

Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)

Gestaltungshilfe für MRK-Anwendungen

Masterarbeit
zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

Fachhochschule Vorarlberg
Studiengang Mechatronics

Betreut von
Prof. (FH) Dipl.-Ing. Robert Amann

Vorgelegt von
Düngler Sebastian

Dornbirn, 18.08.2022

Kurzreferat

Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)

Gestaltungshilfe für MRK-Anwendungen

Die Mensch-Roboter-Kollaboration verspricht, die Leistungsfähigkeit eines Roboters und die Stärken eines Menschen zu kombinieren. Das junge Thema bringt nicht nur Vorteile, sondern auch neue Sicherheitsbestimmungen und aufwändige Validierungsverfahren mit sich, was den Zeitbedarf für die Entwicklung neuer MRK-Applikationen erhöht. Oft ergibt sich erst bei der Validierung, dass die Sicherheitsbestimmungen (meist die biomechanischen Grenzwerte) nicht eingehalten werden können und dadurch Änderungen an der Applikation durchgeführt werden müssen. So bildet sich ein Kreislauf aus „Validieren“ und „Änderungen vornehmen“, der erst nach mehreren Zyklen beendet werden kann. Ziel der vorliegenden Masterarbeit ist es, Empfehlungen zu konzipieren, mit welchen dieser Kreislauf frühzeitig durchbrochen werden kann. Die Arbeit beschränkt sich dabei auf das Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip.

Um den Einfluss unterschiedlicher Parameter, wie beispielsweise die maximalen TCP-Geschwindigkeit oder die Greifergeometrie, auf die Kollisionskräfte und Drücke zu erforschen, wurde ein biofideles Messsystem und ein Roboter vom Typ ABB GoFa™ verwendet. Diese Untersuchungen dienen zusammen mit den Sicherheitsbestimmungen als Grundlage der Gestaltungsempfehlungen. Um eine Anwendung der Empfehlungen vorzuzeigen, wird in der vorliegenden Arbeit exemplarisch eine MRK-Applikation gestaltet und validiert.

Schlagwörter:

Kollaborative Robotik, MRI, MRK, HRI, Cobots, biofideles Messsystem, biomechanische Grenzwerte

Abstract

Human-Robot Interaction (HRI)

Design Recommendations for HRI Applications

Human-robot interaction promises to combine the performance of a robot and the strengths of a human. The young topic brings not only advantages, but also new safety regulations and validation procedures, which increases the time required for the development of new HRI applications. Often, a conflict in the safety regulation (most often the exceed of the biomechanical limits) is noticed as recently as the validation is done and as a result, changes have to be made to the application. Thus, a cycle of "validate" and "change application" is formed, which can only be broken after several cycles. The aim of this master thesis is to develop recommendations to break this cycle at an early stage. The focus of the work is on the power- and force limitation protection principle.

Using a biofidel measurement system and an ABB GoFa™ robot, the influence of different parameters, such as the maximum TCP speed or the gripper geometry, on the collision force and pressure was analysed. These investigations, together with the safety regulations, are the basis for the design recommendations.

To demonstrate the usage of the recommendations, the design and the validation of an example application is part of the present work.

Keywords:

Collaborative Robotics, HRI, Cobots, Biofidel Measurement System, Biomechanical Limits

Inhaltsverzeichnis

Darstellungsverzeichnis	11
Formelverzeichnis	15
1 Einleitung	17
2 Einführung in die Thematik	19
2.1 Begriffsdefinition	19
2.2 Vorteile und Grenzen einer MRK	20
2.3 Wirtschaftlichkeit	21
2.4 Cobots	22
2.4.1 Vorteile von Cobots	22
2.4.2 Anwendungen von Cobots	24
2.4.3 Marktüberblick	25
2.5 ABBs Cobot GoFa™ (CRB 15000)	26
3 Anforderungen an die Mensch-Roboter-Kollaboration	31
3.1 Sicherheitsbestimmungen	31
3.1.1 EU-Richtlinien	31
3.1.2 Normen	31
3.1.3 Gesetze	33
3.2 Anforderungen	33
4 Messungen	37
4.1 Messaufbau und Versuchsdurchführung	37
4.1.1 Biofidele Messsysteme	37
4.1.2 Versuchsdurchführung	40
4.2 Messergebnisse	41
4.2.1 Einfluss der Körperregion auf die Kollisionskraft	41
4.2.2 Einfluss der Tool-Force Supervision auf die Kollisionskraft	45
4.2.3 Einfluss der Körperregion und der Geometrie des Kollisionsobjekts auf die maximale Geschwindigkeit	45
4.2.4 Einfluss der Zusatzmasse auf die Kollisionskraft	48
4.2.5 Einfluss der Roboterbahn auf die Kollisionskraft	49
4.3 Erkenntnisse	51
4.3.1 Problem 1: Kollisionsversuche entsprechen nicht der Realität	51

4.3.2	Problem 2: kein zeitlicher Verlauf des Drucks vorhanden	55
4.3.3	Problem 3: Druckmessfolien sind nicht dehnbar	56
4.3.4	Problem 4: komplexer Zusammenhang zwischen Druck und Kraft	58
4.3.5	Problem 5: geringe Wiederholgenauigkeit der Druckmessungen	59
4.3.6	Problem 6: zu geringer TFS-Grenzwert	60
4.4	Reflexion der Validierungsmethode	60
5	Gestaltungsempfehlung für kollaborative Applikationen mit dem ABB GoFa	63
5.1	Grenzen der Empfehlungen	64
5.2	Gestaltung allgemein	64
5.2.1	Umgebung gestalten	64
5.2.2	Werkzeug und Werkstück gestalten	65
5.2.3	Geschwindigkeit begrenzen	66
5.2.4	Roboterbahn auslegen	67
5.2.5	Übergeordnete Tool-Force Supervision einrichten	67
5.2.6	Beschleunigung begrenzen	68
5.2.7	„motion supervision“ verwenden	68
5.3	Gestaltung applikationsspezifisch	69
5.3.1	„safe zones“ festlegen	69
5.3.2	Maximale Beschleunigungen festlegen	71
5.3.3	Maximale TCP-Geschwindigkeit festlegen	71
5.4	Impact-Tabelle	75
6	Beispielapplikation	77
6.1	Problemstellung	77
6.2	Equipment	78
6.3	Gestaltung	78
6.3.1	Allgemeine Gestaltungsempfehlungen angewandt an der Beispielapplikation	78
6.3.2	Gestaltungsempfehlungen applikationsspezifisch angewandt an der Beispielapplikation	81
6.4	Validierung der Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte	85
6.4.1	Validierung Szenario 1	85
6.4.2	Validierung Szenario 2	86
6.4.3	Validierung Szenario 3	87
6.5	Risikominderung	88

7	Zusammenfassung	91
8	Fazit	93
	Literaturverzeichnis	94
	Anhang	97

Darstellungsverzeichnis

Abbildung 1: Grad der Interaktion	19
Abbildung 2: ABBs Wizard easy programming	23
Abbildung 3: Cobotmarkt.....	26
Abbildung 4: ABB GoFa™ CRB 15000.....	27
Tabelle 1: SafeMove-Funktionen inkl. Kennzahlen	28
Abbildung 5: Norm-Typen	32
Tabelle 2: Biomechanische Grenzwerte nach ISO/TS 15066	34
Abbildung 6: Verlauf der transienten und quasistatischen Grenzwerte	35
Abbildung 7: Empfohlene Vorgehensweise beim Überprüfen der biomechanischen Grenzwerte nach der DGUV-Information FB HM-080.....	36
Abbildung 8: Biofideles Messsystem	38
Abbildung 9: Pilz-Robot-Measurement-System (PRMS)	38
Abbildung 10: Kraftverlauf (dunkelrot) mit transientem Grenzwert (hellrot).....	39
Abbildung 11: Druckmessfolie, Druckverteilung und Maximaldruck.....	39
Abbildung 12: gewöhnliche Messung	41
Tabelle 3: Federkonstante des PRMS	42
Abbildung 13: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Federkonstanten.....	42
Tabelle 4: Eigenschaften der Dämpfungselemente	43
Abbildung 14: Dämpfungselemente von Pilz	43
Abbildung 15: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Dämpfungselementen	43
Abbildung 16: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Körperregionen	44
Abbildung 17: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen TFS-Grenzwerten	45
Tabelle 5: Vmax nach Kraftgrenzwert (gültig für transienten und quasistatischen Kontakt)	46
Tabelle 6: Geometrien für die Druckmessungen	46
Abbildung 18: Objekte für die Druckmessungen	47
Abbildung 19: Objekte für die Druckmessungen II	47
Abbildung 20: berücksichtigte Druckwerte.....	47
Tabelle 7: Vmax nach Druckgrenzwert (gültig für transienten und quasistatischen Kontakt)	48

Abbildung 21: Kollisionskräfte bei unterschiedlicher Zusatzmasse	48
Abbildung 22: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Roboterbahnen	49
Abbildung 23: GoFa-Rotation um die 1. Achse.....	49
Abbildung 24: GoFa-Bewegung radial nach außen.....	49
Abbildung 25: Bahn der Messung 1	50
Abbildung 26: Bahn der Messung 2.....	50
Abbildung 27: Ergebnis Messung 1	50
Abbildung 28: Ergebnis Messung 2	50
Abbildung 29: Gofa-Rotation um die zweite Achse	51
Abbildung 30: Messungen am Dummy	52
Abbildung 31: Vergleich der Ergebnisse.....	53
Abbildung 32: typische Messung eines quasistatischen Kontakts.....	54
Abbildung 33: Druckmessung mit künstlichem Finger	54
Abbildung 34: Kugel trifft auf Unterarm.....	56
Abbildung 35: Faltenbildung bei Messversuchen	56
Abbildung 36: Druckbild einer Kugel mit Falten in den Folien	57
Abbildung 37: Druckbild ohne Berücksichtigung der Falten	57
Abbildung 38: Druckbild eines Würfels	57
Abbildung 39: ungewöhnliches Druckbild	57
Abbildung 40: Druck und Kraft bei Kollisionen mit einer künstlichen Hand bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten	58
Abbildung 41: Skizze der Biegung des Dämpfungselements	59
Abbildung 42: Kollision mit Quader bei geringer Geschwindigkeit	59
Abbildung 43: Kollision mit Quader bei hoher Geschwindigkeit	59
Abbildung 44: Druckwerte 7 identer Messungen	59
Abbildung 45: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Geschwindigkeit der Hand einer arbeitenden Person	61
Abbildung 46: unerwünschter Kreislauf bei der Realisierung kollaborativer Anwendungen	63
Abbildung 47: Entscheidungsbaum zur Auswahl des Maximalgeschwindigkeitsrichtwerts	73
Tabelle 8: Vmax nach Kraftgrenzwert.....	73

Tabelle 9: Vmax nach Kraftgrenzwert berechnet.....	73
Tabelle 10: Vmax nach Druckgrenzwert.....	74
Tabelle 11: Impact-Tabelle.....	75
Abbildung 48: Einsetzen des PCBs	77
Abbildung 49: Einsetzen des PCBs (II).....	77
Abbildung 50: Halterung inkl. PCB.....	78
Abbildung 51: Greifer und Kamera am Roboter.....	79
Abbildung 52: Aufbau der Beispielapplikation: Roboter, vereinfachtes Tray und Vorrichtung, in der das PCB eingesetzt werden soll	80
Tabelle 12: Kollisionsszenarien	81
Abbildung 53: PCB greifen.....	82
Abbildung 54: PCB einsetzen	82
Abbildung 55: PCB Transport	82
Abbildung 56: Anwendung des Entscheidungsbaums.....	82
Tabelle 13: Auswahl des Richtwerts für Szenario 1 und 3	83
Tabelle 14: Richtwerte der maximalen Geschwindigkeiten aller Szenarien	83
Abbildung 57: Sperrzone (grün) und kollaborierender Bereich (orange)	84
Abbildung 58: Zone „Pick“ (gelb), Zone „Place“ (hellblau) und Werkzeughülle (dunkelblau).....	85
Abbildung 59: Druckmessung Szenario 1	86
Abbildung 60: Druckmessung Szenario 1 (II)	86
Abbildung 61: Druckmessung Szenario 2.....	87
Abbildung 62: Druckmessung Szenario 3, Finger fixiert.....	88
Abbildung 63: Druckmessung Szenario 3, Finger nicht fixiert	88
Abbildung 64: Rapid-Code gewöhnlicher Kollisionsversuche.....	97

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der maximalen Geschwindigkeit	52
Formel 2: Zusammenhang zwischen Druck und Kraft	58

1 Einleitung

Die Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) ist eine junge, sich noch entwickelnde Technologie. Sie verspricht unter anderem das Entlasten arbeitender Personen, eine hohe Einsatzflexibilität, sowie eine wirtschaftliche Lösung für teilautomatisierte Prozesse. Trotz dieser Vorteile betrachten viele Unternehmen den Einsatz von Mensch-Roboter-Kollaborationen kritisch. Insbesondere die neuen Sicherheitsbestimmungen und Validierungsverfahren sind teils eine große Herausforderung. Bereits die Realisierung einfachster Anwendungen kann sehr zeitintensiv sein. Oft wird erst bei der Validierung der Applikation bemerkt, dass gewisse Sicherheitsbestimmungen nicht eingehalten werden können. Ist das der Fall, muss die Applikation neugestaltet bzw. müssen Änderungen durchgeführt werden. Oft führt das Vorgehen in einen Kreislauf aus „Validieren“ und „Änderungen vornehmen“, der erst nach mehreren Zyklen durchbrochen werden kann. Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, Gestaltungsempfehlungen und Hinweise zu konzipieren, damit die Entstehung des geschilderten Kreislaufs frühzeitig verhindert werden kann. Die Empfehlungen begrenzen sich dabei auf das Schutzprinzip der Leistungs- und Kraftbegrenzung und auf die Anwendung des kollaborationsfähigen Roboters CRB 15000 von ABB.

Zu Beginn der Arbeit werden in Kapitel 2 die Grundlagen zu den Themen „Mensch-Roboter-Kollaboration“ und „kollaborationsfähige Roboter“ beschrieben. Auch die Eigenschaften des CRB 15000 werden hier zusammengefasst.

In Kapitel 3 werden einige wichtige Punkte zu den „Sicherheitsbestimmungen“ und „Anforderungen“ angeführt.

Im darauffolgenden Kapitel 4 wird auf die Kollisionsmessungen näher eingegangen. Einleitend werden biofidele Messsysteme erklärt, mit deren Hilfe Kräfte und Drücke bei Kollisionen zwischen einem Roboter und einer menschlichen Person ermittelt werden können. Im Anschluss werden Messergebnisse und Erkenntnisse der durchgeführten Messungen zusammengefasst. Diese zeigen vor allem den Einfluss verschiedener Parameter (wie z. B. die Tool-Center-Point-Geschwindigkeit (TCP-Geschwindigkeit) oder die Zusatzmasse) auf die gemessenen Kollisionskräfte und Drücke.

Die bereits erwähnten Gestaltungsempfehlungen werden in Kapitel 5 detailliert beschrieben. Diese Empfehlungen leiten sich aus den Messergebnissen und Erkenntnissen des vorherigen Kapitels, sowie den Anforderungen aus den Sicherheitsbestimmungen ab. Im Konkreten wird beispielsweise die optimale Gestaltung von Werkzeugen oder die Auswahl einer geeigneten TCP-Geschwindigkeit behandelt.

Kapitel 6 bildet das letzte Kapitel der vorliegenden Arbeit und zeigt exemplarisch, wie eine Beispielapplikation anhand der Empfehlungen und Hinweise zur Gestaltung und Validierung einer MRK-Applikation mittels des ABB GoFa, entwickelt werden kann.

2 Einführung in die Thematik

2.1 Begriffsdefinition

Eine Mensch-Roboter-Interaktion, kurz MRI, beschreibt das Mit- und Nebeneinander von Personen und Robotern. In den meisten industriellen Anwendungen werden Roboter in Zellen abgegrenzt, um einen Kontakt mit einem Menschen zu vermeiden. Bei MRI-Applikationen müssen Roboter nicht eingezäunt werden, weil hier durch verschiedenste Technologien eine Kollision mit dem Menschen verhindert wird, oder der Roboter bei Kontakt mit einem Menschen so gestoppt wird, dass er nicht verletzt wird. [1]

Prinzipiell wird der Grad der Interaktion zwischen Mensch und Roboter, wie in Abbildung 1 ersichtlich, in 5 Gruppen gegliedert. [2]

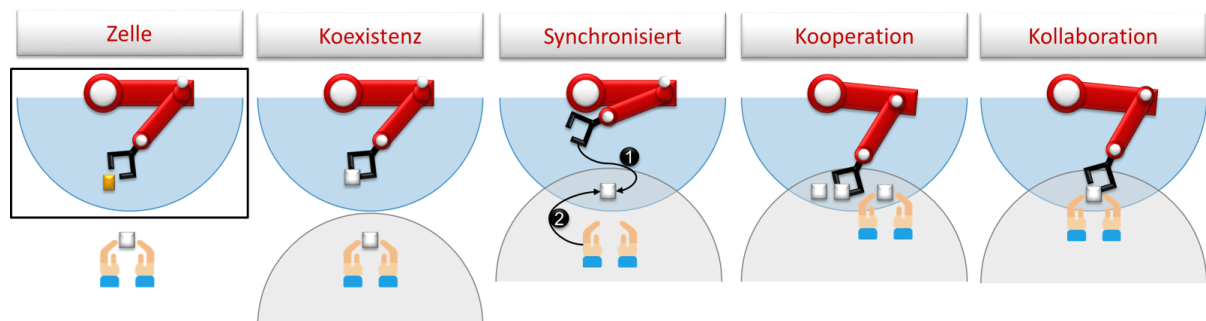


Abbildung 1: Grad der Interaktion

Quelle: [2]

Neben der klassischen Kapselung in eine Zelle gibt es unter anderem die Koexistenz. Hier ist der Roboter nicht mehr eingezäunt, aber er teilt sich auch nicht den Arbeitsraum mit einer arbeitenden Person, wie es in den restlichen Gruppen der Fall ist. Haben die Person und der Roboter keine gleichzeitigen Tätigkeiten, aber denselben Arbeitsraum, spricht man von einer synchronisierten Applikation. Dagegen ist eine Anwendung mit gleichzeitigen Tätigkeiten in einem gemeinsamen Arbeitsraum eine Kooperation. Erst wenn der Mensch zusammen mit dem Roboter eine Aufgabe durchführt, wird von einer Kollaboration gesprochen. [2]

Bei der Abkürzung MRK wird von einer MRI oder von einer bestimmten Interaktionsart der MRI gesprochen. Die Abkürzung kann also für Mehreres stehen. Das „M“ und das „R“ stehen immer für Mensch und Roboter. Das „K“ kann allerdings für Koexistenz, Kooperation oder Kollaboration gelten [3]. Der häufigste Begriff ist dabei die Mensch-Roboter-Kollaboration, wobei damit sehr oft die Mensch-Roboter-Interaktion gemeint wird. In der Literatur wird häufig auf den Begriff HRI gestoßen. Diese Abkürzung steht für den englischen Begriff der MRI und heißt ausgesprochen „human-robot interaction“. In der vorliegenden Arbeit wird die Abkürzung MRK (im Sinne der Mensch-Roboter-Kollaboration) verwendet, da sie die gängigste Abkürzung ist.

MRK-Applikationen können auch nach anderen Kriterien gegliedert werden. Häufig werden sie nach dem angewandten Schutzprinzip gruppiert. Hierbei unterscheidet man zwischen vier Prinzipien, wobei ein kollaborierender Betrieb auch mehr als nur ein Schutzprinzip anwenden kann [4, Kap. 5.5.1].

Schutzprinzipien [4, Kap. 5.5.1]:

- Sicherheitsbewerteter überwachter Halt
- Handführung
- Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung
- Leistungs- und Kraftbegrenzung

Das Prinzip "Sicherheitsbewerteter überwachter Halt" ist so zu verstehen, dass der Roboter stoppt, sobald eine Person den Arbeitsbereich betritt. Erst nachdem der Mensch den Bereich wieder verlassen hat, kann die Bewegung fortgeführt werden.[5, S. 5] Hält sich keine Person im Arbeitsbereich auf, darf der Roboter auch nicht-kollaborative Aufgaben ausführen.

Beim „Handführungs-Prinzip“ werden Kräfte und Bewegungen, die die arbeitende Person auf den Roboter ausübt, in Roboterbewegungen umgewandelt [5, S. 5]. Manche Robotersysteme sind zusätzlich mit einer Kraftverstärkung ausgeführt [4, Kap. 5.5.2.1], damit beispielsweise schwere Gegenstände mit dem Roboter gehoben werden können.

Ähnlich dem Schutzprinzip "Sicherheitsbewerteter überwachter Halt" wird auch beim „Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachungsprinzip“ der Roboter gestoppt, wenn die Bedienungsperson dem Roboter zu nahekommt. Hier ist die Grenze jedoch nicht fixiert, sondern entspricht dem Mindestabstand. Dieser Abstand ist abhängig von der Geschwindigkeit des Roboters, wodurch die Grenze variabel wird und auch kontinuierlich der Robotergeschwindigkeit angepasst werden könnte. [4, Kap. 5.5.4.1]

Bei der „Leistungs- und Kraftbegrenzung“, dem letzten der vier Schutzprinzipien, wird der Roboter nicht gestoppt, wenn eine Person auf diesen zugeht. Dadurch kann es zwischen dem Roboter und der Person zu einer Kollision kommen und es müssen deshalb eine Leistungs- und Kraftbegrenzung verwendet werden. Die mit dem Robotersystem verbundene Gefährdungen müssen dabei immer unter einem Belastungsgrenzwert liegen. Diese Werte werden bei der Risikobeurteilung bestimmt.[4, Kap. 5.5.5.1] In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf das „Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip“ gelegt.

2.2 Vorteile und Grenzen einer MRK

Zu den bedeutendsten Stärken eines Roboters zählen die Ausdauer, Kraft, Präzision und die Wiederholgenauigkeit. Gleichzeitig sind diese Eigenschaften die Schwächen der Menschen. Die Feinmotorik sowie die Fähigkeit, Entscheidungen zu treffen und ungenau definierte Aufgaben zu lösen sind das, was Menschen, aber nicht Roboter beherrschen.[4, S. 5] Das Ziel

der Mensch-Roboter-Kollaboration ist es, die Stärken eines Roboters mit den Fähigkeiten der Menschen zu kombinieren, um ein flexibles und ergonomisches Arbeitssystem zu erhalten [6, S. 2]. Besonders die Unterstützung bei körperlich strengen Arbeitsschritten verbessert die Ergonomie und schützt die Gesundheit der arbeitenden Personen.

Ein Nachteil der MRK ist, dass sie einen großen Aufwand mit sich bringt. Für jede MRK-Anwendung ist eine CE-Zertifizierung erforderlich. Dafür müssen aufwendige Dokumentationen erstellt werden. Auch muss für jede Applikation eine Risikobeurteilung durchgeführt werden. Das korrekte Implementieren der Aufgabe, sowie das Einstellen der Geschwindigkeits- und Kraftbegrenzung nehmen vor allem bei Einsteigern viel Zeit in Anspruch. Zusätzlich muss ein Nachweis über eine erfolgte Prüfung des Verletzungsrisikos erbracht werden, was erneut einen zeitlichen Aufwand mit sich bringt. [7]

Bevor eine Anwendung realisiert wird, sollte diese auf jeden Fall auf ihre Wirtschaftlichkeit geprüft werden. Wird die Applikation im Kollaborationsmodus durchgeführt, kann die Taktzeit (aufgrund noch unbekannter Robotergeschwindigkeiten) kaum abgeschätzt werden, was eine Planung bzw. Berechnung erschwert.

2.3 Wirtschaftlichkeit

MRK werden grundsätzlich in der Teilautomatisierung eingesetzt. Im Vergleich zu manuellen Applikationen sind die variablen Kosten deutlich geringer, da der arbeitenden Person Teile der Aufgabe abgenommen und automatisiert werden. Aufgrund der Investitionskosten steigen dagegen die Fixkosten. Bei einem vollautomatisierten Prozess sind die Fixkosten hingegen deutlich höher, dafür aber die variablen Kosten geringer, da keine manuellen Arbeitsschritte benötigt werden, aber in eine teure Anlage investiert werden muss. Das bedeutet, MRK macht den manuellen Prozess wirtschaftlicher und durch die Einbindung des Menschen den Prozess flexibler. [8]

Da für eine vollautomatisierte Produktion, wie bereits erwähnt, große Investitionskosten aufgrund großer, komplexer Maschinen auf das Unternehmen zukommen und diese auch viel Platz in Anspruch nehmen, ist diese Art der Produktion für klein- und mittelständige Unternehmen nicht geeignet. Sie benötigen günstigere, platzsparende und flexiblere Maschinen, da sie meist kleinere Losgrößen produzieren und oft keine großen Ersparnisse und Produktionshallen besitzen.[9] Genau in solchen Situationen können Mensch-Roboter-Kollaborationen mit passenden Cobots von Vorteil sein.

2.4 Cobots

Die Bezeichnung „Cobot“ setzt sich aus den Wörtern „Collaboration“ und „Robot“ zusammen. Ein Cobot ist ein kollaborationsfähiger Roboter, der speziell für eine Kollaboration mit dem Menschen konzipiert ist. [10]

Der größte Unterschied zwischen Cobots und konventionellen Industrierobotern ist einerseits die geringere Eigenmasse und andererseits der Besitz von Kollisionserkennungs-Mechanismen. Ein Großteil der heutzutage produzierten Cobots sind Leichtbau-Roboter. Durch die geringe Masse können sie schnell abgebremst werden und es entstehen dadurch relativ geringe Kollisionskräfte. Um eine Kollaboration mit dem Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip realisieren zu können, müssen Cobots Kollisionen bemerken, um im Notfall stehen bleiben zu können. Ein weit verbreitetes Mittel zur Kollisionserkennung sind Drehmomentsensoren. Die meisten Cobots besitzen in allen Achsen Drehmomentsensoren, um auf die äußeren Kräfte zurückschließen zu können. Neben dieser Methode gibt es noch andere Möglichkeiten Kollisionen detektieren zu können. Ein weiteres Beispiel wäre eine Schutzhaut mit integrierten kapazitiven und taktilen Sensoren, die über einen gewöhnlichen Roboter gespannt werden könnte. [3]

In diesem Kapitel wird zuerst auf die Vorteile der Cobots eingegangen. Anhand mehrerer Anwendungsbeispiele wird darauf gezeigt, wie diese Vorteile eingesetzt werden können. Im Anschluss wird noch ein Überblick über den kollaborativen Robotermarkt gegeben.

2.4.1 Vorteile von Cobots

Die bedeutendsten Vorteile der Cobots sind die Flexibilität und die Bedienerfreundlichkeit. Cobots können sehr einfach und schnell (um)programmiert werden. Für die Implementierung einiger Anwendungen sind keine Programmierkenntnisse notwendig. Viele Cobots können durch die Aktivierung einer speziellen Funktion per Hand an eine Position geschoben / gedrückt werden. Diese Konfiguration des Roboters kann dann gespeichert werden und im Programm verwendet werden. ABB bietet zum Beispiel das Tool "Wizard Easy Programming" an. Damit kann wie in Abbildung 2 ersichtlich, mittels "drag and drop" und "drop-down Menü" ein Programm mit den bereits geteachten Positionen erstellt werden.[11]

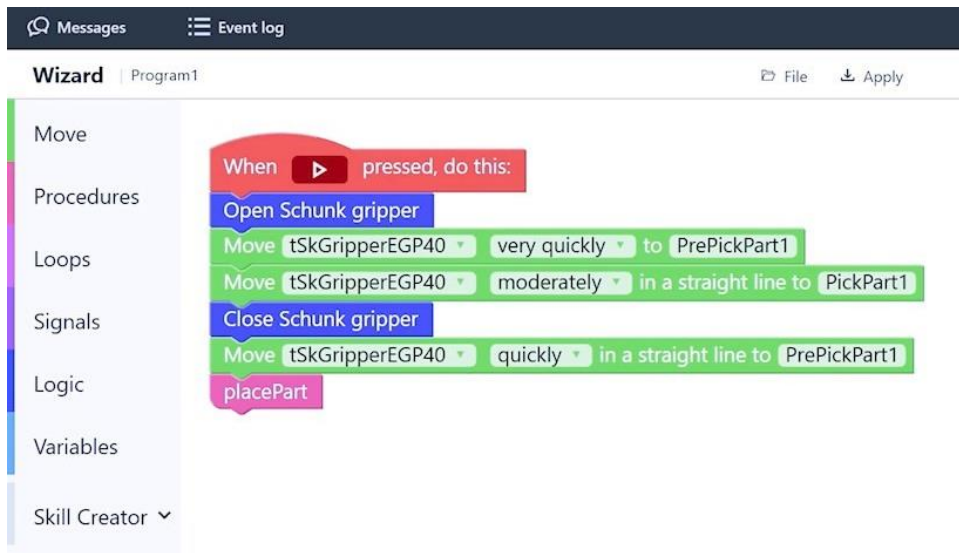


Abbildung 2: ABBs Wizard easy programming

Quelle: modifizierte Abbildung aus [11]

Somit kann eine neue Applikation nicht nur schnell, sondern auch von nahezu jeder Person realisiert oder angepasst werden, weshalb auch zügig auf kurze Lebenszyklen oder diverse Veränderungen reagiert werden kann. Mitunter können durch diese Eigenschaften auch kleine Losgrößen ein wirtschaftlich gutes Ergebnis liefern. Aufgrund der genannten Vorteile werden Cobots auch häufig für nicht-kollaborative Anwendungen verwendet. Nur rund 2 Prozent aller Cobots werden tatsächlich im kollaborierenden Modus verwendet [12]. Die Flexibilität und einfache Bedienbarkeit sind vor allem für Robotik-Neulinge geeignet. Ganz nach dem "do it yourself"-Prinzip können einige Applikationen auch ohne Roboter-/Systemintegratoren verwirklicht werden. Ebenfalls gibt es auch mobile Cobots auf dem Markt, welche die Flexibilität noch einmal steigern. Da die tatsächlichen kollaborativen Anwendungen wie beschrieben nur ein Nischenmarkt sind, und Cobots oft als konventionelle Industrieroboter verwendet werden, haben verschiedenste herstellende Unternehmen versucht, auch ihre Industrieroboter so bedienfreundlich wie Cobots zu gestalten. [13]

Ein weiterer bedeutender Vorteil von Cobots ist der geringe Platzbedarf. Erstens sind die kollaborativen Roboter selbst relativ klein und zweitens müssen aufgrund der eingebauten Sicherheitsfunktionen keine Zäune oder andere räumliche Abgrenzungen des Arbeitsareals eingerichtet werden. Dadurch kann Platz in den Produktionsstätten gespart werden. Oft können Cobots aufgrund ihrer Größe sogar in bestehende Produktionslayouts integriert werden.[14]

In den meisten kollaborationsfähigen Robotern sind Kraft- / Momentsensoren verbaut, die den Roboter sensitiv auf Kontaktkräfte machen. Sind diese Sensoren vorhanden, können diese nicht nur für die Kollisionsdetektion, sondern auch zusätzlich für verschiedenste Anwendungen genutzt werden.

Deshalb ist es möglich, dass manche Cobots einen konstanten Anpressdruck auf eine nicht genau definierte Oberfläche ausführen. Diese Eigenschaft kann zum Beispiel beim Entgraten, Polieren, Schleifen, Fräsen oder auch beim Auftragen von Kleber genutzt werden.[15]

2.4.2 Anwendungen von Cobots

Nachdem die Stärken der kollaborativen Roboter geklärt sind, werden einige reale und einige erfundene Beispielapplikationen aufgezählt. Die folgenden Anwendungen sollen zeigen, wo der Einsatz von Cobots Vorteile bieten kann.

Anwendungsbeispiel - Feinfühligkeit:

Das japanische Unternehmen Koyo Electronics Industries benötigte bis vor einiger Zeit noch eine angestellte Person, dessen einzige Aufgabe es war, einen Ein- und Ausschalter eines Touch-Bildschirms zu drücken, um die Reaktionsfähigkeit zu testen. Mithilfe eines UR3 (ein Cobot von Universal Robot) konnte diese monotone Arbeit automatisiert werden, da ein Cobot in der Lage ist, auch sehr empfindliche Bauteile sensibel zu überprüfen. Schon nach einem Jahr sei der ROI (Return of Invest) erreicht worden und die Produktivität um mehr als 30 Prozent gesteigert worden. Durch den Einsatz eines Cobots bleibt die Qualitätsüberprüfung auch nach vielen Zyklen und bei hohen Taktzahlen genau und objektiv.[16]

Anwendungsbeispiel - Ergonomie:

Das Palettieren von Kabelabzweckästen brachte bis vor kurzem einen großen zeitlichen Aufwand im Unternehmen Hensel mit sich. Um arbeitende Personen von der körperlich belastenden Tätigkeit zu befreien, wurde ein Cobot eingesetzt, der nun innerhalb von acht Stunden 1200 Verpackungseinheiten palettiert. So werden die angestellten Personen weniger belastet und können ihre Zeit für höherwertige Aufgaben, wie zum Beispiel das weitere Optimieren der Montageanlage, nutzen. Ein Vorteil gegenüber einer Automatisierung mit einem konventionellen Industrieroboter ist, dass sich Menschen in unmittelbarer Nähe des Cobots aufhalten dürfen. Die angestellten Personen können so beispielsweise die vollen Euro-Paletten direkt beim Roboter abholen bzw. zum Roboter bringen, ohne den Cobot stoppen und einen Zaun öffnen oder schließen zu müssen.[17]

Anwendungsbeispiel – Ergonomie II:

Die Aufgabe einer arbeitenden Person ist das Anbringen und Montieren eines schweren Bauteiles. Macht die Person das für längere Zeit, wird sich das negativ auf ihre Gesundheit auswirken. Mithilfe eines Roboters im Handführungsmodus, muss die Person nur einen Zustimmungsschalter drücken und sie kann dann das Bauteil mit dem Roboter in eine gewünschte Position bringen, ohne viel Kraft aufwenden zu müssen. Ein großer Vorteil dieser Vorgehensweise ist,

dass der Ablauf und die Position flexibel / variabel bleiben. Die Bedienperson kann das Teil wie gewünscht positionieren (oft ändert sich die Position im folgenden Zyklus). Tritt ein Problem auf, kann die Person den Gegenstand auch nochmal zurückschieben.

Anwendungsbeispiel - Flexibilität:

Für ein Produkt, das auf 20 Exemplare limitiert wurde, müssen einige verschiedene Schweißvorgänge durchgeführt werden.

Durch das sehr einfache Teachin von Konfigurationen und das simple Programmieren können hier Personen auch ohne "Expertenwissen" intuitiv und schnell die verschiedenen Bahnen programmieren, sodass der automatisierte Schweißvorgang auch schon für kleine Stückzahlen rentabel ist. Auch die Qualität der Nähte bleibt dadurch immer konstant.

Anwendungsbeispiel – Flexibilität II:

In einer Fertigungslinie ist einer von drei Robotern ausgefallen. Die Produktionsschritte vor diesem Roboter müssen nun verlangsamt werden und die darauffolgenden sind nicht vollständig ausgelastet. Hier könnte ein mobiler Cobot helfen. Er kann schnell zum Einsatzort gebracht werden und auch innerhalb kurzer Zeit für die neue Aufgabe programmiert werden (Nachteilig wirkt sich jedoch die aufwändige, aber notwendige Risikobeurteilung aus). So kann die Effizienz der Straße schnell und einfach angehoben werden, bis der ursprüngliche Roboter wieder einsatzbereit ist. Passieren in einer Fertigungsstraße des Öfteren solche Ausfälle, können die entsprechenden Aufgaben schon vorher eingelernt werden. Auch die Risikobeurteilung kann so ohne Zeitdruck im Vorfeld durchgeführt werden.

Anwendungsbeispiel - Platzbedarf:

Eine angestellte Person muss bei der Montage eines Produkts verschiedene Schrauben und Dichtungen anbringen. Aufgrund der Taktzeit muss dies schnell durchgeführt werden und es bleibt oft keine Zeit, die Arbeit zu kontrollieren. Wird ein Montageschritt vergessen, wird der Fehler erst später bemerkt. Die Fehlerbehebung ist dann in der Regel sehr zeitintensiv. Aufgrund des niedrigen Platzbedarfes eines Cobots kann in diesem Fallbeispiel in den Arbeitsplatz ein Cobot integriert werden. Dieser unterstützt die arbeitende Person beim Aufbringen der Dichtungen, damit der Zeitdruck verringert und keine Dichtung vergessen wird.

2.4.3 Marktüberblick

Im Jahr 2020 gab es über 22.000 neuinstallierte Cobots. Das entspricht etwa 5,7 Prozent aller neuinstallierten Roboter [18, S. 12]. Wie die Abbildung 3 verdeutlicht, erreichte der kollaborative Robotermarkt im Jahr 2021 ein Volumen von über 700 Millionen U.S. Dollar. Im Vergleich zum Vorjahr ist das eine Steigerung von fast 110 Millionen U.S. Dollar. Laut Statista sollen die

Zahlen auch in Zukunft weiter ansteigen. So soll bis zum Jahr 2030 ein Marktvolumen von rund 1990 Millionen U.S. Dollar erreicht werden. [19]

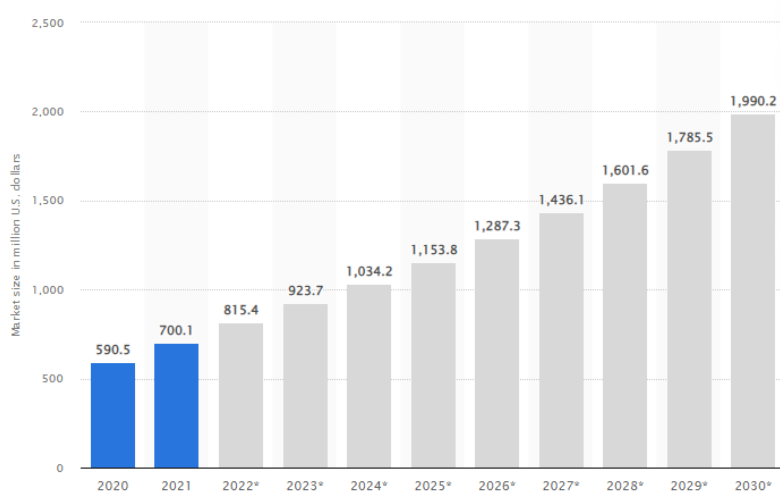


Abbildung 3: Cobotmarkt

Quelle: [19]

Aufgrund vielversprechender Statistiken sind schon zahlreiche namhafte Roboterhersteller auf den Cobot-Hype aufgesprungen und haben mit der Produktion ihre eigenen Cobots begonnen. Bekannte Cobots werden von den Unternehmen Universal Robots, KUKA, ABB und Fanuc hergestellt. Aber auch Denso, Yaskawa, Mitsubishi, Kawasaki, Stäubli, Franka Emika und viele mehr bieten diverse Cobots an.

2.5 ABBs Cobot GoFa™ (CRB 15000)

In Rahmen der vorliegenden Arbeit wurden rund 400 Kollisionen mit einem Cobot durchgeführt, um die Kollisionskräfte und Drücke zu untersuchen (siehe Kapitel 4). Da für diese Zusammenstöße der CRB 15000 von ABB verwendet wurde, wird im folgenden Abschnitt etwas näher auf diesen Cobot eingegangen.

Der ABB GoFa™ CRB 15000 (siehe Abbildung 4), ist ein 27 kg schwerer 6-Achs-Roboter. Er besitzt eine Wiederholgenauigkeit von 0,05 mm und eine Reichweite von 950 mm. Die maximale lineare Geschwindigkeit liegt bei 2200 mm/s und die maximale Payload beträgt 5 kg. Der Roboter läuft über die OmniCore™-Steuerung. [20]



Abbildung 4: ABB GoFa™ CRB 15000

Quelle: [21]

Der CRB 15000 ist ein kollaborationsfähiger Roboter und für die Zusammenarbeit mit Menschen ausgelegt. Eine auf dem Cobot installierte Software ist die „SafeMove-Collaborative“, welche unter anderem Bewegungen, Geschwindigkeiten, Positionen oder Orientierungen des Roboters und des Werkzeugs überwachen kann. Auch äußere Kräfte können mit der Software beaufsichtigt werden. Die in der sicherheitszertifizierten Software SafeMove enthaltenen Funktionen erreichen alle das Performance Level „d“, Kategorie 3 (siehe Tabelle 1) und sind dafür geeignet bzw. ausgelegt, den Menschen vor Verletzungen zu schützen, indem sie beispielsweise beim Überschreiten eines Grenzwerts (z. B.: äußere Kräfte > 100 N) den Roboter stoppen. Die nachstehende Tabelle 1 listet alle Funktionen des SafeMoves inklusive der wichtigsten Kennzahlen der funktionalen Sicherheit auf. [22, S. 40 und S. 41]

	SafeMove functions	Category (SRP/CS)	PFH _D (SRP/CS) [1/hour]	PL	PFH _D (including brake) ¹ [1/hour]
1	Enabling function	3	1.96x10 ⁻⁷	d	3.33x10 ⁻⁷
2	Emergency stop	3	2.05x10 ⁻⁷	d	3.42x10 ⁻⁷
3a	Protective stop (discrete)	3	2.14x10 ⁻⁷	d	3.51x10 ⁻⁷
3a	Protective stop (safe bus)	3	2.25x10 ⁻⁷	d	3.62x10 ⁻⁷
4	Category 0 stop	3	2.25x10 ⁻⁷	d	3.62x10 ⁻⁷
5	Monitored category 1 stop	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
6	Axis Position Supervision	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
7	Axis Speed Supervision	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
8	Stand Still Supervision	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
9	Tool Position Supervision	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
10	Tool Orientation Supervision	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
11	Tool Speed Supervision	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
12	Tool Force Supervision	3	2.50x10 ⁻⁷	d	3.87x10 ⁻⁷
13	Axis Torque Supervision	3	2.50x10 ⁻⁷	d	3.87x10 ⁻⁷
14	Control Error Supervision	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷
15	Contact Application Tolerance	3	2.40x10 ⁻⁷	d	3.77x10 ⁻⁷

Tabelle 1: SafeMove-Funktionen inkl. Kennzahlen

Quelle: [22, S. 40 und S. 41]

SafeMove wurde so designed, dass die Software zutreffenden Teilen folgender Normen entspricht [23, S. 20]:

- EN ISO 12100:2010 Safety of machinery - General principles for design - Risk assessment and risk reduction
- EN 60204-1:2006/A1:2009 Safety of machinery - Electrical equipment of machines - Part 1: General requirements
- EN ISO 10218-1:2011, Robots for industrial environments – Safety requirements – Part 1: Robot
- EN 61000-6-2:2005 EMC, Generic immunity
- EN 61000-6-4:2007/A1:2011 EMC, Generic emission

- ENISO 13849-1:2015 Safety of machinery - Electrical equipment of machines Part 1: General requirements.
- EN ISO 13849-2:2012 Safety of machinery - Safety-related parts of control Systems - Part 2: Validation

3 Anforderungen an die Mensch-Roboter-Kollaboration

Wie alle technischen Applikationen müssen auch kollaborative Anwendungen bestimmte Anforderungen erfüllen. Es gibt verschiedenste Sicherheitsbestimmungen welche Anforderungen an eine MRK stellen, wobei nicht alle davon zwingend eingehalten werden müssen. Folgend werden verschiedene Bestimmungen erklärt und zeitgleich für diese Arbeit relevante Dokumente aufgezählt. Darauf folgend werden einige wissenswerte Anforderungen an kollaborative Anwendungen beschrieben.

3.1 Sicherheitsbestimmungen

Im folgenden Kapitel wird auf drei Arten von Sicherheitsbestimmungen eingegangen. Gestartet wird mit den EU-Richtlinien, dann folgen die Normen und dann die Gesetze. In dem Kapitel wird der Fokus auf den Gültigkeitsbereich „Europa“ gesetzt.

3.1.1 EU-Richtlinien

Ein Ziel der europäischen Union ist es, die Sicherheit und Gesundheit von arbeitenden Personen zu schützen. Aus diesem Grund werden verschiedenste Mindestvorschriften erlassen. Diese Mindestvorschriften werden von der EU als EU-Richtlinien festgelegt, welche alle Mitgliedsstaaten in nationales Recht umsetzen müssen. [24]

Die Arbeitsschutz-Rahmenrichtlinie der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft (RL 89/391/EWG) und die Arbeitsmittelbenutzungsrichtlinie (RL 2009/104/EWG) werden unter anderem in das Arbeitnehmer*innenschutzgesetz (AT) bzw. Arbeitsschutzgesetz (DE) umgesetzt. [24, S. 7]

3.1.2 Normen

Normen sind Dokumente, die Anforderungen an Produkte, Dienstleistungen oder Verfahren festlegen. Durch sie werden Qualitätsstandards in der Technik (und auch anderen Bereichen) sowie die Sicherheit von Menschen und Gegenständen gesichert. Laut dem deutschen Institut für Normung (DIN) beträgt der jährliche volkswirtschaftliche Nutzen von Normen rund 17 Milliarden Euro. Alleine DIN hat bereits mehr als 34.000 Normen in den Verkehr gebracht, welche tagtäglich Klarheit schaffen und den freien Warenverkehr erleichtern. [25]

Die Anwendung von Normen ist im Gegensatz zur Anwendung von Gesetzen grundsätzlich freiwillig. Dennoch sind sie qualifizierte Empfehlungen und dienen im Streitfall (z. B. in Haftungsprozessen) als Entscheidungshilfe.[26]

In der Technik sind Normen in vielerlei Hinsicht sehr nützlich. Sie machen Prüfmethode vergleichbar, ermöglichen die Verwendung von genormten Teilen, definieren Verfahren / Methoden und beschreiben den Stand der Technik.[27]

Wie auch bei den Gesetzen gibt es eine hierarchische Struktur in den Normen. Aufgeteilt wird in Typ A-, Typ B- und Typ C-Normen. Wie **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** zeigt, steigt der Detaillierungsgrad von den Typ A-Normen zu den Typ C-Normen. Die Typ C-Normen sind immer vorrangig. [28, S. 7]

	Typ	Normen
C	C-Normen Detaillierte Sicherheitsanforderungen für eine bestimmte Maschine oder Gruppe von Maschinen	DIN EN ISO 10218-1, DIN EN ISO 10218-2
B	B2-Normen Normen zu Schutzeinrichtungen	DIN EN ISO 14119, DIN EN ISO 13850
B	B1-Normen Normen zu Sicherheitsaspekten	DIN EN ISO 13855, DIN EN ISO 13857, DIN EN ISO 13849, DIN EN ISO 11161
A	A-Normen Sicherheitsfachgrundnormen und Grundbegriffe, Gestaltungsansätze für Maschinen	DIN EN ISO 12100

Abbildung 5: Norm-Typen

Quelle: [28, S. 7]

Die **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** listet einige für das Thema „MRK“ relevante Normen auf.

Harmonisierte Normen

Eine besondere Kategorie der europäischen Normen bilden die harmonisierten Normen. Mit der Einhaltung dieser Normen wird unter Beweis gestellt, dass die Produkte / Dienstleistungen / Verfahren auch die technischen Anforderungen der einschlägigen EU-Rechtsvorschriften erfüllen. [29]

Im nationalen Vorwort der DIN EN ISO 10218-1:2012-01 wird dies wie folgt beschrieben:

Ab dem Zeitpunkt ihrer Bezeichnung als Harmonisierte Norm im Amtsblatt der Europäischen Union kann der Hersteller bei ihrer Anwendung davon ausgehen, dass er die von der Norm behandelten Anforderungen der Maschinenrichtlinie eingehalten hat (so genannte Vermutungswirkung).

Die in der Robotik viel verwendeten Normen „DIN EN ISO 10218-1 und 2“ sind somit harmonisierte Normen, mit deren Einhaltung auch die betroffenen Themen in der Maschinenrichtlinie eingehalten werden.

Technische Spezifikationen (TS)

Das Deutsche Institut für Normungen (DIN) beschreibt eine technische Spezifikation als

[...] Ergebnis einer Normungsarbeit, das wegen bestimmter Vorbehalte zum Inhalt, wegen des gegenüber einer Norm abweichenden Aufstellungsverfahrens oder mit Rücksicht auf die europäischen Rahmenbedingung vom DIN nicht als Norm herausgegeben wird.[30]

Eines der relevantesten Dokumente für MRK-Anwendungen ist die ISO TS 15066. Diese Technische Spezifikation beschreibt unter anderem die Sicherheitsanforderungen an die vier Schutzprinzipien (siehe Kapitel 2.1). Ebenfalls gibt sie Hinweise für die Gestaltung / Auslegung der Anwendung. Laut dem Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik und Automatisierung (IPA) ist eine Einarbeitung der Technischen Spezifikation in die ISO 10218 bereits geplant [31, S. 28].

3.1.3 Gesetze

Für das Realisieren von Mensch-Roboter Kollaborationen müssen auch geltende Gesetze berücksichtigt werden. Im Vergleich zu den Normen sind Gesetze rechtlich bindend. Für alle Gesetze gibt es einen Gültigkeitsbereich. In Österreich gibt es zum Beispiel Bundes- und Landesgesetze, welche innerhalb des Staates Österreich oder nur in einem speziellen Bundesland gelten. Außerdem müssen EU-Gesetze berücksichtigt werden, die in der gesamten EU ihre Gültigkeit haben. Wie bereits erwähnt, gibt es EU-Richtlinien, die innerhalb einer gesetzten Frist von den Mitgliedsstaaten in nationales Recht umgesetzt werden müssen.

Für das Thema „Robotik“ relevante Gesetze sind beispielsweise die Maschinen-Sicherheitsverordnung oder das Arbeitnehmer*innenschutzgesetz.

3.2 Anforderungen

In diesem Abschnitt der Arbeit werden einige wissenswerte Anforderungen an kollaborative Applikationen geschildert, da diese für das Verständnis der vorliegenden Arbeit wichtig sind.

Grundsätzlich müssen alle Robotersysteme Anforderungen aus der ISO 10218-1:2011 und ISO 10218-2:2011 erfüllen. Zusätzlich beschreibt die ISO/TS 15066 weitere Anforderungen speziell für kollaborierende Anwendungen.

Anforderungen, welche speziell für kollaborative Anwendungen relevant sind, könnten beispielsweise in folgende Punkte gegliedert werden:

- Anforderungen an das Steuerungssystem
- Anforderungen an den Kollaborationsraum
- Anforderungen an die arbeitende Person

- Medizinische und ergonomische Anforderungen
- Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb

Bei der Realisierung einer MRK-Applikation sollte keiner dieser Punkte vernachlässigt werden. Nachstehend werden einige Anforderungen an das Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip, die ein Teil der Anforderungen an den kollaborierenden Betrieb sind, erklärt.

Diese Kapitel listet nicht alle zu berücksichtigenden Anforderungen auf. Diese müssen den entsprechenden Bestimmungen (z. B. der ISO/TS 15066) entnommen werden.

Wichtige Anforderungen an das Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip:

Da es bei Anwendungen mit dem Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip zu Kollisionen zwischen Mensch und Roboter kommen kann, müssen risikomindernde Maßnahmen getroffen werden, damit bestimmte Belastungsgrenzen nicht überschritten werden und die arbeitenden Personen nicht verletzt werden. Die jeweiligen Belastungsgrenzen müssen in der Risikobeurteilung festgelegt werden, wobei die ISO/TS 15066 Grenzwerte für verschiedene Körperregionen vorschlägt (siehe Tabelle 2).[4, Kap. 5.5.5.1]

Körperregion	Spezifischer Körperbereich		Quasistatischer Kontakt		Transienter Kontakt	
			Maximal zulässiger Druck ^a p_s N/cm ²	Maximal zulässige Kraft ^b N	Faktor für den maximal zulässigen Druck ^c P_T	Faktor für die maximal zulässige Kraft ^c F_T
Schädel und Stirn ^d	1	Stirnmitte	130	130	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
	2	Schläfe	110		Nicht anwendbar	
Gesicht ^d	3	Kaumuskel	110	65	Nicht anwendbar	Nicht anwendbar
Hals	4	Halsmuskel	140	150	2	2
	5	Siebter Halswirbel	210		2	

Tabelle 2: Biomechanische Grenzwerte nach ISO/TS 15066

Quelle: Ausschnitt aus [2, Tabelle A.2]

Wie der Ausschnitt aus Tabelle A.2 aus der ISO/TS 15066 zeigt, wird für jede Körperregion eine maximale zulässige Kraft und für jeden spezifischen Körperbereich ein maximal zulässiger Druck angegeben. Auch enthält die Tabelle Faktoren, die bei einem transienten Kontakt auf den quasistatischen Grenzwert angewandt werden können. In der Regel kann der

quasistatische Wert verdoppelt werden. Bei der Körperregion „Schädel und Stirn“ und „Gesicht“ sind die quasistatischen und transienten Grenzwerte allerdings ident.

Einschub: Definition des quasistatischen und transienten Kontakts nach ISO/TS 15066:

[Ein **quasistatischer Zusammenstoß** ist ein] Kontakt zwischen einer Bedienperson und einem Teil eines Robotersystems, bei dem der Körperteil der Bedienperson zwischen einem beweglichen Teil eines Robotersystems und einem anderen feststehenden oder beweglichen Teil der Roboterzelle eingeklemmt sein kann. [4, Kap. 3.4]

[Ein **transienter Stoß** ist ein] Kontakt zwischen einer Bedienperson und einem Teil eines Robotersystems, bei dem der Körperteil der Bedienperson nicht eingeklemmt ist und vom beweglichen Teil des Robotersystems zurückprallen kann. [4, Kap. 3.5]

Wie die Abbildung 6 zeigt, ist der transiente Grenzwert bei allen Kollisionen relevant. Erst wenn der Roboter länger als 0,5 Sekunden auf den Menschen drückt (z. B. wenn ein Körperteil eingeklemmt wurde), müssen nach dieser Zeit die quasistatischen Grenzwerte eingehalten werden. Bei einem transienten Stoß wird nicht mit dauerhaft anhaltenden Kräften gerechnet, da der Körperteil in der Regel vom Roboter weggedrückt wird [32, S. 5].

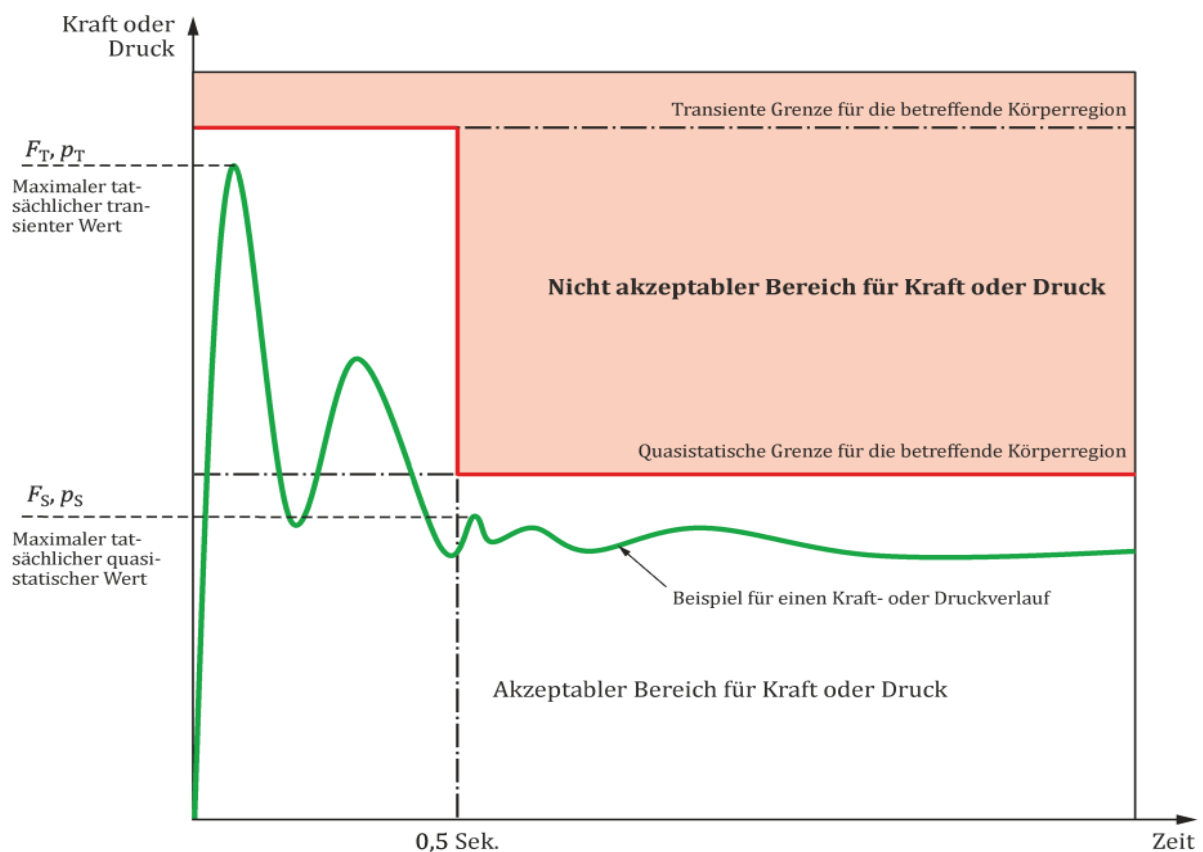


Abbildung 6: Verlauf der transienten und quasistatischen Grenzwerte

Quelle: [4, Abb. 4]

Das Einhalten aller ausgewählten Grenzwerte muss bei allen Applikationen überprüft werden. Die FB HM-080 (eine Information der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (DGUV)) empfiehlt, die Kräfte und Drücke zu messen, um das Einhalten der Grenzen zu überprüfen. Wie in Abbildung 7 ersichtlich, soll laut FB HM-080 für das Messen des transienten und des quasistatischen Kontaktes das Messgerät fixiert werden. Für die Auswertung wird gleich wie in der ISO/TS 15066 (siehe Abbildung 6) geraten, für transiente Kollisionen nur den Peak-Wert und für quasistatische Kollisionen den Peak-Wert, sowie den höchsten Wert ab 0,5 Sekunden nach der Kollision zu bewerten.

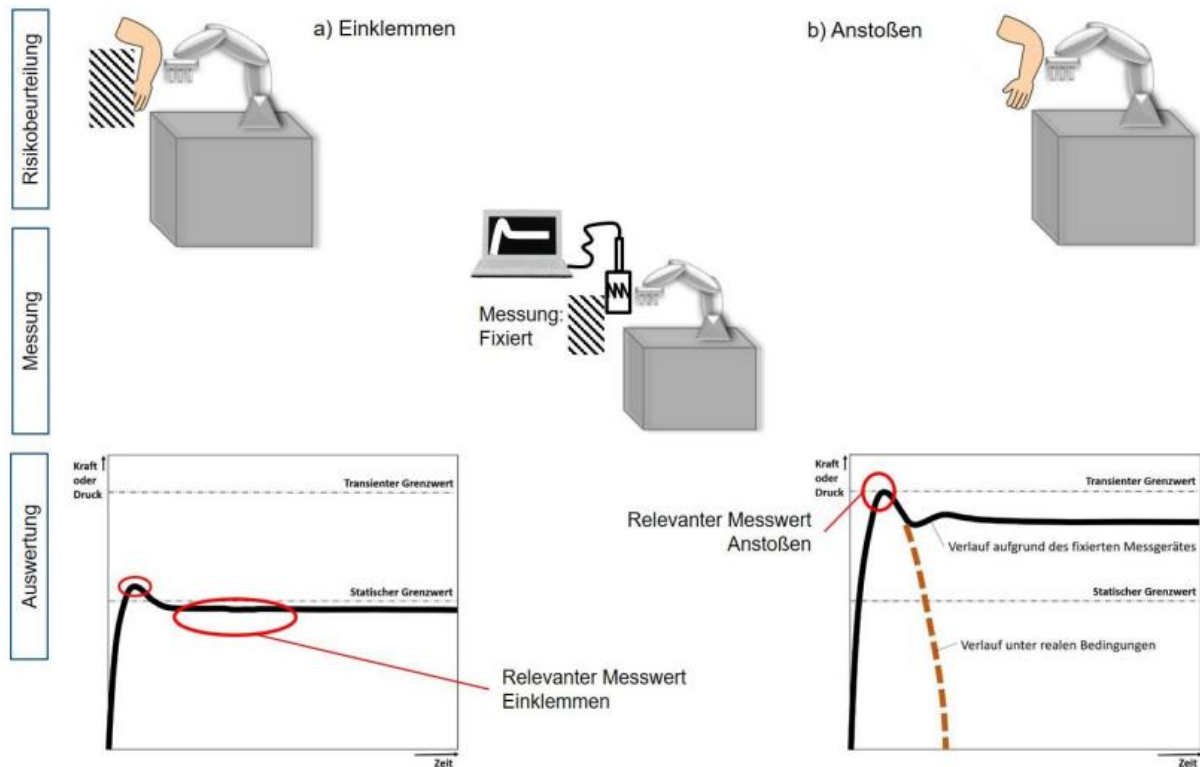


Abbildung 7: Empfohlene Vorgehensweise beim Überprüfen der biomechanischen Grenzwerte nach der DGUV-Information FB HM-080

Quelle: [32, Abb. 7]

4 Messungen

In der Risikobeurteilung müssen diverse Belastungsgrenzen festgelegt werden, damit arbeitende Personen bei einer Kollision mit dem Roboter nicht verletzt werden (siehe Kapitel 3.2). Mithilfe von Messungen kann überprüft werden, ob diese Grenzen auch eingehalten werden.

Die Belastungsgrenzen beziehen sich meistens auf die Kollisionskraft und den Druck. Es können aber auch andere Schwellwerte wie zum Beispiel eine Grenze für die Kollisionsenergie angegeben werden. Am häufigsten werden die ersten zwei Größen, die Kraft und der Druck, als Grenzen benutzt.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden rund 400 Messungen durchgeführt. Der Großteil davon wurde für die Untersuchung von diversen Einflüssen, wie zum Beispiel der Einfluss der TCP-Geschwindigkeit auf die Kollisionskraft bzw. den Druck, durchgeführt. Die Ergebnisse, sowie andere aufgetretene Erkenntnisse werden in diesem Teil der Arbeit behandelt. Im darauffolgenden Kapitel werden unter anderem Gestaltungsempfehlungen aus diesen Ergebnissen abgeleitet.

In Kapitel 4.4 wird die Aussagekraft von Messungen mittels eines biofidelen Messgerätes kritisch reflektiert.

4.1 Messaufbau und Versuchsdurchführung

4.1.1 Biofidele Messsysteme

Biofidele Messsysteme ermitteln die Kraft und den Druck bei Kollisionen mit dem menschlichen Körper. Dieser besteht aus verschiedenen Körperregionen mit jeweils unterschiedlichen Dämpfungs- und Federeigenschaften. Um einen realen Zusammenstoß möglichst gut simulieren zu können, besitzen diese Messsysteme ein austauschbares Dämpfungselement und eine austauschbare Feder, damit jede Körperregion mit den jeweils richtigen Eigenschaften modelliert werden kann. Ein Kraftsensor unter der Feder dient der Ermittlung des Kraftverlaufes. Der Druck wird über Druckmessfolien, welche auf das Dämpfungselement gelegt werden, aufgenommen (siehe Abbildung 8). Stellen, an denen Kraft auf die Folie wirkt, verfärben sich rot. Die Intensität bestimmt dabei die Höhe des Drucks. Um die Druckkraft genau zu ermitteln, werden die Folien eingescannt, damit eine Software den Druck bestimmen kann. Optional kann auch ein Mikrofasertuch auf die Folien gelegt werden, sodass kleine Oberflächenkonturen ausgeglichen werden können.

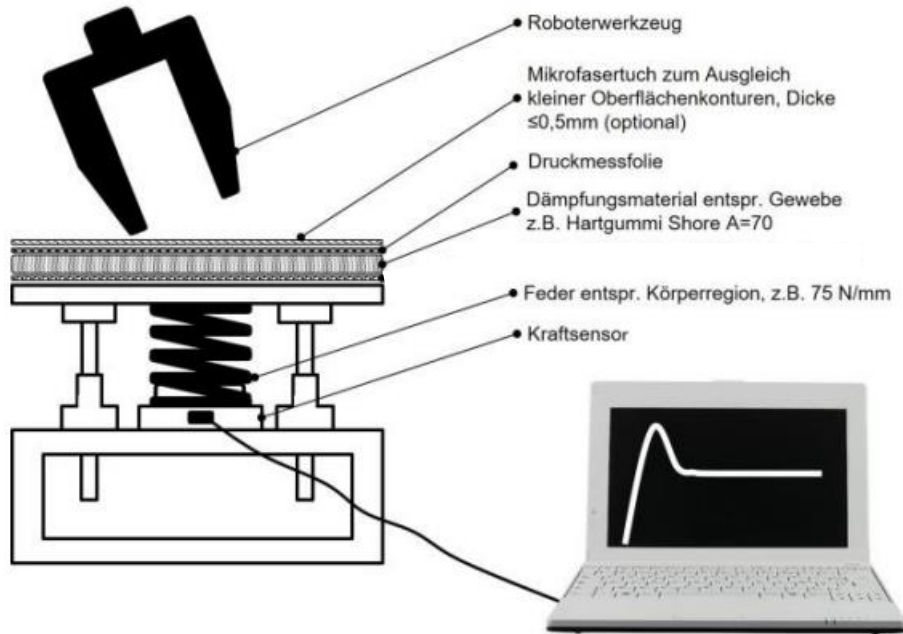


Abbildung 8: Biofideles Messsystem

Quelle: modifizierte Abbildung aus [32, S. 4]

Für die vorliegende Arbeit wurde das biofidele Messsystem „Kollisionmess-Set PRMS (Pilz Robot Measurement System)“ von PILZ verwendet (siehe Abbildung 9). Um die nach ISO/TS 15066 zwölf unterschiedlichen Körperregionen [21, Tabelle A.1] zu modellieren, besitzt das Messsystem neun verschiedene Federn und drei Dämpfungselemente, welche einfach ausgetauscht werden können. Die Software PRMS zeigt für jede Körperregion an, welche Feder und welches Dämpfungselement verwendet werden sollen, um diese Region bestmöglich zu modellieren. Der Druck wird mittels Druckmessfolien von FujiFilm, einem Scanner, einem Kalibrierblatt und einer Auswertesoftware von PILZ ermittelt. Die korrekte Anwendung des Messsystems ist in der Bedienungsanleitung [33] nachzulesen.



Abbildung 9: Pilz-Robot-Measurement-System (PRMS)

Quelle: modifizierte Abbildung aus [34]

Beim Durchführen der Messungen sollte auf die maximale Kraft, die auf das Messgerät wirken darf, geachtet werden. Es ist empfehlenswert, die gewünschte Kollision zuerst mit geringerer Geschwindigkeit zu messen und diese dann langsam zu erhöhen, um den Grenzwert nicht zu

überschreiten. Bei den Druckmessungen sollten die Luftfeuchtigkeit und die Raumtemperatur ermittelt werden, da sich diese physikalischen Größen auf die Messergebnisse auswirken. Die Auswerte-Software von Pilz berücksichtigt diese Parameter, wenn sie manuell eingetragen werden.

Als Ergebnis liefert das Messsystem den zeitlichen Verlauf der Kraft (siehe Abbildung 10) und den Maximaldruck inklusive der Druckverteilung (siehe Abbildung 11). Wie in Abbildung 10 ersichtlich, wird die Kraftgrenze der gewünschten Körperregion und der ausgewählten Kollisionsart (transient oder quasistatisch) hellrot eingezeichnet.

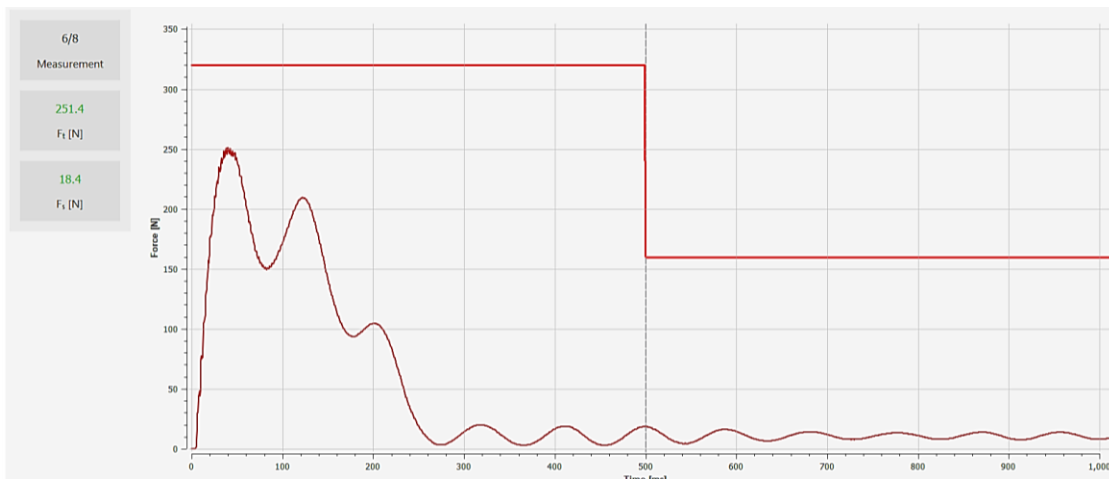


Abbildung 10: Kraftverlauf (dunkelrot) mit transientem Grenzwert (hellrot)

Quelle: eigene Messdaten, gemessen und ausgewertet mit der PRMS Software von Pilz

Die Abbildung 11 zeigt eine Druckmessfolie (links), die Druckverteilung (Mitte), den Maximaldruck „ P_{max} “ und den maximal erlaubten Druck „ P_{limit} “ (oben rechts) der ausgewählten Körperregion und Kollisionsart.

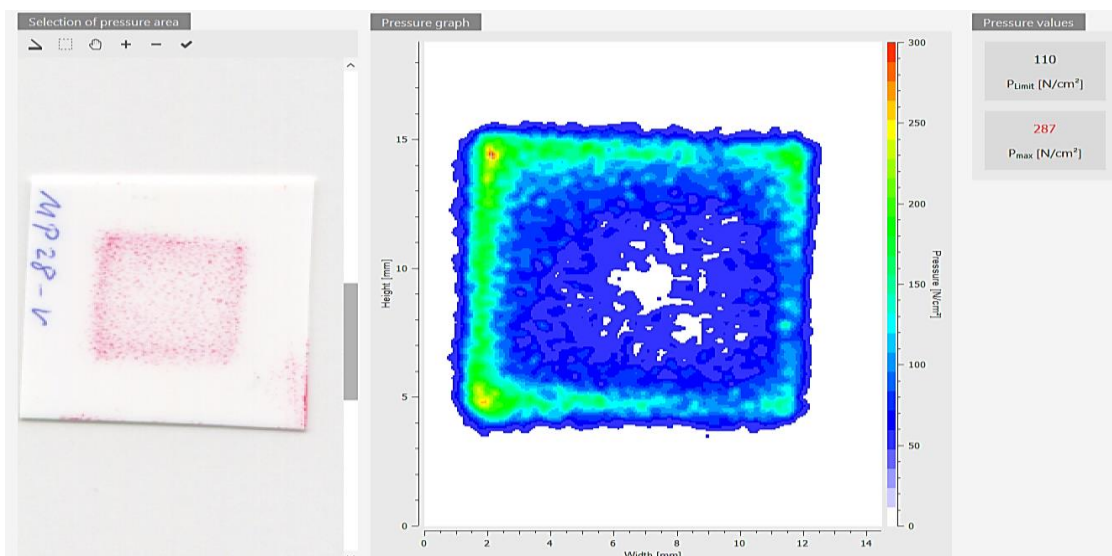


Abbildung 11: Druckmessfolie, Druckverteilung und Maximaldruck

Quelle: eigene Messdaten, gemessen und ausgewertet mit der PRMS Software von Pilz

4.1.2 Versuchsdurchführung

Um Einflüsse auf die Kollisionskraft zu analysieren, ist eine einheitliche Versuchsdurchführung erforderlich. Folgend wird die Vorgehensweise bei den Kollisionsmessungen beschrieben.

Ablauf einer Kollisionsmessung:

1. In ABBs RobotStudio (Software für die Roboterprogrammierung) wird die gewünschte Bahn inklusive der Tool-Center-Point-Geschwindigkeit (TCP-Geschwindigkeit) programmiert.
2. In den SafeMove Einstellungen werden alle Funktionen, wie zum Beispiel die Tool-Force-Supervision (TFS), wie gewünscht eingerichtet.
3. Die „motion supervision“ wird ausgeschaltet (Grund siehe 5.2.7).
4. Die korrekte Feder und das richtige Dämpfungselement werden am Messgerät angebracht.
5. Die Druckmessfolien werden passend für die Applikation zugeschnitten und auf das Dämpfungselement gegeben.
6. Ein Mikrofaser Tuch wird über das Dämpfungselement bzw. über die Folien gelegt.
7. Die Messung wird in der dafür vorgesehenen Software angelegt. Im selben Zuge werden alle Einstellungen getroffen. Dazu zählen zum Beispiel die Auswahl der TCP-Geschwindigkeit und der betroffenen Körperregion.
8. Das Messgerät wird an der richtigen Stelle befestigt und die Messung in der Software gestartet.
9. Die programmierte Roboterbewegung wird gestartet.
10. Nachdem der Roboter kollidiert ist, wird er sofort manuell vom Messgerät weggefahren.
11. Die Schritte acht und neun werden zwei oder drei Mal durchgeführt.
12. Die Messergebnisse werden auf Ausreißer kontrolliert. Weicht eines der Ergebnisse deutlich von den anderen Ergebnissen ab, wird eine neue Messung durchgeführt.
13. Das arithmetische Mittel der Messergebnisse wird als Endergebnis angesehen. Die Ausreißer werden bei der Berechnung des Mittelwerts nicht berücksichtigt. Bei Messungen zur Validierung einer kollaborativen Applikation dürfen Ausreißer nicht ignoriert werden.

Für alle Kollisionsmessungen wurden, wenn nichts anderes angegeben, folgende Einstellungen verwendet:

- TFS-Grenzwert = 50 Newton
- Beschleunigung wird reduziert auf „AccSet 10, 10;“ (Details zum Befehl „AccSet“ siehe [35, S. 15])

- Die Bewegung des Roboters verläuft senkrecht nach unten. Der Roboterarm befindet sich dabei zwischen der ausgestreckten und der ganz angewinkelten Konfiguration (in der Mitte des Arbeitsbereichs, wie in Abbildung 12 ersichtlich) (Rapid-Programm siehe Anhang).
- Der Tool-Center-Point (TCP) befindet sich in Verlängerung der sechsten Achse des Roboters. Es wird immer mit dem TCP mittig auf das Messgerät gefahren.



Abbildung 12: gewöhnliche Messung

Quelle: eigene Aufnahme

Wird in den folgenden Kapiteln von einer Geschwindigkeit gesprochen, ist damit, wenn nichts anderes erwähnt, die TCP-Geschwindigkeit des Roboters gemeint.

Um den GoFa zu schonen, wurden keine Messungen über 400mm/s durchgeführt. Kollisionen mit hohen Geschwindigkeiten können den Roboter beschädigen. Da mit dem Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip maximal Geschwindigkeiten von 400 mm/s – 500 mm/s empfohlen werden (siehe Kapitel 5.2.3), sind Messungen bis zu diesem Wert ausreichend.

4.2 Messergebnisse

Etwa 400 Messungen wurden für das Ermitteln der Einflüsse von diversen Parametern auf die Kollisionskraft/Druck oder auf die maximale TCP-Geschwindigkeit durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchung werden in den folgenden Abschnitten erläutert.

Die analysierten Parameter sind die Körperregion, der Tool-Force Supervision Grenzwert, die Geometrie der Kollisionsobjekte, die Zusatzmasse und die Roboterbahn.

4.2.1 Einfluss der Körperregion auf die Kollisionskraft

Eine Körperregion wird mittels dem PRMS immer durch eine Feder und ein Dämpfungselement modelliert. Nach der ISO/TS 15066 unterscheiden sich die Regionen dagegen nur mit unterschiedlichen Federkonstanten. Um den Einfluss der Federkonstante und des

Dämpfungselements genauer zu untersuchen, werde diese Parameter zuerst separat analysiert, und erst darauf gezeigt, wie sich die kombinierten Eigenschaften auf die Kollisionskraft auswirken.

Einfluss der Federkonstante

Um alle Federkonstanten der verschiedenen Körperregionen abdecken zu können, werden neun verschiedene Federn benötigt. Die vorhandenen Federkonstanten sind in Tabelle 3 eingetragen. Die nachstehenden Messergebnisse in Abbildung 13 zeigen, wie sich die unterschiedlichen Federn auf die Kollisionskräfte auswirken. Für die nachstehenden Versuche wurden die Federkonstanten 25 N/mm, 40 N/mm und 75 N/mm analysiert. Dabei wurde jeweils das schwarze Dämpfungselement mit der Härte Shore A 70 verwendet.

Federkonstanten des PRMS [N/mm]	10	25	30	35	40	50	60	75	150
---------------------------------	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

Tabelle 3: Federkonstante des PRMS

Quelle der Daten: [36, S. 1]

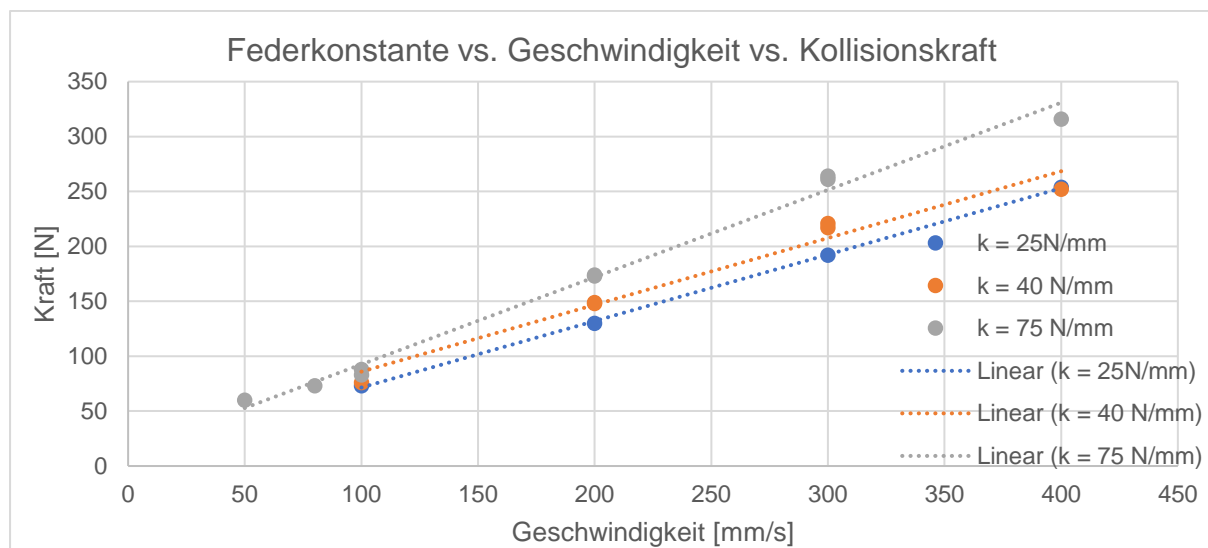


Abbildung 13: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Federkonstanten

Quelle: eigene Messdaten

Wie die Versuche zeigen, variieren die Kollisionskräfte je nach Federkonstante und TCP-Geschwindigkeit. Bei einer Geschwindigkeit von 100 mm/s ist die Abweichung der Kollisionskräfte der drei unterschiedlichen Federkonstanten mit ca. 10 Prozent relativ gering. Wird die Geschwindigkeit auf 400 mm/s erhöht, steigt die Abweichung auf ca. 20 Prozent.

Grundsätzlich kann bei den Messungen jede Feder mit einer steiferen Feder ersetzt werden, solange die Taktzeit keine Rolle spielt. Denn mit einer steiferen Feder vergrößern sich die Kollisionskräfte und es muss folglich eine kleinere Geschwindigkeit für den Roboter ausgewählt werden, damit die Schwellwerte eingehalten werden können. Eine kleinere Geschwindigkeit verringert die Taktzeit, aber erhöht die Sicherheit der arbeitenden Personen. Da bei

einigen Hersteller*innen für jede Federkonstante ein separates Kraftmessgerät gekauft werden muss, kann das Ersetzen gewisser Federn die Kosten des Messsystems verringern.

Einfluss der Dämpfungselemente

Das PRMS enthält drei verschiedenfarbige Dämpfungselemente (siehe Abbildung 14). Diese sind unterschiedlich hoch und hart. Tabelle 4 enthält die Eigenschaften aller Elemente.

Farbe	Härte	Höhe [mm]
Gelb	Shore AO 10	21
Blau	Shore A 30	14
Schwarz	Shore A 70	7

Tabelle 4: Eigenschaften der Dämpfungselemente

Quelle der Daten: [36, S. 2]



Abbildung 14: Dämpfungselemente von Pilz

Quelle: eigene Aufnahme

Der Einfluss der unterschiedlichen Dämpfungselemente auf die Kollisionskraft ist in der nachstehenden Grafik (Abbildung 15) dargestellt. Die Versuchsreihe wurde mit einer Feder mit der Steifigkeit von 75 N/mm durchgeführt.

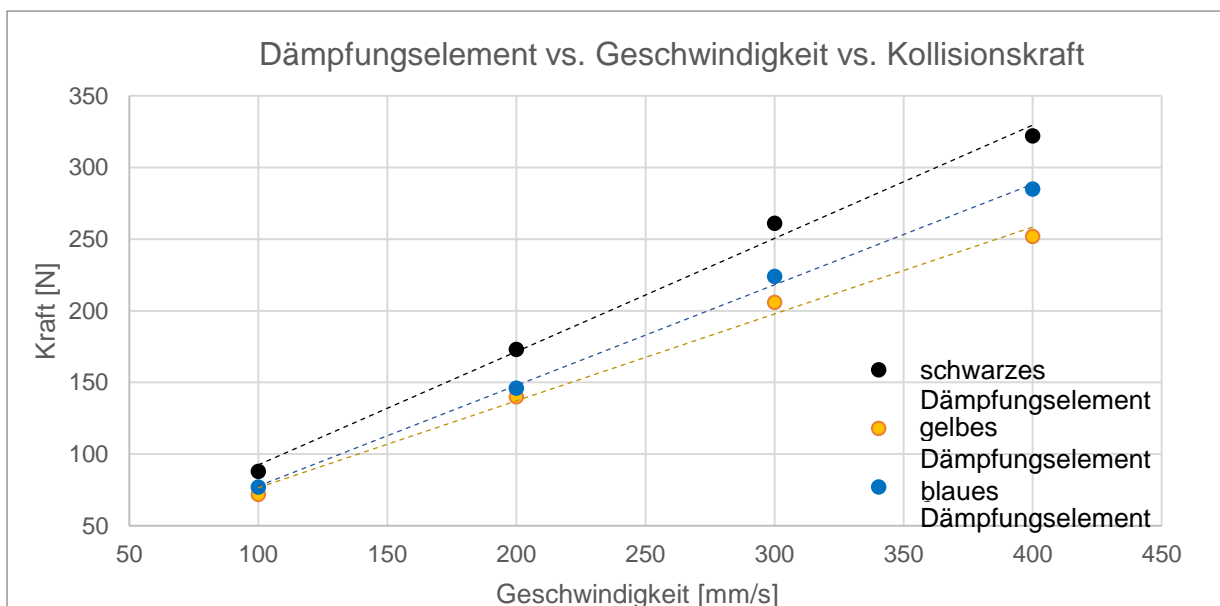


Abbildung 15: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Dämpfungselementen

Quelle: eigene Messdaten

Auch hier steigt der Unterschied in den Ergebnissen mit der TCP-Geschwindigkeit. Relativ gesehen sind die Kollisionskräfte mit dem gelben Dämpfungselement ca. 20 Prozent geringer als jene mit dem schwarzen Element. Es wurde dieselbe Versuchsreihe außerdem mit einer Feder mit der Steifigkeit 40 N/mm durchgeführt. Hier beträgt der relative Unterschied nur noch zwischen 5 Prozent und 10 Prozent. Dieses Resultat kann wahrscheinlich darauf zurückgeführt werden, dass bei Kollisionen mit einer weniger steifen Feder die Dämpfungselemente weniger stark eingedrückt werden, weil die Feder mehr nachgibt. Folglich wirkt sich die Federsteifigkeit des Körpers auch auf die Dämpfung aus und umgekehrt.

Wie die Ergebnisse zeigen, kann sich das Dämpfungselement deutlich auf die Kollisionskräfte auswirken. Auch wenn die ISO/TS 15066 die Dämpfungseigenschaften der Körperregionen nicht berücksichtigt, wird das Verwenden der Elemente bei Kollisionsmessungen empfohlen.

Einfluss der Körperregion

Nachdem der Einfluss der Federkonstante und des Dämpfungselements separat analysiert wurden, wird in diesem Abschnitt gezeigt, wie sich die verschiedenen Körperregionen, also die Zusammensetzung einer Feder und eines Dämpfungselements, auf die Kollisionskräfte auswirken. Die Federsteifigkeit und die Härte des Dämpfungselements werden für jede Körperregion von der PRMS-Software vorgeschlagen.

Die nachstehende Abbildung 16 zeigt die Kollisionskräfte eines Zusammenstoßes mit verschiedenen Körperregionen bei einer TCP-Geschwindigkeit von 150 mm/s. Die Kräfte variieren von 75 Newton bei der Körperregion „Bauch“ bis 148 Newton bei der Region „Kopf“.

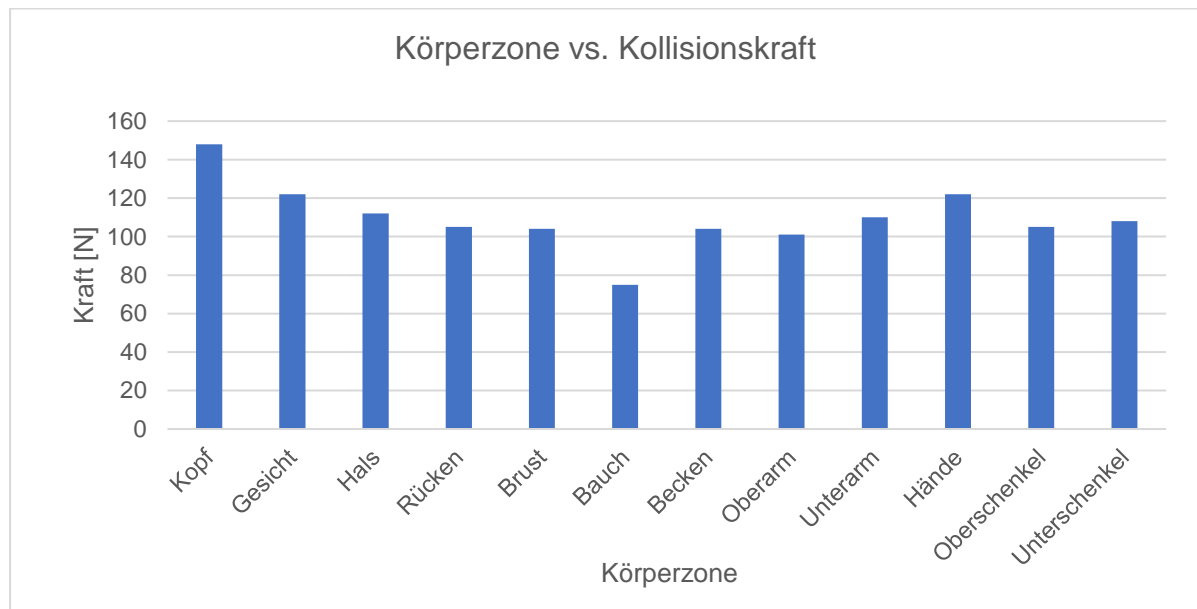


Abbildung 16: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Körperregionen

Quelle: eigene Messdaten

4.2.2 Einfluss der Tool-Force Supervision auf die Kollisionskraft

ABBs Tool-Force Supervision kann die Kräfte am TCP überwachen. In den Einstellungen des SafeMoves kann ein Grenzwert eingegeben werden, bei dessen Überschreitung der Roboter ein Sicherheitsstopp der Kategorie 0 ausführt. Die Versuchsreihe soll zeigen, wie gut die Grenzwerte bei einer Kollision eingehalten werden können. Es wurde das Dämpfungselement mit der Härte Shore A 30 und die Feder mit einer Steifigkeit von 50 N/mm verwendet.

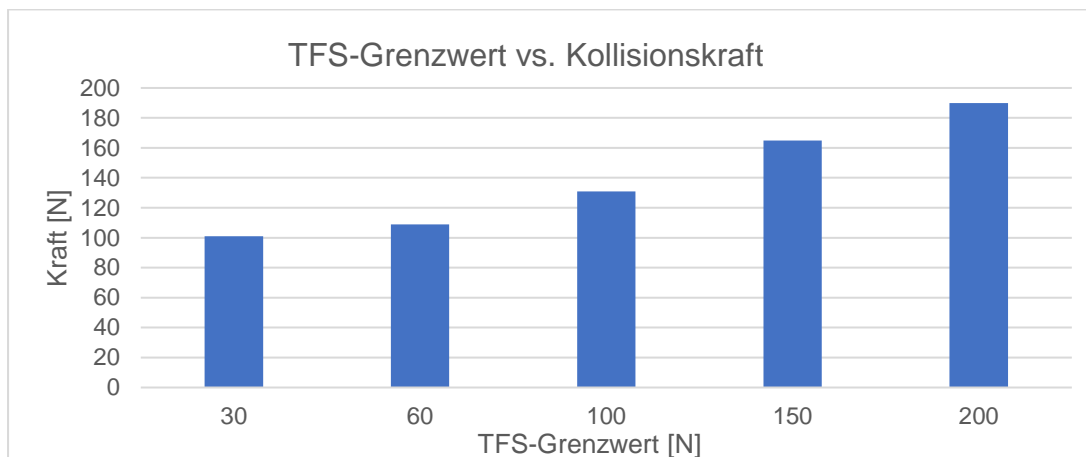


Abbildung 17: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen TFS-Grenzwerten

Quelle: eigene Messdaten

Wie die Abbildung 17 zeigt, können bei einer TCP-Geschwindigkeit von 150 mm/s, erst TFS-Grenzwerte von über 150 Newton eingehalten werden. Auch kann aufgrund der Abbildung vermutet werden, dass bei einer Geschwindigkeit von 150 mm/s kaum Kollisionskräfte unter 100 Newton erreicht werden können. Zum einen, weil die Kräfte bei einem TFS-Wert von 30 Newton nur 8 Newton geringer sind als die bei einem eingestellten TFS-Wert von 60 Newton. Zum anderen, weil die TFS Grenze nicht beliebig weit gesenkt werden kann. Bei diesem Versuch konnte mit einer Grenze von 20 Newton die Roboterbewegung nicht mehr gestartet werden (genauer in Kapitel 4.3.6).

Der Roboter kann bei höheren Geschwindigkeiten die Grenzen vermutlich deshalb nicht einhalten, weil er dann mehr Zeit bzw. Weg für das Abbremsen benötigt. Deshalb können mit geringeren Geschwindigkeiten auch geringere Grenzwerte eingehalten werden.

4.2.3 Einfluss der Körperregion und der Geometrie des Kollisionsobjekts auf die maximale Geschwindigkeit

Wie in den Anforderungen (Kapitel 3.2) beschrieben, gibt es für jede Körperregion biomechanische Schwellwerte, die bei einer Kollision mit dem Robotersystem nicht überschritten werden dürfen. Da die Kollisionskräfte und Drücke mit der Geschwindigkeit des Roboters steigen, ergibt sich für jede Körperregion eine maximale Robotergeschwindigkeit. Fährt der Roboter nicht schneller als diese Geschwindigkeit, können die Schwellwerte eingehalten werden.

Um diese maximalen Geschwindigkeiten zu ermitteln, wurden mehrere Kollisionsversuche durchgeführt. Die erste Versuchsreihe ermittelte die maximalen Geschwindigkeiten bezogen auf die maximal erlaubte Kollisionskraft, die zweite Reihe hingegen auf den maximal erlaubten Druck. Da der Druck sehr stark von der Kontaktfläche abhängt, wurden für diese Versuchsreihe Kollisionen mit unterschiedlichen Geometrien durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 und Tabelle 7 abgebildet.

Bei allen quasistatischen Messungen mit dem GoFa war der Kraft-Peak in den ersten 0,5 Sekunden der begrenzende / kritische Kraftwert. Da in der ersten halben Sekunde der Schwellwert bei quasistatischen Kollisionen derselbe ist wie bei transienten Kontakten (siehe Kapitel 3.2), sind auch die maximalen Geschwindigkeiten bezogen auf den Kraftgrenzwert für den quasistatischen und den transienten Kontakt dieselben.

Die maximalen Geschwindigkeiten wurden nur für Körperregionen ermittelt, welche in der Regel dem Roboter am nächsten sind und somit vermutlich am häufigsten zum Kollisionsobjekt werden.

Da nur Messungen mit einer TCP-Geschwindigkeit von bis zu 400mm/s durchgeführt wurden, sind alle maximalen Geschwindigkeiten, welche deutlich über diesem Wert liegen mit 400+ mm/s angegeben.

Körperregion	Vmax [mm/s]
Gesicht	50
Hände und Finger	350-400
Unterarm und Handwurzelgelenke	400+
Brust	400+
Bauch	400+

Tabelle 5: Vmax nach Kraftgrenzwert (gültig für transienten und quasistatischen Kontakt)

Quelle: eigene Messdaten

Die Druckmessungen wurden wie bereits erwähnt mit verschiedenen Geometrien ausgeführt (siehe Abbildung 18 und Abbildung 19). Diese werden in Tabelle 6 beschrieben.

Geometrie	Abmessungen	Material
Quader	1 cm ² Bodenfläche (Kanten nur entgratet)	Aluminium
Kugel	25 mm Radius	Aluminium
Kante „ohne Fase“	35 mm Länge, (entgratet)	Aluminium
Kante mit Fase	35 mm Länge, 0,5 mm Fasenbreite, 45° Fasenwinkel	Aluminium
Kante mit Fase	35 mm Länge, 1 mm Fasenbreite, 45° Fasenwinkel	Aluminium
Kante mit Rundung	35 mm Länge, 1 mm Radius	Aluminium

Tabelle 6: Geometrien für die Druckmessungen

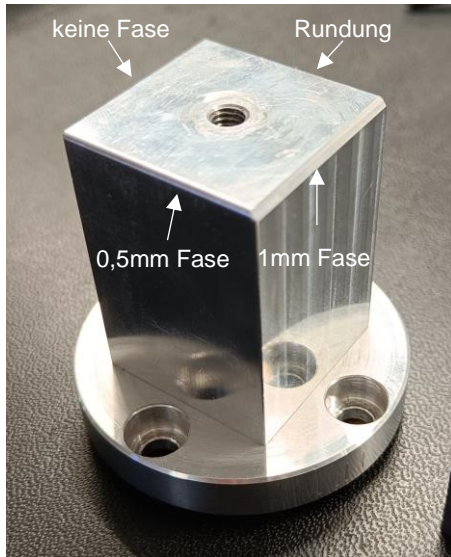


Abbildung 18: Objekte für die Druckmessungen
Quelle: eigene Aufnahme

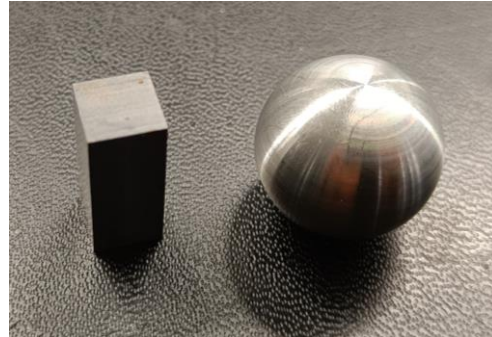


Abbildung 19: Objekte für die Druckmessungen II
Quelle: eigene Aufnahme

Bei den Messungen wurde für jede Fase der Worstcase ausgewertet. Dieser ungünstigste Fall ist meist eine Kollision in einem 45 Grad oder 22,5 Grad Winkel. Dieser Winkel hängt nicht nur von der Fasenbreite oder dem Fasenwinkel ab, sondern auch vom Dämpfungselement und der Federsteifigkeit. Will die Geschwindigkeitsgrenze voll ausgenutzt werden, sollten daher immer zwei Messungen mit unterschiedlichen Winkeln durchgeführt werden.

Bei der Auswertung des Drucks der Kollisionmessungen mit den genannten vier Kanten wurden wie in Abbildung 20 ersichtlich die Ecken nicht berücksichtigt, weil diese das Ergebnis verfälschen würden. Daher wurden nur Druckwerte innerhalb des gelben Vierecks berücksichtigt. Die Messergebnisse sind in Tabelle 7 eingetragen.

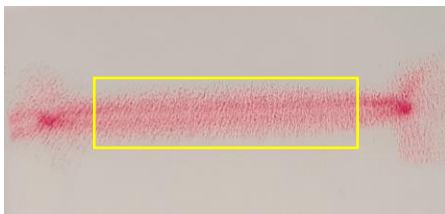


Abbildung 20: berücksichtigte Druckwerte
Quelle: eigene Aufnahme

Geometrie	Vmax [mm/s]					
	Q	K	F0	F0,5	F1	R1
Gesicht	50	0	0	0	0	0
Hände und Finger	50-80	50	50	50-80	50-80	80
Unterarm und Handwurzelgelenke	100	40	50	50-80	50-80	80
Brust	100	0	50	50	50	50-80
Bauch	0	150	0	0	20	0

F0 ... 35mm lange Kante ohne Fase

F0.5 ... 35mm lange Fase mit einer Breite von 0.5mm und einem Fasenwinkel von 45 Grad

F1 ... 35mm lange Fase mit einer Breite von 1mm und einem Fasenwinkel von 45 Grad

R1 ... 35mm lange Rundung mit einem Radius von 1mm

K ... Kugel mit einem Durchmesser von 25 mm

Q ... Quader mit einer Bodenfläche von 1cm²

Tabelle 7: Vmax nach Druckgrenzwert (gültig für transienten und quasistatischen Kontakt)

Quelle: eigene Messdaten

Die Tabelle 7 zeigt unter anderem Richtwerte für die Körperregion „Gesicht“. Zusammenstöße mit dem Kopf und dem Hals sollten, wenn möglich, immer vermieden werden. Speziell Kollisionen mit den Augen sind sehr gefährlich.

4.2.4 Einfluss der Zusatzmasse auf die Kollisionskraft

Um den Einfluss von zusätzlicher Masse am Roboterflansch (z.B. das Werkzeuggewicht) zu analysieren, wurden vier verschiedene Gewichte nacheinander auf den Flansch montiert und Messungen durchgeführt. Die Gewichte wiegen 92, 1282, 2456 und 3568 Gramm.

Wie die Ergebnisse zeigen, wirkt sich eine größere Masse am Flansch des Roboters erst ab Geschwindigkeiten von über 100 mm/s auf die Kollisionskräfte aus (siehe Abbildung 21). Bei 400 mm/s TCP-Geschwindigkeit verändern sich die Kräfte von 316 Newton bei einer Masse von 92 Gramm, auf 390 Newton bei 3568 Gramm Zusatzmasse. Das entspricht etwa einem Anstieg von 23 Prozent bei einer Erhöhung des Gewichts von fast. 3,5 kg.

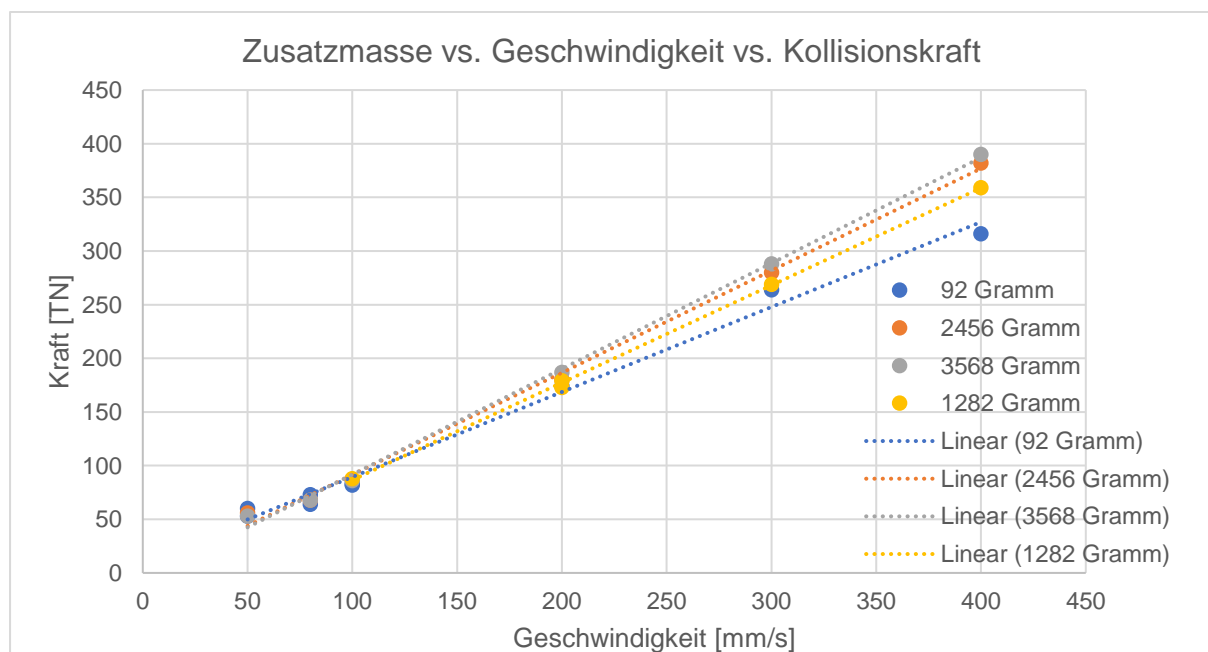


Abbildung 21: Kollisionskräfte bei unterschiedlicher Zusatzmasse

Quelle: eigene Messdaten

4.2.5 Einfluss der Roboterbahn auf die Kollisionskraft

Je nach Bahn konnten beim ABB GoFa trotz identer TCP-Geschwindigkeit unterschiedliche Kollisionskräfte gemessen werden. Wie die nachstehende Abbildung 22 zeigt, erkennt der GoFa Kollisionen schneller, wenn die Bewegungen Rotationen um seine erste Achse sind (siehe Abbildung 23), als wenn die Bahn waagrecht nach außen, radial zur ersten Achse, (siehe Abbildung 24) verläuft.

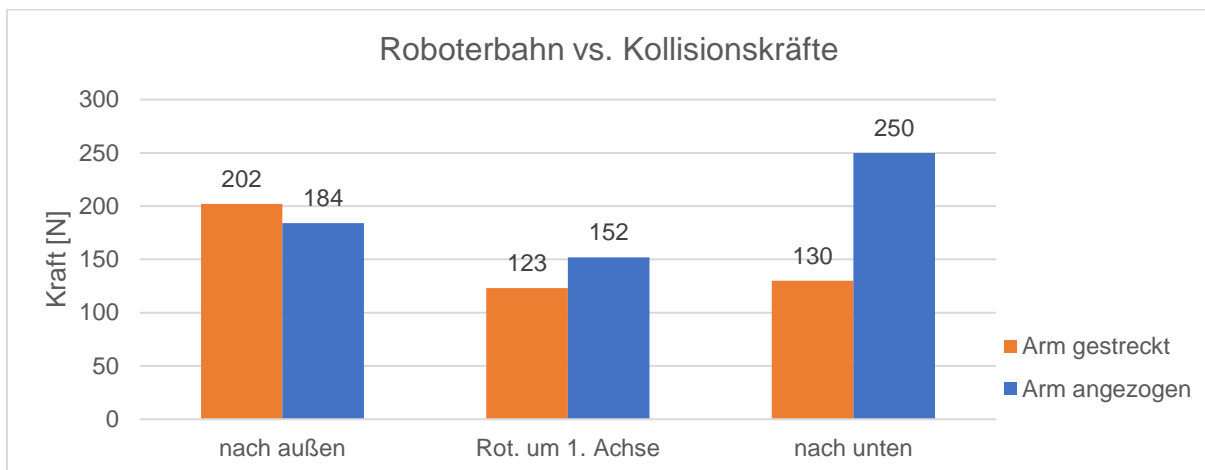


Abbildung 22: Kollisionskräfte bei unterschiedlichen Roboterbahnen

Quelle: eigene Messdaten



Abbildung 23: GoFa-Rotation um die 1. Achse

Quelle: eigene Aufnahme

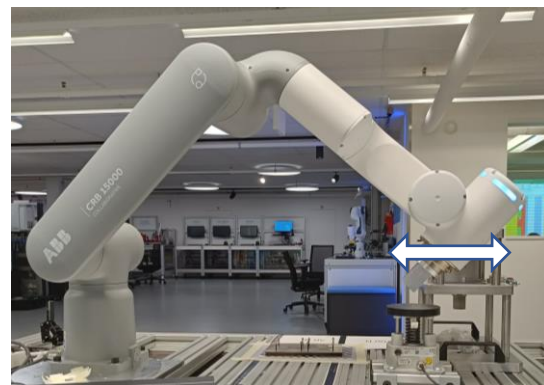


Abbildung 24: GoFa-Bewegung radial nach außen

Quelle: eigene Aufnahme

Bei Roboterbahnen, die senkrecht nach unten verlaufen, kommt es dagegen stark auf die Konfiguration des Roboters an. Die nachstehenden Abbildungen zeigen die unterschiedlichen Ergebnisse zwischen zwei Messungen, bei dessen Versuchsaufbau nur die Bahn des TCPs in X-Richtung variiert. Die Bahnen verlaufen beide senkrecht nach unten starten und enden mit derselben Höhe (Z-Wert). Der einzige Unterschied ist, dass beim ersten Versuch der Roboterarm angezogen und beim zweiten Versuch ausgestreckt ist (siehe Abbildung 25 und Abbildung 26).



Abbildung 25: Bahn der Messung 1

Quelle: eigene Aufnahme



Abbildung 26: Bahn der Messung 2

Quelle: eigene Aufnahme

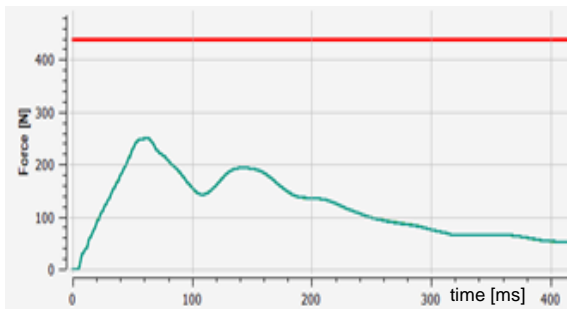


Abbildung 27: Ergebnis Messung 1

Quelle Abbildung 14 und 15: eigene Messungen, ausgewertet mit der PRMS-Software von Pilz

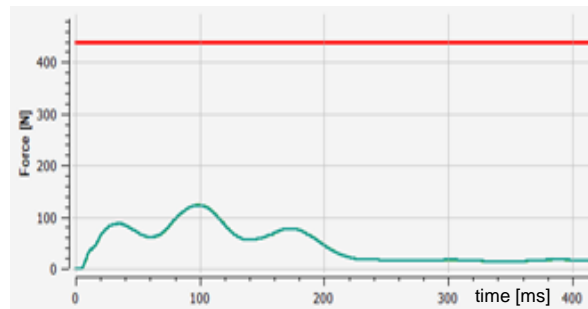


Abbildung 28: Ergebnis Messung 2

Wie die Ergebnisse in Abbildung 27 und Abbildung 28 zeigen, wirkt in der ersten Messung eine höhere Kollisionskraft. Wird in ABBs RobotStudio eine Bewegung programmiert, wird meist nur die Geschwindigkeit des TCPs eingestellt. Da der Bremsweg des Roboters aber abhängig von den Achsgeschwindigkeiten ist, kann es bei verschiedenen Konfigurationen zu unterschiedlichen Kollisionskräften und Drücken kommen, obwohl immer mit derselben TCP-Geschwindigkeit gefahren wird. Im vorherigen Beispiel muss der Roboter bei der ersten Messung die zweite Achse (siehe Abbildung 29) deutlich schneller bewegen als bei der zweiten Messung, um die gewünschte TCP-Geschwindigkeit einhalten zu können. Wird in dieser Applikation ein Sicherheitsstopp ausgeführt, benötigt die zweite Achse in der ersten Messung aufgrund der höheren Achsgeschwindigkeit mehr Zeit, bis sie vollständig abgebremst ist. Dadurch fährt der Roboter ein Stück weiter und es wirken größere Kräfte auf die arbeitende Person.



Abbildung 29: Gofa-Rotation um die zweite Achse

Quelle: eigene Aufnahme

4.3 Erkenntnisse

Bei den im Rahmen der Arbeit durchgeführten Messungen wurden mehrere Probleme ersichtlich. In diesem Kapitel werden die Komplikationen erläutert und Hinweise gegeben, wie diese gelöst oder vermieden werden können.

4.3.1 Problem 1: Kollisionsversuche entsprechen nicht der Realität

Die Kollisionsmessungen zur Überprüfung der Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte mit einem biofidelen Messsystem sind Simulationen, welche versuchen die Kollision mit einem menschlichen Körper nachzustellen. Sollen die Resultate dieser Simulationen zur Validierung der Einhaltung der Grenzwerte dienen, müssen diese auch den realen Ergebnissen entsprechen.

Kraftmessung

Mit der Verwendung verschiedener Federn und Dämpfungselemente können in der Regel bereits gute Messergebnisse erlangt werden, da diese den echten Zusammenstößen schon sehr nahekommen. Ein Parameter, der jedoch nicht von der Simulation berücksichtigt wird, ist die Masse des Menschen. Bei quasistatischen Kollisionen stellt das kein Problem dar, da hier der betroffene Körperteil (bzw. das Messgerät) gegen einen anderen Gegenstand gedrückt wird. Bei transienten Kollisionen wirkt sich die Masse des betroffenen Körperteils deutlich auf die Kollisionskräfte aus, weil der Roboter den Körperteil bei einem Zusammenstoß wegdrückt.

Um transiente Zusammenstöße zu messen, empfiehlt die FB-HM-080, das Messgerät zu fixieren und das gemessene Kraft- bzw. Druckmaximum zu bewerten (siehe Kapitel 3.2). Das

fixierte Messgerät entspricht in diesem Fall einem Körper mit unendlicher Masse. Da die Kollisionskraft mit zunehmender Masse des Körperteils steigt, entspricht das Messergebnis nicht der Kollisionskraft eines realen transienten Zusammenstoßes.

Aber auch die Ergebnisse der Berechnung (siehe Formel 1), wie sie in der ISO/TS 15066 vorzufinden ist, entspricht nicht den realen Werten. Es werden mehrere Annahmen (wie zum Beispiel die Annahme eines vollständig unelastischen Kontakts (siehe [4, Kap. A.3.5])) getroffen, welche nicht den realen Verhältnissen entsprechen.

$$v_{rel, max} = F_{max} / \sqrt{\mu k}$$

$v_{rel, max}$... maximale relative Geschwindigkeit zwischen Roboter und Körperregion des Menschen

F_{max} ... biomechanischer Grenzwert

μ ... die reduzierte Masse des Zwei-Körper-Systems

k ... Federsteifigkeit

Formel 1: Berechnung der maximalen Geschwindigkeit

Quelle: Ausschnitt aus [21, Formel A.6]

Um den Unterschied zwischen einer modellierten Kollision, einer Berechnung und einem realen Stoß zu analysieren, wurden im Rahmen der Arbeit Kollisionsmessungen an einem Dummy durchgeführt (siehe Abbildung 30). Der Dummy hat 80 kg und wird bei den Kollisionen ähnlich wie eine reale Person nach hinten weggedrückt. Aufgrund fehlender Körperspannung und fehlender Reaktionen (z. B. erschrecken / ausweichen) werden auch diese Messungen nicht ident mit den realen Werten einhergehen. Sie werden diesen jedoch im Vergleich zur anderen Messmethode aufgrund der genaueren Modellierung relativ nahekommen. Im folgenden Abschnitt werden die Ergebnisse der Berechnung und der zwei unterschiedlichen Messungen miteinander verglichen.

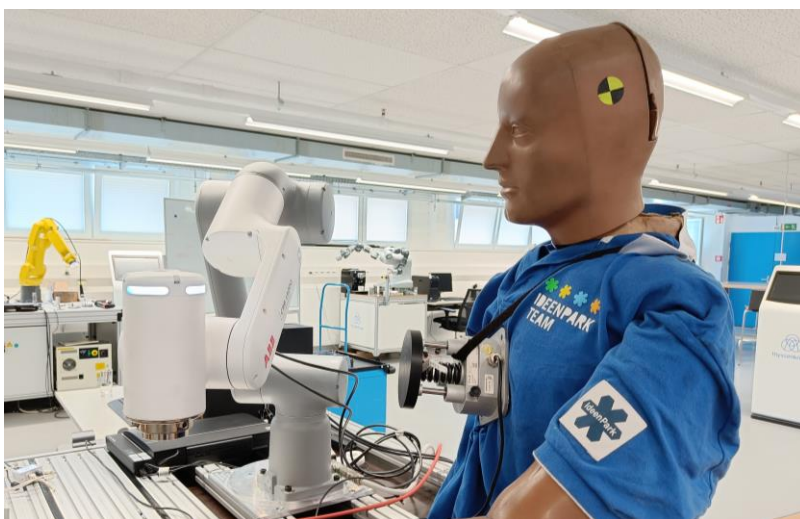


Abbildung 30: Messungen am Dummy

Quelle: eigene Aufnahme

Wie die Abbildung 31 zeigt, sind die Kollisionskräfte höher, wenn das Messgerät fixiert wird. Der Unterschied der Kräfte steigt mit der Geschwindigkeit. Bei einer TCP-Geschwindigkeit von 400 mm/s ist die Kollisionskraft bei einem Zusammenstoß mit der Brust bei einem befestigten Messgerät ca. 100 Newton höher als bei den Messungen am Dummy. Die Ergebnisse der Berechnung nach Formel 1 weichen dagegen um nur ca. 50 Newton ab.

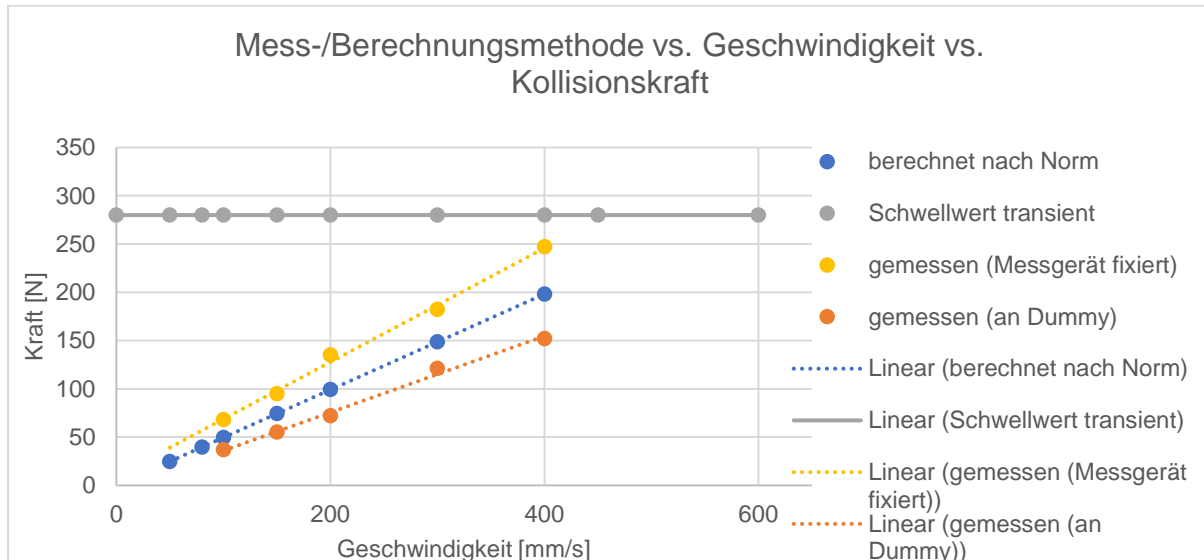


Abbildung 31: Vergleich der Ergebnisse

Quelle: eigene Messdaten

Die Abweichungen der Kollisionskräfte werden mit Körperregionen mit geringerer effektiver Masse als die der Brust, vermutlich noch größer sein, da diese Regionen mit noch geringerer Energie zurückgedrückt werden können.

Druckmessung

Soll ein quasistatischer Kontakt gemessen werden, wird die Messung meistens wie in Abbildung 32 ersichtlich durchgeführt. Das Messgerät ist dabei parallel zur Kontaktfläche ausgerichtet. Das erste Problem dieses Aufbaus ist, dass die Kontaktfläche des Messgeräts nur selten der Fläche der betroffenen Körperzone entspricht. Das zweite Problem ist, dass die Körperzone nur in sehr seltenen Fällen parallel zur Kontaktfläche des Gegenstands steht.

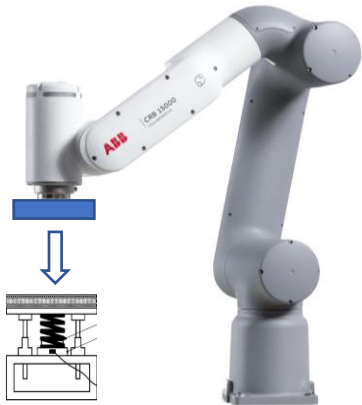


Abbildung 32: typische Messung eines quasistatischen Kontakts

Quelle: modifizierte und zusammengesetzte Abbildung aus [21] und [32, S. 4]

Um den Unterschied zwischen der Messung und der Realität zu analysieren, wurde ein weiterer Versuch durchgeführt. Es wurde eine quasistatische Kollision zwischen einem Finger und einem Quader mit 1 cm^2 Bodenfläche angenommen. Zuerst wurde mit einer TCP-Geschwindigkeit von 50 mm/s mit dem Quader auf das Messgerät gefahren (mit parallelen Kontaktflächen). Die Druckmessung ist fehlgeschlagen, weil der Druckwert unter dem Minimum der Druckmessfolie ($<50 \text{ N/cm}^2$) lag. Darauf wurden an jener Stelle, an der das Messgerät fixiert war, ein künstlicher Finger und Druckmessfolien platziert (siehe Abbildung 33). Da der Finger aufgrund seiner Geometrie nicht parallel zu der Fläche des Quaders ist, reduziert sich die Kontaktfläche und der Quader kollidiert nun zusätzlich mit seiner scharfen Kante. Die Druckwerte waren deshalb über dem Maximum der Druckmessfolie ($>300 \text{ N/cm}^2$).

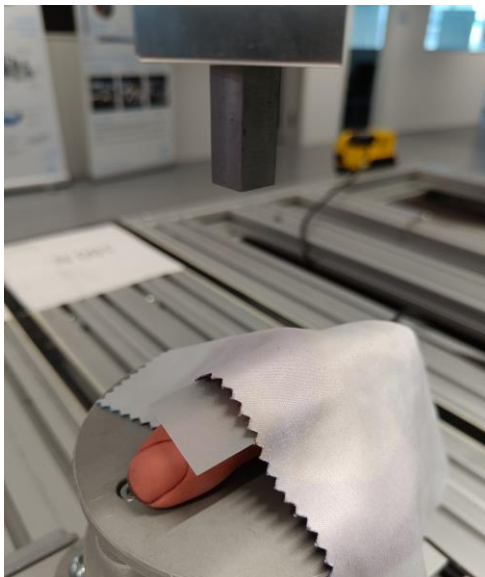


Abbildung 33: Druckmessung mit künstlichem Finger

Quelle: eigene Aufnahme

Wie dieser Versuch zeigt, kann die Druckmessung stark von der Realität abweichen. Da ein Finger häufig die betroffene Körperzone bei quasistatischen Kollisionen ist, kann es Sinn machen, bei der Validierung Messungen mit einem künstlichen Finger durchzuführen. Ein weiterer Vorteil dieser Messmethode ist, dass der Finger kleiner ist als das Messgerät, und dadurch auch an Stellen gemessen werden kann, an denen das Messgerät keinen Platz hat oder nicht fixiert werden kann (z. B. auf unebenen Flächen).

4.3.2 Problem 2: kein zeitlicher Verlauf des Drucks vorhanden

Der Unterschied einer Kollisionsmessung bei quasistatischen Szenarien gegenüber Transienten ist, dass bei quasistatischen Messungen nicht nur der Maximaldruck, sondern auch der maximale Druck ab 0,5 Sekunden nach der Kollision relevant ist (siehe Kapitel 3.2). Mit den Druckmessungen, die mit den Druckmessfolien durchgeführt werden, können jedoch keine zeitlichen Verläufe des Drucks aufgezeichnet werden. Es können lediglich der Maximaldruck und die Druckverteilung ermittelt werden.

Eine mögliche Lösung des Problems wären zum Beispiel elektronische Foliensensoren wie das Druckmess-Set „CoboSafe-Tek“ von GTE. Dieses Set kann über die Foliensensoren zusätzlich zum Maximaldruck und der Druckverteilung auch den Druckverlauf ermitteln.[37]

Im Rahmen der Kollisionsmessungen mit dem ABB GoFa ist aufgefallen, dass die Kollisionskraft 0,5 Sekunden nach dem Zusammenstoß, bei den meisten Messungen im Bereich von 15 Newton bis 25 Newton liegt. Auch bei Messungen mit einer Maximalkraft von 390 Newton und einer Zusatzmasse von rund 3,5 kg war der höchste Wert nach 0,5 Sekunden nur 15 Newton. Das entspricht in diesem Fall weniger als 4 Prozent des Maximums und ist deutlich kleiner als die biomechanischen Schwellwerte für quasistatische Zusammenstöße. Da der Druck direkt proportional zur Kraft ist, kann davon ausgegangen werden, dass bei den durchgeführten Messungen auch der Druck 0,5 Sekunden nach der Kollision die Grenzwerte nicht überschritten hat, sofern in der ersten halben Sekunde der quasistatische Grenzwert nicht oder nur wenig übertreten wurde und sich die Kraft, wie geschildert nach 0,5 Sekunden deutlich verringert hat. Wenn der Druckwert in der ersten halben Sekunde über dem quasistatischen Grenzwert liegt und die Kraft nach einer halben Sekunde nicht wesentlich geringer geworden ist, wie das zum Beispiel bei einer Quetschung des Fingers in einem Greifer sein könnte, ist dieses Argument nicht gültig. In einem solchen Fall sollten Messmethoden, die einen zeitlichen Verlauf des Drucks aufzeichnen können, wie zum Beispiel die erwähnten elektronischen Foliensensoren, verwendet werden oder der Druck muss so weit reduziert werden, dass auch der Maximalwert unter der quasistatischen Grenze liegt.

4.3.3 Problem 3: Druckmessfolien sind nicht dehnbar

Trifft ein Gegenstand auf einen menschlichen Körper, wird dieser ein Stück weit in den Körper hineingedrückt. Betrachtet man dieses Hineindrücken genauer, wird deutlich, dass sich die menschliche Haut um den Gegenstand legt (siehe Abbildung 34), weil sie dehnbar ist.



Abbildung 34: Kugel trifft auf Unterarm

Quelle: eigene Aufnahme

Bei der Durchführung von Druckmessungen, werden hingegen nicht dehnbare Druckmessfolien verwendet. Beispielsweise können sich bei einer Kollision mit einer Kugel die Messfolien nicht wie die Haut an die Kugelform anpassen. Das führt dazu, dass sich die Folien wie in Abbildung 35 ersichtlich falten.

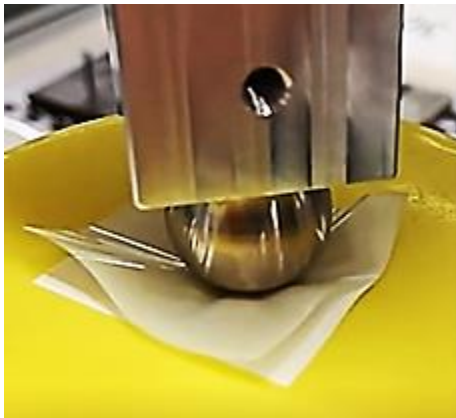


Abbildung 35: Faltenbildung bei Messversuchen

Quelle: eigene Aufnahme

Wie die Messfolie in Abbildung 36 zeigt, erhöhen diese Falten den Druckwert. Umso weicher das Dämpfungselement, desto größer wird dieser Effekt, weil die Kugel noch tiefer in das Dämpfungselement gedrückt wird und die Folie sich somit noch mehr um die Kugel legen müsste. Da diese Erscheinungen nicht bei realen Kollisionen vorkommen, ist das Ermitteln des echten Druckwerts in diesem Fall mit den Messfolien nicht möglich. Der Druckwert innerhalb des gelben Kreises in Abbildung 37 ist nur leicht von den Falten betroffen und kann als Richtwert für den Druck herangezogen werden.



Abbildung 36: Druckbild einer Kugel mit Falten in den Folien

Quelle: eigene Aufnahme



Abbildung 37: Druckbild ohne Berücksichtigung der Falten

Quelle: eigene Aufnahme

Aufgepasst muss bei anderen Geometrien werden. Zum Beispiel zeigt Abbildung 38 das Druckbild einer Kollision mit einem Würfel. Hier müssen die dunkelroten Kanten, welche ein Viereck ergeben, mitgemessen werden. Wie in der Abbildung 41 ersichtlich, sind diese dunklen Kanten nicht den Falten verschuldet. Diese entstehen durch die Biegung des Dämpfungselements bzw. der menschlichen Haut (siehe 4.3.4).

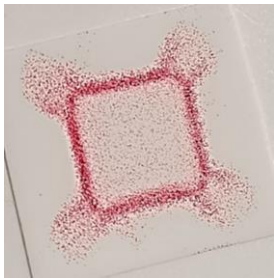


Abbildung 38: Druckbild eines Würfels

Quelle: eigene Aufnahme

Bei Druckbildern wie in Abbildung 39 ist es schwer, die Ursache der dunkelroten Striche zuzuweisen. Diese könnten von der Biegung des Dämpfungselements, von Falten in den Folien oder von ganz anderen Ereignissen kommen. Aus diesem Grund ist das Ignorieren dunkler Striche auf dem Druckbild nicht empfehlenswert, wenn die Ursache nicht eindeutig den Falten zugeordnet werden kann.



Abbildung 39: ungewöhnliches Druckbild

Quelle: eigene Aufnahme

4.3.4 Problem 4: komplexer Zusammenhang zwischen Druck und Kraft

Wie Formel 2 zeigt, hängen der Druck und die Kraft über die Kontaktfläche zusammen.

$$p = F/A$$

p ... Druck

F ... Kraft

A ... Fläche

Formel 2: Zusammenhang zwischen Druck und Kraft

Somit könnte vermutet werden, dass sich bei einer Verdoppelung der Kollisionskraft durch das Erhöhen der TCP-Geschwindigkeit auch die Druckwerte verdoppeln, solange die Geometrie dieselbe bleibt. Kollisionsversuche mit dem Quader (Q) und der Körperregion „Hand“ (Ergebnisse siehe Abbildung 40) haben jedoch gezeigt, dass dies eine falsche Annahme ist, da sich die Kontaktfläche trotz der gleichbleibenden Geometrie mit der TCP-Geschwindigkeit verändert.

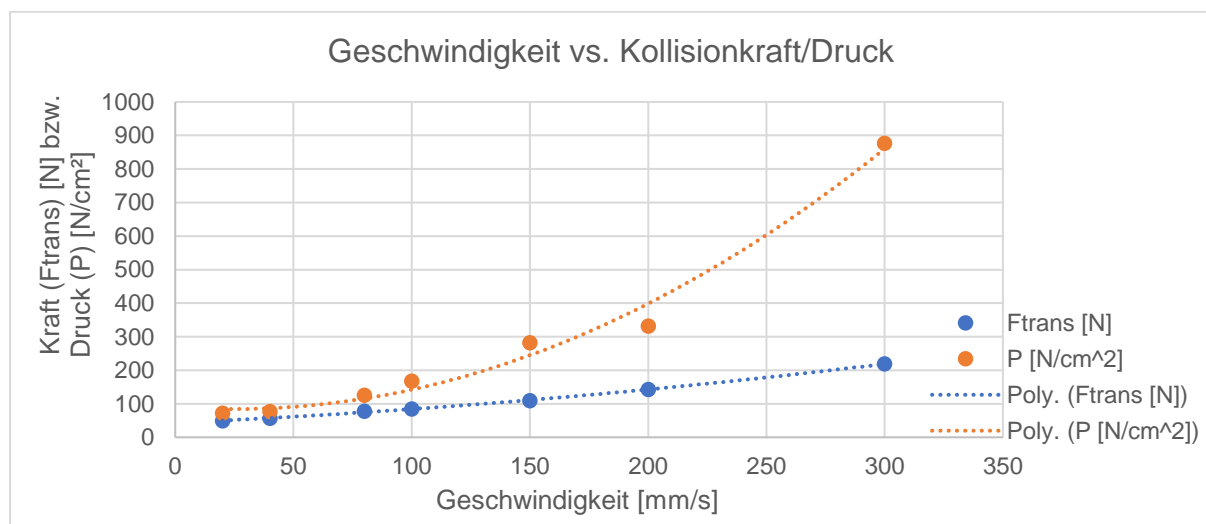


Abbildung 40: Druck und Kraft bei Kollisionen mit einer künstlichen Hand bei unterschiedlichen Geschwindigkeiten

Quelle: eigene Messdaten

Erhöhen sich die Kräfte (F_{trans}), wird der Kollisionsgegenstand mehr in das Dämpfungselement bzw. in den menschlichen Körper gedrückt. Dadurch vergrößert sich die Kontaktfläche. Noch ausschlaggebender ist allerdings, dass mit dem Erhöhen der Geschwindigkeit bzw. der Eintrittstiefe Phänomene wie das Falten der Messfolien (siehe 4.3.3) oder die Biegung der Dämpfungselemente verstärkt werden.

Es konnten am obigen Beispiel keine roten Striche bzw. Bereiche aufgrund von Falten vernachlässigt werden, da die Ursache nicht sicher auf die Falten zurückgeführt werden konnte.

Wie Abbildung 41 verdeutlicht, verlagern sich die Kräfte bei einer Biegung des Dämpfungselements auf den Rand des Kollisionsgegenstands. Je nach Gegenstand kann es

vorkommen, dass die Mitte des Gegenstands das Dämpfungselement nicht berührt. Es erhöht sich somit der Druck, weil sich die Kräfte auf eine kleinere Fläche konzentrieren. Umso weicher das Dämpfungselement und umso größer die Geschwindigkeit bzw. die Eintrittstiefe, desto bedeutender wird dieser Effekt. Die Druckbilder in Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen, wie sich das rote Rechteck bei höheren Geschwindigkeiten verstärkt und die Fläche innerhalb des Rechtecks heller wird.



Abbildung 41: Skizze der Biegung des Dämpfungselements

Quelle: eigene Skizze

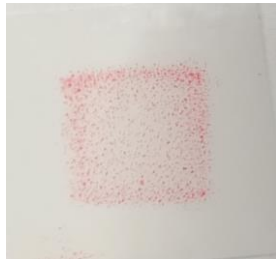


Abbildung 42: Kollision mit Quader bei geringer Geschwindigkeit

Quelle: eigene Aufnahme



Abbildung 43: Kollision mit Quader bei hoher Geschwindigkeit

Quelle: eigene Aufnahme

4.3.5 Problem 5: geringe Wiederholgenauigkeit der Druckmessungen

Werden mehrere idente Druckmessungen durchgeführt, können sich wie zum Beispiel in Abbildung 44, für jede Messung unterschiedliche Druckwerte ergeben.

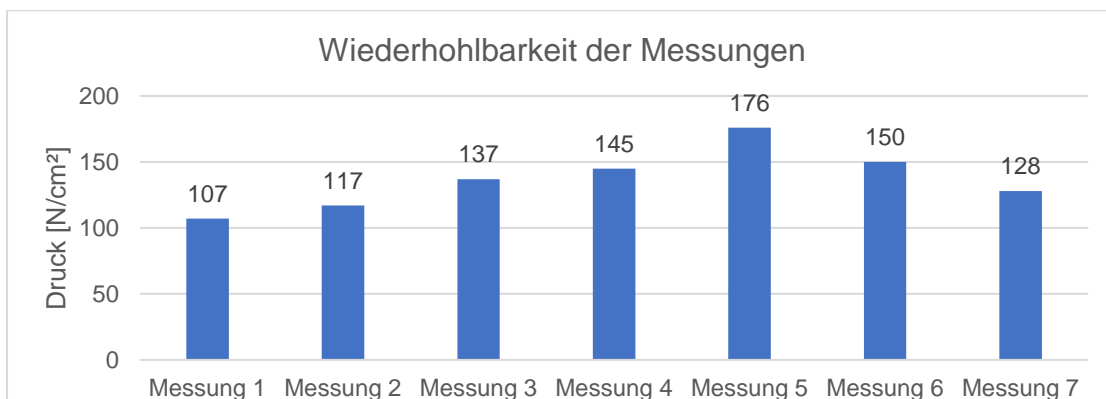


Abbildung 44: Druckwerte 7 identer Messungen

Quelle: eigene Messdaten

Laut Hersteller liegt die Toleranz der Druckmessfolien bei +/- 10 Prozent des Maximalwerts der Folie. Bei der erwähnten Versuchsreihe wurde eine Druckmessfolie mit einem Maximalwert bei 300 N/cm² verwendet. Somit ergibt sich bei einem realen Druckwert von 140 N/cm² eine Spanne von 110 N/cm² bis 170 N/cm². In dieser Versuchsreihe wurden Schwankungen von ca. +/- 12 Prozent gemessen.

Sehr auffällig ist, dass die Druckwerte bis zur Messung 5 stets angestiegen sind und dann bis zur Messung 7 wieder abgenommen haben. Es wurde bei den Versuchen auf eine einheitliche Versuchsdurchführung sowie auf die Sauberkeit aller Komponenten geachtet. Eine mögliche Erklärung ist, dass ein noch nicht berücksichtigter Parameter, wie zum Beispiel die Temperatur des Scanners, welcher für das Scannen der Druckmessfolien zuständig ist, diese Schwankungen verursacht.

4.3.6 Problem 6: zu geringer TFS-Grenzwert

Im Zuge der Reduzierung der Kollisionskräfte (siehe Kapitel 4.2.2) wurde eine Versuchsreihe mit verschiedenen TFS-Grenzwerten gestartet. Begonnen wurde mit einem hohen TFS-Wert, der bei jeder Messung weiter reduziert wurde. Ab einem gewissen TFS-Grenzwert konnte der Roboter die Bewegung nicht mehr starten und die Messung somit nicht durchgeführt werden. Das könnte an einer zu ungenauen Ermittlung des Massenträgheitsmoments des Werkstücks bzw. des Werkzeugs liegen (diese Werte müssen in den Einstellungen des SafeMoves eingetragen werden), es könnte aber auch eine Schwäche des GoFas oder ein anderer Grund dafür verantwortlich sein.

Das Problem kann oft durch das Reduzieren der Achsbeschleunigungen behoben werden (genauerer siehe 5.2.6).

4.4 Reflexion der Validierungsmethode

Umso mehr die Messwerte den realen Kollisionswerten entsprechen, desto sicherer kann eine Applikation gestalten werden. Eine Überprüfung der in der Risikobeurteilung festgelegten biomechanischen Grenzwerte macht nur dann Sinn, wenn die Grenzwerte angemessen ausgewählt sind und die Messergebnisse möglichst den realen Kollisionswerten entsprechen. Folgende Punkte können die Validität der Ergebnisse verringern:

- Die Federn und die Dämpfungselemente modellieren die Federsteifigkeit und Dämpfung der menschlichen Körperregionen. Was jedoch nicht berücksichtigt wird ist, dass jede Person andere Körpereigenschaften besitzt. Es gibt muskulöse Menschen, Menschen mit hohem oder geringem Körperfettanteil, Menschen mit Brüsten und vielen anderen Merkmalen, welche die Feder- und Dämpfungseigenschaften einer Körperregion verändern. Zudem beeinflusst das Körpergewicht die Kollisionskräfte bei einem

transienten Stoß. Auch ist es aufwändig eine Bahn zu bestimmen, welche nicht auf Kopfhöhe verläuft, wenn an der Applikation verschieden große Personen arbeiten.

Weiters wird die Bekleidung der arbeitenden Personen nicht berücksichtigt. Wenn Falten der Kleidung, Hosen-/Hemdknöpfe, Brillen oder Schmuckstücke zur Kontaktfläche werden, verändern sich die Druckwerte bei einer Kollision.

Um eine sichere Applikation zu gewährleisten, müssen die genannten Punkte (unterschiedliche Körper, Bekleidung, Schmuck, ...) in der Risikobeurteilung oder in der Bedienungsanleitung bzw. Benutzerinformation berücksichtigt werden. Für das Thema „Knöpfe“ müssen beispielsweise in der Risikobeurteilung Kollisionen mit den Knöpfen berücksichtigt werden, oder es muss in der Bedienungsanleitung / Benutzerinformation klargestellt werden, dass nur Kleidungsstücke ohne Knöpfe genehmigt sind.

- Die in der ISO/TS 15066 vorgeschlagenen biomechanischen Grenzwerte wurden anhand einer Studie zur Schmerzeintrittsgrenze festgelegt. Da jede Person ein anderes Schmerzempfinden hat, ist auch diese Grenze nicht allgemein gültig. Das Buch „Biomechanische Grenzwerte für die sichere Mensch-Roboter-Kollaboration“ von Roland Behrens [6] beschäftigt sich ausführlich mit den Schmerz- und Verletzungseintrittsgrenzen und könnte für die Festlegung der biomechanischen Grenzwerte in der Risikobeurteilung einen wichtigen Input liefern.
- Weiters stellt sich die Frage, wie aussagekräftig die Kollisionsmessungen mit der maximal erlaubten TCP-Geschwindigkeit sind. Bei Kollisionen ist die Relativgeschwindigkeit zwischen den Kollisionsobjekten und nicht die TCP-Geschwindigkeit ausschlaggebend. Um die Geschwindigkeit der Hand einer arbeitenden Person abzuschätzen, wurde ein Versuch durchgeführt, bei dem ein Zeitlupenvideo einer „Pick and Place“-Bewegung eines Menschen aufgezeichnet wurde. Wie die Abbildung 45 zeigt, wurde im Hintergrund eine Stoppuhr mitgefilmt. Das Video zeigte, dass die Hand innerhalb von 0,25 Sekunden eine Strecke von 500 mm zurücklegt, was einer Geschwindigkeit von 2.000 mm/s entspricht. Ein weiterer Durchgang ergab, dass die maximale Geschwindigkeit der Hand bei über 10.000 mm/s liegen kann. (Zum Vergleich: Gute Profipitcher können Bälle mit bis zu 160 km/h werfen [38]. Das entspricht einer Geschwindigkeit von über 44.000 mm/s.) Wird nun richtigerweise die Relativgeschwindigkeit beachtet, könnte diese beispielsweise 2.000 mm/s schneller sein als die TCP-Geschwindigkeit. Theoretisch gesehen müsste sich der Roboter gar nicht bewegen, um bei einer Kollision mit der Hand und dem Roboter die biomechanischen Grenzwerte zu überschreiten.

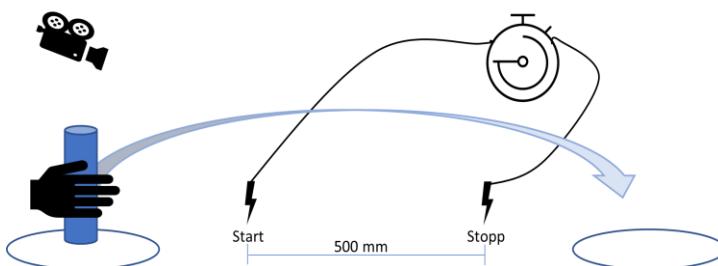


Abbildung 45: Versuchsaufbau zur Ermittlung der Geschwindigkeit der Hand einer arbeitenden Person

Quelle: eigene Skizze

5 Gestaltungsempfehlung für kollaborative Applikationen mit dem ABB GoFa

Für viele Unternehmen ist das Realisieren von kollaborativen Applikationen mit dem Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip eine große Hürde. Meist gibt es noch keine oder nur wenig Erfahrung mit dem Thema. Es gelten neue Normen und damit verbunden neue Methoden zur Validierung. Durch die mangelnde Erfahrung fällt es den arbeitenden Personen oft schwer, eine Applikation auf Anhieb richtig zu gestalten. Mit mehr Erfahrung könnte zum Beispiel eine angemessene TCP-Geschwindigkeit, ein geeigneter TFS-Grenzwert oder ein optimal designter Greifer schon vorab bei der Gestaltung berücksichtigt werden.

Wenn diese Erfahrung jedoch fehlt, ergibt sich bei der Implementation einer neuen Anwendung meist folgender Kreislauf:

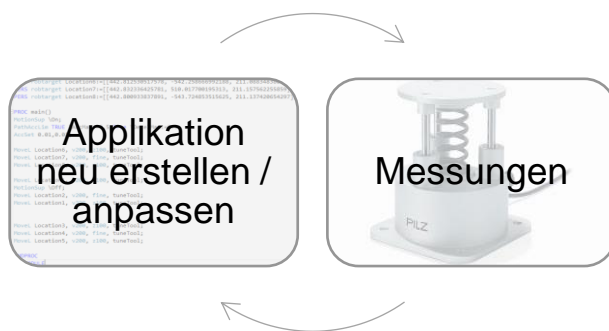


Abbildung 46: unerwünschter Kreislauf bei der Realisierung kollaborativer Anwendungen

Quelle: eigene Abbildung, Hintergrund links: eigener Code aus ABBs RobotStudio, Hintergrund rechts: [34]

Nachdem die Anwendung erstellt wurde, wird eine Messung zur Überprüfung der Einhaltung der Kraft- und Druckschwellwerte durchgeführt. Werden die Werte überschritten, müssen Maßnahmen getroffen werden. Diese könnten beispielsweise durch das Abdecken bzw. Polstern oder das Abrunden von Ecken erfolgen. Auch das Verändern der Bahn, ein anderes Design des Greifers oder das Ändern diverser Einstellungen am Roboter können zielführend sein. Was in jedem Fall die Messwerte verringert, ist das Reduzieren der Robotergeschwindigkeit. Das bedeutet gleichzeitig aber auch eine Vergrößerung der Taktzeit, weshalb gut abgewogen werden sollte, welche Maßnahmen eingesetzt werden. Sind die Messwerte deutlich unter den Schwellwerten, kann die Taktzeit verbessert werden, indem die Robotergeschwindigkeit erhöht wird. Somit wird dieser Kreislauf in der Regel erst unterbrochen, wenn die Messwerte nahe den Schwellwerten, aber immer noch darunter liegen.

Ein Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, mithilfe verschiedenster Gestaltungsempfehlungen diesen Kreislauf frühzeitig zu unterbrechen. Die Empfehlungen leiten sich aus den Anforderungen an kollaborative Anwendungen und aus den Messergebnissen und den daraus resultierenden Erkenntnissen in den Kapiteln 4.2 und 4.3 ab.

Das Kapitel wurde in die Themen „Gestaltung allgemein“ und „Gestaltung applikationsspezifisch“ unterteilt. Die allgemeinen Empfehlungen sind bei allen kollaborativen Anwendungen nahezu ident und können meist unverändert angewandt werden. Die applikationsspezifischen Empfehlungen hingegen ändern ihre Werte bei jeder Applikation. Am Ende des Kapitels wird der Einfluss beschriebener Empfehlungen auf die Kollisionskraft und den Druck zum Thema.

5.1 Grenzen der Empfehlungen

Die folgenden Gestaltungsempfehlungen beziehen sich nur auf das Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip.

Alle Kollisionsversuche wurden mit dem ABB GoFa durchgeführt, wodurch die Ausführungen der vorliegenden Arbeit auf diesen Ergebnissen basieren.

Die Gestaltungsempfehlungen wurden so ausgelegt, dass durch deren Einhaltung keine der zuvor genannten Anforderungen verletzt werden. Allerdings sind nur durch das Einhalten dieser Empfehlungen nicht alle Anforderungen abgedeckt, d. h. diese Arbeit ersetzt keinesfalls die geltenden Normen und Gesetze. Nicht alle Themen aus der Norm werden in diesen Empfehlungen behandelt, genauso sind aber auch Teile der Empfehlungen nicht in den Normen beschrieben.

5.2 Gestaltung allgemein

Bei allen Anwendungen sollten gewisse Gestaltungsprinzipien eingehalten werden. Diese allgemein gültigen Empfehlungen zur Gestaltung werden im Folgenden beschrieben. Die Ratschläge enthalten diese Punkte:

- Umgebung gestalten
- Werkzeug und Werkstück gestalten
- Geschwindigkeit begrenzen
- Roboterbahn auslegen
- Übergeordnete Tool-Force Supervision einrichten
- Beschleunigung begrenzen
- „motion supervision“ verwenden

5.2.1 Umgebung gestalten

Durch eine gute Wahl bzw. Gestaltung des Kollaborationsraums können einige Gefährdungen schon im Vorhinein beseitigt werden. Laut dem Kapitel 4.2 in der ISO/TS 15066 ist es wichtig,

Faktoren wie Hindernisse, Zugänglichkeit für Bedienpersonen oder mit Rutschen, Stolpern oder Stürzen verbundene Gefährdungen zu berücksichtigen.

Daher gilt die Empfehlung, einen übersichtlichen Arbeitsbereich ohne Säulen, Kästen oder anderen Gegenständen in der Nähe zu wählen, damit kein Klemmrisko für die arbeitende Person besteht oder sie bei Bedarf besser Ausweichen kann. Das sichtbare Abgrenzen der Zugangswege für Bedienpersonen (z. B. durch Markierungen am Boden) und des Kollaborationsbereichs könnten ebenfalls die Übersichtlichkeit des Kollaborationsraums erhöhen. Um ein Stolperisiko zu vermeiden, sollten sich keine Kabel, Schläuche, Materialkisten und Ähnliches in den Zugangswegen befinden.

5.2.2 Werkzeug und Werkstück gestalten

Die Geometrie eines Kollisionsobjekts kann (wie in Kapitel 4.2.3 analysiert) einen großen Einfluss auf die Drücke bei einer Kollision und dadurch auf die maximal zulässige TCP-Geschwindigkeit haben. Sehr scharfe oder spitze Geometrien, die beispielsweise bei Nadeln oder Messer zu finden sind, dürfen sich laut der ISO/TS 15066 niemals im Kontaktbereich befinden [4, Kap. 5.5.5.3]. Diese würden für deutlich zu hohe Druckwerte führen und könnten auch die Haut einer arbeitenden Person durchdringen und zu Verletzungen führen. Laut der Norm gehören unter anderem das Abrunden von Kanten, das Verwenden von glatten oder nachgiebigen Oberflächen sowie das Polstern von Oberflächen zu den passiven sicherheitstechnischen Gestaltungsverfahren [4, Kap. 5.5.5.4].

Da die Geometrie wie erwähnt einen hohen Einfluss auf die Kollisionsdrücke hat, ist die Auswahl bzw. die Gestaltung des richtigen Werkzeugs und Werkstücks bei kollaborativen Anwendungen sehr wichtig. Sie ist oft ausschlaggebend, ob eine kollaborative Anwendung den Anforderungen entsprechen kann oder nicht. Eine schlecht gewählte Geometrie erhöht den Druck bei Kollisionen. Dadurch muss die TCP-Geschwindigkeit verringert werden, wobei bei scharfen Formen die biomechanischen Grenzwerte schon bei kleinsten Geschwindigkeiten überschritten werden können und so die Anwendung nicht in Betrieb genommen werden kann.

Neben der Geometrie muss jedoch auch auf andere Punkte, wie zum Beispiel die Schließkraft eines Greifers geachtet werden. Damit keine Probleme mit Druckwerten und anderen Gefährdungen ausgehend von aktiven Tools oder der Geometrie des Werkzeugs / Werkstücks entstehen können, sollten folgende Empfehlungen eingehalten werden.

- Form und Gewicht

Spitzen und scharfe Kanten sollten bei der Gestaltung bzw. der Auswahl prinzipiell vermieden werden. Dagegen sind runde, großflächige Formen anzustreben, damit bei einer Kollision die Druckwerte möglichst geringgehalten werden können. Es sollten zudem keine Scherstellen vorhanden sein. Können kleinflächige, spitze oder scharfe Geometrien nicht vermieden

werden, wird empfohlen diese zu polstern oder sie von der arbeitenden Person abzuwenden, damit diese bei einer Kollision nicht zur Kontaktfläche werden. Auch könnte ein Greifer so gestaltet werden, dass er die scharfen Geometrien des Werkstücks abdeckt, damit kein Verletzungsrisiko mehr besteht.

- **Aktive Tools**

Bei Greifern aller Art sollten die Greifkräfte einstellbar sein, denn auch beim Einklemmen eines Körperteils in den Greifer gelten die biomechanischen Schwellwerte. Benötigt das Greifen eines Objekts eine große Greifkraft, könnte folgendes Vorgehen eventuell helfen. Der Greifer schließt zuerst mit einer geringen Kraft. Dann wird überprüft, ob der Greifer die gewünschte Position erreicht hat oder ob ihn ein Fremdkörper daran gehindert hat. Erst jetzt erhöht der Greifer seine Kraft auf den benötigten Wert.

Die biomechanischen Schwellwerte und alle anderen Anforderungen gelten natürlich für jede Art an Zusatzperipherie. Werkzeuge mit Fräsköpfen oder Werkzeuge, die hohe Temperaturen verursachen (z.B. Schweißgeräte), werden in den meisten Fällen nicht alle Anforderungen einhalten können.

5.2.3 Geschwindigkeit begrenzen

Wie in Kapitel 4.2.3 erforscht, verursacht eine hohe Geschwindigkeit in der Regel auch eine hohe Kollisionskraft und einen hohen Druck. Zudem haben Kollisionsversuche im Rahmen der Arbeit gezeigt, dass hohe Geschwindigkeiten die Bedienperson stressen können. Das kann die Person auf Dauer ermüden bzw. auch ein Mangel an Konzentration verursachen. Auch eine Studie des Instituts für Arbeitsschutz der deutschen gesetzlichen Unfallversicherung (IFA) hat durch Versuche mit einem kollaborierenden Roboter in virtueller Realität bewiesen, dass durch eine Erhöhung der Bewegungsgeschwindigkeit eines Roboters auch die erlebte Anstrengung steigt [39, Kap. 4].

Aus diesem Grunde wird empfohlen alle Geschwindigkeiten im Kollaborationsraum auf maximal 400-500 mm/s zu beschränken. Die Kollisionsmessung aus Kapitel 4 wurden mit einer TCP-Geschwindigkeit von bis zu 400 mm/s durchgeführt. Diese Geschwindigkeit wird subjektiv bereits als unangenehm empfunden. Es kann auch das Gefühl erweckt werden, dass ein Ausweichen nicht mehr möglich ist, was eine beunruhigende Wirkung auf die Bedienpersonen haben kann. Auch wird es der arbeitenden Person wahrscheinlich schwerfallen, sich auf ihre Arbeit zu konzentrieren. Um die ausgewählte Geschwindigkeitsgrenze nicht zu überschreiten, sollte eine übergeordnete Überwachung der Geschwindigkeit eingerichtet werden, welche den Roboter beim Übertreten der Geschwindigkeitsgrenze sofort stoppt. Diese Überwachung kann in ABBs RobotStudio in den SafeMove Einstellungen erstellt werden.

Das genannte Problem bezieht sich nicht nur auf die TCP-Geschwindigkeit, sondern auch auf Geschwindigkeiten einzelner Roboterteile. Sind bei einer Anwendung diese Geschwindigkeiten höher als die TCP-Geschwindigkeit, ist eine Begrenzung der Achsgeschwindigkeiten ratsam.

Neben der Geschwindigkeit ist auch die Autonomie des Roboters ein wichtiger Parameter. Das Erhöhen der Autonomie reduziert die Leistung der arbeitenden Personen [39, Kap. 4].

5.2.4 Roboterbahn auslegen

Kollisionen mit dem Gesicht müssen wie in Kapitel 4.2.3 in Tabelle 7 ersichtlich, in den meisten Fällen vermieden werden. Auch die ISO/TS 15066 besagt, dass Kollisionen mit empfindlichen Körperregionen wie der Schädel, die Stirn, der Kehlkopf, die Augen, die Ohren oder das Gesicht, verhindert werden sollen [4, Kap. 5.5.5.3].

Um solche Kollisionen zu vermeiden, empfiehlt sich die Roboterbahn schon bei der Gestaltung so zu legen, dass diese Zusammenstöße möglichst ausgeschlossen werden könne. Benötigt ein Arbeitsschritt bzw. eine Bewegung keine Mitarbeit der Bedienperson, sollte diese deshalb außerhalb der Reichweite der arbeitenden Person durchgeführt werden. Schnellere Bewegungen des Roboters könnten beispielsweise ein Meter (je nach Tischhöhe auch weniger oder mehr) hinter der Tischkante gefahren werden, da dieser Bereich mit dem Kopf nicht erreicht werden kann. Gibt es keine andere Möglichkeit, als auf Kopfhöhe vor der arbeitenden Person zu fahren, muss diese Situation in der Risikobeurteilung genau analysiert werden. Anhand der Beurteilung wird entschieden, ob das Risiko tolerierbar ist oder nicht.

Ein weiterer wichtiger Punkt der Bahnplanung ist das Thema Achsgeschwindigkeit. Wie im Kapitel 4.2.5 erwähnt, können diese die Kollisionskräfte stark beeinflussen. Da in der Nähe von Singularitäten hohe Achsgeschwindigkeiten auftreten, wird empfohlen die Bahn so zu legen, dass der Roboter nicht nahe einer Singularität kommt, um später keine aufwändigen Maßnahmen treffen zu müssen.

Gibt es keine Möglichkeit die Bahn zu verändern, können die einzelnen Achsgeschwindigkeiten anstatt der TCP-Geschwindigkeit begrenzt werden. Somit bewegt sich keine Achse schneller als die maximal eingestellten Achsgeschwindigkeit. Eine weitere Möglichkeit ist die Begrenzung des Drehmoments einer einzelnen Achse oder mehrerer Achsen.

5.2.5 Übergeordnete Tool-Force Supervision einrichten

Ebenso wie die Geschwindigkeit der gesamten Applikation begrenzt werden sollte, wird auch das Einrichten einer übergeordneten TFS empfohlen, um bei allen möglichen Kollisionen die Kräfte auf ein gewisses Level zu reduzieren. Somit kann auch außerhalb der „safe zones“ (siehe Kapitel 5.3.1) und auch außerhalb des kollaborierenden Bereichs verhindert werden,

dass der Roboter mit seiner gesamten Kraft mit einem Objekt kollidiert. Die Grenzwerte können in ABBs RobotStudio in den SafeMove Einstellungen geändert werden.

Kollisionsversuche im Rahmen der Arbeit haben ergeben, dass 50 Newton als Richtwert für den TFS-Grenzwert herangezogen werden kann. Bei geringeren Werten ist es vorgekommen, dass der Roboter ungewollt stoppte. Mit einem Grenzwert von 50 Newton konnten hingegen alle Versuche durchgeführt werden. Weshalb der Wert nicht beliebig klein gewählt werden kann, wird in Kapitel 4.3.6 erklärt.

In Bereichen, in denen es zu Kollisionen mit dem menschlichen Körper kommen kann, ist es ratsam eine „safe zone“ mit einem angepassten TFS-Wert anzulegen (siehe Kapitel 5.3.1).

5.2.6 Beschleunigung begrenzen

Große Beschleunigungswerte können bei kollaborativen Arbeiten dazu führen, dass der Roboter beim Starten einer Bewegung die Bedienperson erschreckt. Aus diesem Grund wird geraten, die Beschleunigung aller Bewegungen zu begrenzen. Das hat zusätzlich den Vorteil, dass auch geringere TFS-Grenzwerte ausgewählt werden können (siehe 4.3.6).

Beim ABB GoFa gibt es verschiedene Arten die Beschleunigung zu begrenzen. Es kann die TCP-Beschleunigung entlang der Bahn oder die Achsbeschleunigungen eingeschränkt werden. Für ein besseres Anfahren aufgrund kleiner TFS-Grenzwerte oder für ein Roboter-schonendes Anfahren sollten die Achsbeschleunigungen limitiert werden, da somit die Beschleunigung jeder einzelnen Achse gedrosselt wird. Würde nur die TCP-Beschleunigung limitiert werden, könnte je nach Bahn und Konfiguration die Beschleunigungen mancher Achsen nur kaum verringert werden. Soll bei einer „Pick and Place“ Anwendung ein Bauteil vorsichtig nach oben gehoben werden, macht eine Begrenzung der TCP-Beschleunigung Sinn, da in diesem Fall das Werkstück vorsichtig beschleunigt werden muss und nicht die einzelnen Achsen des Roboters. Es können auch beide Arten der Limitation gleichzeitig verwendet werden.

Die Kollisionsversuche haben gezeigt, dass folgende Richtwerte für den GoFa meist ein (ruckelfreies) Anfahren des Roboters bei einer eingestellten TFS-Grenze von 50 Newton ermöglichen. Die Rapid-Befehle sind im Handbuch „RAPID Instructions, Functions and Data types“ [35, S. 15 und S. 295] erklärt.

- Richtwert der Achsbeschleunigung: AccSet := **10,10**;
- Richtwert der TCP-Beschleunigung: PathAccLim TRUE \AccMax := **1**, TRUE \DecelMax := **1**;

5.2.7 „motion supervision“ verwenden

ABBs „motion supervision“ enthält die Softwareoption „collision detection“, welche wie der Name besagt, Kollisionen schnell detektiert. Zusätzlich stoppt sie bei einer Detektion sofort

den Roboter und kann dadurch Aufprallkräfte reduzieren [40, S. 135]. Bei Applikationen, für welche hohe Kräfte angewendet werden müssen, kann es vorkommen, dass die „motion supervision“ die Bewegung ungewollt stoppt. Ist das der Fall, kann in ABBs RobotStudio mit der Funktion „MotionSup“ die Sensitivität beeinflusst werden oder die Supervision ganz ausgeschaltet werden. Soll der Wert dauerhaft geändert werden, ist es möglich, dies in den Systemparametern durchzuführen. Ratsam ist es, die Sensitivität der „motion supervision“ in einem solchen Fall mit nur kleinen Schritten so lange zu verringern, bis die Anwendung ausgeführt werden kann. Da die Funktion bei einer Kollision einen zusätzlichen Schutz bietet, sollte sie nicht deaktiviert oder mit einer geringeren Sensitivität als nötig betrieben werden. Wie die „motion supervision“ getunt werden kann, wird im Handbuch „RAPID Instructions, Functions and Data types“ [35, S. 228] beschrieben.

Bei Messungen für die Validierung einer kollaborativen Anwendung sollte die „motion supervision“ ausgeschaltet werden. Die Überwachung kann in manchen Fällen die Kollisionskräfte reduzieren, aber die Funktion ist nicht Teil des ABB SafeMoves und sollte daher nicht für den Schutz von Personen eingesetzt werden. Die TFS dagegen ist eine Funktion des SafeMoves und besitzt ein Performance Level von PL = d, Kategorie 3 (siehe Kapitel 2.5).

Wird keine Messung zur Überprüfung der biomechanischen Werte durchgeführt, sollte die „motion supervision“ eingeschaltet bleiben, da sie bei manchen Bewegungen noch vor der TFS eine Kollision erkennen könnte und der Roboter somit schneller zum Stehen kommen würde.

5.3 Gestaltung applikationsspezifisch

Nach den allgemein gültigen Empfehlungen werden nun die applikationsspezifischen Empfehlungen beschrieben. Diese umfassen die Themen:

- „safe zones“ festlegen
- Maximale Beschleunigungen festlegen
- Maximale TCP-Geschwindigkeit festlegen

5.3.1 „safe zones“ festlegen

Bei gewöhnlichen kollaborativen Anwendungen kann es an mehreren Positionen zu einem Zusammenstoß mit dem Menschen kommen. Zum Beispiel kann es dort zu einem quasistatischen Kontakt kommen, wo der Roboter einen Gegenstand greift, und auch dort, wo er den Gegenstand einsetzt. Zwischen diesen Stellen könnte es zu einem transienten Kontakt kommen. Da an allen Stellen unterschiedliche Geschwindigkeiten gefahren werden müssen und verschiedene Kontaktflächen zur Gefährdung werden, müssen auch für alle Szenarien die richtigen Einstellungen (wie zum Beispiel ein passender TFS-Grenzwert) gemacht werden.

Aus diesem Grund empfiehlt sich für eine kollaborative Applikation sogenannte „safe zones“ zu erstellen. Das kann in ABBs RobotStudio in den SafeMove Einstellungen gemacht werden. Befindet sich der Roboter in einer solchen Zone, können je nach Einstellung die Position, die Geschwindigkeit, die Ausrichtung und die Kräfte am Werkzeug und / oder an den Achsen überwacht werden. Wird ein eingestellter Grenzwert überschritten, führt der GoFa (wenn nicht anders eingestellt) einen Sicherheitsstopp der Kategorie 0 aus. Überall dort, wo eine Kollision geschehen könnte, sollte eine „safe zone“ eingerichtet werden. In jeder dieser Zone ist es empfehlenswert, zumindest die Geschwindigkeit und die Kraft am TCP zu begrenzen (bei ABB „Tool Speed Supervision“ und „Tool Force Supervision“ genannt), da nur so die biomechanischen Schwellwerte eingehalten werden können (siehe Kapitel 4.2.2).

Wie in Kapitel 5.2.5 beschrieben, wird ein übergeordneter TFS-Grenzwert bei 50 Newton empfohlen. In den „safe zones“, in denen es zu Kollisionen mit scharfen Kanten oder Ecken kommen könnte, ist es ratsam, den TFS-Grenzwert zu optimieren, um Kollisionskräfte bzw. Drücke möglichst klein zu halten. Der ideale Grenzwert kann mit dem „Trial-and-Error“-Verfahren ermittelt werden. Dazu wird der Grenzwert erhöht, sollte der Roboter während der Anwendung stoppen, und verkleinert, solange es keine Probleme gibt. Je nach Konfiguration, Bahn und Last kann die Grenze auf unter 20 Newton gesenkt werden, ohne das Anfahren des Cobots zu verhindern. Das Herantasten an den idealen Grenzwert kann viel Zeit in Anspruch nehmen und sollte deshalb nur für Bewegungen mit großer Verletzungsgefahr durchgeführt werden.

Wie in Kapitel 4.2.2 analysiert, kann in der Regel mit einer kleineren TFS-Grenze schnellere Robotergeschwindigkeiten gefahren werden. Sollte eine kurze Taktzeit einer Anwendung wichtig sein, könnte somit auch durch das Optimieren der TFS-Grenzwerte die Robotergeschwindigkeiten erhöht werden.

Um die Kollisionskräfte unter einer bestimmten Grenze zu halten, ist das Auswählen einer TFS-Grenze allein nicht ausreichend. Es muss auch die Geschwindigkeit unter einer bestimmten Grenze gehalten werden, damit die biomechanischen Grenzwerte nicht überschritten werden (siehe Kapitel 4.2.3). Deshalb wird in den „safe zones“ auch das Überwachen der Geschwindigkeit empfohlen. Als Schwellwert sollte ein Wert, der ein wenig höher ist als die Geschwindigkeit aus dem Punkt „Maximale Geschwindigkeit festlegen“, gewählt werden. Wird die Grenze auf denselben Wert wie die maximal erlaubte Geschwindigkeit (siehe 5.3.3) gelegt, kann es vorkommen, dass der GoFa ungewollt stoppt. Damit Fehler im Programm nicht zu einer Gefährdung werden können, macht es Sinn die maximale Geschwindigkeit in der „safe zone“ überwachen zu lassen und nicht nur im Rapid-Programm eine geringere Geschwindigkeit für die Bewegung auszuwählen.

Je nach Anwendung können auch andere Überwachungsfunktionen sehr hilfreich sein. Gibt es zum Beispiel scharfe Kanten oder Ecken am Werkzeug, welche zu jeder Zeit von der Bedienperson abgewandt sein sollten, ist die Orientierungsüberwachung eine gute Option. Soll

das Werkzeug nicht auf Kopfhöhe bewegt werden, kann dagegen eine Positionsüberwachung sinnhaft sein.

5.3.2 Maximale Beschleunigungen festlegen

Um weitere Gefährdungen bereits bei der Gestaltung zu beseitigen, sollten für gewisse Bewegungen die Beschleunigung verringert werden. Vor allem in Situationen, in welchen die Bedienperson dem Roboter sehr nahekommt, wird das Drosseln der Beschleunigung empfohlen. Das hat den Vorteil, dass die Person nicht erschreckt und bei Bedarf besser Ausweichen kann. Wird mit dem Cobot beispielsweise etwas Kleines sehr genau gefügt, ist die Wahrscheinlichkeit groß, dass eine Person mit ihrem Kopf dem Roboter nahekommt, um einen besseren Einblick auf das Geschehen zu haben. Lässt der Roboter das Teil los und fährt dann ohne gedrosselte Beschleunigung in die entgegengesetzte Richtung, kann das die Person erschrecken oder es kann sogar zu einer Kollision mit dem Roboter und dem Gesicht des Menschen kommen.

5.3.3 Maximale TCP-Geschwindigkeit festlegen

In MRK-Applikationen ist bei jeder einzelnen Bewegungen die TCP-Geschwindigkeit ein wichtiger Parameter. Sie muss für jede Roboterbewegung separat angepasst werden, damit es bei einer Kollision mit dem Menschen nicht zu einer Verletzung kommt.

Bei der Wahl der Geschwindigkeit müssen alle potenziellen Kollisionsszenarien berücksichtigt werden. Dabei haben die Antworten auf folgende Fragen Einfluss auf die maximale Geschwindigkeit:

- Handelt es sich um eine quasistatische oder eine transiente Kollision?
- Welche Körperregionen sind beteiligt?
- Welche Körperregionen können bei einer vorhersehbaren Fehlanwendung beteiligt sein?
- Wie sehen die Kontaktflächen aus?

Für unerfahrene Personen ist es sehr schwer, bereits bei der Gestaltung eine passende TCP-Geschwindigkeit zu wählen. Damit der bereits beschriebene Kreislauf aus Anpassungen und Messungen möglichst wenig oft durchlaufen werden muss, wurde im Rahmen dieser Arbeit ein Entscheidungsbaum zur Auswahl der maximalen Geschwindigkeit angefertigt. Sind die obigen Punkte zum Thema Art der Kollision, Körperregion und Kontaktfläche geklärt, kann mithilfe des Entscheidungsbaums ein Richtwert für die maximale Geschwindigkeit ermittelt werden. Wichtig ist, dass der Richtwert kritisch betrachtet wird und gegebenenfalls angepasst werden muss. In jedem Fall ist eine Validierung der Anforderungen durch eine Messung durchzuführen.

Der Entscheidungsbaum

Gestartet wird bei der Wahl der Maximalgeschwindigkeit immer mit der Frage «Ist die Kontaktfläche großflächig und besitzt keine Kanten?» (siehe Abbildung 47). Ist das der Fall, kann davon ausgegangen werden, dass es keine großen Druckwerte bei der Kollision gibt und die Kraft der limitierende Parameter ist. Je nachdem ob es sich nun um einen quasistatischen oder einen transienten Kontakt handelt, wird Tabelle 8 oder Tabelle 9 herangezogen, um den Maximalgeschwindigkeitsrichtwert abzulesen. Wie in Kapitel 4.3.1 erklärt, ergibt das Messen eines transienten Stoßes mit einem fixierten Messgerät keine korrekten Messergebnisse. Die berechneten Werte liegen näher an den realen Werten, weil hier die Masse der betreffenden Körperregion berücksichtigt werden. Aus diesem Grund entsprechen die Richtwerte in Tabelle 9 den berechneten Werten und nicht den gemessenen. Eine Validierung der Einhaltung der berechnete Werte kann bei Bedarf mittels einer Messung mit einem Dummy oder so, wie in der Beispielapplikation in Kapitel 6.4.3, durchgeführt werden.

Gibt es jedoch nicht nur großflächige Kontaktflächen ohne Kanten, muss geprüft werden, wie scharf die Geometrien sind. Ein Kontakt mit dem Kopf oder dem Hals ist bei scharfen Kanten oder Ecken nicht zulässig. Gibt es Spitzen, scharfe Ecken oder sehr scharfe Kanten, welche die Haut durchdringen könnten, muss eine Kollision mit allen Körperregionen vermieden werden. Ist es nicht möglich eine Kollision mit scharfen Geometrien (die nicht die Haut durchdringen oder verletzen können) zu vermeiden und eine Kollision mit dem Kopf und dem Hals kann ausgeschlossen werden, kann eine Kollision vielleicht mit sehr geringer Geschwindigkeit legitim sein. Dieser Fall sollte jedoch sehr kritisch betrachtet und überprüft werden.

Gibt es keine sehr scharfen Kanten oder Spitzen, können bei einem quasistatischen Kontakt die Richtwerte in Tabelle 10 herangezogen werden. Bei einem transienten Kontakt ist es schwierig einen Richtwert festzulegen. Grundsätzlich können dieselben Werte wie in Tabelle 10 verwendet werden, diese Geschwindigkeiten sind jedoch sehr gering. Wie das Kapitel 4.3.1 zeigt, liegen die mit einem fixierten Messgerät ermittelten Kollisionskräfte und somit auch der Druck höher als bei einem realen transienten Stoß. Dazu kommt, dass wie bereits erwähnt, bei Kollisionen die relative Geschwindigkeit ausschlaggebend ist. Es macht wenig Sinn, die Geschwindigkeit auf wenige mm/s zu reduzieren, wenn sich die arbeitende Person deutlich schneller bewegt (siehe 4.4). Aus diesem Grund wird ein Richtwert von 100mm/s vorgeschlagen. Bewegt sich der Arm einer Bedienperson mit beispielsweise 2.000 mm/s und der Roboter verfährt mit 100 mm/s, so hat die TCP-Geschwindigkeit einen deutlich kleineren Einfluss auf die Kollisionskräfte als die Geschwindigkeit der Hand. Ist es möglich die Bedienperson bei einem transienten Stoß bei einer TCP-Geschwindigkeit von 100mm/s zu verletzen, sollte eine Kollision mit einem Menschen generell vermieden werden. Die schlussendlich verwendete Geschwindigkeit muss auf jeden Fall in der Risikobeurteilung bestimmt und ausreichend begründet werden.

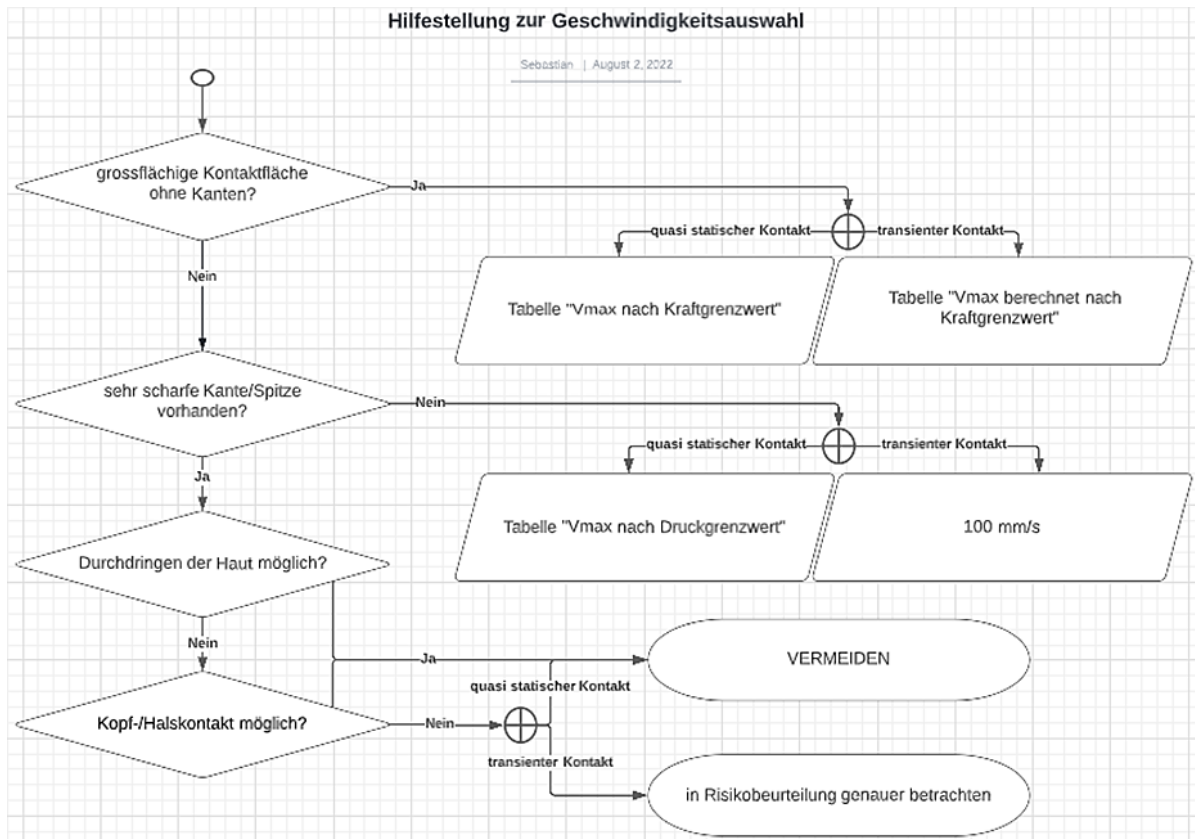


Abbildung 47: Entscheidungsbaum zur Auswahl des Maximalgeschwindigkeitsrichtwerts

Quelle: eigene Darstellung

Körperregion	Vmax [mm/s]
Gesicht	50
Hände und Finger	350-400
Unterarm und Handwurzelgelenke	400+
Brust	400+
Bauch	400+

Tabelle 8: Vmax nach Kraftgrenzwert

Quelle: eigene Messdaten

Körperregion	Vmax [mm/s]
Gesicht	100
Hände und Finger	400+
Unterarm und Handwurzelgelenke	400+
Brust	400+
Bauch	400+

Tabelle 9: Vmax nach Kraftgrenzwert berechnet

Quelle: eigene Messdaten

Körperregion	Vmax [mm/s]					
	Q	K	F0	F0.5	F1	R1
Gesicht	50	0	0	0	0	0
Hände und Finger	50-80	50	50	50-80	50-80	80
Unterarm und Handwurzelgelenke	100	40	50	50-80	50-80	80
Brust	100	0	50	50	50	50-80
Bauch	0	150	0	0	20	0

F0 ... 35mm lange Kante ohne Fase

F0.5 ... 35mm lange Fase mit einer Breite von 0.5mm und einem Fasenwinkel von 45 Grad

F1 ... 35mm lange Fase mit einer Breite von 1mm und einem Fasenwinkel von 45 Grad

R1 ... 35mm lange Rundung mit einem Radius von 1mm

K ... Kugel mit einem Durchmesser von 25 mm

Q ... Quader mit einer Bodenfläche von 1cm²

Tabelle 10: Vmax nach Druckgrenzwert

Quelle: eigene Messdaten

Tabelle 8 und Tabelle 10 wurden mithilfe von Messungen im Kapitel 4.2.3 angefertigt. Die Werte in Tabelle 9 entsprechen den nach ISO/TS 15066 berechneten Maximalgeschwindigkeiten (Formel siehe Kapitel 4.3.1).

In Tabelle 10 muss zusätzlich zur richtigen Körperregion auch die Geometrie, die der Kontaktfläche am ähnlichsten ist, gewählt werden (Die in der Tabelle aufgelisteten Geometrien sind in Kapitel 4.2.3 abgebildet.). Die Werte dieser Tabelle sollten kritisch beurteilt werden, denn nur selten sind die reale Kontaktfläche und die zur Auswahl stehenden Geometrien ident. Ist die reale Fläche größer bzw. die Kante länger, erhöht sich die maximal zulässige Geschwindigkeit. Werden sie kleiner, spitzer oder kürzer, verringert sich diese Geschwindigkeit. Es ist zu beachten, dass die Ecken der genannten Kanten, wie in Kapitel 4.2.3 bereits beschrieben, bei den Messungen zur Auswahl der Richtwerte nicht berücksichtigt wurden. Gibt es eine Kollision mit einer Ecke, müssen andere Richtwerte für die Geschwindigkeit herangezogen werden.

Die Richtwerte „400+“ in Tabelle 8 und Tabelle 9 bedeuten, dass die Geschwindigkeit auch über 400mm/s liegen kann (siehe Kapitel 4.2.3).

Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass nicht nur die TCP-Geschwindigkeit ausschlaggebend ist. Die Bedienperson könnte auch mit dem Arm des Roboters kollidieren. In vielen Fällen ist die Geschwindigkeit des Arms geringer als die TCP-Geschwindigkeit, aber es kann auch umgekehrt der Fall sein. Der GoFa an sich besitzt keine kantigen Geometrien, deshalb ist auch meist die maximale Geschwindigkeit begrenzt durch die Geometrie des Werkstücks oder des Werkzeugs. Es kann in einzelnen Anwendungen trotzdem vorkommen, dass der Arm des Cobots zur Gefährdung wird.

5.4 Impact-Tabelle

Die folgende Tabelle 11 zählt Aktionen auf, welche bereits in den Empfehlungen erwähnt wurden und dafür genutzt werden können, die Kollisionskräfte und Drücke zu reduzieren. Die zweite Spalte der Tabelle zeigt an, wie viel Einfluss die Handlungen auf diese Reduzierung haben kann (Hat sie einen großen Einfluss, kann mit der Handlung die Kollisionskraft/der Druck weiter gesenkt werden als mit einer Handlung mit mittlerem oder geringem Einfluss). Die Tabelle kann nicht nur für die Gestaltung verwendet werden, sondern kann auch Anhalt geben, welche Maßnahmen nach einem zu hohen Messergebnis in der Validation getroffen werden können.

Empfehlung	Impact
Runde Geometrien anwenden	Groß
Geschwindigkeiten reduzieren	Groß
Roboterbahn ändern, um Kontakt mit bestimmten Körperregionen zu vermeiden	Groß
SafeMove Funktionen anwenden (z. B. TFS)	Groß
Beschleunigungen reduzieren	Mittel
Masse reduzieren	Gering
„motion supervision“ aktivieren / tunen	Gering

Tabelle 11: Impact-Tabelle

Quelle: eigene Tabelle

Eine der wichtigsten Handlungen ist das Auswählen runder Geometrien. Das gilt für das Werkzeug, das Werkstück und alle anderen im Kollaborationsbereich befindlichen Gegenstände. Ebenso kann mit dem Verringern der Geschwindigkeit in Kombination mit der Auswahl eines geeigneten TFS-Grenzwertes, die Kollisionsenergie stark beeinflusst werden. Auch hat das Ausschließen eines Kopf- und Halskontaktes einen hohen Impact. Es werden dabei nicht direkt die Kollisionskraft und der Druck verringert, aber die biomechanischen Grenzen werden deutlich erhöht. Die bisher aufgezählten Aktionen sollten auch als Maßnahme nach einem zu hohen Messergebnis in der Validierung als erstes in Erwägung gezogen werden.

Das Reduzieren der Beschleunigung hat nur einen sehr geringen Einfluss auf die Kollisionskraft. Allerdings kann sie dazu führen, dass mit geringeren TFS-Grenzwerten gearbeitet werden kann, was wiederum einen größeren Einfluss auf die Kollisionsenergie hat. Das Reduzieren der Masse und das Verwenden der „motion supervision“ (oder das Erhöhen der Sensibilität der Überwachung) wirken sich bei biomechanischen Messungen nur wenig auf das Ergebnis aus. Aus diesem Grund sollten diese Aktionen auch nicht die erste Wahl sein, um Kollisionskräfte oder Drücke zu verringern.

6 Beispielapplikation

In diesem Kapitel soll anhand einer Beispielapplikation gezeigt werden, wie mithilfe der Gestaltungsempfehlungen (Kapitel 5) und der Erkenntnisse (Kapitel 4.3) eine kollaborative Anwendung gestaltet werden kann, die allen Anforderungen (Kapitel 3.2) entspricht.

6.1 Problemstellung

Ein aktuelles Problem der thyssenkrupp Presta AG ist das Einsetzen eines PCBs (Leiterplatte) in eine zur Verfügung gestellte Vorrichtung (siehe Abbildung 48 und Abbildung 49). Aufgrund von ESD darf das PCB nicht angegriffen werden. Angestellte Personen liefern die Leiterplatten in großen Trays, in welchen die PCBs horizontal gelagert werden. Da die Trays nicht genau gefertigt werden, kann die Position der einzelnen PCBs voneinander abweichen.

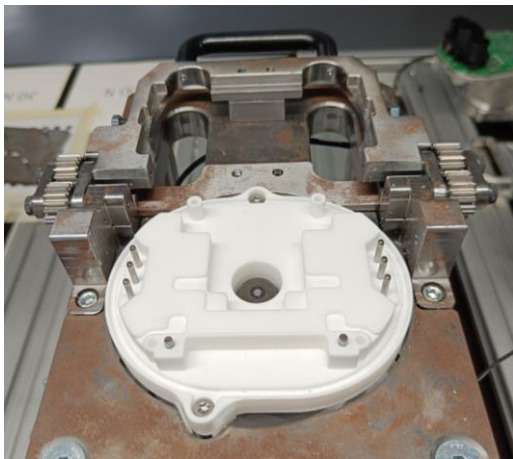


Abbildung 48: Einsetzen des PCBs

Quelle: eigene Aufnahmen

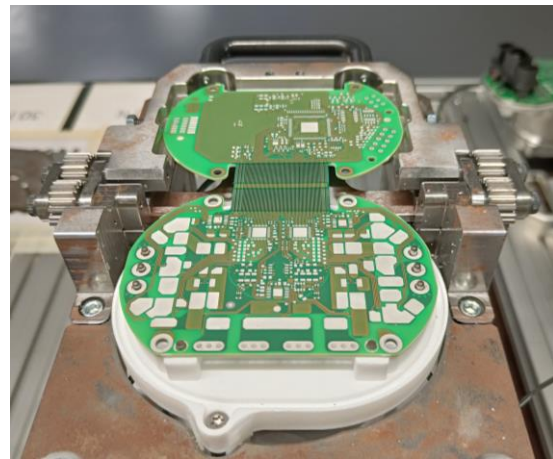


Abbildung 49: Einsetzen des PCBs (II)

Quelle: eigene Aufnahmen

Zur Problemlösung soll eine MRK mit dem ABB GoFa erstellt werden. Die arbeitende Person kann somit unkompliziert den Kollaborationsbereich betreten, um die Trays zu liefern. Es muss kein Zaun geöffnet werden und der Roboter muss seine Aufgabe nicht stoppen. Für die genaue Lokalisierung der einzelnen PCBs soll eine Kamera verwendet werden.

Vereinfachungen / Anpassungen

Die PCBs werden für diese Demonstration nicht aus dem originalen Tray, sondern aus einer einfachen Halterung, wie in Abbildung 50 ersichtlich, entnommen.

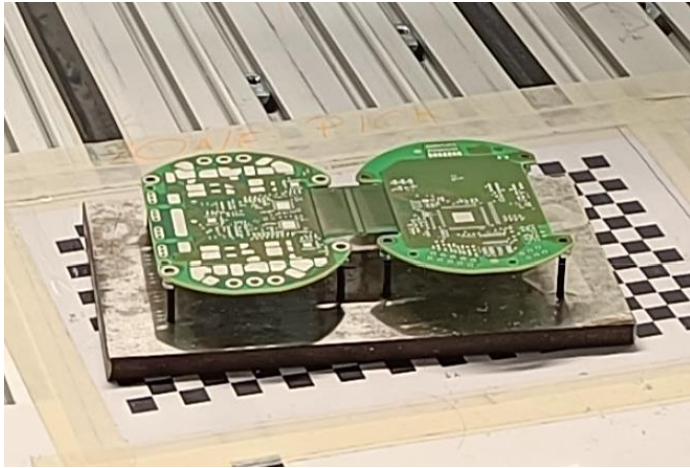


Abbildung 50: Halterung inkl. PCB

Quelle: eigene Aufnahme

6.2 Equipment

Für die Applikation wird der ABB GoFa verwendet. An den Flansch des Roboters wurde ein servoelektrischer Parallelgreifer von Weiss-Robotics (IEG 76-030) und eine Kamera von Cognex (DSQC1021) montiert. Die Kamera kann über ABBs Bildverarbeitungssystem Integrated Vision direkt mit dem RobotStudio eingerichtet und programmiert werden. Der Greifer kommuniziert dagegen über einer SPS von Beckhoff (CX5140).

6.3 Gestaltung

In diesem Kapitel soll gezeigt werden, wie die allgemeinen und applikationsspezifischen Gestaltungsempfehlungen an dieser exemplarischen Problemstellung angewandt werden können.

6.3.1 Allgemeine Gestaltungsempfehlungen angewandt an der Beispielapplikation

Umgebung

Die Umgebung wird so gewählt, dass sich keine Säulen oder andere Gegenstände im Kollaborationsraum befinden. Alle Kabel werden ordentlich verlegt und die Zugangswege markiert.

Werkstück gestalten

Das Werkstück (das PCB) kann bei dieser Applikation nicht angepasst werden.

Werkzeug gestalten

Der verwendete Parallelgreifer kann seine Greifkraft variieren. Das Greifen des PCBs wird so programmiert, dass der Greifer zuerst nur sehr leicht das PCB greift und dieses dann nach zwei Sekunden fester zusammendrückt. Sollte die arbeitende Person ihre Finger einklemmen, bemerkt sie es durch das leichte Zusammendrücken des Greifers. Ab diesem Zeitpunkt hat die Person zwei Sekunden Zeit, die Finger herauszuziehen. Nach dieser Zeit wird die Kraft erhöht, aber nur so fest, dass die Person nicht verletzt werden würde.

Die Finger des Greifers (siehe Abbildung 51) besitzen keine scharfen Geometrien und sind so entworfen, dass ein Teil der Kanten des PCBs beim Greifen abgedeckt wird. Eine Form, welche alle Kanten abdecken würde, kann nicht realisiert werden, weil ansonsten das Einsetzen des PCBs nicht möglich wäre. An den Fingern sind zusätzlich zwei Kugeldruckstücke angebracht, damit die Platine einfacher gegriffen werden kann.



Abbildung 51: Greifer und Kamera am Roboter

Quelle: eigene Aufnahme

Geschwindigkeit begrenzen

Die maximale Geschwindigkeit wird auf 400 mm/s gelegt. Zudem wird eine übergeordnete Geschwindigkeitsüberwachung eingerichtet. Im Zuge der Untersuchungen wird die Geschwindigkeit aus subjektiver Sicht als angemessen empfunden.

Bahn auslegen

Wie die Abbildung 52 zeigt, befindet sich die Position, an der die PCBs gegriffen werden, direkt an der Tischkante. Das wird so gewählt, damit die arbeitende Person die Trays ohne große Bemühungen auf den Tisch stellen kann.

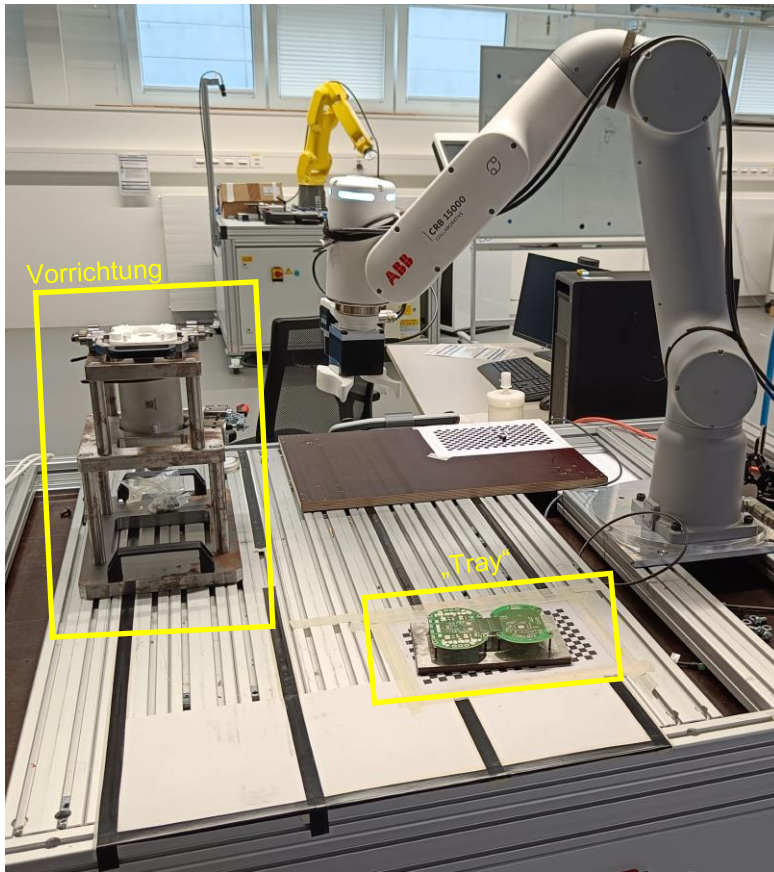


Abbildung 52: Aufbau der Beispielapplikation: Roboter, vereinfachtes Tray und Vorrichtung, in der das PCB eingesetzt werden soll

Quelle: eigene Aufnahme

Die Vorrichtung, in welches die Platine eingesetzt wird, wird weiter hinten (weg von der Person) platziert. Da diese sehr hoch ist (siehe Abbildung 52), muss der Roboter auf Kopfhöhe fahren, um das PCB einsetzen zu können. Die Vorrichtung wird so weit hinten platziert, sodass sichergestellt werden kann, dass auch beim Vorlehnen der Bedienperson eine Kollision mit dem Kopf bzw. dem Hals ausgeschlossen werden kann.

Die Bahn des Roboters wird so gewählt, dass der Cobot, nachdem er das PCB gegriffen hat, auf geringer Höhe nach hinten fährt. Erst dort, wo der Kopf nicht mehr zum Kollisionsobjekt werden kann, fährt er auf die für das Einsetzen benötigte Höhe. Für den Rückweg wird dieselbe Bahn verwendet.

Die ausgewählte Bahn des Roboters befindet sich in keiner Nähe von Singularitäten. Es gibt somit keine Probleme mit hohen Achsgeschwindigkeiten.

Übergeordnete TFS einrichten

Wie in den Empfehlungen geschildert, wird eine übergeordnete TFS mit einem Grenzwert von 50 Newton eingerichtet. Somit wird die Kollisionsenergie bereits im gesamten Bereich reduziert. Es gibt keine Probleme beim Beschleunigen des Roboters.

Beschleunigung begrenzen

Die TCP-Beschleunigung entlang der Bahn wird gemäß den Empfehlungen begrenzt. Da es bis zu diesem Zeitpunkt keine Probleme beim Anfahren des Roboters gibt und die Bewegungen nicht schreckhaft wirken, wird vorerst keine Begrenzung der Achsbeschleunigungen eingerichtet.

„motion supervision“ verwenden

Die „motion supervision“ wird nur für die Messungen zur Überprüfung der Grenzwerte ausgeschaltet. Es müssen keine weiteren Anpassungen durchgeführt werden.

6.3.2 Gestaltungsempfehlungen applikationsspezifisch angewandt an der Beispielapplikation

Maximale Geschwindigkeit festlegen

Um die maximale Geschwindigkeit für die einzelnen Bewegungen auszuwählen, werden zuerst alle möglichen Kontaktszenarien ermittelt (siehe Tabelle 12).

Mögliche Kollisionsszenarien:

Szenario	Art der Kollision	Betroffene Körperregionen	Kritische Kontaktfläche
1) PCB greifen (Abbildung 53)	Quasistatisch	Finger, Hände, Unterarme	Greiferfinger: abgerundete Kante + stark abgerundete Ecke + Kugeldruckstücke
2) PCB einsetzen (Abbildung 54)	Quasistatisch	Finger, Hände	Vorrichtung: Stirnseite eines Stifts
3) PCB Transport (Abbildung 55)	Transient	Finger, Hände, Unterarme	Greifer: scharfe Kante

Tabelle 12: Kollisionsszenarien

Quelle: eigene Tabelle

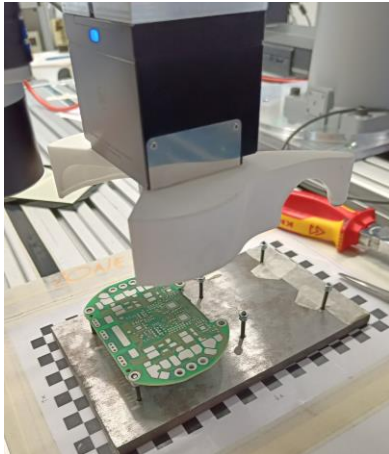


Abbildung 53: PCB greifen
Quelle: eigene Aufnahme

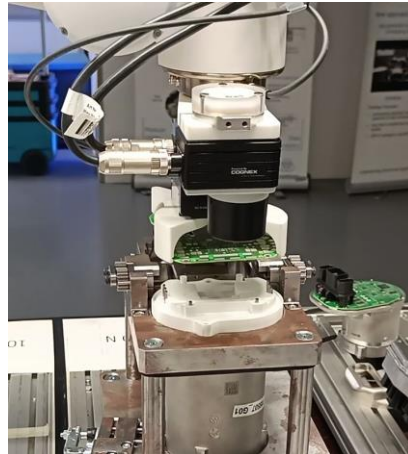


Abbildung 54: PCB einsetzen
Quelle: eigene Aufnahme



Abbildung 55: PCB Transport
Quelle: eigene Aufnahme

Sind die Kollisionsszenarien geklärt, kann die Auswahl der Geschwindigkeit mithilfe des Entscheidungsbaums (siehe Abbildung 56) gestartet werden. Als Ergebnis für das Szenario 1 und 3 liefert der Entscheidungsbaum die Tabelle „Vmax nach Druckgrenzwert“, in welcher der empfohlene Maximalgeschwindigkeitsrichtwert abgelesen werden kann (siehe Tabelle 13). Für das Szenario 2 ergibt sich ein Richtwert von 100 mm/s.

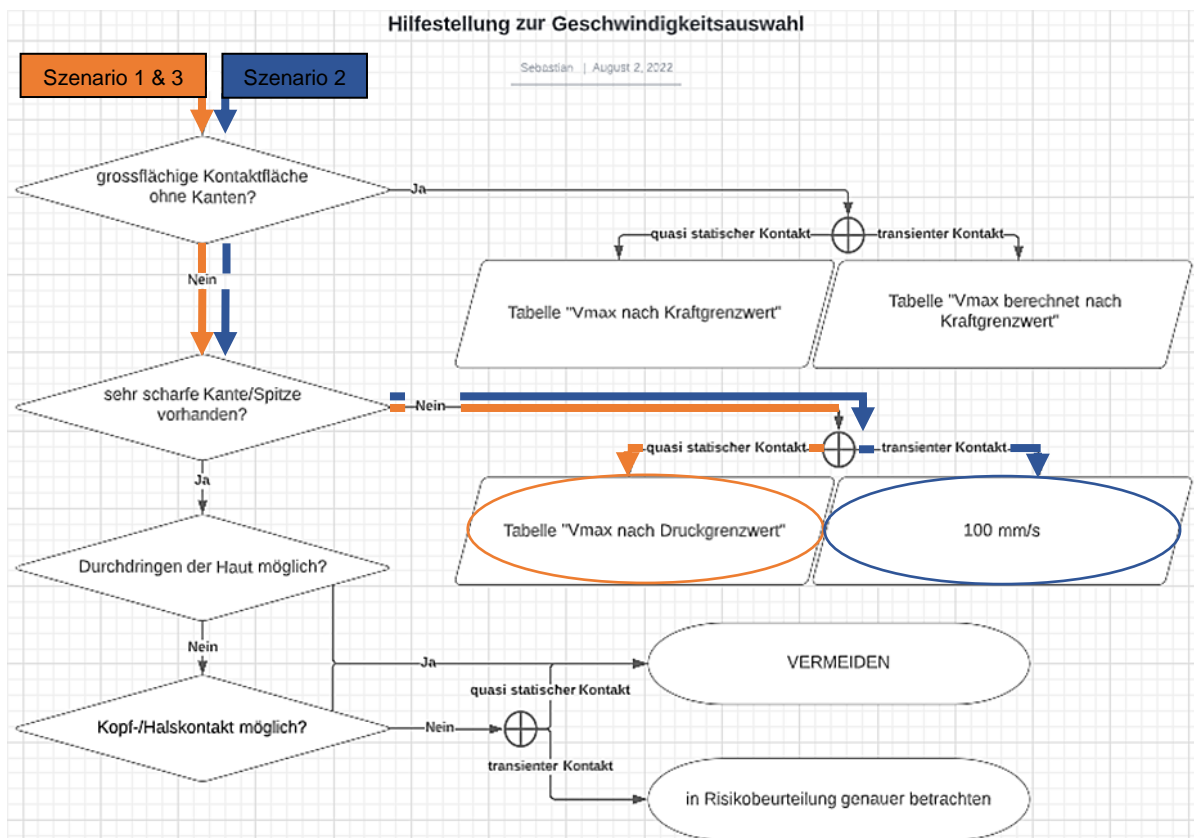


Abbildung 56: Anwendung des Entscheidungsbaums
Quelle: eigene Darstellung

Körperregion	Vmax [mm/s]						
	Q	K	F0	F0.5	F1	R1	
Gesicht	50	0	0	0	0	0	0
Hände und Finger	50-80	50	50	50-80	50-80		80
Unterarm und Handwurzelgelenke	100	40	50	50-80	50-80		80
Brust	100	0	50	50	50		50-80
Bauch	0	150	0	0	20		0

Szenario 1

Szenario 3

Tabelle 13: Auswahl des Richtwerts für Szenario 1 und 3

Quelle: eigene Messdaten

Die kritischen Kontaktflächen in Szenario 1 sind eine abgerundete Kante, eine stark abgerundete Ecke und die Kugeldruckstücke. Die Geometrien der Kante und der Ecke entsprechen etwa der Kante mit einer Rundung mit einem Rundungsradius von 1 mm (R1). Laut Tabelle beträgt der Richtwert also 80 mm/s. Sollte nur ein Finger bei der Kante eingeklemmt werden, entspricht die Länge der Kontaktfläche ca. 20 mm und nicht den 35 mm wie in den Kollisionsversuchen. Kollidiert der Finger mit der Ecke, ist auch hier die Kontaktfläche deutlich geringer. Deshalb wird der Geschwindigkeitsrichtwert verringert und eine Geschwindigkeit von 50 mm/s ausgewählt. Das Kugeldruckstück entspricht mehr der Geometrie der Kugel (K). Da das Druckstück einen deutlich kleineren Durchmesser als die 25mm Test-Kugel hat, wird auch hier der Richtwert reduziert und eine Geschwindigkeit von 10 mm/s bis 20 mm/s ausgewählt. Es ist immer vom ungünstigsten Fall (hier die Kollision mit dem Druckknopf) auszugehen, weshalb für das Szenario 1 eine Geschwindigkeit von 10 mm/s gewählt wird.

Die Kontaktfläche des Szenarios 2 ist die Stirnseite eines Stifts. Dieser besitzt eine Fase und könnte mit der Geometrie F0,5 verglichen werden. Da hier die Kontaktfläche deutlich kleiner ist als bei den Kollisionstests, wird eine Geschwindigkeit von 20 mm/s statt den 50 mm/s-80 mm/s ausgewählt.

Anhand des Entscheidungsbaums und der Tabelle 13 ergeben sich zusammenfassend folgende maximale Geschwindigkeiten als Richtwert:

Szenario	Richtwert der maximalen Geschwindigkeit
1) PCB greifen	50 mm/s
2) PCB einsetzen	20 mm/s
3) PCB Transport	100 mm/s

Tabelle 14: Richtwerte der maximalen Geschwindigkeiten aller Szenarien

„safe zones“ festlegen

Als erster Schritt wird im Stehbereich der Bedienperson eine Sperrzone eingerichtet. Sobald der Roboter diese Zone betritt, wird er gestoppt. Somit kann eine Kollision mit allen

Körperteilen, außer mit den gegebenenfalls vorgestreckten Armen und Händen, ausgeschlossen werden. Angrenzend an den Sperrbereich (siehe Abbildung 57) wird eine Zone erstellt, welche den kollaborierenden Bereich umfasst. Innerhalb dieser Zone wird die Geschwindigkeit und die Tool-Force überwacht. Überschreitet die Geschwindigkeit 100 mm/s (höchste Geschwindigkeit dieser Applikation) oder übertritt die Tool-Force 50 N (aus den Empfehlungen), stoppt der Roboter mit einem Sicherheitshalt der Kategorie 0.

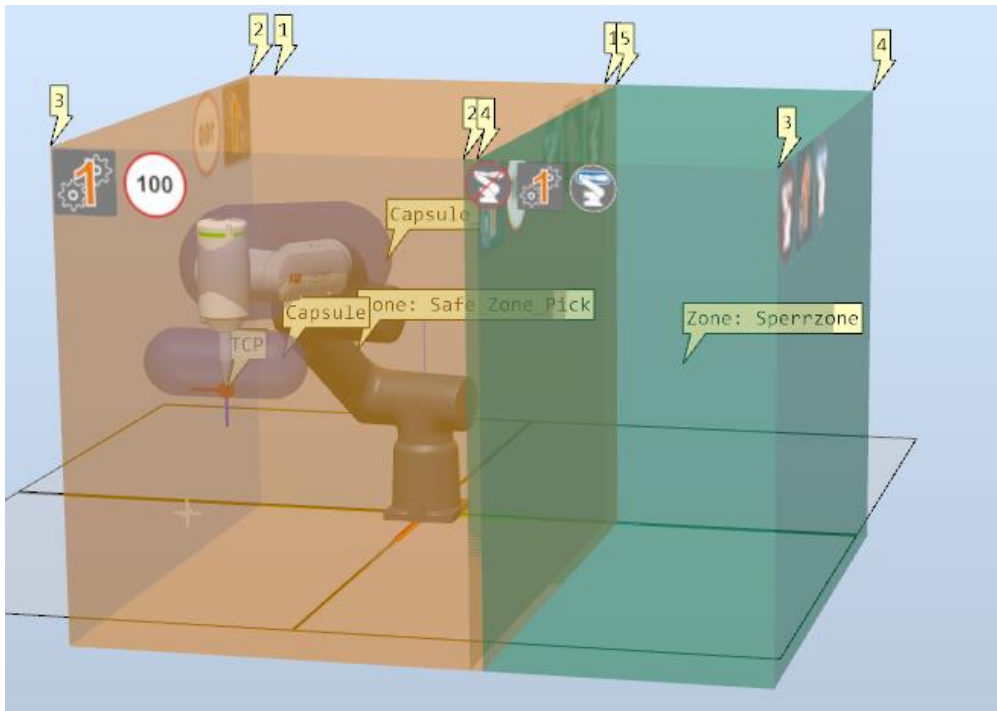


Abbildung 57: Sperrzone (grün) und kollaborierender Bereich (orange)

Quelle: Screenshot aus ABBs RobotStudio

Weiters werden an Stellen, an denen es zu einem quasistatischen Kontakt kommen könnte, zusätzliche „safe zones“ eingerichtet. In dieser Anwendung sind das jene Stellen, an der das PCB gegriffen (Zone „Pick“) und eingesetzt (Zone „Place“) wird (siehe Abbildung 58). Auch in diesen Zonen werden die Tool-Force und die TCP-Geschwindigkeiten überwacht. Die Geschwindigkeits-Grenzwerte werden 5 mm/s über den festgelegten TCP-Geschwindigkeiten (Grund siehe 5.3.1) gelegt. Der TFS-Grenzwert wird wie in den Empfehlungen geschildert, mittels des „Trial-and-Error“-Verfahrens ermittelt. Es ergibt sich, dass 30 N für die Zone „Pick“ und 40 N für die Zone „Place“ passende Grenzwerte sind.

Zusätzlich wird für das Werkzeug eine Hülle angefertigt. So wird nicht nur ein Sicherheitsstopp ausgeführt, wenn der Roboter die Sperrzone betritt, sondern auch wenn das Werkzeug die Grenze überschreitet.

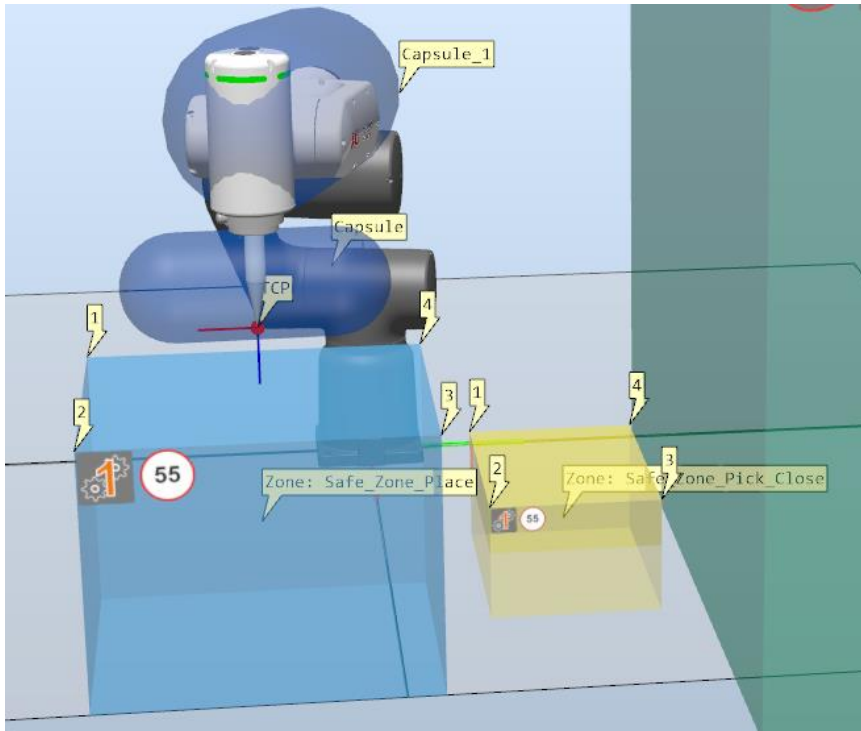


Abbildung 58: Zone „Pick“ (gelb), Zone „Place“ (hellblau) und Werkzeughülle (dunkelblau)

Quelle: Screenshot aus ABBs RobotStudio

Maximale Beschleunigung festlegen

Da der Roboter nur sehr wenig Spiel beim Greifen und Einsetzen des PCBs hat, ist zu erwarten, dass eine Person mit dem Kopf dem Greifer sehr nahekommt, um den Prozess besser beobachten zu können. Deshalb wird die Beschleunigung des TCPs beim Greifen und beim Einsetzen der Platine auf das Minimum ($0,5 \text{ m/s}^2$) gesenkt. Die Bedienperson wird so in der Regel weniger erschreckt und hat mehr Zeit, auszuweichen.

6.4 Validierung der Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte

Für das Überprüfen der biomechanischen Grenzwerte werden für alle drei Szenarien (beschrieben in Tabelle 12) Messungen durchgeführt. Im folgenden Abschnitt werden die Vorgehensweise und die Ergebnisse der Validierung beschrieben.

6.4.1 Validierung Szenario 1

Für die Validierung der Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte in Szenario 1 werden nur Druckmessungen und keine Kraftmessungen durchgeführt. Wie Tabelle 5 zeigt, sind die maximalen Geschwindigkeitswerte bezogen auf den Kraftgrenzwert für Kollisionen mit den Händen und Fingern bei ca. 400 mm/s . Da die gewählte Geschwindigkeit in diesem Szenario bei 10 mm/s liegt, kann davon ausgegangen werden, dass der Kraftwert eingehalten werden kann.

Wie Abbildung 60 zeigt, wird für die Druckmessung ein künstlicher Finger verwendet, damit eine möglichst reale Messung erfolgen kann. Da in diesem Szenario auch die Kante des PCBs auf den Finger drückt, werden wie in Abbildung 59 ersichtlich auch unter dem Finger Druckmessfolien angebracht.

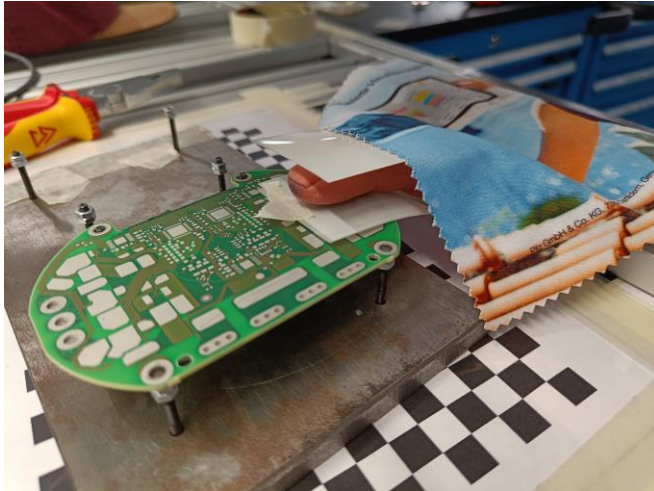


Abbildung 59: Druckmessung Szenario 1

Quelle: eigene Aufnahme

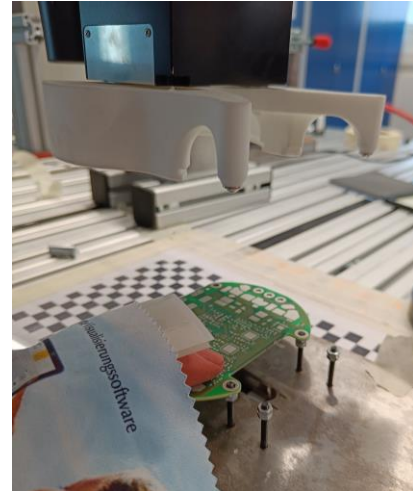


Abbildung 60: Druckmessung Szenario 1 (II)

Quelle: eigene Aufnahme

Die Messergebnisse liefern einen Maximaldruck von 150 N/cm^2 an der Stelle des Druckstücks. Der biomechanische Grenzwert nach der ISO/TS 15066 liegt bei 220 N/cm^2 für das Zeigefingerendgelenk. Der Körperbereich mit dem geringsten Grenzwert der Hand (190 N/cm^2) ist der Handrücken der nicht-dominierenden Hand [4, S. 33 und S. 34]. Da sich die Kontaktfläche bei einer Kollision zwischen dem Druckstück und dem Finger und zwischen dem Druckstück und dem Handrücken nicht ändert, kann davon ausgegangen werden, dass auch die Druckwerte bei einer Kollision mit dem Handrücken nicht überschritten werden, da laut der PRMS Software auch dieselben Feder- und Dämpfungseigenschaften für den Finger und den Handrücken gelten.

Um ein noch detaillierteres Verständnis für die Kollisionen in der Beispielapplikation zu bekommen, wird zusätzlich eine Kollision mit der stark abgerundeten Ecke, bei einer Geschwindigkeit von 50 mm/s , gemessen. Der maximale Druckwert von 191 N/cm^2 trifft hier relativ genau auf den Grenzwert des Zeigefingergelenks.

6.4.2 Validierung Szenario 2

Auch in Szenario 2 wird auf eine Kraftmessung verzichtet und ein künstlicher Finger für die Druckmessung verwendet. Eine Messung mit dem Messgerät wäre hier schwer durchführbar, da das Messgerät nirgends montiert werden könnte, um aussagekräftige Messungen durchzuführen.

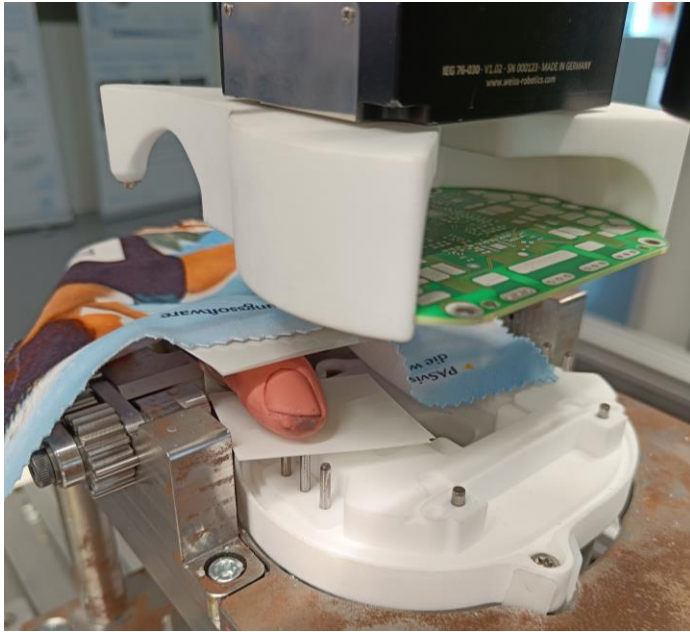


Abbildung 61: Druckmessung Szenario 2

Quelle: eigene Aufnahme

Die Druckmessung ergibt in diesem Szenario 220 N/cm^2 , was genau dem Grenzwert des Zeigefingergelenks entspricht. Eine Kollision mit dem Handrücken würde den Druckwert von 190 N/cm^2 (Grenzwert für den Handrücken) vermutlich überschreiten.

6.4.3 Validierung Szenario 3

Für das Szenario 3 wird eine Geschwindigkeit von 100 mm/s ausgewählt. Da dieser Richtwert nicht mit Kollisionsversuchen ermittelt, sondern mit anderen Argumenten (siehe Kapitel 5.3.3) begründet wurde, kann der Wert auch nicht mit Messungen überprüft werden. Der schlussendlich ausgewählte Wert muss in der Risikobeurteilung bestimmt und ausreichend begründet werden. Um trotzdem einen Messwert zu erlangen (oft wichtig für die Dokumentation, die CE-Zertifizierung, ...), kann zum Beispiel ein künstlicher Finger auf ein Alu-Profil geklebt und anschließend mit der Hand in die Roboterbahn gehalten werden (siehe Abbildung 63). Dieser Versuch kommt dem realen Stoß deutlich näher als eine Messung mit einem fixierten Finger, da die Körperregion so zurückgedrückt werden kann.

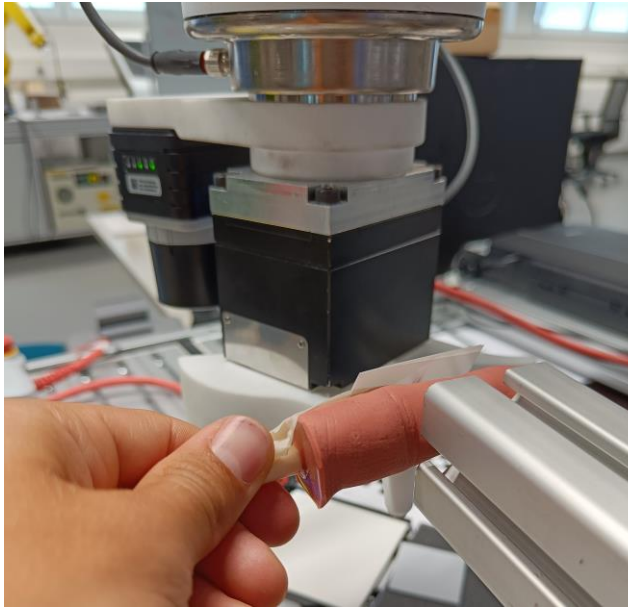


Abbildung 62: Druckmessung Szenario 3, Finger fixiert

Quelle: eigene Aufnahme

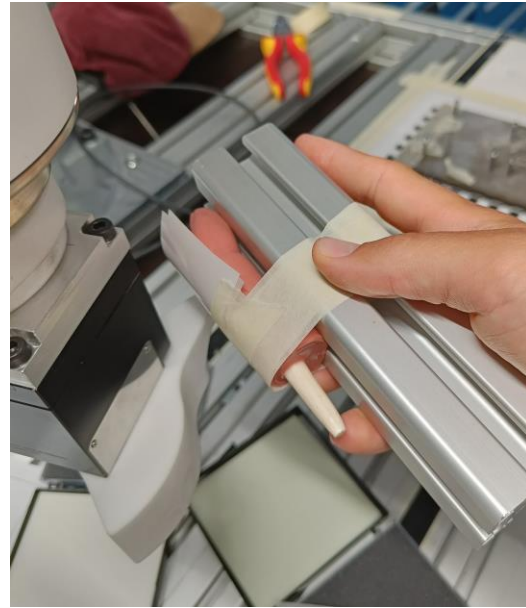


Abbildung 63: Druckmessung Szenario 3, Finger nicht fixiert

Quelle: eigene Aufnahme

Wird der Finger inklusive Alu-Profil normal gehalten, stoppt der Roboter nicht, da die Kräfte am TCP zu gering sind, um den TFS-Grenzwert zu überschreiten. Erst, wenn der Finger gegen den Greifer gedrückt wird, führt der Roboter einen Stopp aus. Der Druckwert liegt so beim ersten Versuch unter dem kleinsten messbaren Druckwert der Messfolien ($<50 \text{ N/cm}^2$) und beim zweiten Versuch immer noch deutlich unter dem biomechanischen Grenzwert (ca. 80 N/cm^2).

Zum Vergleich wird auch eine Messung mit einem fixierten Finger durchgeführt (siehe Abbildung 62). Hier liegen die Druckwerte über dem größten messbaren Wert der Messfolie ($>300 \text{ N/cm}^2$).

6.5 Risikominderung

Da die Validierung der Beispielapplikation in Szenario 2 einen zu hohen Druckwert ergibt, müssen Maßnahmen zur Verringerung des Drucks getroffen werden. Wie die Impact-Tabelle in Kapitel 5.4 besagt, haben folgenden Handlungen am meisten Einfluss auf die Kollisionskraft und den Druck:

- runde Geometrien anwenden
- Geschwindigkeit reduzieren
- Roboterbahn ändern, um Kontakt mit bestimmten Körperregionen zu vermeiden
- SafeMove Funktionen anwenden

Da die Geometrie der Vorrichtung, in welche das PCB eingesetzt werden soll, nicht verändert werden kann, fällt der erste Punkt für dieses Szenario weg. Auch würde eine geringere Geschwindigkeit den Druckwert nicht verringern, weil der TFS-Grenzwert bereits genau erreicht wird (es würde also bei geringerer Geschwindigkeit gleich viel Kraft bei der Kollision auf den Finger wirken) und der Grenzwert nicht mehr gesenkt werden kann, da ansonsten ein Anfahren des Roboters nicht mehr möglich ist. Auch die SafeMove Funktionen können nicht mehr verbessert werden. Es bleibt noch das Ändern der Roboterbahn. Durch das Verlegen einer anderen Applikation kann der Arbeitsbereich des Roboters vergrößert werden, wodurch die Vorrichtung (und die Roboterbahn) noch weiter nach hinten verschoben werden kann, sodass diese mit der Hand nicht mehr erreicht werden kann.

Folglich können ab diesem Zeitpunkt die biomechanischen Grenzwerte eingehalten werden und es kann sich nun auf andere Punkte der Risikobeurteilung bzw. der Validierung konzentriert werden.

7 Zusammenfassung

Die vorliegende Arbeit startet mit einer Einführung in das Themengebiet Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) in Kapitel 2. Hier werden wichtige Begriffe, wie beispielsweise der Grad der Interaktion zwischen Mensch und Roboter, sowie die vier Schutzprinzipien erläutert. Weiters wird ein Überblick über die Vorteile, die Grenzen und die Wirtschaftlichkeit einer MRK gegeben. Anschließend wird das Thema „Cobot“ fokussiert. Die Vorteile, Anwendungsbeispiele und ein Marktüberblick geben eine kurze Einführung ins Thema. Der ABB GoFa wird darauf genauer betrachtet und es werden seine Eigenschaften und einige nützliche Funktionen beschrieben, da der kollaborationsfähige Roboter im Rahmen dieser Arbeit für die Kollisionsversuche genutzt wurde.

Im dritten Kapitel wird erläutert, was EU-Richtlinien, Normen und Gesetze sind und weshalb diese für das Realisieren einer MRK-Anwendung relevant sind. Ergänzend werden einige wichtige Anforderungen an eine kollaborative Applikation, die das Leistungs- und Kraftbegrenzungsschutzprinzip anwendet, erklärt. Dazu gehören vor allem die biomechanischen Grenzwerte sowie die Messmethode für die Validierung der Einhaltung dieser Werte.

Das Thema Kollisionsmessungen bildet das Kapitel 4. Nach dem Beschreiben des Messaufbaus und der Versuchsdurchführung wird der Einfluss der Körperregion, der TFS, der Geometrie, der Zusatzmasse und der Roboterbahn auf die Kollisionskräfte und Drücke präsentiert. Weiters werden diverse Probleme, auf welche bei den Messungen gestoßen wurde, beschrieben und Hinweise gegeben, wie diese verhindert bzw. vermieden werden können. Anschließend wird die angewandte Validierungsmethode reflektiert.

Die aus den Messergebnissen und den Anforderungen aus den Sicherheitsbestimmungen abgeleiteten Gestaltungsempfehlungen werden im fünften Kapitel beschrieben. Diese sind in allgemein gültige und in applikationsspezifische Empfehlungen aufgeteilt. Hier sind beispielsweise Hinweise für eine vorteilhafte Gestaltung eines Werkzeugs oder Richtwerte für eine angemessene TCP-Geschwindigkeit angeführt. Die Impact-Tabelle am Ende des Kapitels gibt einen Überblick über die Relevanz einiger Gestaltungsempfehlungen, was auch als kurze, vereinfachte Zusammenfassung der Messergebnisse angesehen werden kann. Die Tabelle zeigt, dass runde Geometrien, geringe Geschwindigkeiten, eine gut gewählte Roboterbahn und das Anwenden von SafeMove-Funktionen den größten Einfluss auf die Kollisionskräfte bzw. Drücke haben. Auch wird dargestellt, dass das Reduzieren der Beschleunigung und der Zusatzmasse sowie das Tunen der „motion supervision“ einen vergleichsweise kleinen „impact“ auf die Kollisionskräfte und Drücke haben.

Das Kapitel 6 zeigt anhand einer Beispielapplikation, wie die Gestaltungsempfehlungen sowie weitere Erkenntnisse der Arbeit bei der Entwicklung einer MRK-Anwendung eingesetzt werden können. Nach dem Anwenden der Gestaltungsempfehlungen auf die Beispielapplikation, werden auch die Messungen für die Überprüfung der biomechanischen Grenzwerte

beschrieben. Hier wird ebenfalls exemplarisch gezeigt, wie Hinweise aus der vorliegenden Arbeit die Messungen verbessern können. Abschließend wird vorgeführt, wie die Impact-Tabelle als Entscheidungshilfe für die Wahl der risikomindernden Maßnahme angewendet werden kann.

8 Fazit

Wie das Entwickeln der Beispielapplikation gezeigt hat, können mit den erarbeiteten Empfehlungen und Erkenntnissen der vorliegenden Arbeit, das Gestalten und Validieren einer MRK-Anwendung vereinfacht bzw. bezüglich der Sicherheit, auch verbessert werden. Die TCP-Geschwindigkeiten, die Beschleunigung und noch weitere Parameter konnten im Vorhinein festgelegt werden und das Verwenden künstlicher Körperteile sowie Messmethoden ohne fixierte Messgeräte, lieferten aussagekräftige Messergebnisse, da die gemessenen Werte mehr den Ergebnissen einer realen Kollision entsprechen.

Dennoch gibt es Verbesserungsmöglichkeiten für die vorliegende Arbeit. Basierend auf dem jetzigen Wissensstand könnte beispielsweise eine Erweiterung der Tabelle 7 mit Richtwerten für weitere Geometrien zu Verbesserungen führen, da die Auswahl einer passenden bzw. ähnlichen Geometrie meist nicht einfach ist. Zusätzlich könnte eine neue, geeignete Messmethode erforscht werden, die Kollisionseigenschaften eines transienten Stoßes aufzeichnen kann. Eventuell könnte ein Pendel, an welches unterschiedliche Massen, mit verschiedenen Dämpfungs- und Federeigenschaften, gehängt werden können, zielführend sein.

Eine Herausforderung beim Erstellen von Gestaltungsempfehlungen ist, dass viele verschiedene Eigenschaften Einfluss auf diese Empfehlungen haben. Besonders das Festlegen eines Richtwerts der maximalen Geschwindigkeit stellt sich als kompliziert heraus, weil diesen Wert die Geometrie, die Roboterbahn, die Masse, Einstellungen am Roboter und noch weitere Parameter beeinflussen. Schlussendlich sind die erforschten Geschwindigkeitsrichtwerte sehr gering und wie in der Arbeit geschildert, oft weniger ausschlaggebend für die Kollisionskräfte als die Geschwindigkeit der Körperteile der arbeitenden Person. Mit den in der Arbeit vorgeschlagenen TCP-Geschwindigkeiten sind vermutlich nur noch wenige Applikationen für eine MRK attraktiv.

Auch wenn mithilfe der Arbeit der bereits geschilderte Kreislauf bei der Realisierung kollaborativer Anwendungen (siehe Kapitel 5) frühzeitig durchbrochen werden kann, bleibt das Vorhaben komplex und zeitintensiv. Trotz der Reduktion der Anzahl der Messungen, sind diese immer noch aufwendig bzw. speziell bei transienten Zusammenstößen, nicht immer durchführbar. Der Aufwand und die Komplexität bei der Realisierung einer MRK-Anwendung verringern sich vermutlich erst, wenn Roboterhersteller*innen Kollisions-Simulationstools für ihre Cobots bereitstellen.

Literaturverzeichnis

- [1] Fraunhofer IKS, „Mensch-Roboter-Kollaboration: Wie wir in Zukunft mit dem Roboter zusammenarbeiten werden“, *Fraunhofer-Institut für Kognitive Systeme IKS*. <https://www.iks.fraunhofer.de/de/themen/industrie-40/mensch-roboter-kollaboration.html> (zugegriffen 14. August 2022).
- [2] Kompetenzzentrum Saarbrücken, „Technologieradar: Kollaborative Roboter“, *Mittelstand 4.0*, 4. September 2019. <https://kompetenzzentrum-saarbruecken.digital/cobot/> (zugegriffen 8. August 2022).
- [3] Automationspraxis, „Cobot: Symbiose von Mensch und Roboter“, *Automationspraxis*, 14. Januar 2019. <https://automationspraxis.industrie.de/allgemein/cobot-symbiose-von-mensch-und-roboter/> (zugegriffen 8. August 2022).
- [4] *DIN ISO/TS 15066:2016 Roboter und Robotikgeräte - Kollaborierende Roboter*.
- [5] UNIVERSAL ROBOTS, „Kollaborative Robotik; Handlungssicherheit in der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) mit der ISO TS 15066“. April 2017. Zugegriffen: 13. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.jugard-kuenstner.de/fileadmin/daten/Downloads/Universal_Robots/UR3_UR5_UR10/Universal_Robots_Kollaborative_Robotik.pdf?_sm_au_=iVVnWpqN3mrRD2jQjF3H1K0k4Msfp
- [6] R. Behrens, *Biomechanische Grenzwerte für die sichere Mensch-Roboter-Kollaboration*. Wiesbaden [Heidelberg]: Springer Vieweg, 2019.
- [7] ifaa-Institut, „Mensch-Roboter-Kollaboration; Zahlen, Daten, Fakten“. <https://www.arbeitswissenschaft.net/angebote-produkte/zahlendatenfakten/ue-zdf-mrk/> (zugegriffen 8. August 2022).
- [8] IEN, „Mensch-Roboter-Kooperation effizient planen und wirtschaftlich einsetzen“. <https://www.ien-dach.de/artikel/mensch-roboter-kooperation-effizient-planen-und-wirtschaftlich-einsetzen/> (zugegriffen 8. August 2022).
- [9] Unchained Robotics, „5 gute Gründe, warum gerade KMUs Cobots nutzen sollten“, 13. November 2020. <https://unchainedrobotics.de/klein-und-mittelstaendige-unternehmen/5-gute-gruende-warum-gerade-kmus-cobots-nutzen-sollten/> (zugegriffen 20. Juni 2022).
- [10] Automationspraxis, „Cobot; Erfahren Sie alles Wissenswerte rund um das Thema Cobot und kollaborative Robotik“, *Automationspraxis*. <https://automationspraxis.industrie.de/cobot/> (zugegriffen 8. August 2022).
- [11] ABB, „ABB industrial robots get Wizard Easy Programming software“, *News*, 16. Dezember 2020. <https://new.abb.com/news/detail/72178/abb-industrial-robots-get-wizard-easy-programming-software> (zugegriffen 13. Juni 2022).
- [12] S. Nördinger, „Mensch-Roboter-Kollaboration: Wo sich Cobots wirklich lohnen“, *Produktion*, 10. November 2020. <https://www.produktion.de/technik/wo-sich-cobots-wirklich-lohnen-381.html> (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [13] „Wohin geht die Cobot-Reise?“, *Automationspraxis*, 4. März 2021. <https://automationspraxis.industrie.de/robotik/wohin-geht-die-cobot-reise/> (zugegriffen 21. Juni 2022).
- [14] Unchained Robotics, „Die 5 größten Vorteile von Cobots“, 16. November 2020. <https://unchainedrobotics.de/collaborative-robots-und-mehr/die-5-groessten-vorteile-von-cobots/> (zugegriffen 21. Juni 2022).
- [15] „Endeffektoren | Schleifen, Schweißen, Entgraten, Kleben, Schrauben usw. von Schmachtl“. <https://www.schmachtl.at/de/produkte-und-loesungen/robotik/endeffektoren/> (zugegriffen 21. Juni 2022).
- [16] Universal Robots, „Qualitätsprüfung mit Cobots“, 15. Juli 2021. <https://www.universalrobots.com/de/blog/die-reifepfung-wie-cobots-qualitaet-testen-und-sichern/> (zugegriffen 20. Juni 2022).
- [17] Universal Robots, „Cobot Palettiert“. <https://www.universal-robots.com/de/fallbeispiele/gustav-hensel-gmbh-und-co-kg/> (zugegriffen 20. Juni 2022).

- [18] IFR, „World Robotics 2021“, Online, 28. Oktober 2021. Zugegriffen: 14. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://ifr.org/downloads/press2018/2021_10_28_WR_PK_Presentation_long_version.pdf
- [19] „Collaborative robot market size worldwide 2020-2030“, *Statista*, 2022. <https://www.statista.com/statistics/748234/global-market-size-collaborative-robots/> (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [20] ABB, „ABB präsentiert GoFa™ – einen Cobot mit höherer Traglast für kollaborative Aufgaben bis 5 kg“, *News*, 24. Februar 2021. <https://new.abb.com/news/de/detail/74731/abb-prasentiert-gofa-einen-cobot-mit-hoherer-traglast-fur-kollaborative-aufgaben-bis-5-kg> (zugegriffen 9. August 2022).
- [21] ABB, „ABB GoFa“. https://cdn.produc-timages.abb.com/9PAA00000048113_3200x2143.jpg (zugegriffen 29. Juli 2022).
- [22] ABB, „Produkthandbuch CRB 15000, OmniCore“. 15. Juni 2022. Zugegriffen: 9. August 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://library.e.abb.com/public/e5ad033f82614275b51c3db38d264fff/3HAC077389%20PM%20CRB%2015000-de.pdf>
- [23] ABB, „Anwendungshandbuch; Funktionale Sicherheit und SafeMove“. 24. Mai 2022.
- [24] Bundesministerium für Arbeit, „Sicherheit und Gesundheitsschutz am Arbeitsplatz“, September 2021. <https://ec.europa.eu/social/main.jsp?langId=de&catId=148> (zugegriffen 16. August 2022).
- [25] DIN, „DIN - kurz erklärt“. <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/basiswissen> (zugegriffen 21. Juni 2022).
- [26] DIN, „Rechtsverbindlichkeit durch Normen“. <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/normen-und-recht/rechtsverbindlichkeit-durch-normen> (zugegriffen 21. Juni 2022).
- [27] „Informationen zu Normen“, *oesterreich.gv.at - Österreichs digitales Amt*. https://www.oesterreich.gv.at/themen/dokumente_und_recht/normen/Seite.2560001.html (zugegriffen 21. Juni 2022).
- [28] Fraunhofer IGCV, „Leitfaden für den ortsflexiblen Einsatz von kollaborativen Robotern: Praxisnah. Anwenderfreundlich. Prägnant.“, 2021, Zugegriffen: 14. Juni 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://publica.fraunhofer.de/entities/publication/a7ca28b0-8255-4191-b108-179f2cfea81d/details>
- [29] „Normung in Europa – technische Anforderungen – harmonisierte Normen – CE-Kennzeichnung“, *Your Europe*, 4. August 2021. https://europa.eu/youreurope/business/product-requirements/standards/standards-in-europe/index_de.htm (zugegriffen 14. Juni 2022).
- [30] DIN, „Ergebnisse von Normungsarbeit“. <https://www.din.de/de/ueber-normen-und-standards/din-norm/ergebnisse> (zugegriffen 20. Juni 2022).
- [31] T. Koch, „Industrielle Robotik-Anwendungen mit Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK); Von der Konzeption bis zur Umsetzung“, Online, 24. Februar 2022.
- [32] F. H. und M. DGUV, „Kollaborierende Robotersysteme - Planung von Anlagen mit der Funktion ‚Leistungs- und Kraftbegrenzung‘“. August 2017.
- [33] PILZ, „Bedienungsanleitung: PRMS device, PRMS Assistant“. Zugegriffen: 23. Juli 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.pilz.com/download/open/PRMS_V110_Operat_Man_1005182-DE-01.pdf
- [34] PILZ, „Kollisionsmess-Set PRMS für Mensch-Roboter-Kollaboration“. <https://www.pilz.com/de-AT/produkte/robotik/prms/prms> (zugegriffen 4. August 2022).
- [35] „Technical reference manual_RAPID_3HAC16581-1_revJ_en.pdf“. Zugegriffen: 4. August 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://library.e.abb.com/public/688894b98123f87bc1257cc50044e809/Technical%20reference%20manual_RAPID_3HAC16581-1_revJ_en.pdf
- [36] PILZ, „Beiblatt PRMS set“.
- [37] GTE, „CoboSafe-Tek“. <https://www.gte.de/en/products/kraftdruckmessung/druckmess-set-cobosafe-tek> (zugegriffen 16. August 2022).

- [38] ORF, „Die sagenumwobene Wurftechnik“. https://sportv1.orf.at/070626-11082/?href=https%3A%2F%2Fsportv1.orf.at%2F070626-11082%2F11084bigstory_txt.html (zugegriffen 29. Juli 2022).
- [39] M. Koppenborg, A. Lungfiel, B. Naber, und P. Nickel, „Auswirkung von Autonomie und Geschwindigkeit in der virtuellen Mensch-Roboter-Kollaboration“. GfA (Hrsg.), 2013. Zugegriffen: 17. August 2022. [Online]. Verfügbar unter: https://www.dguv.de/medien/ifa/de/pub/grl/pdf/2013_103.pdf
- [40] ABB, „Product specification OmniCore V line“. Zugegriffen: 1. August 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=3HAC074671-003&LanguageCode=de&DocumentPartId=&Action=Launch>

Anhang

Rapid-Programm: Versuchsdurchführung

```
PERS robtarget Location1:=[[703.12,-27.45,313.28],[1.49758E-05,-0.660891,-  
0.750482,2.31769E-05],[-1,-1,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  
PERS robtarget Location2:=[[703.12,-27.43,96.39],[1.72407E-05,-0.660875,  
0.750496,2.54553E-05],[-1,-1,0,0],[9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09,9E+09]];  
  
PROC main()  
  
MotionSup \Off;  
AccSet 10, 10;  
MoveL Location1, v_gewünscht, fine, tuneTool;  
MoveL Location2, v_gewünscht, fine, tuneTool;  
  
ENDPROC
```

Abbildung 64: Rapid-Code gewöhnlicher Kollisionsversuche