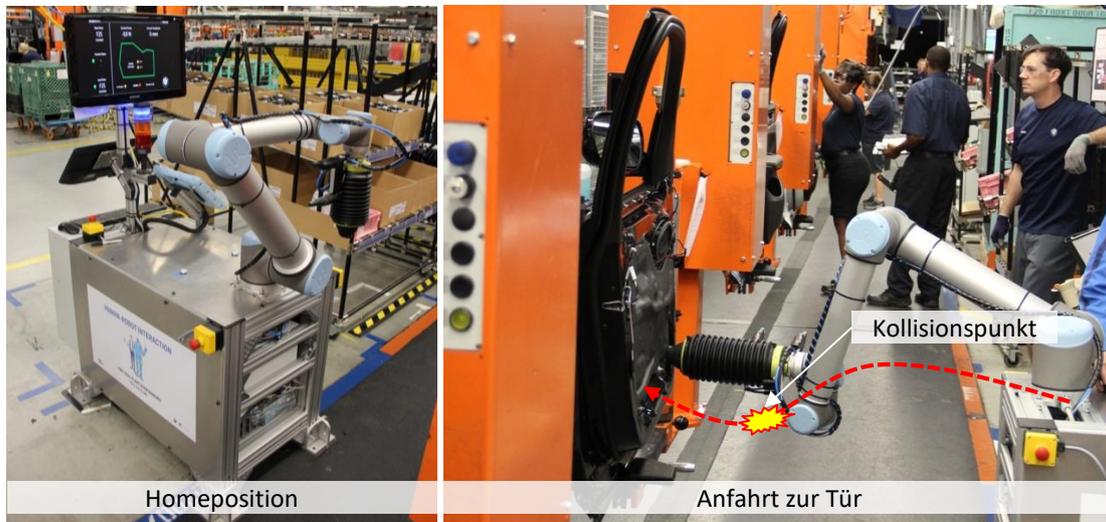


Abbildung 5-5: Geplante Startposition und schematische Darstellung der Anfahrt des Leichtbauroboters aus der Startposition an die Tür

Als mögliches Kollisionsszenario kommt eine Berührung des Montagemitarbeiters bei der Anfahrt des Leichtbauroboters zur Tür in Betracht. Dies ist der Fall, wenn bspw. ein Mitarbeiter aus dem vorgehenden Takt mit der Tür mitläuft, da er seine Arbeitsinhalte aufgrund eines Problems mit einem Bauteil nicht abschließen konnte. Somit steht der Mitarbeiter mit dem Rücken zum Robotersystem und kann eine Anfahrt des Leichtbauroboters nicht sehen. Kollisionsflächen nach dem Körperatlas der ISO TS 15066 sind der Rücken, das Gesäß oder der Oberschenkel. Die Abbildung 5-5 zeigt den festgelegten Kollisionsszenario für die Anfahrt des Leichtbauroboters, an welchem für die genannten Körperstellen Messungen mit einem biofidelen Messgerät durchgeführt wurden. In Tabelle 5-2 sind die ermittelten Kraftwerte mit dem in Abschnitt 3.3 gezeigten biofidelen Messgerät und die entsprechend der ISO TS 15066 festgelegten Grenzwerte aufgeführt. Für die Messung kamen unterschiedliche Geschwindigkeiten zum Einsatz, um die entsprechenden Grenzwerte der ISO TS 15066 zu erfüllen. Es zeigt sich, dass für die Anfahrt sowohl für den klemmenden als auch für den freien Kollisionsfall die Grenzwerte im gezeigten Kollisionsszenario eingehalten sind. Die gezeigten Geschwindigkeiten wurden iterativ ausgehend von 180 mm/s ermittelt, welche schrittweise in 40 mm/s Schritten gesteigert wurden. So wurde bereits bei 220 mm/s das obere Ende der möglichen Geschwindigkeiten für diesen Bereich der Trajektorie erreicht. Die Achse  $A_3$  stellt für den aufgezeigten Kollisionsszenario die Achse da, welche den Stopp über die Kollisionserkennung erkennt.

Tabelle 5-2: Ermittelte Kraftwerte mit einem biofidelen Messansatz für die Anfahrt des Leichtbauroboters

Position	Federkonstante	Grenzwert klemmend	Grenzwert freie Kollision	Kollisionskraft bei 220 mm/s	Kollisionskraft bei 180 mm/s
Rücken	35 N/mm	210 N	420 N	205 N	193 N
Oberschenkel	50 N/mm	220 N	440 N	218 N	209 N

Nach der Anfahrt liegt der Fokus der Kollisionsuntersuchungen auf möglichen Gefährdungen entlang der Bahn auf der Tür. Die Bahn wird durch die aufgebrachte Kleberaube auf der Schallisolierung festgelegt, welche möglichst genau durch den Roboter nachgerollt werden soll. Die Abbildung 5-6 zeigt die Anrollbahn des Roboters auf der Schallisolierung.

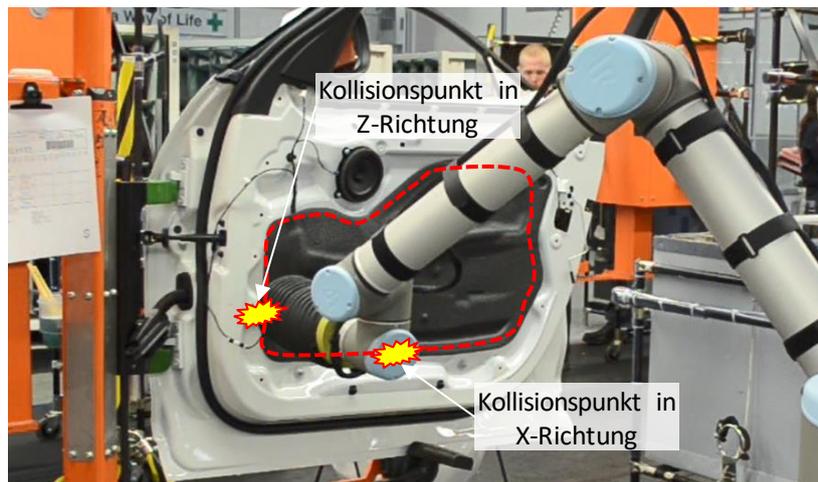


Abbildung 5-6: Roboterbahn entlang der Klebstoffraupe der Schallisolierung auf der Tür des BMW X3, eingezeichneter Kollisionspunkt in X-Richtung und Z-Richtung der Tür

Es sollen nachfolgend zwei Kollisionsszenarien betrachtet werden. Zum einen werden Kollisionen in waagerechter Richtung, in Abbildung 5-6 als Kollisionen in X-Richtung gekennzeichnet, und Kollisionen in senkrechter Richtung, in Abbildung 5-6 als Kollisionen in Z-Richtung gekennzeichnet, untersucht (vgl. Abbildung 3-12). Für die waagerechten Kollisionen wurden als mögliche Gefahrenstellen Kollisionen mit dem Armbereich, dem Oberschenkel und dem Brustkorb festgelegt. Besonderes Augenmerk wurde in diesem Kontext auf die Hand gelegt, da der Mitarbeiter noch Montagetätigkeiten im Arbeitsbereich des Roboters ausführen kann. Für die Bewegungen in Z-Richtung auf der Schallisolierung kommen nur Kollisionen mit der Hand und dem Armbereich infrage. Eine klemmende Kollision kann für alle Szenarien ausgeschlossen werden, da sich die Rolle auf der Tür befindet und die menschlichen Extremitäten nur seitlich durch den Roboter weggeschoben werden können. Selbst ein Überrollen der Hand hätte bei einer Nichterkennung der Kollision nur eine Kraft entsprechend der Anrollkraft von 50 N zur Folge, sodass der Wert unterhalb des Grenzwertes liegt und keine Gefahr für den Mitarbeiter darstellt. Zugleich wird der Druckzylinder bei einer Kollisionserkennung des Roboters vom Druckluftkreislauf getrennt, sodass die Anrollkraft nicht dauerhaft nach einer Kollision anliegt. Die Tabelle 5-3 zeigt die erzielten Messwerte für Kollisionen in X-Richtung auf der Schallisolierung, wie in Abbildung 5-6 gezeigt, und die durch die ISO TS 15066 festgelegten Grenzwerte für die entsprechenden Körperregionen. Die Grenzwerte für die klemmenden Kollisionen sind der Vollständigkeit geschuldet mit aufgeführt, haben aber für die Bewertung keine Relevanz. Die Messungen erfolgten ausgehend von den bei der Anfahrt ermittelten 220 mm/s und wurden anschließend in 40 mm/s Schritten erweitert, bis eine der

untersuchten Positionen einen Grenzwert erreicht. Dies ist bei ca. 300 mm/s der Fall, da hier für die Hand der Maximalwert für die freie Kollision erreicht wird. Alle Grenzwertverletzungen bei den Kollisionen konnten der Achse  $A_1$  zugeordnet werden, da diese den größten Anteil an Bewegungen in Z-Richtung auf der Tür hat.

*Tabelle 5-3: Ermittelte Kraftwerte mit einem biofidelen Messansatz für die Bewegungen in X-Richtung des Leichtbauroboters während des Anrollens der Schallisolierung an die Tür*

Position	Federkonstante	Grenzwert klemmend	Grenzwert freie Kollision	Kollisionskraft bei 220 mm/s	Kollisionskraft bei 260 mm/s	Kollisionskraft bei 300 mm/s
Rücken/Schulter	35 N/mm	210 N	420 N	157 N	167 N	175 N
Brustkorb	25 N/mm	140 N	280 N	152 N	162 N	169 N
Armbereich	40 N/mm	160 N	320 N	159 N	169 N	178 N
Hand	75 N/mm	140 N	280 N	180 N	207 N	240 N
Oberschenkel	50 N/mm	220 N	440 N	163 N	176 N	185 N

Für die letzte Position in Z-Richtung wurden ebenfalls Messungen vorgenommen, dabei sind wie bereits beschrieben nur die Grenzwerte für die Hand und den Armbereich von Bedeutung. Die Tabelle 5-4 zeigt die erzielten Messwerte für die Bewegungen in Z-Richtung. Es zeigt sich, dass für die gezeigten Geschwindigkeitsbereiche alle Grenzwerte in Z-Richtung auf der Tür eingehalten werden können. Die Bewegung wird hauptsächlich von den Achsen  $A_2$  und  $A_3$  des Leichtbauroboters ausgeführt. Der Stopp konnte bei jeder Messung der Achse  $A_2$  zugeordnet werden.

*Tabelle 5-4: Ermittelte Kraftwerte mit einem biofidelen Messansatz für die Bewegungen in Z-Richtung des Leichtbauroboters während des Anrollens der Schallisolierung an die Tür.*

Position	Federkonstante	Grenzwert klemmend	Grenzwert freie Kollision	Kollisionskraft bei 220 mm/s	Kollisionskraft bei 260 mm/s	Kollisionskraft bei 300 mm/s
Armbereich	40 N/mm	160 N	320 N	125 N	132 N	141 N
Hand	75 N/mm	140 N	280 N	143 N	158 N	172 N

Die erfolgten Messungen zeigen, dass die Grenzwerte in den untersuchten Punkten eingehalten werden können.

Es gilt den Sicherheitsregler des Leichtbauroboters derart zu begrenzen, dass die jeweiligen Geschwindigkeiten für die aufgezeigte Roboterbahn nicht überschritten werden. Der Universal Robots UR10 hat eine vom Hersteller vorgegebene Geschwindigkeitstoleranz von 150 mm/s, welche zudem in der Parametrierung des Sicherheitsreglers zu berücksichtigen ist. Es lassen sich 2 Sicherheitskonfigurationen erstellen, welche für die Applikation zum Einsatz kommen. Die erste Konfiguration dient der Begrenzung der Anfahrt des Roboters an die Tür. So wird die maximal mögliche Geschwindigkeit mit 220 mm/s begrenzt, wodurch sich nach Berücksichtigung der Toleranz eine maximal real gefahrene Geschwindigkeit von 70 mm/s ergibt. Für das Verfahren auf der Tür wird analog die Geschwindigkeit

mittels der Toleranz herabgesetzt, sodass sich eine Anrollgeschwindigkeit von 150 mm/s ergibt. Die Abbildung 5-7 zeigt die festgelegten Sicherheitsbereiche, welche durch eine Ebene voneinander getrennt sind. Der Roboter schaltet automatisch bei der Durchfahrt der Sicherheitsebene des konfigurierten TCP zwischen den Konfigurationen um, sodass in den jeweiligen Bereichen unterschiedliche Leistungsbeschränkungen herangezogen werden.

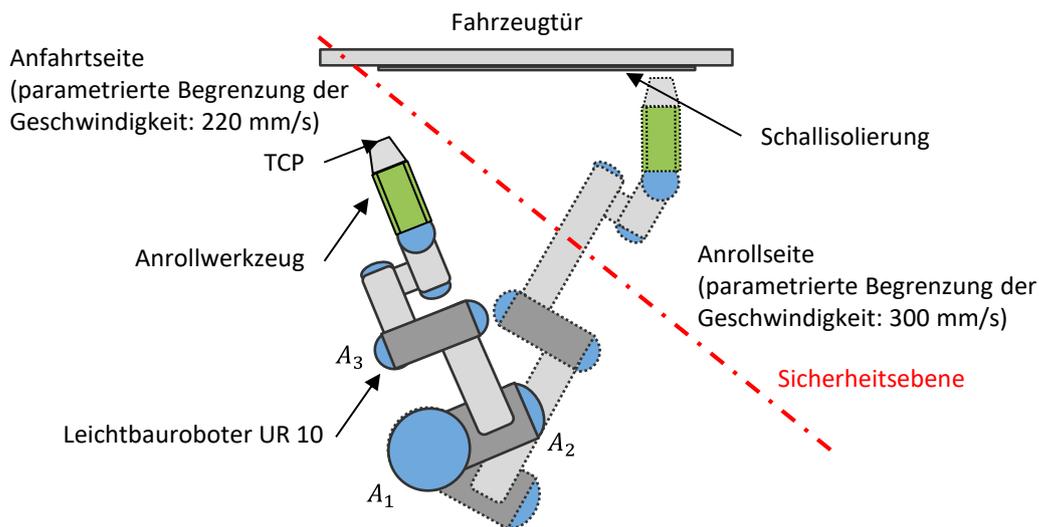


Abbildung 5-7: Konfigurierte Sicherheitsebene zwischen der Anfahrtseite und der Anrollseite mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten

Neben der Sicherheitsbetrachtung der einzelnen Kollisionen gilt es zudem weitere Gefährdungen für den Interaktionspartner zu beleuchten. Dazu zählen bspw. elektrische und thermische Gefährdungen, welche ebenfalls in der Risikoanalyse thematisiert werden. Da an dieser Stelle nur explizit auf die mechanischen Gefährdungen durch den Roboter eingegangen werden soll, wurde auf eine Darstellung verzichtet.

### 5.2.2 Sicherheitsbeurteilung durch die RSC

Nachfolgend soll die Analyse des gezeigten Anwendungsfalles anhand der RSC dargestellt werden. Hierzu erfolgt eine Aufnahme der Trajektorie mittels einer Software, welche für die Erfassung von Kollisionen und Trajektorien innerhalb der RSEC entwickelt wurde. Für die Aufnahme der Trajektorie des Universal Robots UR10 wurde eine Abfragefrequenz von 10 Hz gewählt. Die Aufnahme beinhaltet eine zeitliche Abfolge der Positionen und Bewegungsparameter in Achswinkelangaben und kartesischen Koordinaten bezogen auf den TCP des Roboters. Zusätzlich werden durch den Nutzer weitere Informationen zu den getroffenen Einstellungen im Sicherheitsregler des Leichtbauroboters erfasst. Im Anschluss können alle benötigten Steuergrößen mittels der in Abschnitt 4.2 eingeführten Formeln errechnet werden. Die Abbildung 5-8 zeigt das Interface der in der RSEC verwendeten Software zur Aufnahme der Trajektorie.

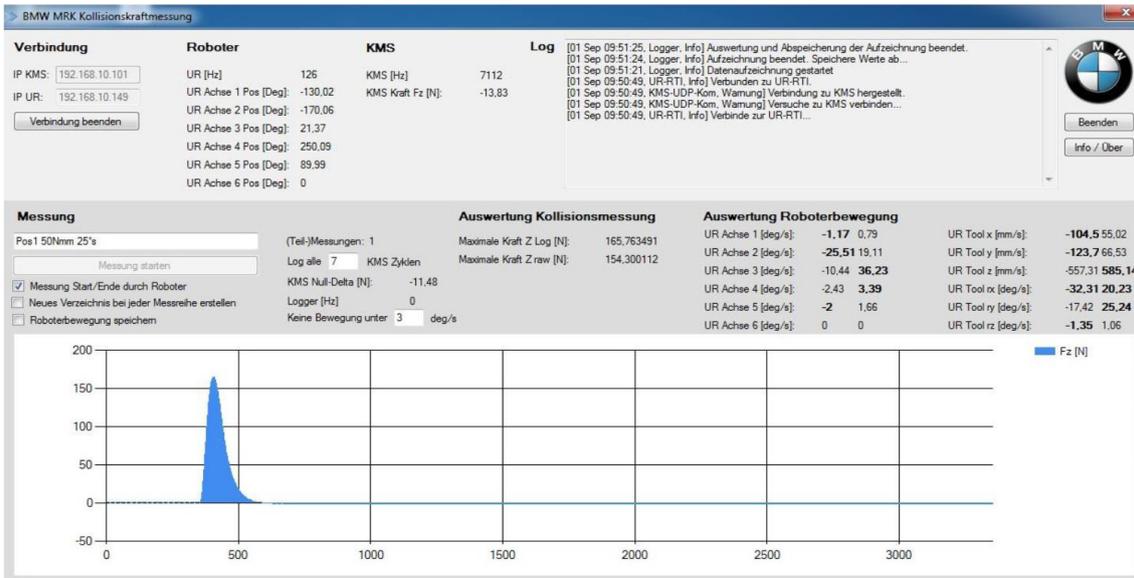


Abbildung 5-8: Software zur Aufnahme von Kollisionen und Trajektorien innerhalb der RSEC

Im Anschluss lädt der Anwender die Trajektorie und die aktuelle Datenbank in das Softwareinterface der RSC. Zudem erfolgt die Angabe des zu untersuchenden Kollisionspunktes im entsprechenden Koordinatensystem des Roboters. Auf Basis der Eingangsgrößen werden für jeden Punkt der Aufnahme die Steuergrößen und die resultierenden Kraftwerte für die Kollisionskraft je Roboterachse berechnet. Die Ausgabe erfolgt wahlweise als Diagramm und als XML-Datei für die Visualisierung in der RVIZ Oberfläche. Das Nutzerinterface der RSC wurde unter Abschnitt 4.3 in Abbildung 4-8 gezeigt.

Für den vorliegenden Anwendungsfall wurde die Trajektorie der Anwendung mittels des gezeigten Softwareinterfaces aufgenommen und als Kollisionspunkt der TCP an der Rolle des Anrollwerkzeuges parametrisiert. So liegt der Verlauf der geplanten Robotertrajektorie ca. 1180 mm von der Basis des Roboters entfernt. Die nachfolgende Abbildung zeigt den mittels RVIZ visualisierten Verlauf der Trajektorie und den aufgezeigten Abstand der Trajektorie.

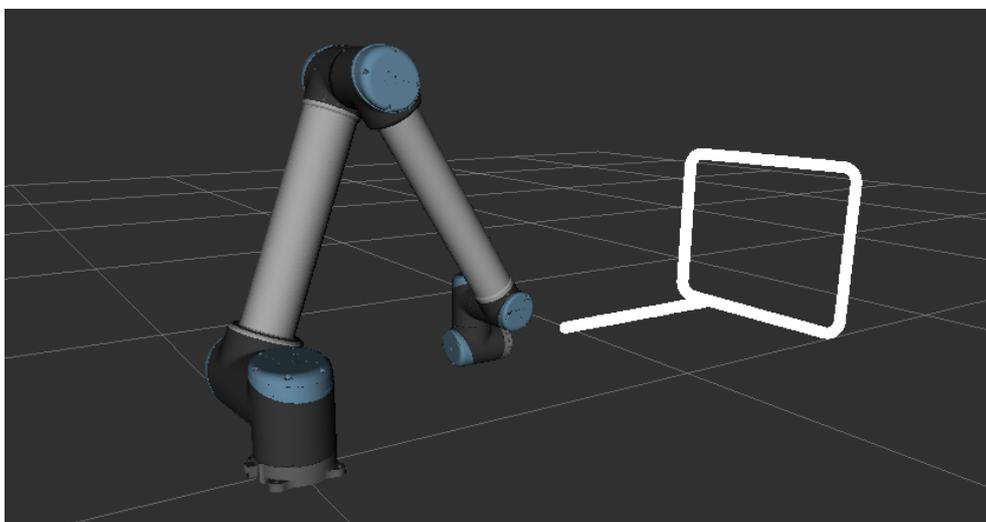


Abbildung 5-9: Visualisierung der Robotertrajektorie mittels RVIZ des Anrollprozesses der Schallisolierung auf einer Fahrzeughür

In Abbildung 5-10, Abbildung 5-11 und Abbildung 5-12 werden die Verläufe der Steuergrößen für die Achsgeschwindigkeit und den Hebelarm der drei Hauptachsen aufgezeigt.

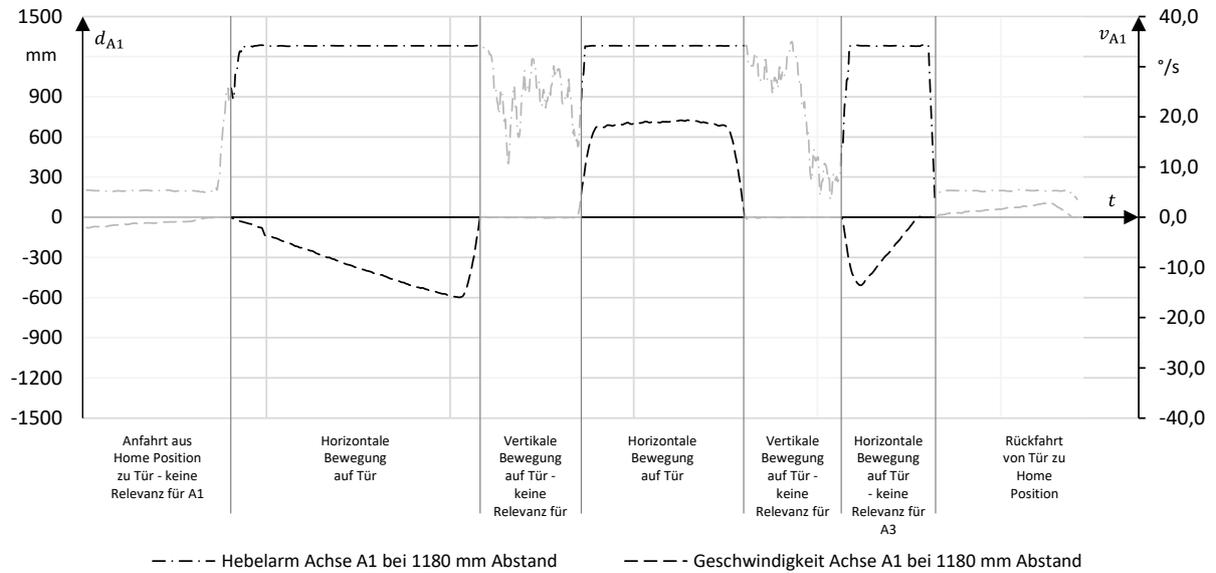


Abbildung 5-10: Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Steuergrößen für den Anrollprozess der Schallisolierung für die Hauptachsen  $A_1$  bei einem Abstand von 1180 mm

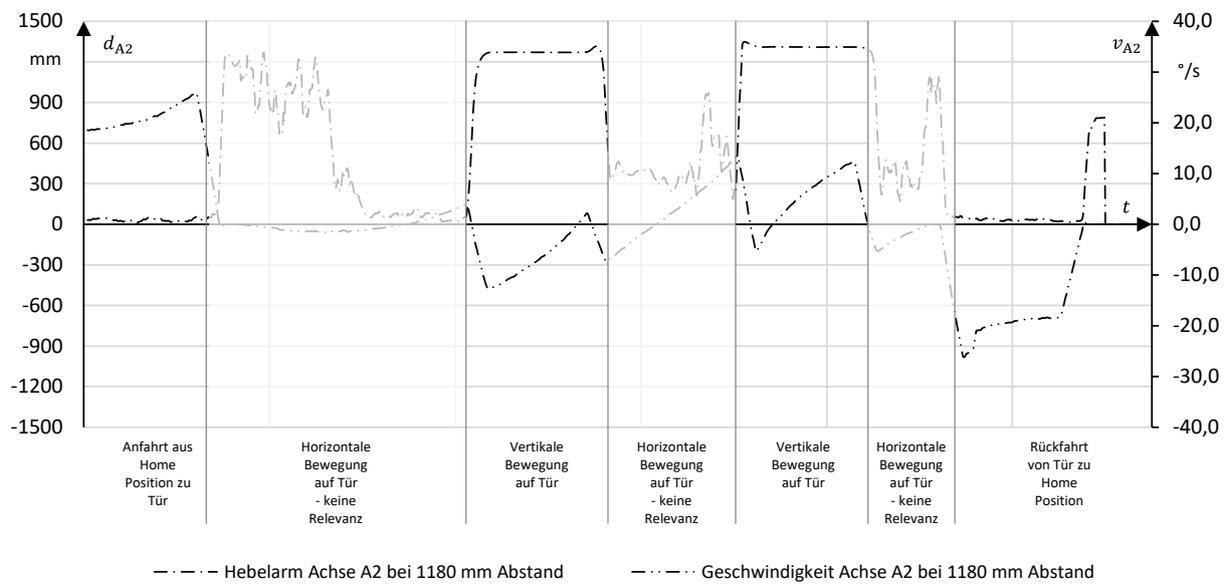


Abbildung 5-11: Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Steuergrößen für den Anrollprozess der Schallisolierung für die Hauptachsen  $A_2$  bei einem Abstand von 1180 mm

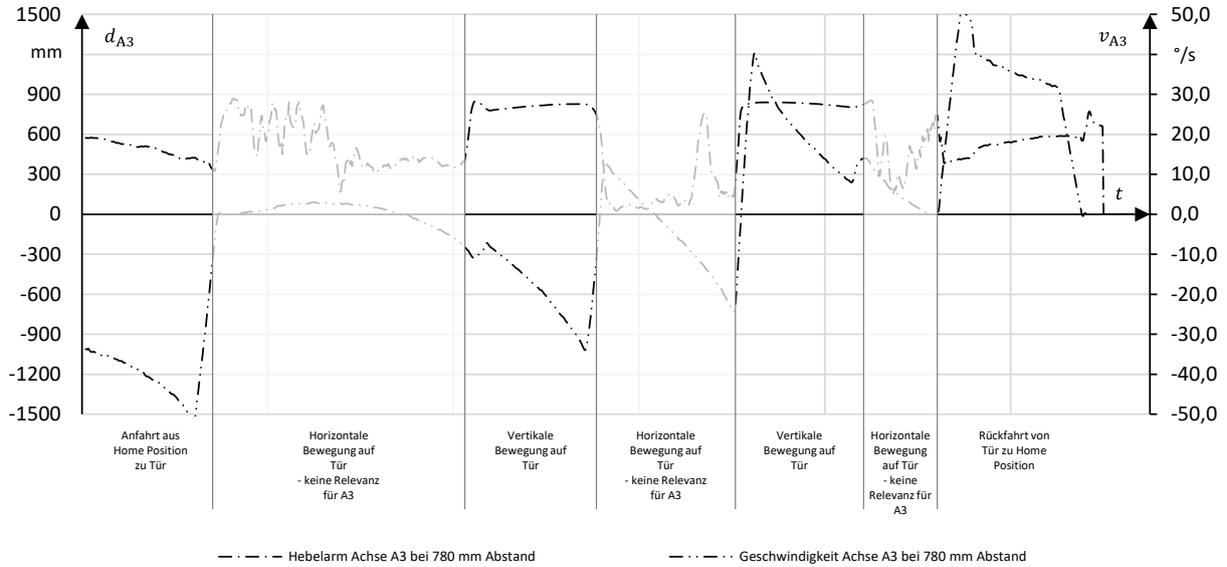


Abbildung 5-12: Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Steuergrößen für den Anrollprozess der Schallisolierung für die Hauptachsen  $A_3$  bei einem Abstand von 1180 mm

Analog zum Verlauf der Steuergrößen lassen sich zudem auch die entsprechenden Kollisionskräfte je Roboterachse auf Basis des in Abschnitt 4.2.3 eingeführten Regressionsmodells berechnen. Neben dem Verlauf der Kollisionskraft je Roboterachse ist zudem noch der Verlauf der minimalen Kollisionskraft in Abbildung 5-13 kenntlich gemacht. Dieser legt zugrunde, dass es bei senkrechter Krafteinleitung zu einer Grenzüberschreitung in der jeweiligen Achse führt und eine Kollision erkannt wird. Die Werte der experimentellen Kraftermittlung aus Abschnitt 5.2.1 sind als Messpunkte ebenfalls in Abbildung 5-13 aufgetragen.

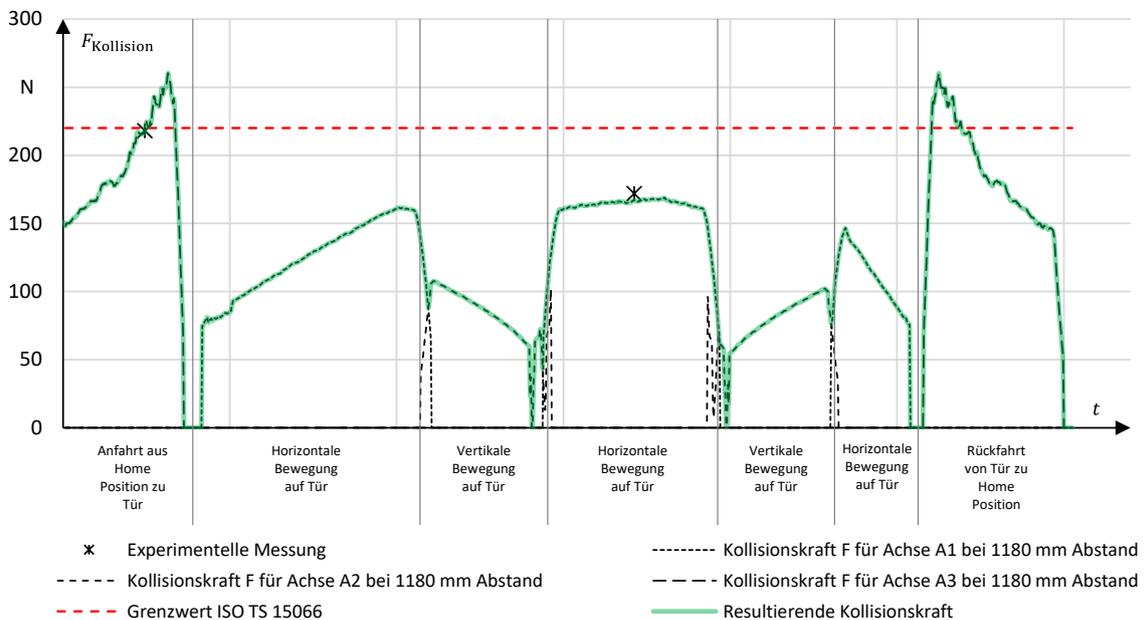


Abbildung 5-13: Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Kollisionskraft für die drei Hauptachsen  $A_1$ ,  $A_2$  und  $A_3$  und minimaler Kraftverlauf für den Anrollprozess der Schallisolierung bei einer Federsteifigkeit von 50 N/mm

Es zeigt sich, dass die in den physischen Messungen erzielten Ergebnisse zum einen den in der RSC ermittelten Kraftwerten entsprechen und in einem akzeptablen Bereich um die berechneten Kraftverläufe streuen. Zugleich zeigt sich, dass die vorgenommenen physischen Messungen nicht an den ermittelten „worst case“ Punkten der Trajektorie vorgenommen wurden. Dies ist damit begründet, dass zum Zeitpunkt der experimentellen Beurteilung des Anwendungsfalles die Auswertung mittels der RSC nicht möglich war und daher eine Festlegung des Messpunktes durch den Experten vor Ort erfolgt ist.

Im Weiteren zeigt sich anhand der ermittelten Ergebnisse der RSC ein erhebliches Potenzial für eine Optimierung der Trajektorie. So kann durch eine Veränderung des Abstandes des Roboters zum einen eine Maximierung der Hebelarme ermöglicht werden, zum anderen kann durch eine gezielte Steigerung der jeweiligen Geschwindigkeiten die Zykluszeit der geplanten Aufgabe verkürzt werden. Die Optimierung wird im nachfolgenden Abschnitt erläutert.

### 5.2.3 Optimierung der Sicherheit mithilfe der RSC

Auf Basis der erfolgten Untersuchungen in Abschnitt 5.2.2 erfolgt eine Optimierung der Robotertrajektorie vor dem Hintergrund der ermittelten Kollisionskraft. Es soll zum einen gezeigt werden, wie durch eine veränderte Platzierung des Leichtbauroboters für die geforderte Aufgabe die Hebelarme maximiert werden können und zum anderen durch eine Variation der Geschwindigkeit die Produktivität der Anlage gesteigert werden kann, ohne dabei die Grenzwerte der ISO TS 15066 zu verletzen. Die nachfolgend dargestellten Untersuchungen finden beispielhaft im Körperbereich des Oberschenkels statt, welcher nach dem in der technischen Spezifikation vorgestellten Körperatlas eine maximale Kollisionskraft für den transienten Kontakt von 440 N, für den quasistatischen Kontakt von 220 N und für die biofidele Messgröße eine Federsteifigkeit von 50 N/mm vorsieht.

Abbildung 5-13 zeigt in Abschnitt 5.2.2 eine Verletzung der maximal zulässigen Kollisionskraft im Bereich der Anfahrt und der Rückfahrt des Leichtbauroboters zur Tür. Durch die Steigerung des Hebelarmes in der Achse  $A_3$  kann gezielt Einfluss auf die Kollisionskraft genommen werden. Dies erfolgt über die Reduzierung des Abstandes des Roboters zur Tür und eine damit verbundene Vergrößerung des Hebelarmes. Abbildung 5-14 zeigt eine Visualisierung der Ausgangsroboterbahn und zweier um 100 mm und 200 mm verschobener Roboterbahnen in Richtung der Base des Leichtbauroboters.

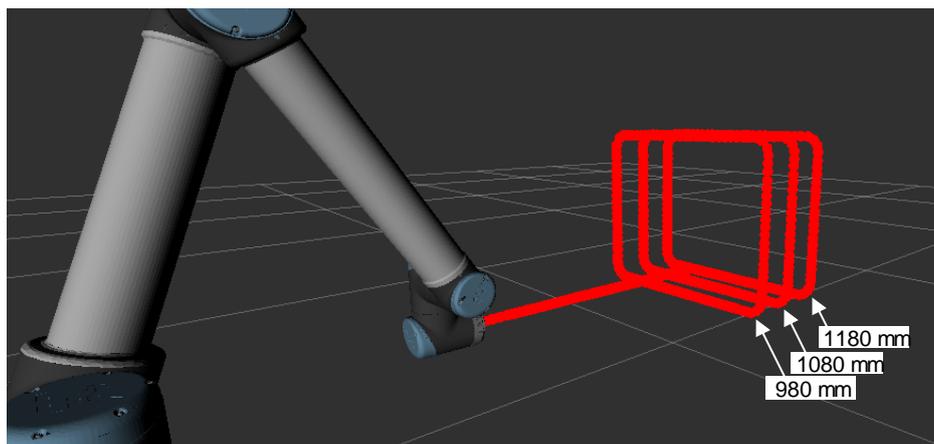


Abbildung 5-14: Visualisierung der Robotertrajektorie auf der Tür für die Abstände 980, 1080 und 1180 mm von der Base des Leichtbauroboters

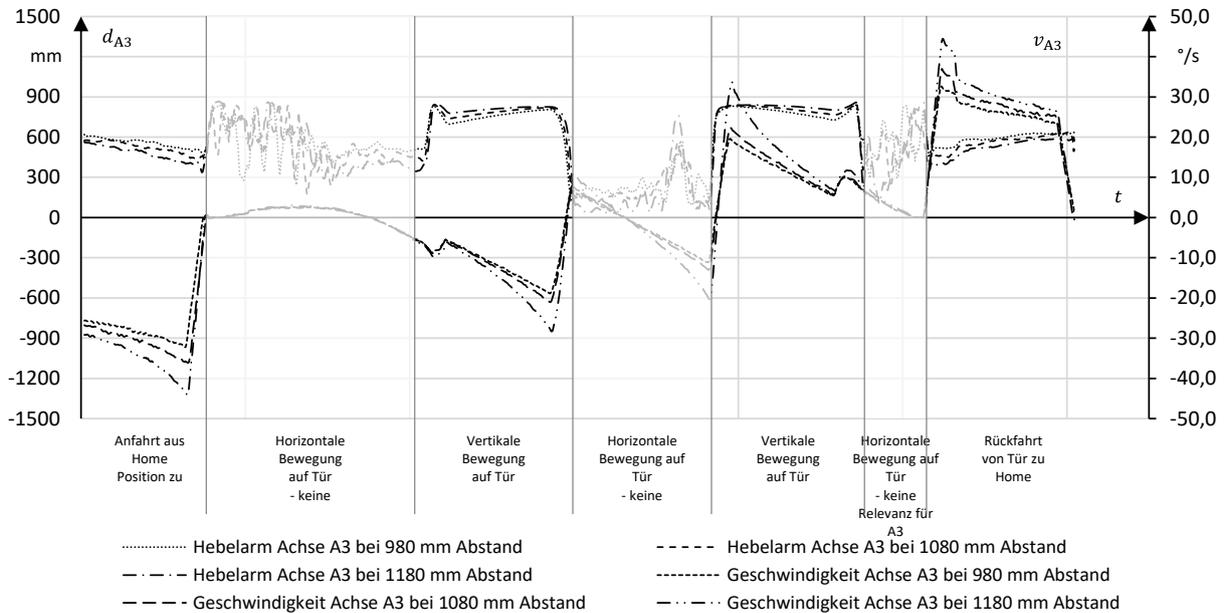


Abbildung 5-15: Verlauf der Steuergrößen der Achse  $A_3$  bei 250 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

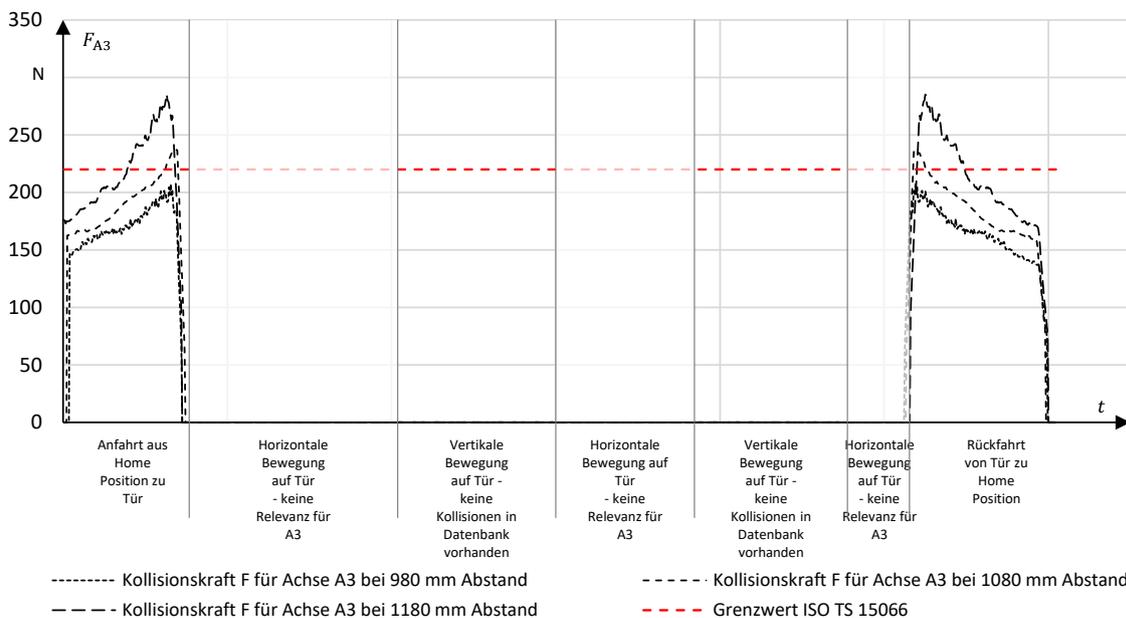


Abbildung 5-16: Kraftverlauf der Achse  $A_3$  bei 250 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

In Abbildung 5-15 und Abbildung 5-16 werden die Verläufe der Steuergrößen und die durch die RSC ermittelte Kraft für die in Abbildung 5-14 gezeigten Roboterbahnen für die Achse  $A_3$  aufgezeigt. Es zeigt sich, dass durch eine Steigerung des Hebelarmes bei gleichem Verlauf der Trajektorie und gleicher TCP-Geschwindigkeit eine niedrigere Achsgeschwindigkeit bedingt ist. Da der Hebelarm der Achse  $A_3$  gerade bei der Anfahrt durch eine Verschiebung der Trajektorie zur Base des Leichtbauroboters hin maximiert wird, wird der Verlauf der Kraftwerte der RSC entsprechend niedriger. Abbildung 5-16 zeigt, dass bei einem Abstand von 980 mm der Base des Leichtbauroboters zum Verlauf der Anrollbahn auf der Tür bei 250 mm/s ein weiteres Steigerungspotenzial für die Anfahrtgeschwindigkeit

besteht. Mithilfe der RSC werden unterschiedliche Geschwindigkeitsverläufe für die gezeigte Trajektorie untersucht und durch ein iteratives Vorgehen ermittelt. Dabei erreicht die Kraft den zulässigen Grenzwert von 220 N für einen quasistatischen Kontakt bei einer TCP-Geschwindigkeit von 350 mm/s (50 N/mm vgl. Abschnitt 2.3.3). Die Abbildung 5-17 und Abbildung 5-18 zeigen den Verlauf der Steuergrößen und die ermittelten Kraftverläufe für eine TCP-Geschwindigkeit von 350 mm/s.

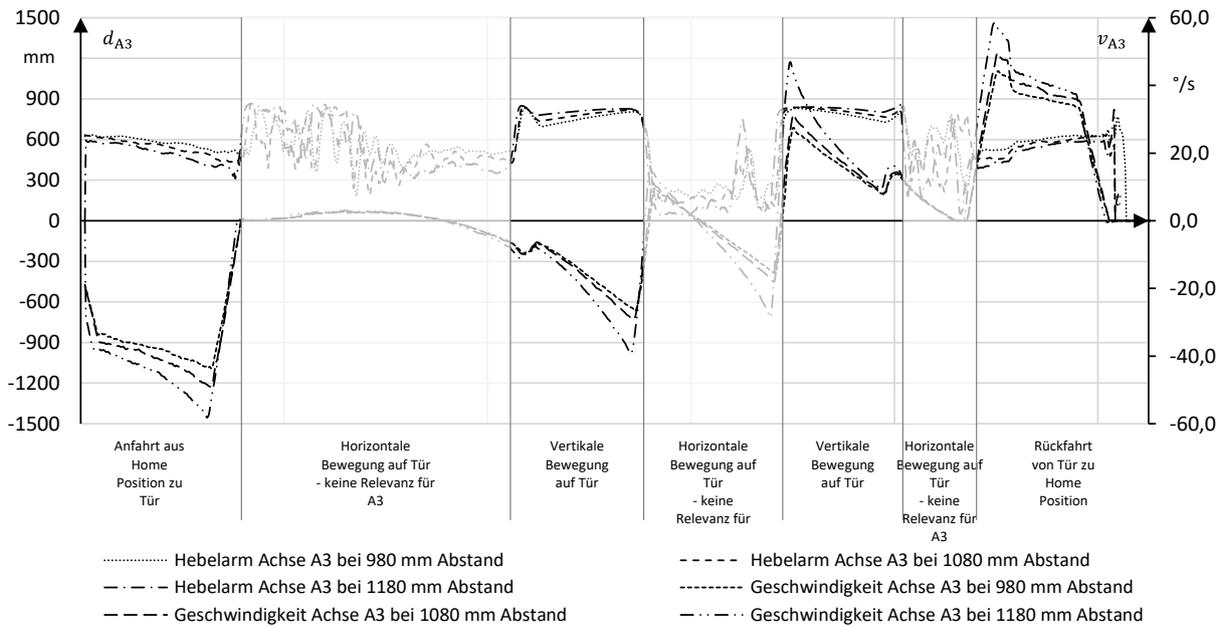


Abbildung 5-17: Verlauf der Steuergrößen der Achse A<sub>3</sub> bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

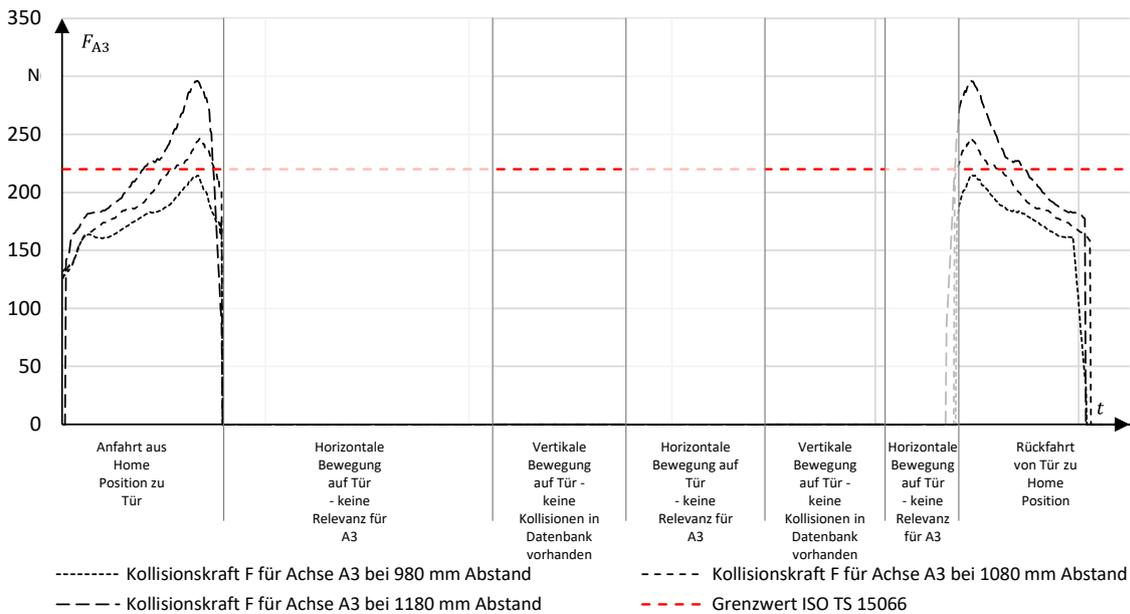


Abbildung 5-18: Kraftverlauf der Achse A<sub>3</sub> bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

Die in der Anfahrt aufgezeigten Optimierungen müssen nachfolgend ebenfalls für den Verlauf der Trajektorie auf der Tür geprüft werden. Es gilt zum einen den Einfluss der Verschiebung der Trajektorie in Richtung der Tür für die senkrechten Bewegungen (Achse A<sub>2</sub>) und die waagerechten Bewegungen (Achse A<sub>1</sub>) zu prüfen. Die in Abbildung 5-13 in Abschnitt 5.2.2 aufgezeigten Kraftverläufe zeigen einen

Kraftverlauf weit unter dem Grenzwert der ISO TS 15066 für die untersuchte Körperregion des Oberschenkels. Für die Untersuchungen der waagerechten Bewegungen erfolgt zunächst eine Betrachtung der Achse  $A_1$ .

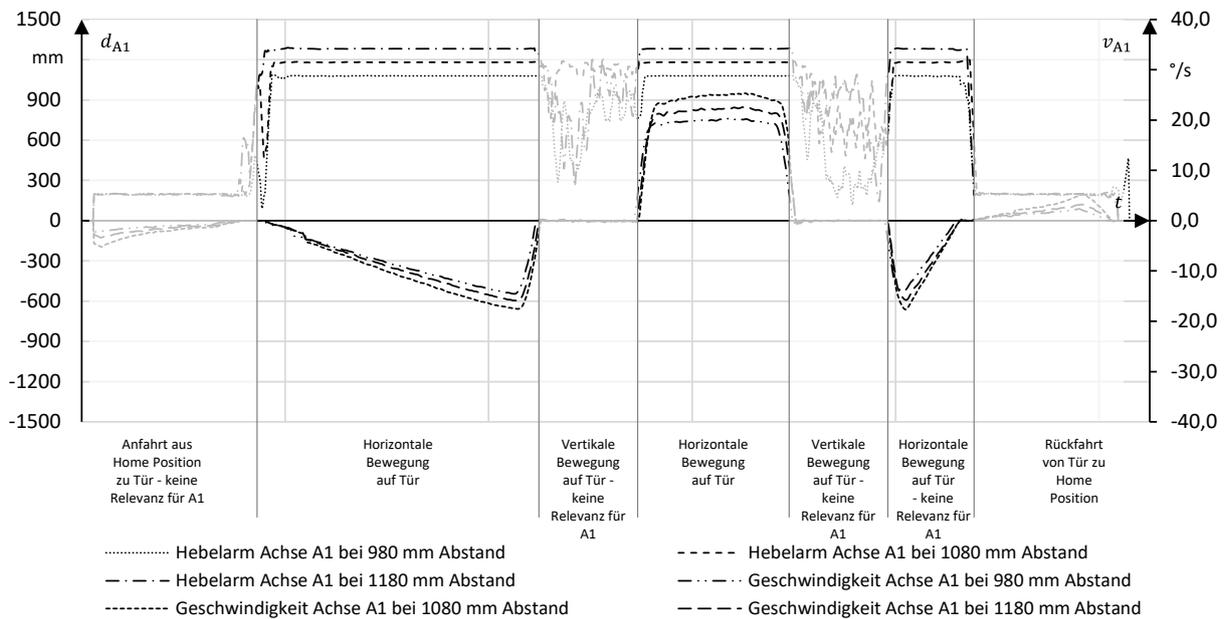


Abbildung 5-19: Verlauf der Steuergrößen der Achse  $A_1$  bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

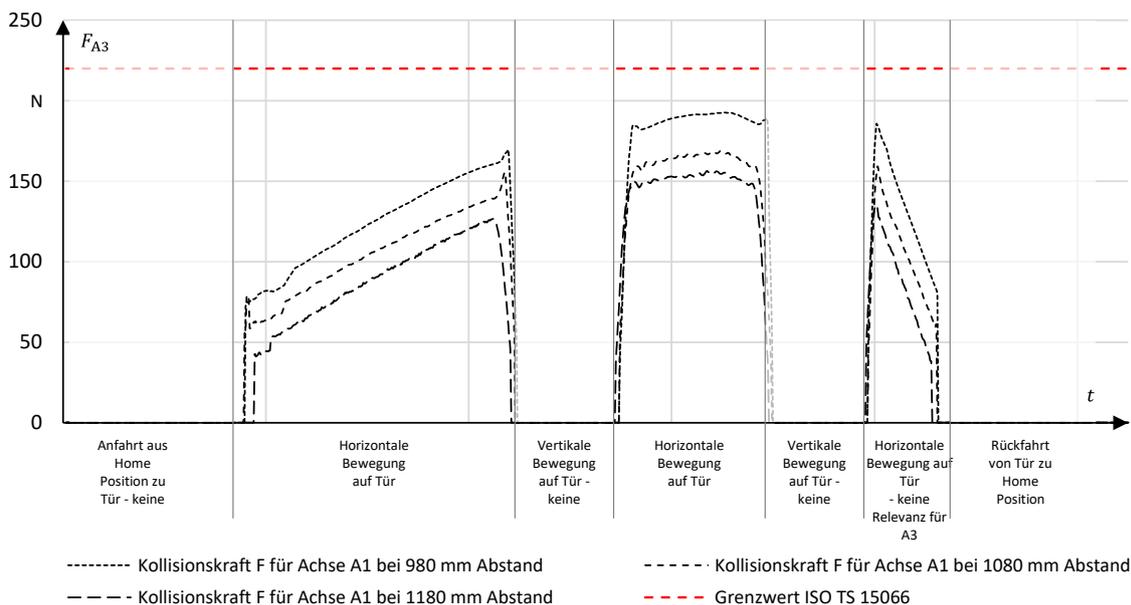


Abbildung 5-20: Kraftverlauf der Achse  $A_1$  bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

Die Abbildung 5-19 und Abbildung 5-20 zeigen den Verlauf der Steuergrößen und den Kraftverlauf für eine Geschwindigkeit von 350 mm/s. Es zeigt sich, dass die Veränderung des Abstandes des Leichtbauroboters zur Anrollbahn einen negativen Einfluss auf die Kollisionskraft hat, dieser jedoch nicht zu einer Überschreitung des Grenzwertes führt. Eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit bis zum Erreichen der Kraftgrenze wäre eine Option für eine optimierte Produktivität der MRI-Anlage. Jedoch wird an

dieser Stelle davon abgesehen, da für den Prozess eine Anrollgeschwindigkeit von 200 mm/s als empfehlenswert angesehen wird und daher die Prozessvorgaben verletzt werden. Leichtbauroboter der Firma Universal Robots besitzen eine Geschwindigkeitstoleranz von 150 mm/s, daher markiert eine Geschwindigkeit von 350 mm/s das obere Limit.

Analoge Untersuchungen erfolgen für die Achse  $A_2$  und die senkrechten Bewegungen auf der Tür. Die Kraftverläufe in Abbildung 5-13 zeigen ein mögliches Potenzial hinsichtlich einer Optimierung der Geschwindigkeit des Leichtbauroboters auf der Tür. Die Untersuchungen erfolgen ebenfalls für alle Abstände und mit einer TCP-Geschwindigkeit von 350 mm/s. In Abbildung 5-21 und Abbildung 5-22 werden die Verläufe der Steuergrößen und die Verläufe der durch die RSC ermittelten Kraft für die Achse  $A_2$  des Leichtbauroboters gezeigt. In Abbildung 5-13 ist ein Potenzial für eine Steigerung der Kräfte für die senkrechten Bewegungen erkennbar. Dies geschieht zum einen über die für die Optimierung der Anfahrt verkürzten Hebelarme als auch über die gesteigerte Geschwindigkeit für den Anrollprozess auf der Tür. Eine weitere Steigerung der Geschwindigkeit über 350 mm/s hinaus wäre auch für die Achse  $A_2$  auf der Tür möglich, würde aber ebenfalls den durch die Prozessvorschrift vorgegebenen Wert von 200 mm/s (+150 mm/s Toleranz) überschreiten.

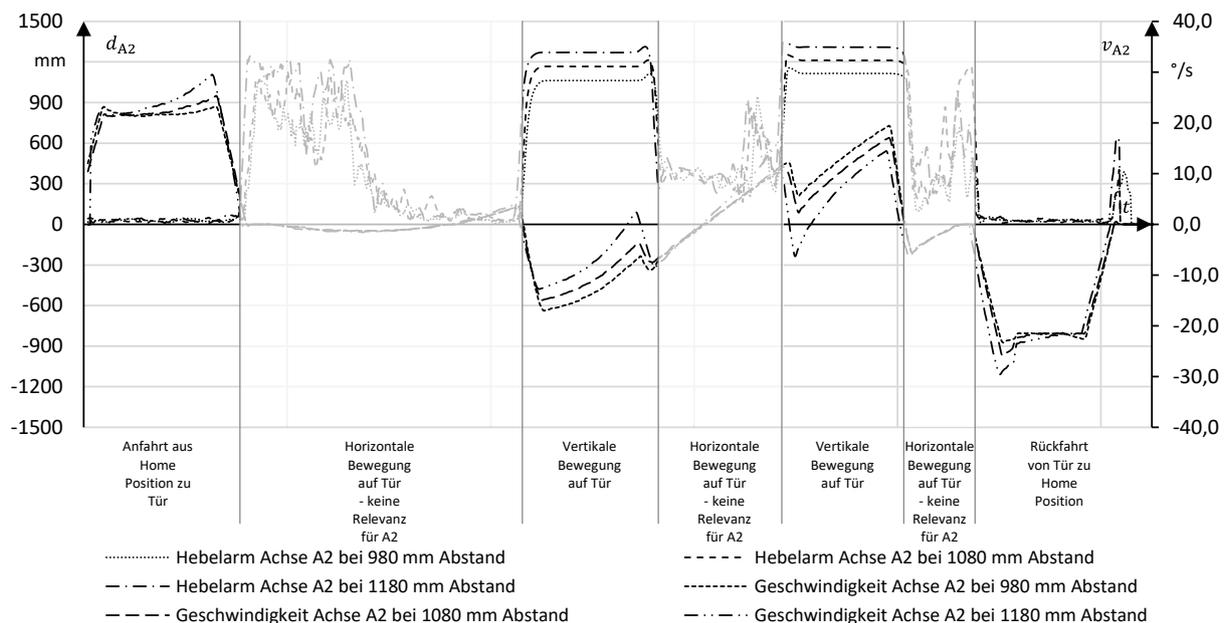


Abbildung 5-21: Verlauf der Steuergrößen der Achse  $A_2$  bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

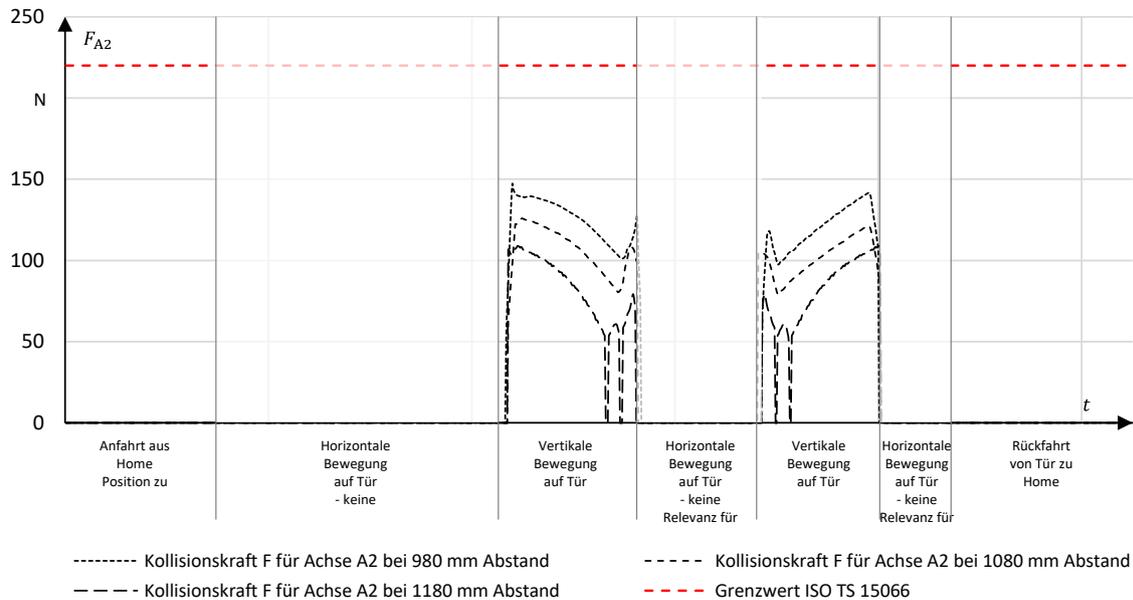


Abbildung 5-22: Kraftverlauf der Achse  $A_2$  bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters

Im Anschluss werden die durch die RSC ermittelten Kraftkurven durch eine Messung der jeweiligen Konfiguration im Prüfstand der RSEC bzw. bei Anlagenabnahme in der Fertigung verifiziert. Dabei bietet sich eine Messung in der RSEC an, da hier aufgrund der Möglichkeit einer Positionierung des Messgerätes mit einem Industrieroboter jeder mögliche Bewegungsvektor exakt vermessen werden kann und so eine effiziente Prüfung der Berechnung der RSC erfolgen kann. Die Tabelle 5-5 zeigt die durch die reale Messung ermittelten Werte und stellt diese den durch die RSC ermittelten Kraftwerten gegenüber.

Tabelle 5-5: Vergleich der durch RSC ermittelten Kraftwerte und der realen Kollisionskraftmessung der Trajektorie innerhalb der RSEC.

Position	Ge- schwindig- keit	Ver- sagende Achse	Rs Messung Kraft	RSC Kal- kulation	Stbw. der RSC	Grenz- wert
Anfahrt Leichtbauroboter	350 mm/s	$A_3$	225,3 N	214,6 N	12,5 N	220 N
Waagerechte Bewegung oben	350 mm/s	$A_1$	186,7 N	185,7 N	14,5 N	440 N (220 N)
Waagerechte Bewegung unten	350 mm/s	$A_1$	189,3 N	192,5 N	13,5 N	440 N (220 N)
Senkrechte Bewegung nach unten	350 mm/s	$A_2$	141,7 N	147 N	11 N	440 N (220 N)
Senkrechte Bewegung nach oben	350 mm/s	$A_2$	136,6 N	143 N	10,5 N	440 N (220 N)

Es zeigt sich, dass die mittels der RSC berechneten Kraftwerte und die in der realen Messung ermittelten Kraftwerte nahezu übereinstimmen. Die RSC ermittelt zu den errechneten Kraftwerten eine Standardabweichung aus dem Datensatz der zugrunde gelegten Kollisionen, welche sich für die gezeigten Messungen bei 5-8% in einem relativ engen Korridor bewegt. Addiert man in der Planungsphase einer Anlage die doppelte Standardabweichung auf den ermittelten Kraftwert der RSC, wie in Abschnitt 4.2.3 aufgezeigt, liegen alle Kraftwerte für den gezeigten Anwendungsfall unterhalb des ermittelten Wertes der RSC. Die zur Verifikation ermittelten Kraftwerte und Kollisionskonfigurationen finden wiederum Eingang in die Datenbank der RSC, um künftig auch diese Kollisionen einer Berechnung zugrunde zu legen.

### 5.3 Vergleich der Sicherheitsbeurteilungen

Abschließend sollen die drei vorgestellten Sicherheitsbeurteilungen bzw. Optimierungen des Anwendungsfalles verglichen werden. Neben den ermittelten Kraftwerten erfolgen zudem ein Vergleich der resultierenden Zykluszeit für den gezeigten Anwendungsfall und eine Beurteilung weiterer qualitativer Faktoren. Die nachfolgende Tabelle 5-6 zeigt den durch die Optimierung mithilfe der RSC erzielten Mehrwert für den Anwendungsfall. Verglichen werden die in der experimentellen Beurteilung erzielten Geschwindigkeiten und Kollisionskräfte, die durch die RSC-Untersuchung ermittelten Grenzwerte und die nach der Optimierung eingestellten Grenzen.

*Tabelle 5-6: Überblick über die jeweiligen Beurteilungsmethoden und die erzielten Messwerte für die Untersuchung des Oberschenkels (50 N/mm) für den Anwendungsfall Schallisolierung anrollen*

Beurteilungsbereiche	Experimentelle Beurteilung	Beurteilung mittels RSC	Anlagenoptimierung mittels RSC
Geschwindigkeit Anfahrt	220 mm/s	180 mm/s	350 mm/s
Geschwindigkeit auf Tür	250 mm/s	350 mm/s	350 mm/s
Transparenz Steuergrößen entlang Trajektorie	x	✓	✓
Maximale Kraft (Grenzwert)	218 N (220 N) Anfahrt	197 N (220 N) Anfahrt	215 N (220 N) Anfahrt
Zykluszeit	45 s	42 s	31 s
Anzahl Sicherheitskonfiguration auf Sicherheitskontroller	2	2	1

Die experimentelle Beurteilung zeigt, dass bei einer Anfahrtgeschwindigkeit von 220 mm/s ein Kraftwert von 218 N erzielt werden konnte. Gleichzeitig zeigte sich anhand der Untersuchung, dass nicht die „worst case“ Kombination aus anliegender Achsgeschwindigkeit und Hebelarm untersucht und daher die Anlage unter falschen Beurteilungskriterien vermessen worden ist. Dies ist der Intransparenz der

Auswahl der Messpunkte geschuldet, da dem Beurteiler mit dem Auge eine „worst case“ Konfiguration bei einer komplexen Roboterbewegung nicht ersichtlich wird. Im Weiteren wurden die Kraftwerte für den Anrollprozess auf der Tür bei 250 mm/s vermessen. Wie in Abschnitt 5.2.1 aufgezeigt, kommen sowohl bei der experimentellen als auch bei der durch die RSC beurteilten Ausgangssituation zwei Sicherheitskonfigurationen zum Einsatz, um die Performance des Robotersystems im Anrollprozess zu optimieren. Bei der in Abschnitt 5.2.3 erfolgten Optimierung der Roboterposition und Maximierung der Geschwindigkeit konnten die Anfahrtsgeschwindigkeiten zur Tür erheblich gesteigert werden, sodass auf eine gemeinsame Sicherheitskonfiguration für Anfahrt- und Anrollprozess zurückgegriffen werden kann. Festzuhalten bleibt zudem, dass durch die Optimierung gerade im Hinblick auf die Anfahrt des Roboters eine erhebliche Reduzierung der Zykluszeit erzielt werden konnte, welche nun wertvolle Zeit in der Montage für weitere Tätigkeiten im Takt erlaubt. Die RSC liefert dem Anwender eine Transparenz entlang der gesamten Roboterbewegung, sodass auch bei künftigen Variantenintegrationen eine Datenbasis geschaffen worden ist, auf der Planungen aufbauen können.

Abschließend wird festgehalten, dass mittels der RSC eine Beurteilung der Sicherheit entlang einer Trajektorie vollumfänglich erfolgen und so ein wichtiger Beitrag in der Planungs- und Konzeptionsphase der Anlage geliefert werden kann. Zugleich kann anhand der Analyse der Steuergrößen eine zielgerichtete Optimierung bereits in einem frühen Konzeptionsstadium der Anlage erfolgen und so eine gewinnbringende Integration der MRI in heutige Montagesysteme unterstützen. Die ermittelten Kraftverläufe liegen in einem Korridor, welcher durch die statistische Auswertung der RSC festgelegt werden kann, sodass auf Basis der Daten Anlagenkonstruktionen und -planungen erfolgen können. Dieser Korridor kann zudem gezielt verkleinert werden, indem die Menge an Kollisionsdaten für die zu untersuchende Trajektorie erhöht wird.

## 5.4 Zusammenfassung

Im vorliegenden Abschnitt sollen kurz die Inhalte des Kapitels 5 zusammengefasst werden. Die in Kapitel 4 vorgestellte RSC wird anhand eines Anwendungsbeispiels aus der Automobilindustrie angewandt. Hierzu wird zunächst in Abschnitt 5.1 der Montagevorgang einer Schallisolierung auf einer Autotür vorgestellt. Dieser gliedert sich in den eigentlichen Fügevorgang und einen Anrollprozess einer Kleberaupe, welche die Verbindung zwischen Tür und Schallisolierung sicherstellt. Neben der eigentlichen Verbindungsfunktion der Schallisolierung zur Tür dient die Kleberaupe einer Abdichtung der Tür zum Fahrzeuginnenraum, sodass unter qualitativen Aspekten eine durchgängige Verbindung der Kleberaupe mit der Tür sichergestellt sein muss. Dieser Prozess wird je nach Montagewerk der BMW Group manuell, automatisiert mit einem Industrieroboter oder in einem hybriden kollaborierenden Montagekonzept mit einem MRI-Leichtbauroboter dargestellt. Die unterschiedlichen Lösungsalternativen werden hierzu in Abschnitt 5.1.2 kurz vorgestellt und die Vor- und Nachteile diskutiert. Abschnitt 5.2 stellt die Sicherheitsbeurteilung der MRI-Variante der vorgestellten Prozesse vor. Es wird zunächst in Abschnitt 5.2.1 die experimentelle Sicherheitsbeurteilung vorgestellt, welche aufbauend auf dem in Abschnitt 2.5 dargestellten Stand der Technik mithilfe von Experteneinschätzungen erfolgt. Im Weiteren wird der vorliegende Anwendungsfall mithilfe der in Kapitel 4 vorgestellten RSC analysiert. Es konnte aufgezeigt werden, dass die experimentelle Sicherheitsbeurteilung lückenhaft ist und daher die sicherheitskritischen Untersuchungen nicht das gesamte Gefahrenpotenzial der Anlagen erfassen. Die RSC bietet mit der Gegenüberstellung des Verlaufs der Kollisionskraft und der Steuergrößen eine Transparenz, anhand derer die Auswahl der Messpunkte für eine experimentelle Untersuchung erfolgen kann.

Zugleich deckt die RSC Potenziale für eine Optimierung der Trajektorie im Hinblick auf Verlauf und Geschwindigkeit auf. Diese zielgerichtete Optimierung erfolgt im Abschnitt 5.2.3. So wurde die Leistung der Anlage erheblich gesteigert, da durch die Verschiebung der Arbeitsaufgabe im Arbeitsraum des Leichtbauroboters die Geschwindigkeiten des TCP erheblich erhöht werden konnten. Abschließend erfolgt in Abschnitt 5.3 ein Vergleich der aufgezeigten Sicherheitsbeurteilungen. Dabei wird der Mehrwert einer systematischen Analyse und Optimierung einer Trajektorie durch die RSC in einem MRI-Szenario dargestellt.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

### Inhalt Kapitel 6

---

6.1 Zusammenfassung .....	130
6.2 Ausblick .....	131

---

*Kapitel 6 bildet den Abschluss der Forschungsarbeit und fasst die Inhalte der Arbeit ausführlich zusammen. Zugleich wird in Abschnitt 6.2 ein Ausblick über mögliche Anknüpfungspunkte für weitergehende Forschungsarbeiten gegeben. Nachfolgend wird in den angegliederten Verzeichnissen ein Überblick über alle Abbildungen, Tabellen und Quellen der Arbeit gegeben.*

### 6.1 Zusammenfassung

Steigender Wettbewerbsdruck und der demografische Wandel stellen Unternehmen vor erhebliche Herausforderungen. So gilt es künftige Produktionssysteme gerade im Hinblick auf die Automatisierung wandlungsfähiger und adaptiver zu gestalten und diese gewinnbringender auf den Menschen auszurichten. Die zunehmende Überschneidung der Arbeitsbereiche von Mensch und Maschine spielt dabei eine wesentliche Rolle. Die Mensch-Roboter-Interaktion erlaubt einen stärkenorientierten Einsatz der jeweiligen Interaktionspartner, birgt jedoch auch ein erhebliches Gefährdungspotenzial für den Menschen. Parallel zur Entwicklung entsprechender Robotersysteme wurden die Erhebungs- und Bewertungskriterien für die Sicherheit angepasst und stellen sowohl Anlagenintegratoren wie auch -betreiber vor neue Herausforderungen.

Die Technische Spezifikation ISO TS 15066 enthält für Kollisionen zwischen einem kraft- und leistungsbeschränkten Leichtbauroboter und einem Menschen einen biofidelen Körperatlas, welcher Maximalkräfte wie auch Flächenpressungen für einen quasistatischen und einen transienten Kontakt festlegt. Die Erhebung der auftretenden Kollisionskräfte erfolgt experimentell für jeden Anwendungsfall mittels eines biofidelen Messgerätes, welches durch das Institut für Arbeitssicherheit der Berufsgenossenschaften entwickelt wurde. Da eine Bewertung erst bei Anlagenabnahme im industriellen Umfeld erfolgt, werden die Anforderungen der ISO TS 15066 unzureichend in der frühen Planungsphase von kollaborierenden Roboteranlagen berücksichtigt. Als wesentlich für eine frühzeitige Integration der Aspekte des biofidelen Messverfahrens stellt sich die Identifizierung von Einflussgrößen auf die Kollisionskraft eines Leichtbauroboters dar. Hierbei dienen vorangegangene Forschungsarbeiten als Indikatoren. So bilden Versuche des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt mit automobilen Crash-Test-Dummys den Ausgangspunkt der Analyse. Weitere Untersuchungen, welche im Kontext der Entwicklung des biofidelen Messansatzes stehen, zeigen ebenfalls wichtige Einflussgrößen auf. So stellen sich abschließend die Kollisionsgeschwindigkeit, die Achsstellung des Robotersystems zum Zeitpunkt der Kollision, die bewegten Massen, das Werkzeugdesign hinsichtlich der Kollisionsflächen und die biofidelen Messgrößen der ISO TS 15066 als elementare Einflussgrößen dar. Da die aufgezeigten Einflussgrößen größtenteils bereits in der Planungsphase der Anlage über Simulationsumgebungen entlang einer Trajektorie bekannt sind, hat der in dieser Arbeit entwickelte biofidele Bewertungsansatz zum Ziel, diese Einflussgrößen in einen Kontext mit den in der ISO TS 15066 gesetzten Zielgrößen zu bringen. Dies erfolgt mittels eines nicht linearen Regressionsrechenmodells namens „Robot Safety Calculation“ (RSC), welches auf Basis einer Datenbank die entsprechenden Zielgrößen kalkuliert.

Grundlage der RSC bildet eine systematische Analyse der Einflussgrößen. Dies erfolgt sowohl vor einem theoretischen als auch einem experimentellen Hintergrund. Ausgangspunkt der theoretischen Analyse bildet der elastische Stoß, mit welchem ein Auftreffen eines Kollisionskörpers auf das biofidele Messgerät beschrieben werden kann. Es wird zugrunde gelegt, dass sich beide Körper nach dem Auftreffen des Kollisionskörpers auf die Kollisionsfläche des Messgerätes gleichförmig weiterbewegen. Da die Bewegung durch eine Feder, welche den biofidelen Hintergrund der ISO TS 15066 widerspiegelt, gebremst wird und dabei die Bewegungsenergie in eine potenzielle Energie umgewandelt wird, lässt sich am anderen Ende der Feder die auftretende Kollisionskraft messen. Zusätzlich erfolgt eine Messung der Flächenpressung auf der Oberfläche des Messgerätes mittels einer Druckmessfolie, um die Anforderung bzgl. der maximalen Flächenpressung beurteilen zu können. Je nach Federsteifigkeit können die unterschiedlichen Körperstellen des Menschen über die Federsteifigkeit im Messgerät beschrieben werden. Der Zusammenhang des elastischen Stoßes und der Energieumwandlung bildet die Grundlage für

die experimentelle Analyse. Diese erfolgt in einem für die Untersuchung konstruierten Prüfstand, welcher nachfolgend als „Robot Safety Evaluation Cell“ (RSEC) bezeichnet wird. Innerhalb der RSEC erfolgt die Positionierung des Messgerätes zum Leichtbauroboter automatisiert mittels eines Industrieroboters, sodass flexibel alle möglichen Kollisionsszenarien untersucht werden können. Die experimentelle Analyse zeigt, dass die Annahme im Hinblick auf den elastischen Stoß und die Energieumwandlung den Zusammenhang zwischen der auftretenden Kollisionskraft und den entsprechenden Einflussgrößen valide beschreibt. Für die Untersuchung der Roboterposition wird die Kollisionserkennung des Roboters näher betrachtet. Dieser löst einen Sicherheitsstopp aus, sobald an einem der Drehgelenke ein zu hohes Moment entgegen der Bewegung auftritt, welches regelungsseitig nicht auftreten sollte. Der Kollisionskraftvektor wird über einen der jeweiligen Hebelarme in jedem Gelenk als Moment sichtbar. Dieser Hebelarm lässt sich für jeden Bewegungsvektor und auf jede Achse des Leichtbauroboters berechnen und hat einen erheblichen Einfluss auf die auftretende Kollisionskraft. Versuche innerhalb der RSEC zeigen, dass der zugrunde gelegte Zusammenhang des wirkenden Hebelarms sich in den Ergebnissen der Versuche widerspiegelt und daher die hierzu getroffenen Annahmen ebenfalls valide sind.

Auf Basis der theoretischen Analyse wird in der Folge das datenbankbasierte Berechnungsmodell der RSC erarbeitet. Ausgangspunkt bildet eine zu beurteilende Trajektorie, welche über die Datenschnittstelle der RSEC aufgenommen wird. Im Weiteren werden alle relevanten Steuergrößen entlang dieser Trajektorie analog zu den Kollisionen in der RSEC berechnet. Anhand der einzelnen Steuergrößen werden Daten aus einer Kollisionsdatenbank der RSEC gefiltert und mittels eines nicht linearen Regressionsansatzes in eine Funktion überführt. Die Grundlage bildet ein lineares Regressionsmodell, welches mittels einer Variablensubstitution die Wirkprinzipien der theoretischen und experimentellen Analyse abbildet. Die abschließende statistische Beurteilung der aufgestellten Funktion erlaubt eine Aussage über die Güte des Modells und die Qualität des Ergebnisses. Dieses Vorgehen erfolgt für jede einzelne Achse des Leichtbauroboters und für jeden Bahnpunkt der Trajektorie. Abschließend erhält der Nutzer einen Kollisionskraftverlauf für jede Achse entlang der aufgenommenen Bahn. Es wird zugrunde gelegt, dass der Roboter bei einer Kollision in der Roboterachse, welche den niedrigsten Kraftwert besitzt, den Sicherheitsstopp auslöst. Die Steuergrößen und die Ergebnisse können abschließend mittels einer Simulationsumgebung grafisch dargestellt werden oder über Diagramme ausgewertet werden.

Das beschriebene Vorgehen wird im letzten Abschnitt anhand eines Beispiels aus der Automobilindustrie erläutert. Es wird aufgezeigt, wie anhand der RSC eine vollumfängliche Sicherheitsbeurteilung einer Anlage unterstützt werden kann. Im Weiteren kann auf Basis der Wirkprinzipien der einzelnen Steuergrößen eine Optimierung der Anlage erfolgen. Das Ergebnis bildet eine entlang der Grenzwerte optimierte Robotertrajektorie, welche einerseits durch eine optimierte Bahnplanung im Arbeitsraum des Roboters ein erheblich verringertes Gefahrenpotenzial aufweist und andererseits durch eine Anhebung der Geschwindigkeiten eine gesteigerte Produktivität liefert. Der Anwendungsfall zeigt, dass die RSC einen erheblichen Mehrwert in der Umsetzung einer sicheren MRI-Anwendung mit kraft- und leistungsbeschränkten Leichtbaurobotern liefern kann.

## 6.2 Ausblick

Die Recherchen und die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit bieten Anknüpfungspunkte für mögliche weiterführende Forschungsarbeiten. Drei Schwerpunkte werden nachfolgend vorgestellt, welche für die Integration, die Weiterentwicklung und den Erfolg von MRI-Anwendungen in der Industrie einen wesentlichen Beitrag liefern können.

Den ersten Ansatzpunkt bildet die Weiterentwicklung des Schmerzschwellenkatalogs und des Prüfverfahrens. Im Speziellen zeigt sich, dass bei der Beurteilung des transienten Kontakts eine unzureichende Beurteilung erfolgt. Eine reproduzierbare Messung ist nur gegen einen definierten festen Anschlag möglich, daher gilt es geeignete Umrechnungsfunktionen zu schaffen, welche auf die Möglichkeit des Wegschlagens bzw. Wegschiebens des Körperteils durch den Roboter eingehen. Dies ist derzeit Gegenstand der Untersuchungen des Fraunhofer IFF in Magdeburg. Zugleich ist eine Beurteilung von 26 Körperregionen für einen Anwendungsfall sehr umfangreich. Daher könnte eine umfassende Versuchsreihe in einem Prüfstand mögliche Feder-Grenzwert-Konstellationen aufzeigen, welche durch eine schlechtere Kombination einer anderen Paarung bereits abgedeckt sind.

Ausgangspunkt der vorliegenden Arbeit bilden die in Abschnitt 2.3 vorgestellten Normen und Vorschriften, welche bei Anlagenintegrationen im industriellen Umfeld berücksichtigt werden müssen. Die DIN EN ISO 12100 bildet die Ausgangssituation der Beurteilung. Dabei werden mögliche Gefährdungen identifiziert und diese mit einer Risikoeinschätzung belegt. Das Risiko ist definiert als Produkt aus Eintrittswahrscheinlichkeit und dem möglichen Schaden. Die vorliegende Forschungsarbeit beschreibt eine Beurteilung eines möglichen Schadens mittels der Ermittlung der auftretenden Kollisionskraft, wobei die Einschätzung der Auftrittswahrscheinlichkeit Experten obliegt. Erste MRI-Umsetzungen und Erfahrungen aus der Industrie könnten die Grundlage einer Analyse liefern, welche die getroffene Entscheidung im Hinblick auf die Auftrittswahrscheinlichkeit hinterfragt und so eine Grundlage für die zukünftige Beurteilung liefert.

Zuletzt zeigen die Versuche mit einem Leichtbauroboter selbst ein erhebliches Potenzial im Hinblick auf die Sicherheit auf. Da die derzeit gängigsten Leichtbauroboter vor der Einführung des biofidelen Bewertungsansatzes entwickelt wurden, könnte eine Überarbeitung bzw. Neuentwicklung der Kollisionsüberwachung vor dem Hintergrund der ISO TS 15066 Potenziale aktivieren. Es gilt zum einen die Erkennung der Kollision in den Achsen mit dem Verlauf der Kollisionskraft aus dem biofidelen Messgerät zu synchronisieren und durch eine frühere Erkennung bzw. eine verbesserte Bremsfunktion die auftretenden Kräfte zu reduzieren. Mechanisch weichere Systeme bieten gleichzeitig die Möglichkeit, die Energie nach der Kollision nicht nur über die Feder abzubauen, sondern auch durch den Roboterarm selbst aufzunehmen. Zugleich könnten für den Anwender in der Nutzeroberfläche Aspekte der ISO TS 15066 durch Voreinstellungen integriert werden, sodass bereits wirksamere Begrenzungen zu einem früheren Zeitpunkt verfügbar sind. Eine definierte Datenbank analog der RSC durch den Roboterhersteller vergleichbar mit den Bremsentests heutiger Industrieroboter Anlagenintegratoren könnten den Messungsaufwand für die Sicherheitsbeurteilung zentralisieren und damit minimieren.

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1:	Produktionsvision der BMW Group für ein hybrides Produktionssystem.....	1
Abbildung 1-2:	Strukturierung und Aufbau .....	3
Abbildung 2-1:	Grad der Kollaboration nach DIN EN ISO 10218-2 [23] .....	6
Abbildung 2-2:	Unterscheidung zwischen Mensch-Roboter-Koexistenz und.....	7
Abbildung 2-3:	Unterscheidung zwischen globaler und lokaler Absicherung, mögliche technische Realisierung und Einordnung nach DIN EN ISO 10218-2 .....	10
Abbildung 2-4:	Globale Absicherungssensoren von Kollaborationsräumen im Anlagenbau, Sicherheitslaserscanner [61], sichere Lichtschranke [62], Anlagenschutzzaun mit Tür .....	11
Abbildung 2-5:	Globale Absicherungssensoren mit umschaltbaren Sicherheitszonen, sicheres Kamerasystem „Safety Eye“ der Firma Pilz [65].....	11
Abbildung 2-6:	Beispielhafte Darstellung von Robotersystemen mit taktilen Schutzhäuten, KR5 Si der Firma MRK Systeme (rechts) [73], Robotersystem der Firma Bosch „APAS“ (links) [74].....	12
Abbildung 2-7:	Weiterentwicklung des DLR Leichtbauroboters, DLR LWR III (links 2003), KUKA LBR 4 (mitte, 2008), KUKA LBR 4+ (2010, nicht gezeigt), KUKA LBR iiwa 14 (rechts, 2013) .....	14
Abbildung 2-8:	Roboter der Firma Universal Robots, UR 5 (links) [81], Einsatz eines UR 10 im BMW Group Werk Spartanburg (mitte) [83], Einsatz eines UR5 im VW Motoren Werk Salzgitter [84] .....	14
Abbildung 2-9:	Thematische Einordnung der Forschungsarbeit vor dem Hintergrund der möglichen Absicherungsformen der MRI.....	15
Abbildung 2-10:	Überblick über relevante Normen bezüglich Schutzeinrichtungen [23] .....	17
Abbildung 2-11:	Schematisches Vorgehen nach DIN EN ISO 12100 zur Risikoanalyse und Risikobewertung der Anlagensicherheit [30].....	22
Abbildung 2-12:	Ansatzpunkte des Forschungsansatzes der vorliegenden Arbeit im Rahmen des schematischen Vorgehens nach DIN EN ISO 12100 zur Risikoanalyse und Risikobewertung der Anlagensicherheit [30].....	24
Abbildung 2-13:	Phasen des Anlagenbeschaffungsprozesses der BMW Group in der Technologie Montage .....	25
Abbildung 2-14:	Versuchsaufbau am ADAC Crashzentrum durch das DLR mit unterschiedlichen Robotertypen zu Evaluierung von Kollisionen in der MRI [85].....	27
Abbildung 2-15:	Rechts: HIC <sub>36</sub> -Verletzungskala und -Ergebnisse für den DLR LWR III Leichtbauroboterarm bei unterschiedlichen Kollisionsgeschwindigkeiten am TCP [85].....	28
Abbildung 2-16:	Ergebnisse einer Simulation einer Kollision zwischen Mensch und Roboter in Abhängigkeit der Robotergeschwindigkeit und Roboter Masse vor dem Hintergrund der Euro NCAP-Crashtest-Verfahren [76] .....	29
Abbildung 2-17:	Untersuchung von Singularität in einer Roboterbewegung und den abzuleitenden Gefährdungen durch die integrierte Kollisionserkennung des DLR LWR III [69] ..	29

Abbildung 2-18: Zweistufiges Risikokonzept des IFA im Hinblick auf mögliche Grenzwerte, rechts Versuchsaufbau des Fraunhofer IFF zur experimentellen Ermittlung von Grenzwerten [29; 109] .....	31
Abbildung 2-19: Aufbau des KDMG-KOLROBOT-Messgerätes zur Erfassung von Kollisionskräften [70] .....	32
Abbildung 2-20: Erweiterung des Planungsprozesses für die sichere Mensch-Roboter-Kooperation nach [96] .....	33
Abbildung 2-21: Schematische Darstellung der RRSC [96] .....	35
Abbildung 3-1: Zusammenhang zwischen Steuer-, Stör- und Zielgrößen in einem technischen System [115; 116] .....	40
Abbildung 3-2: Festgelegte Steuer-, Stör- und Eingangsgrößen zur Evaluierung von Kollisionskräften.....	43
Abbildung 3-3: Theoretischer Ablauf eines elastischen Stoßes zweier Körper, $v_1$ Geschwindigkeit des Körpers 1, $v_2$ Geschwindigkeit des Körpers 2, $c$ Geschwindigkeit beider Körper am Ende der elastischen Kompression nach [119]. .....	44
Abbildung 3-4: Virtuelle Darstellung der RSEC zur Ermittlung und Evaluierung von Kollisionskräften.....	47
Abbildung 3-5: Schematische Darstellung einer Kollisionstrajektorie in der RSEC mit eingezeichnetem Startpunkt, Endpunkt, Kollisionspunkt und Richtungsvektor zum Zeitpunkt der Kollision .....	49
Abbildung 3-6: Biofideles Messgerät der RSEC zur biofidelen Erfassung von Kollisionskräften....	50
Abbildung 3-7: Informationsfluss in der RSEC während einer Messung .....	52
Abbildung 3-8: Darstellung des zeitlichen Ablaufs einer Kollision des Leichtbauroboters Universal Robots UR 10 mit dem Kollisionsmessgerät der RSEC bei 400 mm/s.....	53
Abbildung 3-9: Eingesetzte kollaborierende Robotersysteme, Universal Robots UR10 (links), KUKA LBR iiwa 14 R820 (rechts).....	55
Abbildung 3-10: Aufbau des Impaktors in der RSEC, welcher an der Flanschplatte des Leichtbaurobotersystems montiert wird (hier Universal Robots UR10) und für unterschiedliche Gewichtskonfigurationen ausgelegt ist .....	57
Abbildung 3-11: Angewandtes Vorgehen für die Versuchsplanerstellung und Durchführung der experimentellen Analyse der identifizierten Einflussfaktoren auf die Kollisionskraft in der RSEC.....	57
Abbildung 3-12: Rotationssymmetrische Betrachtung der Kollisionsszenarien am Beispiel des Leichtbauroboters Universal Robots UR10, eingezeichnetes Koordinatensystem für die jeweilige Richtung der Kollisionsuntersuchungen am TCP des Impaktors ..	58
Abbildung 3-13: Normalverteilung Kollisionskraft des Universal Robots UR10 bei einem Mittelwert von 143,06 N und einer Stichprobe von 100 Messungen.....	58
Abbildung 3-14: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Geschwindigkeit $v_p$ für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR 10 .....	62
Abbildung 3-15: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den KUKA LBR iiwa 14 R820 für den Einfluss der Geschwindigkeit $v_p$ auf die Kollisionskraft $F_{\text{Kollision}}$ .....	63

Abbildung 3-16: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Zusatzmasse $m_{\text{Zusatz}}$ für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR10 .....	64
Abbildung 3-17: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Zusatzmasse $m_{\text{Zusatz}}$ für den KUKA LBR iiwa 14 R820 .....	65
Abbildung 3-18: Hebelarmbetrachtung in Abhängigkeit des Kollisionspunktes und der Kollisionsrichtung für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR10 .....	68
Abbildung 3-19: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss des Hebelarms $d_{\text{Ai}}$ für die drei Hauptachsen des Universal Robots UR10 bei konstanten Kollisionsgeschwindigkeiten im Kollisionspunkt.....	68
Abbildung 3-20: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss des Hebelarms $d_{\text{Ai}}$ für die drei Hauptachsen des KUKA LBR iiwa 14 bei konstanten Achsgeschwindigkeiten in der jeweiligen Kollisionsachse und konstanten Kollisionsgeschwindigkeiten im Kollisionspunkt .....	69
Abbildung 3-21: Mehrdeutige Achsstellung für eine Leichtbauroboterkinematik mit 6 Achsen am Beispiel des Universal Robots UR10 und mit 7 Achsen am Beispiel des KUKA LBR iiwa 14 .....	70
Abbildung 3-22: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss des Trägheitstensors $I_{\text{Ai}}$ um die Achse A1 des Universal Robots UR10 für unterschiedliche Achsgeschwindigkeiten .....	72
Abbildung 3-23: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Federkonstanten $k_{\text{mess}}$ um verschiedene Achsen des Universal Robots UR10 .....	73
Abbildung 3-24: Ausgewählte Versuchsergebnisse für den Einfluss der Federkonstanten $k_{\text{mess}}$ um verschiedene Achsen des KUKA LBR iiwa 14 .....	74
Abbildung 3-25: Maßgefertigte Schutzvorrichtungen für MRI-gerechte Werkzeugsdesigns .....	76
Abbildung 3-26: Dokumentation der Kollisionsuntersuchungen durch die Software der RSEC am Beispiel einer Anwendung im BMW Group Werk in Oxford .....	79
Abbildung 4-1: Überblick über den schematischen Ablauf der RSC mit Einteilung in die vier Abschnitte des Ablaufs .....	84
Abbildung 4-2: Vorgehen zum Aufbereiten der Trajektorie für die folgende Sicherheitsberechnung der RSC.....	87
Abbildung 4-3: Aufbau der Kollisionsdatenbank zur Dokumentation der erfolgten Kollisionsuntersuchungen in der RSEC.....	90
Abbildung 4-4: Ablauf des Regressionsrechenmodells für eine festgelegte Trajektorie innerhalb des dritten Abschnitts der RSC .....	93
Abbildung 4-5: Diagrammbasierte Darstellung der Steuergrößen der RSC zur Analyse der vorliegenden Trajektorie vor dem Hintergrund der biofidelen Kollisionskraftuntersuchung in der MRI .....	101
Abbildung 4-6: Diagrammbasierte Darstellung der errechneten Kollisionskraft der RSC mit Darstellung des Grenzwerts der ISO TS 15066 und des Toleranzwertes der RSC (Ampellogik).....	101
Abbildung 4-7: Darstellung der Ergebnisse der RSC über RVIZ in der ROS Umgebung am Beispiel des Universal Robots UR10.....	102

Abbildung 4-8:	Nutzerschnittstelle der RSC zur Eingabe der relevanten Daten für die Regressionsrechnung .....	104
Abbildung 5-1:	Schallisolierung für die akustische Isolierung und Abdichtung des Türinnenraumes zum Fahrgastinnenraum des BMW X3.....	108
Abbildung 5-2:	Manueller Anrollprozess der Schallisolierung im BMW Group Werk Spartanburg .....	109
Abbildung 5-3:	Vollautomatisierte Lösungsvariante zum Anrollen der Schallisolierung im BMW Group Werk München für die Tür der BMW 3er Serie.....	110
Abbildung 5-4:	MRI-Anrollprozess mit dem Leichtbaurobotersystem Universal Robots UR10 im BMW Group Werk Spartanburg.....	111
Abbildung 5-5:	Geplante Startposition und schematische Darstellung der Anfahrt des Leichtbauroboters aus der Startposition an die Tür .....	113
Abbildung 5-6:	Roboterbahn entlang der Klebstoffraupe der Schallisolierung auf der Tür des BMW X3, eingezeichneter Kollisionspunkt in X-Richtung und Z-Richtung der Tür .....	114
Abbildung 5-7:	Konfigurierte Sicherheitsebene zwischen der Anfahrseite und der Anrollseite mit unterschiedlichen Maximalgeschwindigkeiten.....	116
Abbildung 5-8:	Software zur Aufnahme von Kollisionen und Trajektorien innerhalb der RSEC... ..	117
Abbildung 5-9:	Visualisierung der Robotertrajektorie mittels RVIZ des Anrollprozesses der Schallisolierung auf einer Fahrzeugtür .....	117
Abbildung 5-10:	Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Steuergrößen für den Anrollprozess der Schallisolierung für die Hauptachsen $A_1$ bei einem Abstand von 1180 mm .....	118
Abbildung 5-11:	Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Steuergrößen für den Anrollprozess der Schallisolierung für die Hauptachsen $A_2$ bei einem Abstand von 1180 mm .....	118
Abbildung 5-12:	Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Steuergrößen für den Anrollprozess der Schallisolierung für die Hauptachsen $A_3$ bei einem Abstand von 1180 mm .....	119
Abbildung 5-13:	Zeitlicher Verlauf der in der RSC errechneten Kollisionskraft für die drei Hauptachsen $A_1$ , $A_2$ und $A_3$ und minimaler Kraftverlauf für den Anrollprozess der Schallisolierung bei einer Federsteifigkeit von 50 N/mm .....	119
Abbildung 5-14:	Visualisierung der Robotertrajektorie auf der Tür für die Abstände 980, 1080 und 1180 mm von der Base des Leichtbauroboters .....	120
Abbildung 5-15:	Verlauf der Steuergrößen der Achse $A_3$ bei 250 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters.....	121
Abbildung 5-16:	Kraftverlauf der Achse $A_3$ bei 250 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters .....	121
Abbildung 5-17:	Verlauf der Steuergrößen der Achse $A_3$ bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters.....	122

Abbildung 5-18: Kraftverlauf der Achse $A_3$ bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters .....	122
Abbildung 5-19: Verlauf der Steuergrößen der Achse $A_3$ bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters .....	123
Abbildung 5-20: Kraftverlauf der Achse $A_1$ bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters .....	123
Abbildung 5-21: Verlauf der Steuergrößen der Achse $A_2$ bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters.....	124
Abbildung 5-22: Kraftverlauf der Achse $A_2$ bei 350 mm/s TCP-Geschwindigkeit für 980, 1080, 1180 mm Abstand der Anrollbahn von der Base des Leichtbauroboters.....	125



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1:	Überblick über unterschiedliche Normtypen [49].....	16
Tabelle 2-2:	Überblick über die Inhalte der DIN EN ISO 10218: Teil 1 und Teil 2 [22; 23] .....	18
Tabelle 2-3:	Biomechanische Grenzwerte der ISO TS 15066 [18].....	20
Tabelle 2-4:	Überblick über die identifizierten Einflussfaktoren aus den aufgezeigten Ansätzen der Wissenschaft und Industrie .....	36
Tabelle 3-1:	Überblick über die in der RSEC festgelegten Koordinatensysteme.....	48
Tabelle 3-2:	Konfigurationsdaten der RSEC für eine geplante Kollision auf einer festgelegten Trajektorie für einen Punkt P zum Zeitpunkt t .....	48
Tabelle 3-3:	Auslegung Biofideles Messgerät in der RSEC .....	51
Tabelle 3-4:	Aufgezeichnete Daten während der Kollision in der RSEC .....	55
Tabelle 3-5:	Technische Daten der für die Untersuchung eingesetzten kollaborierenden Robotersysteme in der RSEC [82] .....	56
Tabelle 3-6:	Versuchsumfang für die experimentelle Untersuchung der aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den festgelegten Ziel- und Steuergrößen für den Universal Robots UR10 .....	59
Tabelle 3-7:	Versuchsumfang für die experimentelle Untersuchung der aufgezeigten Zusammenhänge zwischen den festgelegten Ziel- und Steuergrößen für den KUKA LBR iiwa 14 R820.....	60
Tabelle 3-8:	Mindestkollisionsflächen in Abhängigkeit von der maximalen statischen Kraft.....	75
Tabelle 3-9:	Überblick über die identifizierten Steuergrößen auf die Kollisionskraft in der MRI und Ableitung von Gestaltungsgrundsätzen für eine sichere Gestaltung einer MRI.....	77
Tabelle 4-1:	Gegenüberstellung der Zielgrößen und der Anforderungen an die Robot Safety Calculation (RSC).....	83
Tabelle 4-2:	Ergebnis der Datensatzaufbereitung der des ersten Abschnitts der RSC .....	89
Tabelle 4-3:	Datenfilter der Steuergrößen der Trajektorie innerhalb des Regressionsrechenmodells der RSC .....	95
Tabelle 4-4:	Identifizierter physikalischer Zusammenhang zwischen den Steuergrößen und der Zielgröße der Kollisionskraft in der MRI .....	96
Tabelle 4-5:	Abgleich der Anforderungen an die RSC .....	104
Tabelle 4-6:	Abgleich der Zielsetzung an die RSC .....	105
Tabelle 5-1:	Überblick über die Vor- und Nachteile der Lösungsvarianten des Montageprozesses „Anrollen der Schallisolierung auf dem Türinnenblech“ .....	112
Tabelle 5-2:	Ermittelte Kraftwerte mit einem biofidelen Messansatz für die Anfahrt des Leichtbauroboters.....	114
Tabelle 5-3:	Ermittelte Kraftwerte mit einem biofidelen Messansatz für die Bewegungen in X-Richtung des Leichtbauroboters während des Anrollens der Schallisolierung an die Tür .....	115

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 5-4:	Ermittelte Kraftwerte mit einem biofidelen Messansatz für die Bewegungen in Z-Richtung des Leichtbauroboters während des Anrollens der Schallisolierung an die Tür. ....	115
Tabelle 5-5:	Vergleich der durch RSC ermittelten Kraftwerte und der realen Kollisionskraftmessung der Trajektorie innerhalb der RSEC.....	125
Tabelle 5-6:	Überblick über die jeweiligen Beurteilungsmethoden und die erzielten Messwerte für die Untersuchung des Oberschenkels (50 N/mm) für den Anwendungsfall Schallisolierung anrollen .....	126

## Abkürzungsverzeichnis

ADAC	Allgemeiner Deutsche Automobil-Club e.V.
AG	Auftraggeber
AN	Auftragnehmer
BG	Berufsgenossenschaft
BGHM	Berufsgenossenschaft Holz und Metall
BMW	Bayerische Motoren Werke
BTU	Brandenburgische Technische Universität
DGUV	Deutsche gesetzliche Unfallversicherung
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- & Raumfahrt
HIC	Head Injury Criterion
IFA	Institut für Arbeitsschutz
IFF	Fraunhofer-Institut für Fabrikbetriebe und -automatisierung IFF
IPA	Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung IPA
KDMG	Kraft-Druck-Messgerät
KMU	klein und mittelständische Unternehmen
LBR	Leichtbauroboter
LWR	Light Weight Robot
mm	Millimeter
MRI	Mensch-Roboter-Interaktion
N	Newton
NCAP	European Car Assessment Program (Euro NCAP)
OEM	Original Equipment Manufacturer
PKW	Personenkraftwagen
ROS	Robot Operating System
RRSC	Remote Robot Safety Cell
RSC	Robot Safety Calculation
RSEC	Robot Safety Evaluation Cell
RVIZ	Visualisierung in der ROS Umgebung
s	Sekunde
TCP	Tool Center Point
TS	Technische Spezifikation
TUM	Technische Universität München
UR	Universal Robots
USA	United States of America
VW	Volkswagen



## Verzeichnis der Formelzeichen

$A_{\text{Kollision}}$	Kollisionsfläche des Roboterwerkzeugs [mm <sup>2</sup> ]
$A_i$	Roboterachse mit der Nummer $i$ [-]
$\alpha$	Signifikanzniveau [-]
$b_x$	Konstante $b$ an der Stelle $x$ (Regressionsansatz) [-]
$c$	Gemeinsame Geschwindigkeit zweier Körper nach einem elastischen Stoß [mm/s]
$d_{A_i}$	Hebelarm bezogen auf den einwirkenden Kraftvektor der jeweiligen Roboterachse $A_i$ in [mm]
$E_{\text{kin}}$	Kinetische Energie eines Körpers in [J]
$E_{\text{pot,Feder}}$	Potentielle Energie der Feder in [J]
$F_{\text{Feder}}$	Federkraft in [N]
$F_{\text{KMS}}$	Gemessene Kraft am Kraft-Momenten-Sensor des Kollisionsmessgeräts in [N]
$F_{\text{Kollision}}$	Ermittelte Kollisionskraft in [N]
$F_{\text{Kollision},A_i(XY)}$	Projizierte Kraft der Kollisionskraft in die XY-Ebene der jeweiligen Roboterachse $A_i$ in [N]
$F_{\text{Kollision,max}}$	Maximale erreichte Kraft während der Kollision in [N]
$F_{\text{Kollision,max},A_i(XY)}$	Maximale erreichte Kraft während der Kollision in der XY-Ebene der jeweiligen Roboterachse $A_i$ in [N]
$F_{\text{Kollision,stat}}$	Stationäre anliegende Kraft nach der Kollision in [N]
$F_{\text{Kollision,stat},A_i(XY)}$	Stationäre anliegende Kraft nach der Kollision in der XY-Ebene der jeweiligen Roboterachse $A_i$ in [N]
$F_{\text{Kollision,reg}}$	Kollisionskraftwert des Regressionsrechenmodell der RSC auf Basis der Auswertung der jeweiligen Kraftwerte $F_{\text{Kollision,reg},A_i}$ der Roboterachsen $A_i$ in [N]
$F_{\text{Kollision,reg},A_i}$	Kollisionskraftwert des Regressionsrechenmodell der Roboterachsen $A_i$ in [N]
$F_{\text{Kollision,reg},A_i(XY)}$	Kollisionskraftwert des Regressionsrechenmodell in der XY-Ebene der Roboterachsen $A_i$ in [N]
$F_{\text{Kollision,reg},A_i,2s}$	Kollisionskraftwert des Regressionsrechenmodell der RSC unter Berücksichtigung der doppelten Standardabweichung in [N]
$g_{A_i}$	Gerade durch $F_{\text{Kollision},A_i(XY)}$ in die XY-Ebene der jeweiligen Roboterachse $A_i$ [-]
$i$	Index der jeweiligen Roboterachse
$I_{P,A_i}$	Trägheitsmoment des Leichtbauroboters bezogen auf den Kollisionspunkt $P(t)_{A_i}$ in [kg mm <sup>2</sup> ]
$k_x$	Federkonstante $k$ der Feder $x$ in [N/mm]
$KS_{\text{LBR,Base}}$	Base Koordinatensystem des Leichtbauroboters

## Verzeichnis der Formelzeichen

---

$KS_{Ai}$	Koordinatensystem in Achse $A_i$ des Leichtbauroboters ( $i$ beschreibt die Anzahl der Achsen)
$KS_{LBR\_ATCP}$	Koordinatensystem am TCP des Leichtbauroboters (Offsetangabe in Steuerung)
$KS_{MR\_Base}$	Base Koordinatensystem des Messroboters (MR)
$KS_{MR\_TCP}$	TCP-Koordinatensystem des Messroboters (MR)
$KS_{MR\_MT}$	Messtool Koordinatensystem am Messroboter (MR), Mittelpunkt der Kollisionsplatte mit Z in Richtung der Feder
$KS_{MPj}$	Messposition $j$ : Montageposition des Leichtbaurobotersystems innerhalb der RSEC
$l$	Federlänge in [mm]
$\gamma$	Variable in einer Geradengleichung [-]
$m_x$	Masse $m$ des Körpers $x$ in [kg]
$m_{Zusatz}$	Zusatzmasse am TCP des Leichtbauroboters in [kg]
$M_{Kollision,Ai}$	Anliegende externe Moment durch die auftretenden Kollisionskraft in der jeweiligen Roboterachsen $A_i$ in [NM]
$M_{Grenz,Ai}$	Grenzmoment für das Auslösen der Sicherheitsfunktion in der jeweiligen Roboterachsen $A_i$ in [NM]
$\vec{O}_{TCP}$	Offset zur Beschreibung des TCP (Tool Center Point) auf die Werkzeugflanschplatte des Leichtbauroboters im $KS_{TCP}$ in [mm] °]
$\vec{P}_{LBR\_Base}(t_{Kollision})$	Kartesische Koordinaten des Kollisionspunktes zum Zeitpunkt der Kollision in [mm] °]
$P(t_{Kollision})$	Achsstellung zum Zeitpunkt der Kollision in [°]
$P_{Kollision,Ai}$	Koordinaten des Kollisionspunktes in den jeweiligen Achskoordinatensystem $KS_{LBR\_Ai}$ in [°]
$P(t)_{Ai}$	Kollisionspunkt zum Zeitpunkt $t$ in Achspositionen des Leichtbauroboters in [°]
$\vec{P}(t)_{LBR\_Base}$	Kollisionspunkt zum Zeitpunkt $t$ in kartesischen Basekoordinaten des Leichtbauroboters in [mm] °]
$\vec{P}_{Kol}(t)_{Ai}$	Kollisionspunkt am Leichtbauroboter ausgehend vom Koordinatensystem $KS_{Ai}$ des jeweiligen Koordinatenabschnitts in [mm] °]
$p_{Steuergröße}$	$p$ -Wert der Steuergrößen im Regressionsrechenmodell der RSC [-]
$S_{Kollision,reg,Ai}$	Ermittelte Standardabweichung der RSC unter Berücksichtigung der verwendeten Kollisionsdaten der Kollisionsdatenbank in [N]
$T_{KS_{Ai}}^{KS_{A(i-1)}}$	Drehmatrix für die Koordinatentransformation eines Vektors aus dem Koordinatensystem $KS_{Ai}$ in das Koordinatensystem $KS_{A(i-1)}$
$\dot{v}_{Ai}$	
$\vec{v}_p(t_{Kollision})_{LBR\_Base}$	Geschwindigkeitsvektor des Kollisionspunktes zum Zeitpunkt der Kollision in [mm/s   °/s]
$v_p(t_{Kollision})_{Ai}$	Achsgeschwindigkeiten zum Zeitpunkt der Kollision [°/s]

$v_p(t)_{Ai}$	Achsgeschwindigkeit der Achsen $A_i$ im Kollisionspunkt $P(t)$ zum Zeitpunkt $t$ des Leichtbauroboters in [°/s]
$\dot{v}_p(t)_{Ai}$	Beschleunigung der Achsen $A_i$ im Kollisionspunkt $P(t)$ zum Zeitpunkt $t$ des Leichtbauroboters in [°/s]
$\vec{v}_P(t)_{LBR\_Base}$	Geschwindigkeitsvektor im Kollisionspunkt $P(t)$ zum Zeitpunkt $t$ des Leichtbauroboters in $KS_{LBR\_Base}$ in [mm/s   °/s]
$v_x$	Geschwindigkeit eines Körpers $x$ in [mm/s]
$v_x'$	Geschwindigkeit eines Körpers $x$ nach einem Stoß (Impulserhaltung) [mm/s]
$\delta_{Ai}$	Quotient aus $F_{Kollision,Ai(XY)}$ und $F_{Kollision}$ [-]
$\rho_{Kollision}$	Auftretende Flächenpressung in Abhängigkeit der Kollisionskraft $F_{Kollision}$ und der Kollisionsfläche $A_{Kollision}$ in [N/mm <sup>2</sup> ]
$\rho_{Kollision,reg}$	Über die Regressionsrechnung der RSC ermittelte Flächenpressung in Abhängigkeit der Kollisionskraft $F_{Kollision,reg}$ und der Kollisionsfläche $A_{Kollision}$ in [N/mm <sup>2</sup> ]



## Literaturverzeichnis

- [1] Deuse, J, Lotter, B, Hasselmann, V-R, Konrad, B, 2015: **Industrial Engineering.** Produktionssysteme verstehen und gestalten, 2015. Auflage, Springer, Berlin, ISBN 978-3-662-45340-7.
- [2] Dombrowski, U, Riechel, C, Evers, M: **Industrie 4.0 – Die Rolle des Menschen in der vierten industriellen Revolution.** In: *Industrie 4.0. Wie intelligente Vernetzung und kognitive Systeme unsere Arbeit verändern. Schriftenreihe der Hochschulgruppe für Arbeits- und Betriebsorganisation e.V.*, [https://gito.de/homepage/gito/gitoshop.nsf/download.html/F1EEE80EDB460066C1257DAF00527D27/\\$File/dombrowski\\_Industrie-4-0\\_HAB-Tagungsband-2014.pdf](https://gito.de/homepage/gito/gitoshop.nsf/download.html/F1EEE80EDB460066C1257DAF00527D27/$File/dombrowski_Industrie-4-0_HAB-Tagungsband-2014.pdf) (abgerufen am 28.12.2017).
- [3] Shen, Y, 2015: **System für die Mensch-Roboter-Koexistenz in der Fließmontage.** Dissertation, iwB - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München.
- [4] Bix, J, 2013: **Mobile Robots at the Assembly Line. Workshop: Industrial Mobile Assistance Robots – Technologies, Applications and Trends.** ICRA, Karlsruhe.
- [5] Spillner, R, 2014: **Einsatz und Planung von Roboterassistenz zur Berücksichtigung von Leistungswandlungen in der Produktion.** Dissertation, iwB - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München.
- [6] Krieger, R, Staab, H., Matthias, B, Kuhlenkotter, B, 2008: **Robotik 2008.** Leistungsstand, Anwendungen, Visionen, Trends; 11. und 12. Juni 2008, München, VDI-Verl., Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092012-2.
- [7] Hägele, M, Blümlein, N, Kleine, O, 2010: **Wirtschaftlichkeitsanalysen neuartiger Servicerobotik Anwendungen und ihre Bedeutung für die Robotik-Entwicklung.** Eine Analyse der Fraunhofer-Institut IPA und ISI im Auftrag des BMBF. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) (Hrsg), Stuttgart, [https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Roboter--und-Assistenzsysteme/Studie\\_EFFIROB.pdf](https://www.ipa.fraunhofer.de/content/dam/ipa/de/documents/Kompetenzen/Roboter--und-Assistenzsysteme/Studie_EFFIROB.pdf) (abgerufen am 28.12.2017).
- [8] Lenz, C, 24.05.2011: **Context-aware human-robot collaboration as a basis for future cognitive factories.** Dissertation, Lehrstuhl für Echtzeitsysteme und Robotik, TUM Fakultät für Informatik.
- [9] Böhme, H-J, 10.2011: **Serviceroboter und intuitive Mensch-Roboter-Interaktion.** Dissertation, Fakultät für Informatik und Automatisierung der Technischen Universität Ilmenau.
- [10] Kossmann, M, 2011: **Konzeption und Entwicklung einer MRK-Anwendung für die Motorenmontage in der Automobilindustrie.** Diplomarbeit, iwB - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, Technische Universität München.
- [11] Bauernhansl, T, 2014: **Industrie 4.0 in Produktion, Automatisierung und Logistik.** Anwendung, Technologien, Migration, Springer Vieweg, Wiesbaden, ISBN 978-3-658-04681-1.
- [12] Economist, 07.09.2013: **Working with Robots - Our friends electric.** Robotics: A new breed of robots is being designed to collaborate with humans, working alongside them to make them more productive. Economist, <https://www.economist.com/news/technology-quarterly/21584455-robotics-new-breed-robots-being-designed-collaborate-humans> (abgerufen am 28.12.2017).

- [13] Pankow, G, 19.10.2015: **Mercedes Produktion: Automatisierung runter – Flexibilität hoch.** Industrie 4.0. Automobil-Produktion, <https://www.automobil-produktion.de/iot-by-sap/iot-by-sap/mercedes-produktion-automatisierung-runter-flexibilitaet-hoch-359.html> (abgerufen am 18.11.2018).
- [14] Zaeh, M, Rösel, W, 2009: **Safety Aspects in a Human-Robot Interaction Scenario: A Human Worker Is Co-operating with an Industrial Robot.** In: Kim, J-H (Hrsg): *Progress in robotics. FIRA RoboWorld Congress 2009, Incheon, Korea, August 16-20, 2009 : proceedings.* Springer, Berlin, New York, ISBN 978-3-642-03985-0.
- [15] Neudörfer, A, 2016: **Konstruieren sicherheitsgerechter Produkte.** Methoden und systematische Lösungssammlungen zur EG-maschinenrichtlinie, 7. Auflage, Springer Vieweg, Berlin, ISBN 978-3-642-45446-2.
- [16] Oberer-Treitz, S, Puzik, A, Verl, A, 2011: **Sicherheitsbewertung der Mensch-Roboter-Kooperation.** Unter Berücksichtigung des Gefährdungspotentials eines spezifischen Robotersystems. Fraunhofer Gesellschaft (Hrsg), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), wt Werkstatttechnik online, [http://www.vdi-z.de/library/news/2011/09/629\\_63044.pdf](http://www.vdi-z.de/library/news/2011/09/629_63044.pdf) (abgerufen am 20.02.2013).
- [17] Kossmann, Max; Bartscher, Stefan, 10.09.2013: **Neuartige Mensch-Roboter-Zusammenarbeit in der BMW Group Produktion.** BMW Group, München, <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0209722DE/neuartige-mensch-roboter-zusammenarbeit-in-der-bmw-group-produktion?language=de> (abgerufen am 17.04.2017).
- [18] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 04.2017: **Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter (ISO/TS 15066:2016)**, DIN ISO/TS 15066:2016; DIN SPEC 5306:2017-04, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN ISO/TS 15066:2016; DIN SPEC 5306:2017-04.
- [19] Bautz, B, 06.09.2013: **Zertifizierung von kollaborierenden Robotersystemen.** DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, Workshop „der sanfte Roboter“ (BGHM), DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung.
- [20] BGIA, 10.2009: **BG/BGIA-Empfehlung für die Gefährdungsbeurteilung nach Maschinenrichtlinie.** Gestaltung von Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern. BGIA, Institut für Abreitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) (Hrsg), Institut für Abreitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Sankt Augustin, [www.dguv.de/bgia](http://www.dguv.de/bgia) (Webcode d89188).
- [21] Kossmann, M, 02.2014: **Mensch-Roboter-Kooperation am Beispiel BMW - Anwendungen, Potenziale und Herausforderungen.** Anwendung, Potentiale und Herausforderung. teamwork - Fporum Arbeitsplatzgestaltung, München, <http://www.teamwork-arbeitsplatzgestaltung.de/download/vortraege2014/Mensch-Roboter-Kooperation.pdf?m=1461674549> (abgerufen am 21.05.2017).
- [22] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 01.2012: **Industrieroboter – Sicherheitanforderungen – Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-1:2011**, DIN EN ISO 10218-1, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 10218-1.
- [23] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 06.2012: **Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-2:2011**, DIN EN ISO 10218-2, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 10218-2.

- [24] Umbreit, M, 2010: **Kollaborierende Roboter - Anforderungen nach EN ISO 10218-1, prEN ISO 10218-2 sowie geplante ISO/TS 15066**. DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg), Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA).
- [25] Kossmann, M, 28.06.2017: **Mensch-Roboter-Kooperation – Herausforderungen in der Sicherheit bei der industriellen Umsetzung**. Von einer digitalen Sicherheitsarchitektur hin zu einer detaillierten Sicherheitsplanung vor dem Hintergrund der ISO TS 15066. Managementforum Stanberg, Sindelfingen, IPA Stuttgart.
- [26] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 11.2010: **Roboter und Robotikgeräte – Wörterbuch (ISO/DIS 8373:2010); Deutsche Fassung prEN ISO 8373:2010**, DIN EN ISO 8373, Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 8373.
- [27] DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, 06.2008: **Industrieroboter (BG Information)**. DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg), BG-Information, Berlin.
- [28] Hoyer, G, Hauke, M, Lungfiel, A, Nickel, P, Huelke, M, Bömer, T, 2012: **Gestaltungsanforderungen an dreidimensionale Schutzräume für Fertigungszellen mit Mensch-Roboter-Interaktion**. Eine Pilotstudie in virtueller Realität. GfA (Hrsg), Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), [http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2012\\_034.pdf](http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2012_034.pdf) (abgerufen am 20.02.2013).
- [29] Huelke, M, 13.03.2013: **Sicherheitsnachweis für Kollaborierende Roboter**. VDE, Erfurt, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) (abgerufen am 15.04.2017).
- [30] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 03.2011: **Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010); Deutsche Fassung EN ISO 12100:2010**, DIN EN ISO 12100, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 12100.
- [31] Matthias, B, 26.01.2011: **Sichere MRK in industriellen Anwendungen**. Entwicklungsschritte bei ABB Corporate Research. VDI; VDE-GMA, 44. Sitzung des FA 4.13 »Steuerung und Regelung von Robotern«.
- [32] Rösel, W, 15.06.2009: **Sicherheit in der Mensch-Roboter-Kooperation**. iwB - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften, München, iwB - Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften.
- [33] Thiemermann, S, 22.04.2004: **Direkte Mensch-Roboter-Kooperation in der Kleinteilemontage mit einem SCARA-Roboter**. Dissertation, Fraunhofer IFF.
- [34] Barho, M, Dietz, T, Held, L, Oberer-Treitz, S, 2012: **Die Anforderungen an eine sichere Mensch-Roboter-Kooperation**. Roboter-Sicherheit auf dem Prüfstand. computer-automation.de (Hrsg), Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, [http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/safety/fachwissen/article/88886/0/Die\\_Anforderungen\\_an\\_eine\\_sichere\\_Mensch-Roboter-Kooperation/](http://www.computer-automation.de/steuerungsebene/safety/fachwissen/article/88886/0/Die_Anforderungen_an_eine_sichere_Mensch-Roboter-Kooperation/) (abgerufen am 16.04.2017).
- [35] Müller, E (Hrsg), 2012: **Demographischer Wandel**. Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft; [Tagungsband zum 25. HAB-Forschungsseminar], Gito, Berlin, ISBN 3942183749.
- [36] 2016: **Stowasser - Neubearbeitung/Lateinisch-deutsches Schulwörterbuch**, Oldenbourg Schulbuchverlag, Berlin, ISBN 978-3637015494.

- [37] Koller, P: **FRIDA soll die Elektronikfertigung revolutionieren**. Elektronik Praxis, <http://www.elektronikpraxis.vogel.de/ems/articles/311645/> (abgerufen am 17.04.2017).
- [38] Bengler, K, Damböck, D, Kienle, M, Wießgerber, T, Bortot, D, 11.02.2012: **Der Mensch und sein Roboter**. von der Assistenz zur Kooperation. TUM - Lehrstuhl für Ergonomie, München, TUM - Lehrstuhl für Ergonomie.
- [39] 2004: **Duden**. Die deutsche Rechtschreibung, 23. Auflage, Dudenverlag, Mannheim, ISBN 9783411040131.
- [40] Mössner, T, 2012: **Risikobeurteilung im Maschinenbau**. Mössner, T (Hrsg), Bundesanstalt für Arbeitsschutz und Arbeitsmedizin, 1. Auflage, Dortmund.
- [41] Bartholomäus, M, 12.2006: **Möglichkeiten der Visualisierung von Risikobewertungen**. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Informatik, Universität Magdeburg.
- [42] Nationale Arbeitsschutzkonferenz, 15.12.2011: **Leitlinie Gefährdungsbeurteilung und Dokumentation**. Mensch und Arbeit. Im Einklang. Geschäftsstelle der Nationalen Arbeitsschutzkonferenz (Hrsg), Nationale Arbeitsschutzkonferenz, Berlin.
- [43] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, 10.2010: **Zuverlässigkeitsmanagement – Teil 1: Leitfaden für Management und Anwendung**, DIN EN 60300-1:2010-10, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, DIN EN 60300-1:2010-10.
- [44] VDI, 11.2011: **Zuverlässigkeitsingenieur/ Zuverlässigkeitsingenieurin**, VDI 4002, Verein Deutscher Ingenieure, VDI, VDI 4002.
- [45] VDI, 06.2012: **Zuverlässigkeitsziele: Ermittlung, Überprüfung, Festlegung, Nachweis**, VDI 4007, Verein Deutscher Ingenieure, VDI, VDI 4007.
- [46] VDI, 03.2007: **Zuverlässigkeitsmanagement**, VDI 4003, Verein Deutscher Ingenieure, VDI, VDI 4003.
- [47] VDI, 06.2007: **Terminologie der Zuverlässigkeit**, VDI 4001, Verein Deutscher Ingenieure, VDI, VDI 4001.
- [48] DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, 12.1990: **Zuverlässigkeit Begriffe**, DIN 40041, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, DIN 40041.
- [49] Adamy, J, Bechtel, P, 2003: **Sicherheit mobiler Roboter**. In: von Jumar, U (Hrsg): *Automatisierungstechnik. Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*. De Gruyter, <https://pdfs.semanticscholar.org/d252/501e67541124476296f0e85f8beb6f62ebfd.pdf> (abgerufen am 08.10.2018).
- [50] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 09.2008: **Sicherheit von Maschinen – Not-Halt – Gestaltungsleitsätze (ISO 13850:2006); Deutsche Fassung EN ISO 13850:2008**, DIN EN ISO 13850, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 13850.
- [51] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 09.2008: **Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung (ISO 13849-2:2003); Deutsche Fassung EN ISO 13849-2:2008**, DIN EN ISO 13849-2, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 13849-2.
- [52] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 12.2008: **Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2008**, DIN EN ISO 13849-1, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 13849-1.

- [53] Elkmann, N, Kroh, R, 30.01.2013: **Sichere Mensch-Roboter-Interaktion dank neuer Sensorik**. Fraunhofer IFF (Hrsg), MM - MaschinenMarkt, <http://www.maschinenmarkt.vogel.de/sichere-mensch-roboter-interaktion-dank-neuer-sensorik-a-392669/index2.html> (abgerufen am 10.10.2018).
- [54] Jacobs, T, 2010: **Freiwillige ISO- und DIN-Normung im Bereich Robotik**. Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA), Stuttgart, Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA).
- [55] Haddadin, S, 12.12.2012: **Towards a “Handbook of Injury in Robotics”**, München, DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt.
- [56] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 10.2010: **Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen (ISO 13855:2010); Deutsche Fassung EN ISO 13855:2010**, DIN EN ISO 13855, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 13855.
- [57] Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG) im DIN, Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 10.2008: **Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen; Deutsche Fassung EN 999:1998+A1:2008**, DIN EN 999, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG) im DIN; Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN 999.
- [58] Sonntag, R: **Industrieroboter für Leichtbaufertigung nutzen**. Mittlere Stückzahlen, hohe Varianz, kurze Zykluszeiten, große Präzision und Wiederholgenauigkeit: Die Industrierobotik stellt sich den Herausforderungen der Composite Branche. VDMA Nachrichten, 02.2013.
- [59] Umbreit, M, 2012: **Risk assessment and investigation of change from pressure feeling to pain**. SIAS 2012 – The 7th International Conference on the Safety of Industrial Automated Systems, Montreal, Institut für Abreitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA).
- [60] Bix, J, 2016: **Mobile Robotik in der bandsynchronen Montage zur flexiblen Mensch-Roboter-Interaktion**. Dissertation, Universität Stuttgart.
- [61] SICK AG, 2017: **Sicherheits-Laserscanner**. Safety first – industrielle Absicherung effizient gelöst, <https://www.sick.com/de/de/produktportfolio/opto-electronic-protective-devices/safety-laser-scanners/c/g187225> (abgerufen am 21.05.2017).
- [62] SICK AG, 2017: **Sicherheits-Lichtvorhänge/Mehrstrahl-Sicherheits-Lichtschranken**. Wirtschaftlichkeit und Effizienz vollendet in Funktion und Design, <https://www.sick.com/de/de/produktportfolio/opto-electronic-protective-devices/multiple-light-beam-safety-devices/c/g187272>.
- [63] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, 12.2007: **Sicherheit von Maschinen – Risikobeurteilung – Teil 1: Leitsätze (ISO 14121-1:2007); Deutsche Fassung EN ISO 14121-1:2007**, DIN EN ISO 14121-1, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN; DKE Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik im DIN und VDE, DIN EN ISO 14121-1.
- [64] Henrich, Dominik: **SIMERO - Kamerasystem ermöglicht sichere Mensch-Roboter-Kooperation**. Henrich, D, Bayreuth, [http://www.ai3.uni-bayreuth.de/projects/simero/press/Pressemeldung.2007\\_02\\_02.pdf](http://www.ai3.uni-bayreuth.de/projects/simero/press/Pressemeldung.2007_02_02.pdf) (abgerufen am 21.05.2017).

- [65] Pilz GmbH & Co. KG: **Sicheres Kamerasystem SafetyEYE**. Überwachen und Steuern mit einem einzigen sicheren Kamerasystem, <https://www.pilz.com/de-DE/eshop/00106002207042/SafetyEYE-Sicheres-Kamerasystem> (abgerufen am 21.05.2017).
- [66] IPA Stuttgart: **PowerMate - Schrankenlose Mensch-Roboter-Kooperation**. IPA Stuttgart (Hrsg), [http://www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/pdf/Robotersysteme/Industrieroboter/Produktblatt\\_PowerMate\\_300\\_219.pdf](http://www.ipa.fraunhofer.de/fileadmin/www.ipa.fhg.de/pdf/Robotersysteme/Industrieroboter/Produktblatt_PowerMate_300_219.pdf) (abgerufen am 20.02.2013).
- [67] Elkmann, N: **Sichere Arbeitsraumüberwachung**. Flexible Produktion durch sichere Mensch-Roboter-Interaktion (im Rahmen des Projekts ViERforES), <http://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/robotersysteme/vierfores.html> (abgerufen am 21.05.2017).
- [68] Elkmann, N, 09.12.2014: **Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration: aktuelle Entwicklungen und Projekte**. Robotics Kongress 2014, Hannover, <http://files.messe.de/001-14/media/downloads/besucher/robotics-kongress-handout-iff.pdf> (abgerufen am 25.05.2014).
- [69] Haddadin, S, Albu-Schäffer, A, Hirzinger, G, 2009: **Requirements for Safe Robots: Measurements, Analysis and New Insights**. The International Journal of Robotics Research (Hrsg), DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, <http://graphics.cs.cmu.edu/nsp/course/16-899/papers/safety/safetyDLR.pdf> (abgerufen am 20.02.2012).
- [70] Ottersbach, J, Huelke, M, 2012: **Kollaborierende Roboter**. Konzept und Realisierung eines biofidelen Messgerätes zur Begrenzung der Kollisionsbelastung auf Personen bei Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotern. Technische Sicherheit Bd. 2 (2012) Nr. 10 (Hrsg), Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), [http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2012\\_125.pdf](http://www.dguv.de/ifa/de/pub/grl/pdf/2012_125.pdf) (abgerufen am 20.02.2013).
- [71] Schenk, M, Elkmann, N, 2012: **Sichere Mensch-Roboter-Interaktion: Anforderungen, Voraussetzungen, Szenarien, Lösungsansätze**. In: Müller, E (Hrsg): *Demographischer Wandel. Herausforderung für die Arbeits- und Betriebsorganisation der Zukunft; [Tagungsband zum 25. HAB-Forschungsseminar]*. Gito, Berlin, ISBN 3942183749.
- [72] Scharf, A, 27.7.2010: **Sensorhaut für Roboter**. ZWOMP industrialdesign meets technology, <http://www.zwomp.de/2010/07/27/sensorhaut-roboter/> (abgerufen am 01.04.2013).
- [73] MRK-Systeme GmbH, 2017: **KUKA KR 5 SI (Safe Interaction)**, [http://www.mrk-systeme.de/images/downloads/prospekt\\_kr\\_5\\_si.pdf](http://www.mrk-systeme.de/images/downloads/prospekt_kr_5_si.pdf) (abgerufen am 21.05.2017).
- [74] Robert Bosch GmbH: **APAS – Intelligente Systeme für die Mensch-Maschine-Kollaboration**. Flexible Systeme, sichere Mensch-Maschine-Kollaboration und Vernetzung vom Sensor bis in die Cloud machen die Fertigung fit für Industrie 4.0, [http://www.bosch-apas.com/de/apas/start/bosch\\_apas.html](http://www.bosch-apas.com/de/apas/start/bosch_apas.html) (abgerufen am 21.05.2017).
- [75] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2008: **DLR Lightweight Robots - Soft Robotics for Manipulation and Interaction with Humans**. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg), Institute of Robotics and Mechatronics, München, <https://pdfs.semanticscholar.org/ab83/51891ce6a8158239ad2f8134c7cea38fc5e8.pdf> (abgerufen am 10.10.2018).
- [76] Haddadin, S, Albu-Schäffer, A, Hirzinger, G, 23.05.2008: **The role of the robot mass and velocity in physical human-robot interaction - Part I: Non-constrained blunt impacts**. DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg), 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, Pasadena, CA, USA.

- [77] Haddadin, S, Haddadin, S, Khoury, A, Rokahr, T, Parusel, S, Burgkart, R, Bicchi, A, Albu-Schaffer, A, 2013: **Biomechanisch sichere Geschwindigkeitsregelung für die Mensch-Roboter Interaktion.** Biomechanically Safe Velocity Controller for Human-Robot Interaction. In: De Gruyter Oldenbourg (Hrsg): *at Automatisierungstechnik. Methoden und Anwendungen der Steuerungs-, Regelungs- und Informationstechnik*, <https://doi.org/10.1515/auto-2012-0236> (abgerufen am 09.10.2018).
- [78] DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt: **Leichtbaurobotik.** Die Leichtbaurobotik bildet seit über 20 Jahren einen Forschungsschwerpunkt des DLR Instituts für Robotik und Mechatronik., <http://www.dlr.de/rmc/rm/desktopdefault.aspx/tabid-3803/> (abgerufen am 21.05.2017).
- [79] Reintsema, D, Landzettel, K, Hirzinger, G, 2005: **DLR's Advanced Telerobotic Concepts and Experiments for On-Orbit Servicing.** DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg), Seiten , <http://elib.dlr.de/52944/1/ReintsemaDLRSpaceBuch.pdf> (abgerufen am 21.05.2017).
- [80] Koepe, R, Albu-Schäffer, A, 2011: **The KUKA-DLR Lightweight Robot.** The KUKA-DLR Lightweight Robot - an advance tool for robotics reserch, manufacturing and new applications. euRobotics, Västerås (Schweden), DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, [http://www.echord.info/file/Documents/WP5-pr-dissemination/Presentations/IROS2011/2011\\_09\\_30d\\_KUKA\\_DLR.pdf](http://www.echord.info/file/Documents/WP5-pr-dissemination/Presentations/IROS2011/2011_09_30d_KUKA_DLR.pdf) (abgerufen am 08.10.2018).
- [81] Universal Robots, 2017: **Unsere Geschichte**, <https://www.universal-robots.com/de/%C3%BCber-universal-robots/unsere-geschichte/> (abgerufen am 21.05.2017).
- [82] Universal Robots, 2017: **Benutzerhandbuch UR10 / CB3.** Übersetzung der originalen Anleitung (de). Universal Robots (Hrsg), Universal Robots, Odense, [https://www.universal-robots.com/media/8752/ur10\\_user\\_manual\\_de\\_global.pdf](https://www.universal-robots.com/media/8752/ur10_user_manual_de_global.pdf) (abgerufen am 22.05.2017).
- [83] Schweiger Andreas, 28.08.2013: **Im VW-Werk Salzgitter arbeiten Mensch und Roboter zusammen.** Braunschweiger Zeitung, <http://www.braunschweiger-zeitung.de/wirtschaft/article151129039/Im-VW-Werk-Salzgitter-arbeiten-Mensch-und-Roboter-zusammen.html> (abgerufen am 22.05.2017).
- [84] Haddadin, S, Albu-Schäffer, A, Hirzinger, G, 2007: **Safety Evaluation of Physical Human-Robot Interaction via Crash-Testing.** DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (Hrsg), DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, Wessling, [http://www.robotic.dlr.de/fileadmin/robotic/haddadin/Haddadin\\_et\\_al\\_rss2007.pdf](http://www.robotic.dlr.de/fileadmin/robotic/haddadin/Haddadin_et_al_rss2007.pdf) (abgerufen am 19.02.2013).
- [85] Zürn, M, Reichenbach, M, 25.06.2015: **Automobilproduktion mit mobiler Mensch-Roboter-Kooperation.** Fraunhofer IFF, Stuttgart, Daimler AG.
- [86] Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, 01.2011: **Roboter und Robotikgeräte – Sicherheitsanforderungen für nicht-industrielle Roboter – Nicht-medizinische Haushalts- und Assistenzroboter (ISO/DIS 13482:2011); Deutsche Fassung prEN ISO 13482:2011,** DIN EN ISO 13482, DIN Deutsches Institut für Normung e. V., Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, DIN EN ISO 13482.
- [87] DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, 04.2017: **Kollaborierende Robotersysteme.** Planung von Anlagen mit der Funktion „Leistungs-und Kraftbegrenzung". DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg), DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, 080. Auflage, [https://www.bghm.de/fileadmin/user\\_upload/Arbeitsschuetzer/Praxishilfen/Fachbereichs-Informationenblaetter/080\\_FBHM\\_Kollaborierende\\_Robotersysteme.pdf](https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Praxishilfen/Fachbereichs-Informationenblaetter/080_FBHM_Kollaborierende_Robotersysteme.pdf) (abgerufen am 23.05.2017).

- [88] Huelke, M, 2015: **Kollaborierende Roboter**. In: DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung (Hrsg): *Industrie 4.0 - kollaborierende Roboter*. Universum Verlag, Wiesbaden.
- [89] Umbreit, M, 18.09.2013: **Normative Anforderungen nach EN ISO 10218-1, 10218-2 und ISO TS-15066**. DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, Erlangen, DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung.
- [90] Elkmann, N, Behrens, R, 13.11.2012: **Untersuchungen von freien und klemmenden Stößen für eine standardisierte Risikobeurteilung von Mensch-Roboter-Kollisionen**. Normausschuss Maschinenbau (NAM) im DIN, Stuttgart, Fraunhofer IFF.
- [91] Elkmann, Norbert: **Kollisionsuntersuchungen für die Mensch-Roboter-Interaktion**. Fraunhofer IFF, <http://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/kollisionsuntersuchungen-fuer-mensch-roboter-interaktion-fraunhofer-iff.pdf> (abgerufen am 08.10.2018).
- [92] Muttray, A, 16.09.2013: **Schmerzgrenzen an der Mensch Maschine Schnittstelle**. Geißler, B.; Melia, M.; Umbreit, Dr. Matthias; Ottersbach, Dipl. -Ing.Hans Jürgen; Huelke, Dr. rer. biol. hum. Dipl.-Ing Michael; Binder, H.; König, J.; Krahn, U., Erlangen, Institut für Arbeits-, Sozial- und Umweltmedizin, Universität Mainz.
- [93] Ottersbach, J, Huelke, M, 18.09.2013: **Messgeräte zur Bestimmung von Kraft- und Druckeinwirkungen an Arbeitsplätzen mit kollaborierenden Robotersystemen**. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Erlangen, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA).
- [94] Reintjes, T: **Kollege Roboter II**. Eine ISO-Norm soll Sicherheitsstandards für Roboter neu definieren. Deutschlandfunk, [http://www.deutschlandfunk.de/kollege-roboter-ii.676.de.html?dram:article\\_id=29362](http://www.deutschlandfunk.de/kollege-roboter-ii.676.de.html?dram:article_id=29362) (abgerufen am 08.10.2018).
- [95] Gürtler, A, 2015: **Entwicklung eines experimentell gestützten Planungssystems für sichere Mensch-Roboter-Kooperation**. Remote Robot Safety Cell. Dissertation, Lehrstuhl für Automatisierungstechnik, BTU Cottbus-Senftenberg.
- [96] GTE Industrieelektronik GmbH, 2017: **Messtechnik für kollaborierende Roboter**. KDMG - Kraft-Druck-Messgerät KMG - Kraftmessgerät. GTE Industrieelektronik GmbH (Hrsg), Viersen, [http://www.kolrobot.com/material/325-2310-050\\_DE10\\_\\_KOLROBOT-Katalog.pdf](http://www.kolrobot.com/material/325-2310-050_DE10__KOLROBOT-Katalog.pdf) (abgerufen am 25.05.2017).
- [97] Kothes, L: **Risikobeurteilung nach DIN EN ISO 12100:2011**. Kothes, Technische Kommunikation GmbH & Co. KG (Hrsg), Kempten, <https://www.yumpu.com/de/document/read/9878765/risikobeurteilung-nach-din-en-iso-121002011-kothes> (abgerufen am 2017).
- [98] Muck, S, 06.09.2012: **Risikobeurteilungen für Maschinen**. DGUV - Deutsche gesetzliche Unfallversicherung, Osnabrück, [https://www.lak-nds.net/lak20120906/images/flyer\\_2012.pdf](https://www.lak-nds.net/lak20120906/images/flyer_2012.pdf) (abgerufen am 08.10.2018).
- [99] Haddadin, S, Albu-Schaffer, A, Frommberger, M, Rossmann, J, Hirzinger, G, 2009: **The “DLR Crash Report”: Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - Part I: Results**. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Institute of Robotics and Mechatronics, <http://ieeexplore.ieee.org/document/5152602/authors> (abgerufen am 08.10.2018).
- [100] Haddadin, S, Albu-Schaffer, A, Frommberger, M, Rossmann, J, Hirzinger, G, 2009: **The “DLR crash report”**. Towards a standard crash-testing protocol for robot safety - Part II: Discussions. IEEE International Conference on Robotics and Automation, Kobe, Japan, DLR - Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt; Institute of Robotics and Mechatronics, <https://ieeexplore.ieee.org/document/5152711> (abgerufen am 08.10.2018).

- [101] Haddadin, S, Albu-Schaffer, A, Hirzinger, G, 2011: **Safe Physical Human-Robot Interaction: Measurements, Analysis & New Insights**. In: Kaneko, M, Nakamura, Y (Hrsg): *Robotics Research. The 13th International Symposium ISRR*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-14742-5.
- [102] Haddadin, S, Haddadin, S, Khoury, A, Rokahr, T, Parusel, S, Burgkart, R, Bicchi, A, Albu-Schäffer, A, 2012: **On making robots understand safety**. Embedding injury knowledge into control. *The International Journal of Robotics Research*, 13, Seiten 1578–1602.
- [103] Haddadin, S, Laue, T, Frese, U, Hirzinger, G, 2007: **Foul 2050**. Thoughts on physical interaction in human-robot soccer. *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems*, Piscataway, NJ, Institute of Electrical and Electronics Engineers; Robotics and Automation Society; Nihon Robotto Gakkai; *IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems; IROS*.
- [104] Albu-Schäffer, A, Eiberger, O, Fuchs, M, Grebenstein, M, Haddadin, S, Ott, C, Stemmer, A, Wimböck, T, Wolf, S, Borst, C, Hirzinger, G, 2011: **Anthropomorphic Soft Robotics - from Torque Control to Variable Intrinsic Compliance**. In: Pradalier, C, Siegart, R, Hirzinger, G (Hrsg): *Robotics Research. The 14th International Symposium ISRR*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, ISBN 978-3-642-19457-3, <http://elib.dlr.de/73959/> (abgerufen am 01.04.2013).
- [105] Elkmann, N: **Kollisionsmessung für die Mensch-Roboter-Interaktion**. Projektblatt/Produktblatt des Fraunhofer IFF Magdeburg, <https://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/kollisionsuntersuchungen-fuer-mensch-roboter-interaktion-fraunhofer-iff.pdf> (abgerufen am 28.10.2018).
- [106] Behrens, R, Lerez, C, Elkmann, N, Jachau, K, Schmidt, S, 18.11.2013: **KAN-Studie 52 „Recherche Biomechanischer Belastungsgrenzen“ - Abschlussbericht**. Eine Studie der Kommission Arbeitsschutz und Normung KAN, bearbeitet durch das Fraunhofer-Institut für Fabrikbetrieb und - automatisierung IFF. Fraunhofer IFF, Institut für Rechtsmedizin (IFR) der Otto-von-Guericke-Universität (Hrsg), Magdeburg, [https://www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Sonstige/de/Studie52-KAN-Rundschreiben/3\\_Abschlussbericht\\_IFF.pdf](https://www.kan.de/fileadmin/Redaktion/Dokumente/Sonstige/de/Studie52-KAN-Rundschreiben/3_Abschlussbericht_IFF.pdf) (abgerufen am 25.05.2017).
- [107] Behrens, R, Elkmann, N, 2014: **Study on meaningful and verified Thresholds for minimizing the consequences of human-robot collisions**. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*, Hong Kong, <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/6907345> (abgerufen am 25.09.2018).
- [108] Huelke, M, 14.01.2014: **Kollaborierende Roboter – Zum Stand von Forschung, Normung und Validierung**. Institut ASER e. V., 97. Sicherheitswissenschaftliches Kolloquium im Institut ASER, Wuppertal, Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), [http://www.suqr.uni-wuppertal.de/fileadmin/site/suqr/Kolloquium\\_Download/Huelke\\_2014-01-14.pdf](http://www.suqr.uni-wuppertal.de/fileadmin/site/suqr/Kolloquium_Download/Huelke_2014-01-14.pdf) (abgerufen am 25.05.2017).
- [109] Behrens, R, Saenz, J, Vogel, C, Elkmann, N, 18.11.2015: **Upcoming Technologies and Fundamentals for Safeguarding**. All Forms of Human-Robot Collaboration. Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Königswinter, 8. Internationale Konferenz Sicherheit in der Industrieautomation, <https://www.dguv.de/ifa/veranstaltungen/archiv/2015/sias-2015/index.jsp> (abgerufen am 25.09.2018).

- [110] Petersen, H, Behrens, R, Saenz, J, Schulenburg, E, Vogel, C, Elkmann, N, 10.10.2018: **Reliable Planning of Human-Robot-Collaboration featuring Speed and Separation Monitoring.** Institut für Arbeitsschutz der Deutschen Gesetzlichen Unfallversicherung (IFA), Nancy, Frankreich, SIAS 2018 9. Konferenz Sicherheit automatisierter Systeme, <https://www.dguv.de/ifa/veranstaltungen/sias-2018/index.jsp> (abgerufen am 25.09.2018).
- [111] Saenz, J, Vogel, C, Behrens, R, Elkmann, N, Waletz Christoph, 29.03.2017: **Computer-Aided Safety and Risk Prevention.** Pushing collaborative robotics from isolated pilots to large scale deployment. INRS, Nancy, Frankreich, [http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/Actes-et-comptes-rendus/innovorg/J2-Saenz-inrs\\_2017\\_saenz\\_en.pdf/J2%20Saenz%20inrs\\_2017\\_saenz\\_en.pdf](http://www.inrs.fr/dms/inrs/PDF/Actes-et-comptes-rendus/innovorg/J2-Saenz-inrs_2017_saenz_en.pdf/J2%20Saenz%20inrs_2017_saenz_en.pdf) (abgerufen am 27.09.2018).
- [112] Elkmann, N, Behrens, R, 2018: **CAS: Computer Aided Safety.** Sichere Mensch-Roboter-Kollaboration zuverlässig und effizient planen. Fraunhofer IFF (Hrsg), Fraunhofer Gesellschaft, Magdeburg, <https://www.iff.fraunhofer.de/content/dam/iff/de/dokumente/publikationen/computer-aided-safety-fraunhofer-iff.pdf> (abgerufen am 27.09.2018).
- [113] Behrens, R, Elkmann, N, 2018: **Digitale Gefahrenprävention.** Fraunhofer IFF (Hrsg), Fraunhofer IFF, Magdeburg, <https://www.iff.fraunhofer.de/de/geschaeftsbereiche/robotersysteme/bghm-digitale-gefahrenpraevention.html> (abgerufen am 28.09.2018).
- [114] Siebertz, K, van Bebber, D, Hochkirchen, T, 2010: **Statistische Versuchsplanung.** Design of Experiments (Doe), Springer, Dordrecht, ISBN 9783642054938.
- [115] Klein, B, 2014: **Versuchsplanung - DoE.** Einführung in die Taguchi/Shainin-Methodik, 4. Auflage, De Gruyter, Berlin, ISBN 9783110343847.
- [116] Pralitz, C, 2011: **Leichtbauarme für die Mensch-Roboter-Kooperation.** Schunk (Hrsg).
- [117] Niedrig, H, Sternberg, M, 2014: **Das Ingenieurwissen: Physik,** Imprint: Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, ISBN 9783642411281.
- [118] Boege, A, 2007: **Vieweg Handbuch Maschinenbau.** Grundlagen und Anwendungen der Maschinenbau-Technik, 18. Auflage, Vieweg+Teubner Verlag / GWV Fachverlage GmbH, Wiesbaden, Wiesbaden, ISBN 9783834890924.
- [119] Kleppmann, W, 2009: **Taschenbuch Versuchsplanung.** Produkte und Prozesse optimieren, 6. Auflage, Hanser, München, Wien, ISBN 3446420339.
- [120] Friedrich, M, Rietzel, D, Schmiedel, I, Kossmann, M, 05.10.2015: **Verfahren zum Erzeugen einer funktionalen Verkleidung, Schaumstoffteil und Fertigungsvorrichtung,** DE 10 2015 219 185 A1 2017.04.06, Deutschland, Bayerische Motoren Werke Aktiengesellschaft.
- [121] Kaul, T, 2014: **Multiple lineare Regression & High Performance Computing.** Methodik und Software-Implementation komplexer Analysemodelle, Books on Demand, Norderstedt, ISBN 9783734743610.
- [122] ROS.org: **rviz - Package Summary,** <http://wiki.ros.org/rviz> (abgerufen am 24.06.2017).