

# **BACHELORARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

„Bachelor of Science in Engineering“ im Studiengang  
Mechatronik & Robotik

## **Sicherheitsgerechte Konstruktion von Handhabungseinrichtungen für mobile Roboter**

Ausgeführt von: Henry Tran

Personenkennzeichen: 1610330045

1. Begutachter: Dipl.-Ing. (FH) Dr. Vinzenz Sattinger

Wien, 12.06.19



# Kurzfassung

Heutzutage werden mobile Roboter häufig für Anwendungen in der Industrie eingesetzt. Einige von ihnen erfordern die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Maschine. Daher sind Betriebssicherheit (Safety) und Angriffssicherheit (Security) wichtige Themen, die bei der Planung der Arbeitsumgebung berücksichtigt werden sollten. Zurzeit fehlen Sicherheitsstandards für mobile Roboter. Die Entwicklung mobiler Robotereinheiten ist ohne aktuelle Sicherheitsnormen oder -richtlinien sehr riskant. Vor allem kleine und mittlere Unternehmen sind mit diesem Problem konfrontiert. In dieser Arbeit wird ein Sicherheitsleitfaden in Form einer Roadmap für die sicherheitsgerechte Konstruktion von Handhabungseinrichtungen für mobile Roboter vorgestellt. Zu diesem Zweck werden die allgemeinen Sicherheitsnormen für Maschinen analysiert und andere Normen berücksichtigt, die auch für mobile Roboter gelten können. Darüber hinaus werden neue Daten aus einem Interview mit dem TÜV zur Verfügung gestellt. Dies beinhaltet Informationen über die Zukunft der technischen Inspektionen sowie wertvolle Ansätze, um einen Leitfaden für inhärent sicheres Konstruieren zu erstellen. Die Anwendung der Roadmap auf eine Fallstudie zeigt, dass die Risikoprioritätszahlen der Fehlermöglichkeits- und Einflussanalyse (FMEA) im verbesserten Zustand Werte zwischen 1 und 125 aufweisen, welches als geringes Risikopotential eingestuft wird. Zukünftige Projekte können von der Checkliste des Sicherheitsleitfadens profitieren und diese auch für eine Risikobeurteilung und Risikominderung nutzen.

**Schlagwörter:** mobiler Roboter, Handhabungseinrichtung, Betriebssicherheit, Konstruktion, Leitfaden

## Abstract

Nowadays mobile robots are often used for applications in industry. Some of them require collaboration between humans and machines. Therefore, safety and security are important issues that should be considered while planning the work environment. There is a lack of safety standards for mobile robots. The development of mobile robotic units is very risky without any up-to-date safety norms or guidelines. Especially small and medium-sized enterprises have to face this problem. This thesis introduces a safety guideline including a roadmap for a safety-conscious construction of manipulators for mobile robots. For this purpose, the paper analyses general safety norms for machines and considers other norms, which can also be applied on mobile robots. In addition, new data is provided from an interview with the Austrian association for technical inspection (TÜV). This includes information about the future of technical inspections and also valuable approaches in order to create a guideline for inherent safe construction. The application of the roadmap on a case study shows that the Risk Priority Numbers of the Failure Mode and Effective Analysis in the improved state have values between 1 and 125, which is classified as a low risk potential. Future projects can benefit from the checklist of the safety guideline and also use it for a risk assessment and risk reduction.

**Keywords:** mobile robot, manipulator, safety, construction, roadmap

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	5
2	Stand der Technik .....	7
2.1	Maschinensicherheit.....	7
2.2	Sicherheitsrichtlinien für Roboter .....	9
2.2.1	Kollaboration mit Robotern.....	9
2.2.2	Einsatz von mobilen Einheiten .....	9
2.3	Handhabungslösungen in der Robotik.....	11
3	Problem- und Aufgabenstellung.....	13
4	Materialien und Methoden.....	14
4.1	Normenableitung .....	14
4.2	Datenerhebung.....	19
5	Vorgehensweise in der sicherheitsgerechten Konstruktion .....	21
6	Praktische Durchführung.....	26
6.1	Anwendung der Roadmap .....	26
6.2	Modellierung.....	31
6.3	Simulation.....	34
7	Ergebnisse.....	38
8	Diskussion .....	38
9	Zusammenfassung und Ausblick .....	38
	Literaturverzeichnis .....	40
	Abbildungsverzeichnis .....	42
	Anhang A: Konstruktions-FMEA .....	43
	Anhang B: Technische Zeichnung des Drei-Fingergreifers .....	46

# 1 Einleitung

Der Fortschritt auf dem Gebiet der Robotik schreitet immer weiter voran. Viele Unternehmen setzen bereits auf mobile Systeme. Allerdings ist der Sicherheitsstandard noch weit hinter dem aktuellen Stand der Technik. Der Einsatz birgt daher, ohne jegliche Sicherheitsnormen, ein hohes Risiko sowohl für die Umgebung als auch für das System selbst.

Obwohl die ganzheitliche Sicherheit in der Industrie ein wichtiges Thema ist, treten heutzutage die Begriffe „safety“ und „security“ immer mehr in den Vordergrund. Für die beiden englischen Wörter ist der Ausdruck „Sicherheit“ eine gängige Übersetzung im deutschsprachigen Raum. Dennoch unterscheiden sie sich in ihrer Bedeutung.

*„Einerseits lässt sich feststellen, dass im Zusammenhang mit technisch und organisatorisch geprägten Systemen oft der Unterschied ursachenbezogen getroffen wird, indem*

*-Security oft mit der Sicherheit vor Angriffen bzw. Anschlägen gleichgestellt wird, was insbesondere die Existenz eines Angreifers voraussetzt, während*

*-Safety häufig die Sicherheit vor der Auswirkung unbeabsichtigter, etwa naturbedingter oder fehlerbedingter Gefährdungen, beinhaltet.*

*Andererseits wird auch im Hinblick auf die Art der gefährdeten Werte differenziert [18], nämlich der*

*-durch Security-Maßnahmen zu schützenden Daten und Informationen, sowie*

*-durch Safety-Maßnahmen zu schützenden materiellen Werte in der Systemumgebung (Menschen, Umwelt, Hardware, sonstige Infrastruktur) und im System selbst.“ (Freiling et al., 2014)*

Die Sicherheit lässt sich somit grob in zwei Kernbereiche unterteilen: die Betriebssicherheit und die Angriffssicherheit. Gefährdungen der Betriebssicherheit können aber auch bereits bei der Konstruktion von Teilen des mobilen Roboters entstehen. Auch hierzu existieren aktuell noch keine gültigen Normen oder Richtlinien.

In dieser Arbeit werden Konstruktionsrichtlinien gemäß aktueller Sicherheitsnormen speziell für Handhabungseinrichtungen mit mechanischen Greifmechanismen von mobilen Robotern abgeleitet. Die Ergebnisse werden anschließend auf ein Fallbeispiel mit dem Roboter MIR100 angewendet, bei dem ein CAD-Modell einer Handhabungseinrichtung erstellt und in einer Simulationsumgebung veranschaulicht wird.

Im Zuge des Forschungsprojekt „Sicherheit in intelligenten Produktionsumgebungen - SIP 4.0“ werden die beiden Themenfelder Safety und Security untersucht. Dabei wird auch speziell die Kollaboration zwischen dem menschlichen Personal und dem Roboter behandelt. Aufgrund der fehlenden Leitlinien im Bereich Sicherheit von smarten Produktionen, hat sich das Projekt SIP 4.0 das Ziel gesetzt, ein Sicherheitskonzept inklusive Umsetzungsleitfaden zu entwickeln. In der Fachhochschule Technikum Wien soll dieses

Konzept anschließend als Pilotprojekt in Zusammenarbeit mit dem TÜV Austria gestartet werden. (FH Technikum Wien, 2018)

## 2 Stand der Technik

### 2.1 Maschinensicherheit

Zur allgemeinen Sicherheit von Maschinen zählt nicht nur die zuverlässige Ausführung der Funktionen, sondern auch die Verarbeitung des Risikos und damit auch die Verminderung der Anzahl von möglichen Gefahren.

Die Sicherheit von Maschinen wird in der internationalen Norm ISO 12100 behandelt. Darin werden Gestaltungsleitsätze für die Risikobeurteilung und die Risikominderung sowie deren Dokumentation vorgestellt. Speziell für Konstrukteure bietet diese Norm eine Instruktion für die sichere Entwicklung von Maschinen. Des Weiteren werden mit dieser Norm weitere Normenreihen in verschiedene Typen unterteilt:

„– **Typ-A-Normen** (Sicherheitsgrundnormen) behandeln Grundbegriffe, Gestaltungsleitsätze und allgemeine Aspekte, die auf Maschinen angewandt werden können;

– **Typ-B-Normen** (Sicherheitsfachgrundnormen) behandeln einen Sicherheitsaspekt oder eine Art von Schutzeinrichtungen, die für eine ganze Reihe von Maschinen verwendet werden können:

– Typ-B1-Normen für bestimmte Sicherheitsaspekte (z. B. Sicherheitsabstände, Oberflächentemperatur, Lärm);

– Typ-B2-Normen für Schutzeinrichtungen (z. B. Zweihandschaltungen, Verriegelungseinrichtungen, druckempfindliche Schutzeinrichtungen, trennende Schutzeinrichtungen);

– **Typ-C-Normen** (Maschinensicherheitsnormen) behandeln detaillierte Sicherheitsanforderungen an eine bestimmte Maschine oder Gruppe von Maschinen.“  
(International Organization for Standardization, 2013)

Die Risikobeurteilung nach ISO 12100 umfasst vier Schritte.

Zu Beginn müssen Grenzen festgelegt werden. Hierfür müssen sowohl die Eigenschaften der Maschine als auch die naheliegende Umgebung bzw. involvierte Personen und weitere Maschinen definiert werden. Außerdem müssen die Verwendungsgrenzen der Maschinen einschließlich die der Benutzer, die zeitlichen und räumlichen Grenzen sowie weitere produktspezifische Grenzen berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt soll der Arbeitsablauf der Maschinen und der Aufgabenbereich des Personals festgelegt werden, um die damit verbundenen Gefährdungen identifizieren zu können. Dabei ist es ebenfalls wichtig, dass die Gefahren im Betrieb der Maschinen geprüft werden.

Für jedes Gefährdungsszenario müssen sogenannte Risikoelemente bestimmt werden, damit das Risiko eingeschätzt werden kann. Diese Risikoelemente bestehen aus dem Schadensausmaß und der Eintrittswahrscheinlichkeit des Schadens.

Im Anschluss erfolgt schließlich die Risikobewertung. Diese kann beispielsweise in Form eines Vergleichs von ähnlichen Maschinen erfolgen.

Die Risikominderung folgt nach der Risikobeurteilung. Die Minderung des Risikos findet, soweit diese notwendig ist, als iterativer Prozess statt.

Dieser Prozess besteht aus Schutzmaßnahmen, der hier als „Drei-Stufen-Verfahren“ bezeichnet wird.

Der erste Schritt des Drei-Stufen-Verfahrens besteht aus der inhärenten sicheren Konstruktion. Damit werden potentielle Gefahren bereits bei der Konstruktion der Maschine berücksichtigt.

Im zweiten Schritt werden technische Schutzmaßnahmen gesetzt. Hier wird zwischen trennenden und nichttrennenden Einrichtungen unterschieden. Sofern weitere Maßnahmen notwendig sind, müssen ergänzende Schutzmaßnahmen auch für Notfälle festgelegt werden.

Zuletzt müssen Benutzerinformationen zur Verfügung gestellt werden, damit ein sicherer Gebrauch der Maschine gewährleistet werden kann. (International Organization for Standardization, 2013)

Die Maschinen-Sicherheitsverordnung setzt bei der sicheren Konstruktion von Maschinen eine Risikobeurteilung und bei Bedarf auch eine Risikominderung voraus.

In dieser Verordnung werden zunächst allgemeine Sicherheits- und Gesundheitsanforderungen vorgestellt. Unter anderem werden hier Hilfestellungen für die Organisation der Arbeitsumgebung geleistet. Außerdem werden vorab Anforderungen an die Materialien der Maschinen festgelegt.

Die verwendeten Steuerungen der Maschinen müssen laut Richtlinie stets zuverlässig und sicher arbeiten und müssen deren Sicherheitskriterien auch beim Einschalt – bzw. Ausschaltvorgang beibehalten.

Im Hinblick auf mechanische Gefährdungen müssen bewegliche Teile gesondert berücksichtigt werden, damit auch herabfallende Gegenstände vermieden werden können. Zudem muss die Standsicherheit sowie die Bruchsicherheit aller Komponenten gewährleistet werden. Das Verletzungsrisiko von scharfen Kanten bzw. Ecken sollte auch auf ein Minimum reduziert werden. Auch die Oberflächenstruktur darf nicht zu Verletzungen führen.

Für bestimmte Maschinengattungen, wie etwa handgeführte tragbare Maschinen oder Maschinen zur Bearbeitung von Werkstoffen, werden zusätzlich spezifische Anforderungen festgelegt.

Außerdem werden allgemein bewegliche Maschinen in der Sicherheitsverordnung behandelt. Zu diesen zählen jene Maschinen, die aufgrund ihrer Funktion bzw. ihrer Aufgabe Bewegungen ausführen oder stationär arbeitende Maschinen, die mit bestimmten Ausstattungen beweglich werden.

Maschinen, die Hebevorgänge durchführen, werden hier in zwei Kategorien aufgeteilt. Es wird zwischen Maschinen unterschieden, die manuell durch menschliche Kraft angetrieben werden und Maschinen, die keine menschliche Kraft erfordern.

Zudem werden auch spezifische Sicherheitsbestimmungen an Maschinen, die für den Einsatz unter Tage bestimmt sind, festgelegt.



Bei Maschinenanwendungen, in denen Personen gehoben werden, müssen alle Risiken für Personen auf dem Lastträger berücksichtigt werden. Hierzu zählt auch das sichere Anfahren von Position und vor allem die permanente Einhaltung der Stellung. (Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort der Republik Österreich, 2019)

## **2.2 Sicherheitsrichtlinien für Roboter**

### **2.2.1 Kollaboration mit Robotern**

Die technische Spezifikation ISO TS 15066 ist eine Erweiterung der Sicherheitsnormen ISO 10218-1 und ISO 10218-2 für Industrieroboter. Diese Erweiterung umfasst die kollaborative Robotik und enthält Anforderungen sowohl für die Robotersysteme als auch für die beteiligte Umgebung wie etwa menschliches Personal. (Beuth Verlag, 2017)

Das Whitepaper „Kollaborative Robotik“ behandelt die Handlungssicherheit in der Kollaboration zwischen Menschen und Roboter unter der Berücksichtigung der technischen Spezifikation ISO TS 15066. Außerdem werden Methoden vorgestellt, die die Bestimmung der erlaubten Maximalkräfte und der maximalen Druckwerte, erleichtern.

Grundsätzlich wird bei kollaborativen Roboteranwendungen zwischen einem beabsichtigten und einem unbeabsichtigten Kontakt unterschieden, wobei der ungewollte Kontakt eine deutlich höhere Sicherheitsrelevanz aufweist. Sollte es zu einer Kollision des Systems mit einem Gegenstand oder mit einem Menschen kommen, so wird dieser Kontakt, abhängig von der Auswirkung, in quasi statische und in transiente Kontakte unterteilt. Unter quasi statischen Kontakten wird ein Einklemmen verstanden, während transiente Kontakte einen Aufprall beschreiben.

Die Messungen bei Klemmungen sollten über die Zeit erfolgen, da in der ersten halben Sekunde eine hohe transiente Kraft wirkt, bevor diese in eine quasi statische Kraft übergeht. Daher sollte eine Risikobeurteilung stets unter der Berücksichtigung des Zeitverlaufes erstellt werden. Der Spitzenwert des Druckes ist für die Messung einer Klemmung genügend.

Für freie Kollisionen existieren drei Methoden zur Ermittlung von Richtwerten für Kraft und Druck. In der ersten Variante (dynamische Messung) ist das Messgerät frei beweglich. Die zweite Methode nutzt eine Ausgleichsrechnung, um die gewünschten Werte zu erhalten. Dabei ist das Messgerät festmontiert. Die letzte Methode sieht keine praktischen Messungen vor. Stattdessen werden Bewegungsgleichungen und Modelle verwendet. (Universal Robots, 2017)

### **2.2.2 Einsatz von mobilen Einheiten**

Die ISO 3691-4 Norm ist eine Typ-C Norm und behandelt Sicherheitsanforderungen für unbemannte Fahrzeuge, deren Hauptaufgabe in der Beförderung liegt (fahrerlose Flurförderzeuge). Außerdem befasst sich diese Norm mit der Verifizierung der Anforderungen.

In dieser Norm wird unter anderem ein Bremssystem für das Flurförderzeug (in dieser Norm auch Stapler genannt) vorausgesetzt. Dieses System muss auch bei Ausfällen wie der Energieversorgung oder der Steuerung wirksam verbleiben.

Wenn der Stapler eine Last mit sich führt, muss dieser die vorgesehene Lage der Last einhalten können. Sollte die Last die bestimmte Position dennoch nicht einhalten können und das Lastaufnahmemittel verlassen, so muss die Bewegung des Staplers mit weiteren Einrichtungen verhindert werden.

In Bezug auf die Hubhöhe müssen Stapler, die eine Hubhöhe von über 30cm aufweisen, den Sicherheitsanforderungen der ISO 22915 Norm entsprechen, während jene Stapler mit einer Hubhöhe von bis zu 30cm denen der ISO 3691-6 Norm entsprechen müssen. Für spezielle Anwendungen kann der Stapler alternativ auch für eine Prüfung, bei der mit mindestens 110% der Tragfähigkeit und der Geschwindigkeit getestet wird, herangezogen werden.

Unter den nichttrennenden Schutzeinrichtungen muss auf jeden Fall ein Not-Halt vorhanden sein. Sollten Personen im Arbeitsbereich vorgesehen sein, so müssen diese vom Stapler erfasst werden können. Zusätzlich muss berücksichtigt werden, ob ein Fluchtweg vorhanden ist. Wenn dem nicht so ist, müssen weitere Anhaltefunktionen integriert werden.

Für die verschiedenen Betriebsarten muss ein Wahlschalter eingebaut werden, mit dem lediglich die Auswahl festgelegt wird. Der eigentliche Betrieb darf nur mit einer separaten Aktivierung in Gang gesetzt werden. Der Wahlschalter darf für Unbefugte nicht zugänglich sein und nur dieser darf die Betriebsarten Automatik, Automatik mit Bedienereingabe sowie den Instandhaltungsbetrieb ermöglichen. Sollten auch Fahrer auf dem Stapler während des Automatikbetriebs vorgesehen sein, so müssen weitere Sicherheitsanforderungen festgelegt werden.

Wenn die Stapleranwendung das Ziehen von Anhängern erfordert, muss ein sicheres und vor allem nur ein beabsichtigtes An- und Abkuppeln an einer dafür vorgesehenen Einrichtung ermöglicht werden.

Die Funktionsüberprüfung für die Verifizierung der Anforderungen eines Staplers muss entweder direkt mit dem Flurförderzeug oder mithilfe einer Simulation erfolgen. Dabei müssen auch sämtliche Steuerungen überprüft werden.

Beim Einsatz von sogenannten berührungslos wirkenden Schutzmaßnahmen (electro-sensitive protective equipment) am Stapler, muss dieser vor einem Prüfkörper anhalten können. Hier darf es zu keiner Berührung zwischen dem Prüfkörper und einem (festen) Teil des Staplers kommen. Bei sensorischen Einrichtungen, die einen Kontakt erfordern, darf die Kraft nicht mehr als 750N betragen. In der Prüfung mit einem kleineren Prüfkörper darf die Betätigungskraft nicht höher als 250N sein.

Die Standsicherheit des Flurförderzeugs kann bei einer Hubhöhe von bis zu 1,8 Metern mithilfe einer Berechnung überprüft werden. Alle Fälle, in denen die Höhe über dieser Grenze liegen, müssen mit einer Prüfung verifiziert werden.

Sämtliche Komponenten des Staplers müssen einer Prüfung unterliegen, bei der die Elemente eine statische Last von zumindest 125% der Nenntagfähigkeit und der

tatsächlichen Tragfähigkeit laut Hersteller tragen können. Diese Belastung muss 15 Minuten lang durchgeführt werden. (International Organization for Standardization, 2018)

Mobile Roboter können mit den unterschiedlichsten Aktuatoren ausgestattet werden. Daher werden sie auch mobile Manipulatoren genannt. Diese bestehen in der Regel aus einer Manipulationseinrichtung und einer Roboterplattform. Die mobilen Einheiten sind heute bereits in der Lage sich selbstständig in der Umgebung zurechtzufinden. Des Weiteren ist eine Kollaboration zwischen Mensch und Roboter auch in unmittelbarer Nähe möglich.

Bis dato beschäftigte sich lediglich eine Norm mit der Sicherheit von mobilen Manipulatoren. Allerdings liegt der Fokus dieser Norm auf persönliche Assistenzroboter. Das Subkomitee R15.08 der Robotic Industries Association (RIA) arbeitet im Moment noch an einer Norm für die Sicherheit von mobilen Robotern, die im Jahr 2019 veröffentlicht werden soll (International Federation of Robotics, 2019).

Dennoch lassen sich zumindest allgemein gefährliche Situationen auflisten.

Die gefährlichen Bewegungen des mobilen Manipulators können sowohl von dem befestigten Manipulator als auch von der Plattform stammen.

Auch während des Fahrtweges eines Roboters können Gefahren auftreten, vor allem wenn Gegenstände transportiert werden. Außerdem muss der Roboter auch manuell bewegt werden können, da dieser sonst ein Hindernis für die Umgebung darstellt und sogar mögliche Fluchtwege versperren könnte.

Die Kollaboration zwischen Mensch und Maschine sorgt zwar für neue Möglichkeiten im Arbeitsbereich, stellt aber gleichzeitig eine große Gefahr bei einer Kollision für den Menschen dar.

Einige Gefahren lassen sich durch eine geeignete Wahl von Konzepten vermeiden bzw. werden Risiken dadurch gemindert.

Die Art der Fortbewegung des Roboters kann entscheidend in Gefahrenszenarien sein. Bei mobilen Manipulatoren, die mit Rädern ausgestattet sind, muss die Anwendung sowie die Umgebung berücksichtigt werden. Je nach dem welcher Radtyp gewählt wird, sind mit mechanischen Einschränkungen (constraints) zu rechnen. Räder, die ein Rollen in beliebige Richtungen ermöglichen, können auch zu Gefahren bei schiefen Ebenen führen.

Hinsichtlich des mechanischen Aufbaus des Roboters lässt sich allgemein sagen, dass der Roboter möglichst leicht, abgerundet und mit einer schützenden Hülle umgeben sein sollte. Auch die Wahl des Endeffektors sollte mit Bedacht getroffen werden. Dabei gilt es einen formschlüssigen gegenüber eines kraftschlüssigen Greifers vorzuziehen, da die Gefahr bei einem Ausfall der Energieversorgung minimiert wird. (Schlotzhauer et al., 2018)

## **2.3 Handhabungslösungen in der Robotik**

Derzeit existiert ein großer Bedarf an automatisierten Handhabungsmethoden, die auch sensible Objekte transportieren können. Dabei sind vor allem dynamisch anpassbare

Lösungen gefragt, die beispielsweise in der Lebensmittelindustrie verschiedene Obstsorten aufnehmen können.

In der Regel fügt das Greifsystem dem Objekt den meisten Schaden zu. Daher wurden schon Methoden entwickelt, bei denen Kraft- bzw. Momentenmessungen stattfinden. Allerdings messen aktuelle Techniken lediglich die Momente und Kräfte während der Aufnahme bzw. dem Ablegen der Objekte. Für die Berücksichtigung aller Gefahren während des Betriebes müssen auch die dynamischen Kräfte einkalkuliert werden. Eine Möglichkeit, um das Problem zu umgehen, wäre die Reduzierung der Zykluszeit. Das Ergebnis ist dennoch unbefriedigend. Das Forschungsprojekt SenRobGrip beschäftigt sich daher mit der Lösung der Handhabungsprobleme.

Zusätzlich zu den Kraft- und Momentenmessungen muss auch eine Bahnplanung durchgeführt werden, damit den Kräften auch eine Grenze gesetzt wird. Hierfür empfiehlt es sich auch einen Pfadteilungsalgorithmus zu verwenden, um die einzelnen Teilpfade erfassen zu können. (Spies et al., 2018)

Für die Entwicklung von Greifersystemen, die auch mehrere Formen aufnehmen können (z.B. adaptive Formgreifer), steht ein Konzept zur Verfügung. Dieses besteht aus sechs Schritten, wobei ein iterativer Prozess stattfindet, solange bis die Anforderungen erfüllt werden. Dabei dienen die ersten fünf Schritte der Parametrierung der Greiferkonfigurationen. Zunächst werden sämtliche Daten und Informationen gesammelt. Darunter fallen auch CAD Dateien, Maximalwerte und auch Materialeigenschaften.

Anschließend werden erste Greiferkonfigurationen erstellt. Darauf folgt eine Finite-Elemente-Simulation, in der die vorherigen Einstellungen für den Greifer verwendet werden.

Nach der Auswertung der Ergebnisse wird entschieden, ob die erforderlichen Kräfte und Abweichungen den Anforderungen genügen.

Im Idealfall können hier bereits die Konfigurationen für die nächste Form erstellt werden. Ist dies nicht der Fall, so müssen die Konfigurationen angepasst werden und erneut simuliert werden.

Im letzten Schritt werden die gesammelten Lösungen zusammengefasst und für die Implementierung kombiniert. (Ballier et al., 2018)

### 3 Problem- und Aufgabenstellung

Derzeit ist es sehr schwer einzuschätzen, welchen Einfluss mobile Roboter auf die Sicherheit der Umgebung und vor allem auf die der Menschen haben. Der Mangel an Normen und Sicherheitsrichtlinien für den Bereich der mobilen Robotik führt zu Unklarheiten bei der Entwicklung von Sicherheitskonzepten. Kleineren und mittleren Unternehmen fällt es daher besonders schwer mobile Systeme zu entwickeln, die zusätzlich mit Manipulatoren ausgestattet sind und auch die nötige Sicherheit gewährleisten können.

Da die aktuellen Normen lediglich die allgemeine Sicherheit von Maschinen abdecken, ist es fraglich, ob aus dem derzeitigen Stand ein Sicherheitsleitfaden speziell für die Entwicklung von Handhabungseinrichtungen von mobilen Robotern entworfen werden kann.

Daher muss die folgende Fragestellung behandelt werden: Welche Sicherheitsrichtlinien existieren speziell für Handhabungseinrichtungen von mobilen Robotern und wie kann aus diesen ein Leitfaden zur sicherheitsgerechten Konstruktion erstellt werden?

Das Ziel dieser Arbeit ist, dass der angefertigte Leitfaden für Handhabungseinrichtungen den Sicherheitsvorschriften, anhand des Fallbeispiels in der digitalen Fabrik der Fachhochschule Technikum Wien, entspricht. Dabei müssen die Anwender und Anwenderinnen, auch ohne Fachwissen auf diesem Gebiet, in der Lage sein den Inhalt umzusetzen und damit eine sichere Konstruktion von Handhabungseinrichtungen anfertigen zu können.

Die Herausforderung hierbei ist es, eine geeignete Auswahl an Sicherheitsrichtlinien zu finden, die auch für mobile Roboter zulässig sind bzw. auch den Bereich der mobilen Robotik betrifft. Außerdem müssen diese Standards speziell auch für Handhabungseinrichtungen von mobilen Robotern abgeleitet werden.

Da der derzeitige Greifer des mobilen Roboters in der digitalen Fabrik (siehe Abbildung 1) nicht den Sicherheitsrichtlinien entsprechen kann, soll die Entwicklung eines neuen Werkzeugs für den Roboterarm als Fallbeispiel für den Sicherheitsleitfaden dienen.



Abbildung 1: Greifer des MIR100 Roboters in der digitalen Fabrik

## 4 Materialien und Methoden

Für diese Arbeit werden aktuelle Normen und Sicherheitsrichtlinien über Sicherheit von Maschinen sowie jene, die bereits die Sicherheit in der Kollaboration mit Robotern behandeln, abgeleitet und speziell für die mobile Robotik adaptiert. Dabei werden insbesondere sicherheitsbezogene Richtlinien für die Konstruktion von Handhabungseinrichtungen für mobile Roboter berücksichtigt.

Außerdem werden, zusätzlich zur Untersuchung des aktuellen Standes der Sicherheitstechnik, weitere Daten im Hinblick auf die Zukunft erhoben. Diese empirische Forschungsmethodik wird in Form eines Interviews mit einem Sprecher von TÜV Austria durchgeführt.

### 4.1 Normenableitung

In der Sicherheitsnorm ISO 12100 wird die allgemeine Sicherheit von Maschinen behandelt. Als Typ-A-Norm kann diese somit auch für den Bereich der mobilen Robotik verwendet werden. Dabei sind die allgemeinen Gestaltungsgrundsätze vor allem für die Risikobeurteilung sowie für die Risikominderung von großer Bedeutung. Da beide Punkte in einem iterativen Prozess bearbeitet werden, kann diese Art der Abarbeitung der notwendigen Schritte als Vorlage für den zu entwerfenden Leitfaden verwendet werden. Damit kann sichergestellt werden, dass auch wirklich alle Schritte berücksichtigt werden. Für den Fall, dass ein Schritt nicht den Anforderungen entspricht, kann der vorherige Abschnitt solange optimiert werden, bis der aktuelle den Ansprüchen des Benutzers genügt.

Im ersten Schritt, der Festlegung der Grenzen, müssen die Attribute des mobilen Roboters bestimmt werden. Dabei müssen sowohl die physischen bzw. mechanischen Eigenschaften des Roboters als auch die Fähigkeiten der mobilen Einheit definiert werden. Sollten noch weitere Roboter und Maschinen im selben Raum agieren, müssen deren Eigenschaften ebenfalls definiert werden. Neben der Festlegung des Arbeitsraumes eines jeden Roboters, muss die Umgebung vor allem bei mobilen Einheiten vor dem Einsatz bereits bekannt sein. Dies inkludiert auch Personen, die in der naheliegenden Umgebung mit dem Roboter arbeiten, aber auch indirekt involvierte Menschen, die am Prozess beteiligt sind.

Da der Roboter eine Aufgabe erfüllen soll, müssen im Hinblick auf Verwendungsgrenzen sowohl die vorgesehenen Anwendungen als auch die möglichen Fehlanwendungen des Roboters berücksichtigt werden. Hierzu gehören die verschiedenen Betriebsarten, die der Roboter zur Verfügung hat. In der Regel ist ein manueller Eingriff mit einem sogenannten FlexPendant möglich, weshalb dieser Modus unbedingt zu berücksichtigen ist. Außerdem muss der Einsatzbereich des Roboters klar sein. Idealerweise werden diese Bereiche in Gruppen, wie etwa Industrieroboter oder Serviceroboter, eingeteilt.

Bei mobilen Robotern muss auch der Bewegungsraum betrachtet werden, vor allem in einer dynamischen Umgebung, in der menschliches Personal nicht immer exakt denselben Pfad entlang geht.

In einer solchen Umgebung muss auch damit gerechnet werden, dass auch ungeschulte Personen den Raum betreten können.

Bei der Identifizierung der Gefährdungen wird zwischen dauerhaften Gefährdungen und unerwarteten Gefährdungen unterschieden. Zu den dauerhaften Gefährdungen zählen jene Objekte und Personen, die stets im Arbeitsprozess beteiligt sind und deren Handlungen und Aktionen eine potentielle Gefahr darstellen. Unerwartete Gefährdungen hingegen sind solche, die, beispielsweise bei eindeutigen Fehlverhalten des Personals, zu einer Gefahr für den Betrieb werden können. Daher ist es wichtig, dass die Arbeitsabläufe der Roboter festgelegt sind und die Aufgaben des Personals klar definiert sind, um die Gefährdungen leichter einschätzen zu können.

Mobile Roboter haben hinsichtlich der Phasen der Lebensdauer viele Gemeinsamkeiten mit anderen Maschinen. Allerdings sollte beim Eingriff von Menschen besonders darauf geachtet werden, dass der Roboter, zusätzlich zu seinen Aktuatoren wie etwa Roboterarme, auch noch über eine Fahrplattform verfügt. Somit müssen Personen, die dem Roboter näher kommen müssen, sich vergewissern, dass sich dieser auch tatsächlich im Stillstand befindet. Auch bei mobilen Robotern wird zwischen einem Normalbetrieb und jenem Betriebszustand unterschieden, bei dem der Roboter seine geplanten Funktionen nicht ausführt.

Die Risikoeinschätzung der einzelnen Gefährdungssituationen mit Roboterapplikationen kann auch mit den Risikoelementen erfolgen. Beim Schadensausmaß wird daher zwischen dem Grad der Verletzung und der Anzahl der Betroffenen unterschieden. Hier ist es wichtig vor allem den Grad der Verletzung richtig einschätzen zu können und beispielsweise bei der Auswahl der Verletzungsstufen vernünftigerweise eine Stufe höher zu wählen. Damit kann sichergestellt werden, dass mit den entsprechenden Sicherheitsmaßnahmen auch alle Verletzungsrisiken abgedeckt werden können.

Personen, die sich häufig im Arbeitsbereich des Roboters befinden erhöhen die Eintrittswahrscheinlichkeit eines Unfalls bzw. eines Schadens. Dabei sind Faktoren wie die Dauer und Häufigkeit des Einsatzes, die Anzahl der Beteiligten und die Art des Kontaktes mit dem Roboter entscheidend für die richtige Einschätzung der Gefährdung sowie der Bestimmung der Eintrittswahrscheinlichkeit.

Je nachdem welche Optionen zur Begrenzung oder sogar zur Vermeidung des Schadens zur Verfügung stehen, wirkt sich dies auch auf die Eintrittswahrscheinlichkeit aus. Bei Anwendungen mit mobilen Robotern sollte die Erfahrung sowie die Qualifikation im Umgang mit den Einheiten mitberücksichtigt werden, da dies in einer Gefährdungssituation durchaus auch entscheidend sein kann.

Die Risikobewertung kann auch mithilfe eines Vergleichs mit anderen zuvor bewerteten Robotermodellen erfolgen.

Für die abschließende Risikominderung bietet sich vor allem die inhärent sichere Konstruktion an, da diese Methode am wirksamsten ist. Technische Schutzmaßnahmen wie die trennenden Einrichtungen sind bei mobilen Robotern unvorteilhaft, da diese den Arbeitsraum einschränken. Für stationäre Industrieroboter hingegen sind diese ideal, da auch ganze Schutzzäune integriert werden können.

Als letzte Maßnahme kann noch die Methode der Benutzerinformation angewendet werden. Allerdings hindert dies Personen nicht daran unerlaubte Handlungen auszuführen und ist daher nicht sehr effektiv.

Die Maschinen-Sicherheitsverordnung umfasst nicht nur Sicherheitsrichtlinien für den Einsatz der Maschine, sondern liefert auch wertvolle Grundsätze für die Arbeitsumgebung. Außerdem wird zwischen mehreren Maschinentypen differenziert und für spezielle Gattungen gesonderte Richtlinien ausgeschrieben. Diese Verordnung deckt viele Maschinenvorgänge ab und ist daher vor allem für die Anwendungen der mobilen Roboter von großer Bedeutung. Da hier eine Risikobeurteilung sowie eine Risikominderung vorausgesetzt wird, ist dies eine ideale Ergänzung zur Sicherheitsnorm ISO 12100.

Bei der Konstruktion des Roboters bzw. der Teile des Roboters muss bereits darauf geachtet werden aus welchem Material diese Elemente bestehen sollen, die für den Bau des Roboters gedacht sind. Das Material kann beispielsweise hinsichtlich dem Gewicht einen deutlichen Unterschied ausmachen und daher in einigen Situationen die Gefährdung erhöhen. Dies ist vor allem bei ruckartigen Bewegungen besonders gefährlich, da bei einer Kollision mehr Kräfte auf ein Objekt bzw. im schlimmsten Fall sogar auf einen Menschen wirken können.

Im Betrieb muss die Standsicherheit vor allem bei mobilen Robotern gewährleisten sein. Daher sollten gerade mobile Einheiten eine gewisse Höhe nicht überschreiten, um das Risiko des Umfallens zu vermindern. Außerdem ist ein zu hoher Roboter empfindlicher gegenüber Berührungen bzw. Stößen und müssen dann mit zusätzlichem Gewicht ausgestattet werden, um diese Schwachstelle zu kompensieren. Bei stationären Robotern hingegen kann bei Bedarf immer noch leichter nachgerüstet werden. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass zusätzliche Befestigungsmaßnahmen den Arbeitsraum einschränken kann.

Hinsichtlich des Bruchrisikos müssen alle Komponenten des Roboters den Belastungen, denen die Elemente bei den Anwendungen ausgesetzt sind, standhalten. Umso wichtiger ist es daher, dass das Material auch über die gesamte vorgesehene Lebenszeit des Roboters beständig bleibt und die Festigkeit nach wie vor erhalten bleibt. Dies ist beispielsweise bei Greifanwendungen von immenser Bedeutung, damit auch jeder Vorgang gelingt und keine abfallenden Teile des Greifers die Sicherheit der Umgebung gefährden kann. Außerdem gilt es generell Maßnahmen zu setzen, damit herabfallende Objekte nicht zur Gefahr werden können.

Neben der richtigen Materialauswahl dürfen Oberflächen, Kanten und Ecken nicht zu Verletzungen führen. Aus diesem Grund sollten raue Flächen, spitze Ecken sowie scharfe Kanten bei der Konstruktion der Roboter Elemente vermieden werden.

Bei Anwendungen, in denen der Roboter zur Bearbeitung von Werkstoffen eingesetzt wird, muss das bearbeitende Werkzeug, bei Gefahr eines unerwünschten Kontaktes mit der Umgebung, rechtzeitig zum Stillstand gebracht werden können.



Mobile Roboter können durchaus sehr wendig sein. Deswegen muss diese Beweglichkeit auch bei automatisierten Fahrten berücksichtigt werden. Während der Fahrt eines mobilen Roboters darf dieser auch bei unkontrollierten Bewegungen nicht die Standsicherheit verlieren. Dies ist besonders bei höheren Geschwindigkeiten in einer Rotationsbewegungen einzuhalten. Sollte der Roboter dabei umkippen, kann es zu größeren Schäden führen, die weitaus mehr als nur den Roboter betreffen können.

Sollte der Roboter bei seinem Einsatz eine zusätzliche Last in Form eines Anhängers mit sich ziehen müssen, muss die Anhängervorrichtung ebenfalls den Kräften während der Fahrt standhalten können und ein Abkuppeln verhindern.

Viele Roboter werden auch für Handhabungsanwendungen eingesetzt. Bei diesen Vorgängen muss für jede Gefährdungssituation mit dem zusätzlichen Gewicht sowie bei einer höheren Geschwindigkeit auch mit höheren Kräften gerechnet werden.

Bei Robotern, die auf einer Verfahrachse agieren, muss daher stets dafür gesorgt werden, dass der Roboter beim Hebevorgang sowie beim anschließenden Transport, die Plattform nicht verlassen und umkippen kann.

Sollten mehrere Roboter zeitgleich Bewegungsabläufe ausführen, so muss sichergestellt werden, dass kein Risiko einer Kollision besteht. Zudem dürfen die getragenen Lasten nicht unkontrolliert herabfallen und müssen bei zu hoher Gefahr durch entsprechende Einrichtungen gesichert werden. Gerade bei stationären Robotern empfiehlt es sich hier, trennende Schutzmaßnahmen zu wählen, damit die Bewegungen kontrolliert begrenzt werden können.

Oft kommt es vor, dass der Roboter bei Handhabungsvorgängen feste Ladestellen anfahren muss. Deswegen darf der Höhenunterschied zwischen dem Roboterwerkzeug und dem Lastträger zu keinem zusätzlichen Sturzrisiko führen. Ein geeigneter Höhenunterschied erspart daher nicht nur weitere Risiken, sondern auch etwaige überflüssige Roboterbewegungen.

Hinsichtlich der Benutzerinformationen muss bei Robotern, die Hebevorgänge ausführen, eine entsprechende Betriebsanleitung zur Verfügung stehen, in der die maximale Tragfähigkeit zu finden ist. Zusätzlich muss die Information in Form einer Kennzeichnung auch am Roboter gut sichtbar sein.

Die Typ-C Norm ISO 3691-4 befasst sich mit den Anforderungen für fahrerlose Flurförderzeuge zur Gewährleistung der Sicherheit. Mobile Roboter können ebenfalls zu der Kategorie fahrerlose Flurförderzeuge gezählt werden. Zwar wird ein fahrerloses Flurförderzeug in der ISO 3691-4 Norm als Stapler genannt, doch kann ein mobiler Roboter auch Lasten mit sich führen und kann daher auch als solches betrachtet werden. Aus diesem Grund können viele Inhalte aus dieser Norm übernommen und für den Bereich der mobilen Robotik verwendet werden. Neben den Sicherheitsanforderungen umfasst diese Norm auch die Verifizierung dieser Anforderungen, weshalb diese für den, bislang noch mangelhaft behandelten Bereich der mobilen Robotik von immenser Bedeutung ist. Diese Norm verweist

außerdem auf die Gefährdungen, die in der Sicherheitsnorm ISO 12100 behandelt werden und deckt somit mehrere relevante Gefahren für den mobilen Roboter ab.

Laut Norm muss ein Stapler ein Bremssystem besitzen, das das Förderzeug bei einer unterbrochenen Energiezufuhr zum Stillstand führt. Bei mobilen Robotern ist es genauso wichtig, dass ein solches Bremssystem integriert wird, damit mögliche Gefahren in dieser Situation verhindert werden können. Im manuellen Betrieb muss dieses System auch eingreifen, wenn die sich der Roboter nicht mehr lenken lässt oder die Geschwindigkeit nicht mehr verändert werden kann.

Bei der Aufnahme sowie beim anschließenden Transport von Lasten, dürfen sich die Positionen dieser Objekte auf dem Lastaufnahmemittel nicht verändern. Bezogen auf die Handhabungseinrichtung eines mobilen Roboters, darf zudem auch die Orientierung nicht unbeabsichtigt veränderbar sein. Der Gebrauch von Kameras dient hier somit der Prüfung der Pose von Werkobjekten und soll dem Roboter, bei einem negativen Prüfergebnis, ein Signal zur Unterbrechung der Fahrt, schicken.

Da der mobile Roboter auch unter die Kategorie der Stapler für spezielle Anwendungen in einem definierten Umfeld fällt, muss dieser für die Gewährleistung der Standsicherheit einer Prüfung unterzogen werden. Diese muss unter extremen Szenarien mit allen im Betrieb möglichen Parametern gestaltet werden. Der mobile Roboter hat die Prüfung bestanden, wenn mit 110% der maximalen Tragfähigkeit sowie mit 110% der Geschwindigkeit keine Gefahr mehr besteht.

Ein mobiler Roboter muss sich in seiner definierten Umgebung frei bewegen können. Daher sind trennende Schutzeinrichtungen hier unvorteilhaft. Stattdessen sollte der Roboter mit Sensoren, die der Personenerkennung bzw. der Objekterkennung dienen, ausgestattet sein. Sollten Probleme bei der Erkennung von Personen auftreten, so muss die Gefahrensituation durch einen Fluchtweg oder einen Nothalt am Roboter entschärft werden können.

Wie bei allen Anwendungen, die das Bewegen von Anhängern erfordern, sollte ein hörbares Signal ertönen, bevor der Roboter langsam anfährt. Dies ist vor allem in einer kleineren Arbeitsumgebung, in der das menschliche Personal mit dem Roboter auf engstem Raum arbeiten muss, einzuhalten. Außerdem muss die Kuppel- oder Zugeinrichtung auf einer Höhe zwischen 20 und 50cm liegen und nur ein beabsichtigtes sowie sicheres An- und Abkuppeln gewährleisten können.

Für die Funktionsüberprüfung von Staplern kann neben der direkten Überprüfung am Förderzeug selbst auch eine Simulation herangezogen werden. Vor dem Einsatz von Robotern werden die Anwendungen oft ohnehin in einer Robotersimulation geprüft. Dennoch kann es von Vorteil sein, den Roboter in der realen Umgebung zu testen, um etwaige Ausfälle früh zu erkennen.

Heutige mobile Roboter sind zumeist mit berührungslosen Sensoren ausgestattet. Für die Überprüfung des Sensors kann ein zylindrischer Prüfkörper verwendet werden, um ein zu erkennendes Objekt darzustellen. Der Roboter muss sich dem Körper in diesem Test nähern und vor diesem anhalten können, ohne den Prüfkörper mit einem festen Bestandteil des Roboters zu berühren.

Wenn der Roboter mit Bumpern agieren soll, darf die Betätigungskraft, je nach Größe des Prüfkörpers, einen maximalen Wert von 750N bzw. 250N erreichen.

Die Tragfähigkeit der strukturellen Komponenten des Roboters müssen ebenfalls einer Prüfung unterzogen werden. Hier müssen die Elemente für 15 Minuten eine statische Last von mindestens 125% der Nenntragfähigkeit sowie der tatsächlichen Tragfähigkeit aushalten können.

## 4.2 Datenerhebung

Die Fachhochschule Technikum Wien arbeitet eng mit dem TÜV Austria an dem Projekt SIP 4.0 zusammen. Daher soll mithilfe eines Interviews Klarheit über die Zukunft dieses Themas geschaffen werden.

Für das Interview wurde zunächst der Fokus auf das Forschungsprojekt gesetzt und die folgende Frage formuliert: „Welchen Einfluss haben Forschungsprojekte wie SIP 4.0 auf zukünftige Normen und Sicherheitsrichtlinien?“

Der TÜV hat einen Sitz im technischen Komitee und kann Ideen und Vorschläge einwerfen. Zwar können diese die Entscheidungen beeinflussen, allerdings existieren noch weitere Organisationen, die auch Gegenargumente liefern können.

Speziell beim Thema SIP 4.0 liegt die Schwierigkeit darin, dass keine einheitliche Norm hierfür existiert. Hier sind zwei Anwendungen klar herauszuheben – das Fahren sowie das Manipulieren. Beim Projekt SIP 4.0 sind beide Anwendungen derzeit nacheinanderfolgend. Daher kann noch kein allgemeiner Schluss für diese Anwendungen gezogen werden.

Allerdings wurden bislang die Interaktionen mit den Stationen wie etwa das Beladen und Entladen untersucht und das sichere Konstruieren miteinbezogen. Nun gilt es den Aufbau zu betrachten und Konstruktionsrichtlinien zu befolgen wie zum Beispiel das Vermeiden von scharfen Kanten.

Ein weiterer Aspekt, der für das Interview berücksichtigt wurde, ist welchen Standpunkt der TÜV zu diesem Thema vertritt. Daher wurde die folgende Frage formuliert: „Wie wird der TÜV auf den veralteten Stand der Sicherheitstechnik im Bereich der mobilen Robotik reagieren?“

Noch in diesem Jahr soll eine neue Norm veröffentlicht werden. Dies kann zwar nützlich sein, dennoch sind Normen und Standards keine Grundvoraussetzung für Applikationen. Wenn keine Norm vorhanden ist, fokussiert sich der TÜV auf die Risikobeurteilung und arbeitet mehr Details aus. Zudem kooperiert der TÜV direkt mit dem Kunden bzw. den Unternehmen und arbeitet daher beim SIP 4.0 Projekt mit der Fachhochschule Technikum Wien zusammen.

Abschließend wurde der Fokus auf die Sicherheitsprüfungen gelegt und die folgende Frage gestellt: „Wie werden Sicherheitsprüfungen für Industrie 4.0 Anwendungen in Zukunft aussehen?“

Bisher wurden die beiden Gebiete Safety und Security getrennt betrachtet. Nun wird immer deutlicher, dass diese miteinander verschmolzen werden und zusammen beurteilt werden müssen. Beispielsweise kann die Betriebssicherheit durch Sicherheitslücken in der Kommunikation gefährdet werden. Daher setzen Firmen in der Zukunft auf Software und Simulationen, die bei der Risikobeurteilung helfen sollen. Außerdem läuft eine ständige Feedbackschleife mit dem Kunden, um das Risiko zu minimieren. Obwohl Software und Tool viel abnehmen können, werden diese den menschlichen Faktor bei der Beurteilung niemals ersetzen können. Daher sollen diese Programme lediglich unterstützend wirken, um die unzähligen Parameter wie etwa Staub oder Lärm erfassen zu können, aber niemals die Rolle des Menschen übernehmen.

## 5 Vorgehensweise in der sicherheitsgerechten Konstruktion

Der Leitfaden für die sicherheitsgerechte Konstruktion von Handhabungseinrichtungen für mobile Roboter wurde nach dem Prinzip einer Roadmap aufgebaut und ist nach der VDI-Richtlinie 2221 (Verein Deutscher Ingenieure, 1993) in vier Konstruktionsphasen unterteilt (siehe Abbildung 2). Dies umfasst die Planung, die Konzipierung, den Entwurf und die Ausarbeitung.

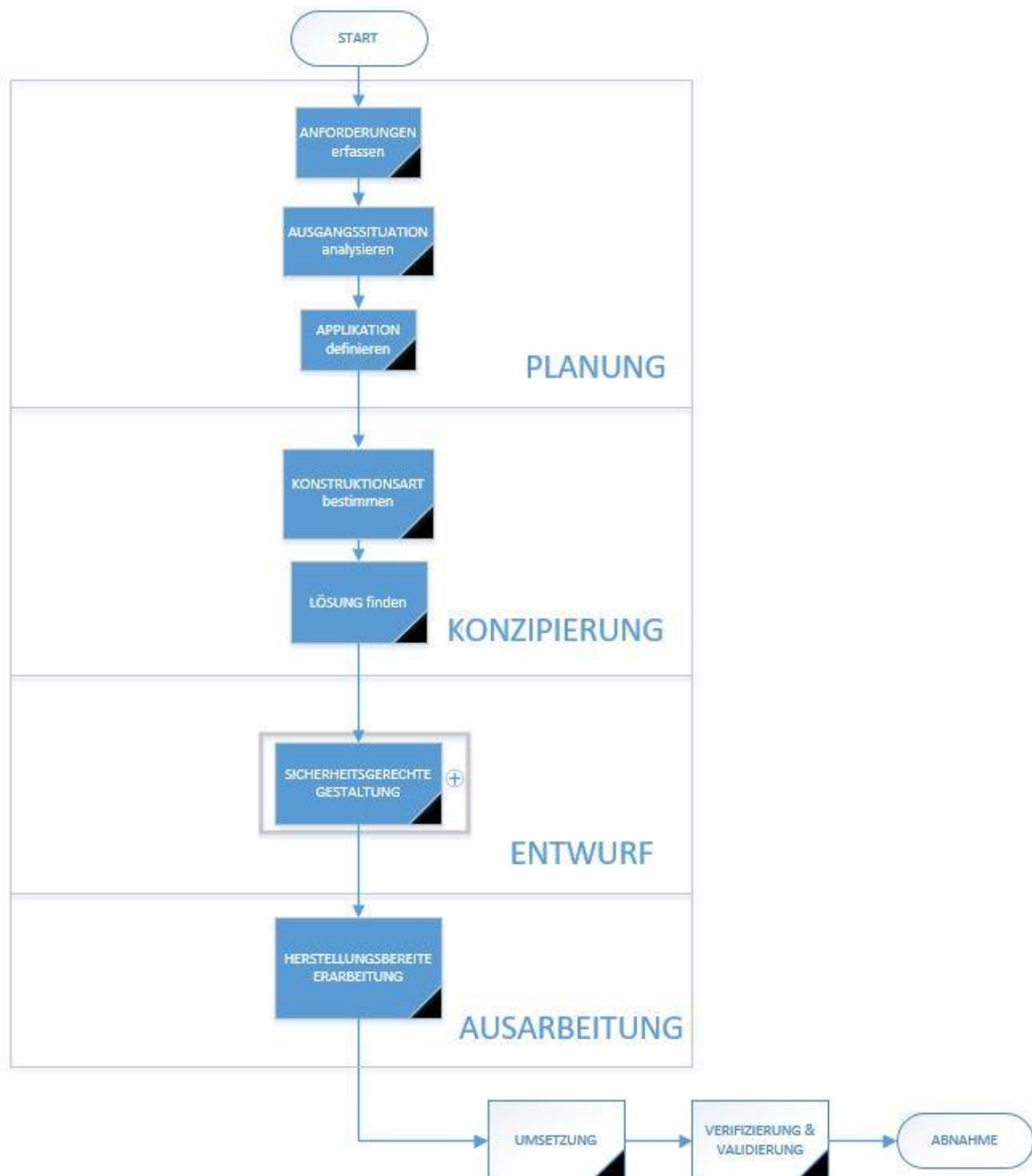


Abbildung 2: Roadmap

In der ersten Phase der Roadmap werden zunächst die Anforderungen zur Klärung der Aufgabenstellung erfasst. Hier ist zu beachten, dass Anforderungen in zwei Gruppen gegliedert werden können – explizite Anforderungen und implizite Anforderungen. Die expliziten Anforderungen werden mit dem Kunden vereinbart und werden üblicherweise schriftlich in einem Pflichtenheft oder in einem Vertrag festgehalten. Zu den expliziten Anforderungen können aber auch nur verbal genannte Anforderungen gezählt werden. Hingegen sind implizite Anforderungen jene, die für den Kunden oft unbekannt sind und daher nicht genannt werden. Hier liegt es in der Verantwortung des Auftragnehmers, diese zu erfassen. Ein Beispiel für eine implizite Anforderung wäre die Möglichkeit der autonomen Pfadplanung eines mobilen Roboters. Neben den Interessen des Kunden und denen des eigenen Unternehmens müssen auch Gesetze und Normen bzw. Standards berücksichtigt werden.

Im nächsten Schritt wird die Ausgangssituation analysiert. Insbesondere muss hierbei der Ordnungszustand (OZ), bestehend aus dem Orientierungsgrad (OG) und dem Positionierungsgrad (PG), bestimmt werden. Ebenfalls müssen die Eigenschaften des Objektes und die des einzusetzenden Roboters untersucht werden. So muss beim Gegenstand auch festgestellt werden, wie empfindlich dieses beim Greifvorgang ist. Ist dieser beispielsweise verchromt, so muss ein besonderes Augenmerk auf die Oberfläche Gegenstandes geworfen werden. Etwaige Toleranzen und weitere Bedingungen, die für den Handhabungsvorgang von Bedeutung sind, sollten ebenfalls erfasst werden.

Anschließend muss die Anwendung mit dem Roboter abgeklärt werden. Hier wird die Frage, wie der Roboter die Aufgabe lösen wird, beantwortet. Dabei wird auch konkretisiert wie der Materialfluss stattfindet.

Die Phase der Konzipierung umfasst das Bestimmen der Konstruktionsart und nach dem Vergleich der zur Auswahl stehenden Konzepte auch die Entscheidung über das endgültige Konzept. Bei den Konstruktionsarten wird grundsätzlich zwischen der Neukonstruktion, Variantenkonstruktion und Anpassungskonstruktion unterschieden.

Die Entwurfsphase besteht aus dem Prozess der sicherheitsgerechten Gestaltung (siehe Abbildung 3). Dieser Prozess beginnt mit dem Rohentwurf der Konstruktion. Hier wird das ausgewählte Konzept unter der Berücksichtigung der vier Gestaltungsschritte des „Pahl/Beitz“ (Feldhusen & Grote, 2013) entworfen. Somit beinhaltet der Gestaltungsprozess folgende Schritte:

1. Relevante Anforderungen und Standards für die Gestaltung erfassen
2. Globalbetrachtung (z.B. Einfluss von äußeren Kräften)
3. Produktstruktur (Anforderungen an die Struktur, Bestimmung, Schnittstellen)
4. Eigentliche Gestaltung und Werkstoffauswahl

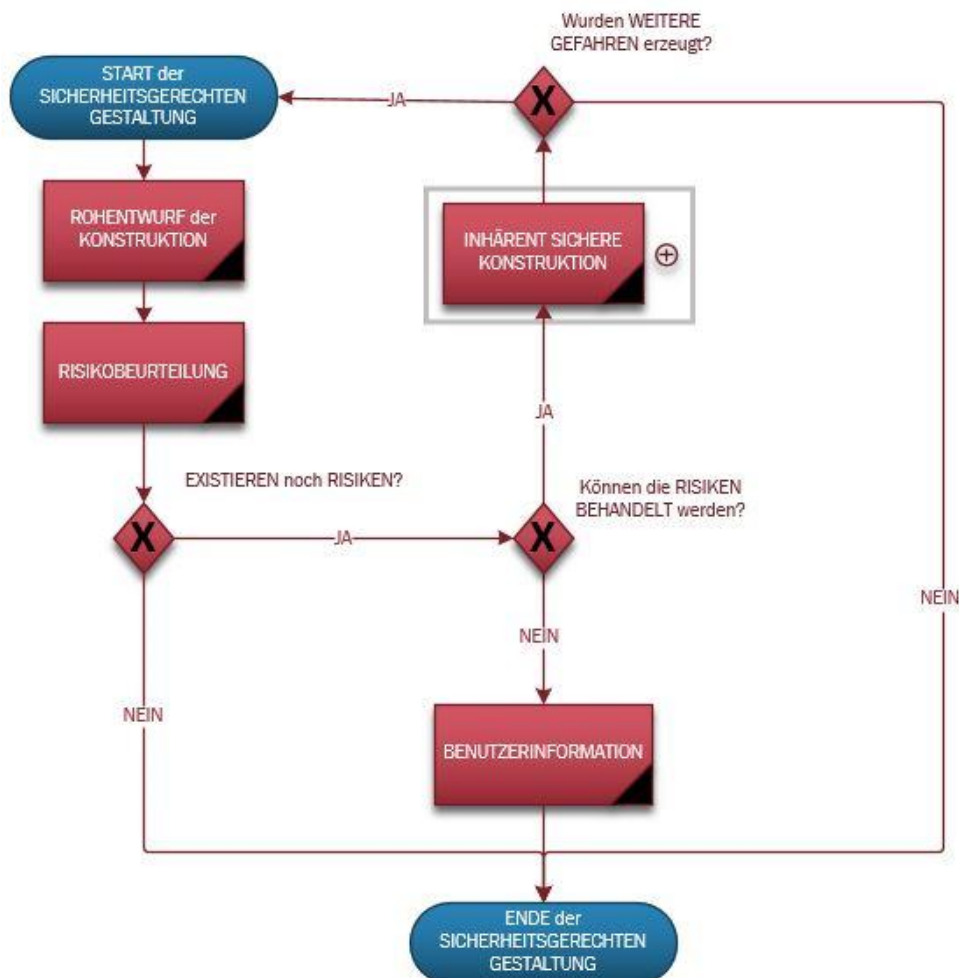


Abbildung 3: Prozess der sicherheitsgerechten Gestaltung

Sobald die Gestaltungsarbeit abgeschlossen ist, muss eine Risikobeurteilung vorgenommen werden. Mit einer sogenannten Konstruktions-Failure Mode and Effective Analysis (Konstruktions-FMEA) können die wichtigsten Bestandteile einer Risikobeurteilung, die Gefährdungsidentifizierung sowie die Risikoeinschätzung und –bewertung, abgedeckt werden. Alternativ kann die Beurteilung auch beispielsweise mit der Bestimmung des Safety Integrity Level (SIL) erfolgen. Im Anschluss an die Risikobeurteilung wird abgefragt, ob nun noch Risiken vorhanden sind. Sollten tatsächlich keine Risiken mehr auffindbar sein, endet die sicherheitsgerechte Gestaltung. Wenn auffindbare Risiken nicht mehr behandelt werden können, müssen Benutzerinformationen hinterlegt werden bevor die Phase beendet wird. Im anderen Fall erfolgt eine Risikominderung mittels der Abfragen in der inhärent sicheren Konstruktion (siehe Abbildung 4).

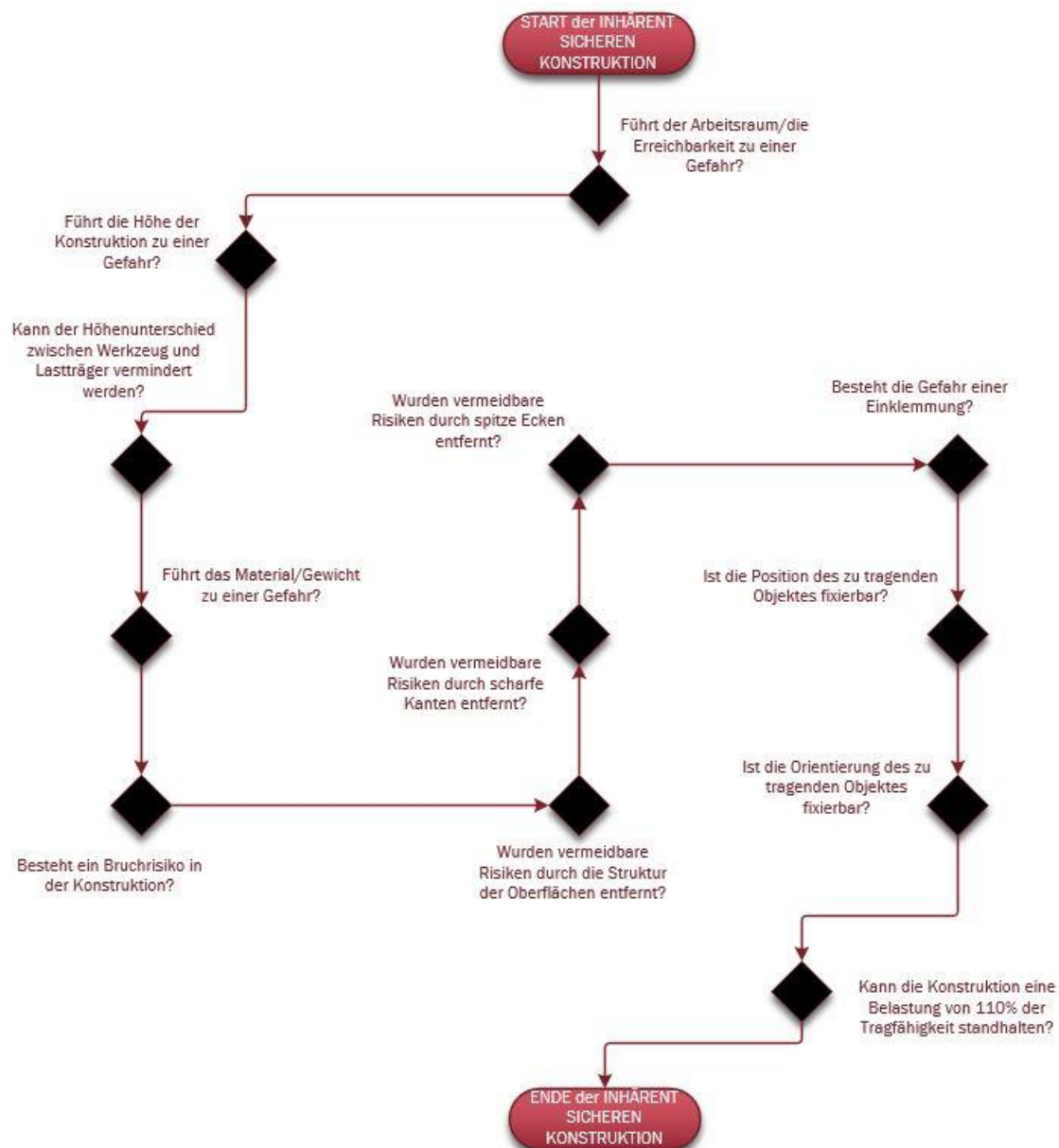


Abbildung 4: Abfragen in der inhärent sicheren Konstruktion

In diesem Prozessschritt werden auch einige abgeleitete Faktoren aus den Sicherheitsnormen ISO 12100 und ISO 3691-4 sowie der Maschinen-Sicherheitsverordnung angeführt. Die Abfragen sollen dem Anwender dabei helfen die grundlegendsten Aspekte bei der sicherheitsgerechten Konstruktion zu berücksichtigen und das Risikoausmaß zu mindern. Anschließend muss überprüft werden, ob neue Gefahren hinzugekommen sind und eine Wiederholung des Ablaufs notwendig ist. Ansonsten endet auch hier die sicherheitsgerechte Gestaltung und damit auch die Entwurfsphase.



Die letzte Phase der Roadmap dient der Ausarbeitung. Hier werden alle notwendigen Details hinsichtlich der Herstellung des Objektes hinzugefügt. Dies geschieht für gewöhnlich durch Stücklisten, technische Zeichnungen und Instruktionen für den möglichen Bau des Objektes. Im Normalfall findet die Umsetzung der geplanten Konstruktion im Anschluss statt, gefolgt von der Verifizierung und Validierung sowie der letztlichen Abnahme.

## 6 Praktische Durchführung

### 6.1 Anwendung der Roadmap

Gemäß der ersten Phase sind die Anforderungen für die Aufgabenstellung zu erfassen. Das Fallbeispiel in der digitalen Fabrik der Fachhochschule Technikum Wien sieht einen Transport von Werkstücken zwischen mehreren Stationen vor. Diese Werkstücke werden auf ein Bauteil platziert, das von einem mobilen Roboter abgeführt wird (siehe Abbildung 5).

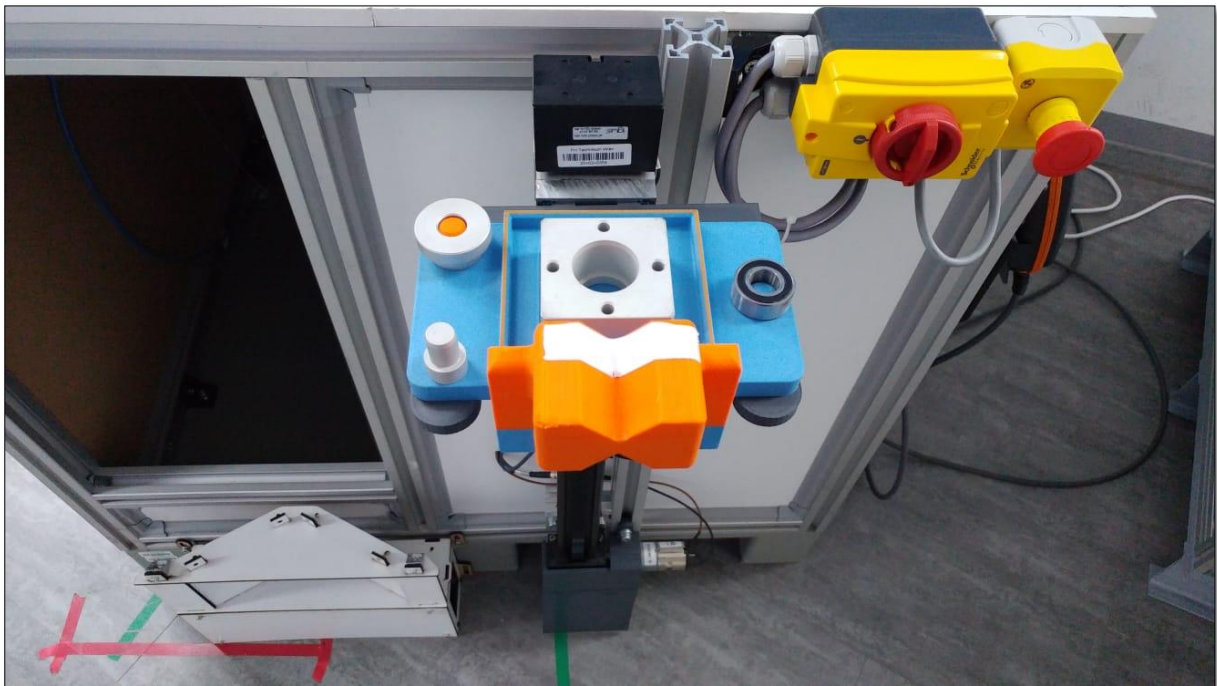


Abbildung 5: Festgelegtes Bauteil

Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Werkstücke auch während dem Transport in ihren bestimmten Vorrichtungen verbleiben. Als weitere implizite Anforderung gilt, dass das Bauteil bei der Übergabe auch tatsächlich in die dafür vorgesehene Position abgelegt werden muss. Für diese bestimmte Anwendung sind keine Vorschriften in Normen bzw. Standards vorhanden. Daher wird eine detaillierte Risikobeurteilung im späteren Verlauf herangezogen.

Nun müssen die Arbeitsmittel sowie die Arbeitsbedingungen analysiert werden. Da das Bauteil auf der Halterung der Stationen weder drehbar noch verschiebbar und während dem Transport fest eingespannt ist, hat dieses im gesamten Prozessablauf einen Ordnungszustand von  $OZ = 3/3$ . Die Werkstücke, die sich auf dem Bauteil befinden sollen, haben den Ordnungszustand  $OZ = 2/3$ , da eine Drehung um die eigene Achse möglich ist. Das Material des Bauteils besteht aus Polylactide (PLA). Für diese Anwendung ist die Oberfläche daher nicht stark empfindlich.

Bei der mobilen Plattform handelt es sich um den MIR100 mit dem Roboterarm UR5 und ist somit ein Sechs-Achs-Roboter mit serieller Kinematik. Der Roboter hat jedoch beim Greifen eine Toleranz von 1cm in der Absolutgenauigkeit.

Die digitale Fabrik sieht bei den Anwendungen grundsätzlich keine Anwesenheit von Menschen vor.

Im Anschluss muss die Anwendung auch hinsichtlich des physikalischen Wirkprinzips genau definiert werden. Hier wird ein mechanisches Wirkprinzip verwendet, da der aktuelle Greifer ein Fingergreifer ist und das Bauteil mit den Werkstücken ein hohes Gewicht hat. Der grundsätzliche Ablauf der Schritte lässt sich mit einer Funktionsfolge darstellen (siehe Abbildung 6).

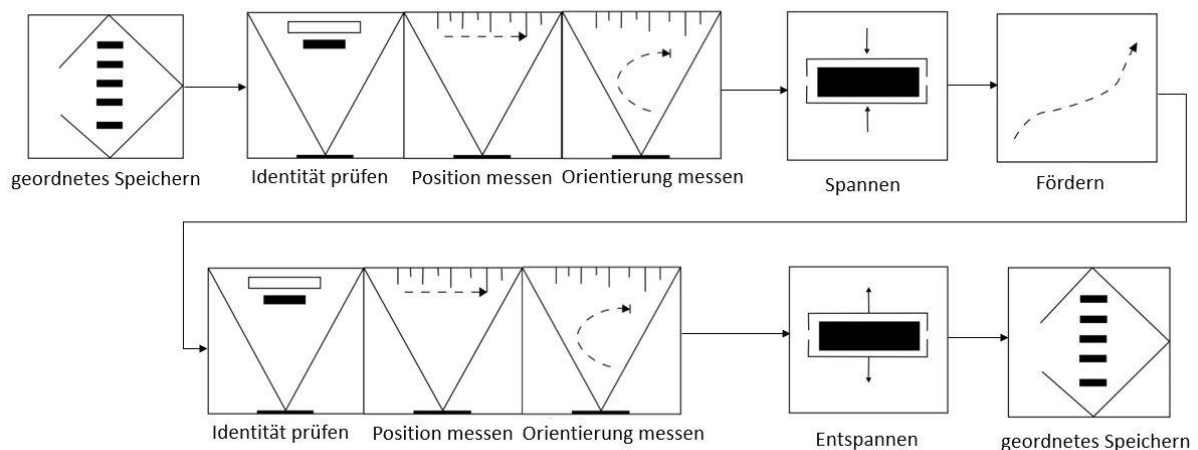


Abbildung 6: Funktionsfolge

Diese umfasst den gesamten Handhabungsablauf und beginnt bei der Aufnahmestation, bei der die Werkstücke bereits auf dem Bauteil platziert sind und daher in einem geordneten Zustand sind. Anschließend wird die Position sowie die Orientierung des Bauteils mittels einer Kamera erfasst. Nach erfolgreicher Prüfung des Bauteils wird dieses mit dem Greifer aufgenommen und zur Übergabestation befördert. Bei der Ankunft erfolgt eine weitere Prüfung, um das Bauteil in die dafür vorgesehene Position abzulegen. Danach befindet sich das Bauteil wieder in einem geordneten Zustand.

Das derzeitige Konzept beinhaltet einen Zwei-Fingergreifer, dessen Greiferbacken für die spezifische Anwendung konstruiert wurden. Da dieser aufgrund einiger Konstruktionsmerkmale nicht den Sicherheitsvorschriften entspricht, muss ein neues Konzept für den Greifer entwickelt werden. Dies wird mithilfe einer Anpassungskonstruktion für den aktuellen Fingergreifer gelöst, um den Sicherheitsanforderungen gerecht zu werden. Zusätzlich wird ein weiterer Greifertyp entwickelt, um beide Konzepte miteinander vergleichen zu können. Dieser Endeffektor besteht aus einem Drei-Fingergreifer mit einer

Federrückstellung, um die Greifkraft in einem Havariefall sichern zu können (siehe Abbildung 7).

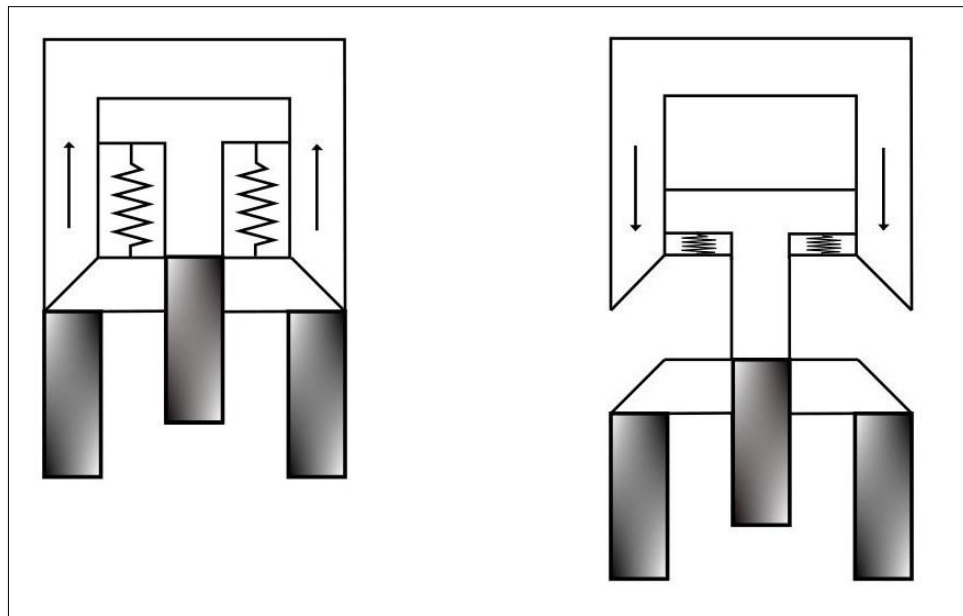


Abbildung 7: Drei-Fingergreifer mit Federrückstellung

Dennoch wird die Anpassungskonstruktion als Lösung herangezogen, da dieser bereits in realen Anwendungen eingesetzt wird. Außerdem sind einige Parameter hinsichtlich der mechanischen Auslegung verfügbar. Aus dem Datenblatt ist die Greifkraft entnehmbar, mit der beispielsweise die Schmerzschwellentabelle gemäß der technischen Spezifikation ISO TS 15066 (Beuth Verlag, 2017) verglichen werden kann, um die Gefährdungen besser einschätzen zu können.

Der bereits konstruierte Zwei-Fingergreifer wird als Rohentwurf für die Entwurfsphase verwendet, um die Risikobeurteilung für dieses Konzept durchzuführen. Hierfür wird in erster Linie eine Konstruktions-FMEA verwendet. Die Risikoprioritätszahl RPZ ergibt sich aus der Multiplikation der einzelnen Faktoren ( $RPZ = A \times B \times E$ ). Für die Bestimmung dieser Faktoren wird auf einer Skala von 1 bis 10 beurteilt (siehe Anhang A.1).

Zunächst wurden die markanten Merkmale des Zwei-Fingergreifers zur Beurteilung herangezogen (siehe Anhang A.2). Besonders auffällig sind die scharfen Kanten sowie die spitzen Ecken der Greiferbacken. Dabei können die Ecken im Vergleich zu den Kanten leichter mit der Umgebung in Kontakt treten, weshalb das Ausmaß einer Berührung höher ist. Dennoch werden diese Eigenschaften oft vernachlässigt und erhalten daher höhere Zahlenwerte. Mit einer Risikoprioritätszahl von über 125 sind beide Merkmale bereits ein mittleres Risiko für die vorgesehene Anwendung. Durch das Hinzufügen von Verrundungen im Modell können diese Merkmale auf ein geringes Risikopotential vermindert werden. Die Auswirkungen im verbesserten Zustand sind nur noch sehr gering.

Des Weiteren sind die Greiferbacken von außen ohne Polsterung ausgestattet und könnten, wenn auch nur im Fall einer Fehlerkennung, der Umgebung größeren Schaden hinzufügen. Daher wird die Auswirkung hoch eingestuft. Wird dies für den verbesserten Zustand berücksichtigt, so reduziert sich die Auswirkung auf ein Minimum.

Als Zwei-Fingergreifer, dessen Greiferbacken an die Form des Bauteils angepasst sind, muss der Roboter das Ziel genau anfahren, um dieses auch greifen zu können. Durch die Toleranz in der Greifgenauigkeit muss der Greifer öfter neupositioniert werden. Da eine Zeitverzögerung und auch sogar ein Schaden als Folge auftreten kann, erhält das Merkmal einen hohen Bedeutungs-Faktor. Mittels eines anderen Greiftyps können trotz Genauigkeitstoleranz das Auftreten und die Auswirkung des Fehler reduziert werden.

Auch der Drei-Fingergreifer wird nach dem Rohentwurf einer Risikobeurteilung unterzogen (siehe Anhang A.3).

Hier ist vor allem die Linearachse aufgrund des Greifertyps ein Merkmal, das berücksichtigt wird. Zwar ist die Häufigkeit einer Einklemmung sehr gering, dennoch ist das Ausmaß immens groß. Durch die Reduzierung der Geschwindigkeit bzw. die Möglichkeit den Greifer manuell bewegen zu können, reduziert sich der Bedeutungs-Faktor. Mit einer Zeitverzögerung ist dennoch zu rechnen.

Aufgrund der Linearachse hat der Greifer auch eine gewisse Länge, die zu einem Risiko führen kann. Das Rohr, das die Achse umgibt, wird nur in seltenen Fällen die Umgebung stoßen. Die Bedeutung ist aufgrund der Kollision, die zu keinen größeren Verletzungen führt, nicht so hoch wie eine Einklemmung. Wird eine Polsterung als Maßnahme gesetzt, so sinkt das Ausmaß des Risikos.

Die Federn entlang der Linearachse werden bei einem Defekt die Greifkraft nicht konstant sichern können. Dieser Fall tritt eher selten auf und die Bedeutung ist auch nicht groß, da die eigentliche Funktion der Feder lediglich als Ergänzung zur Verfahrachse dient. Ein Sichtfenster zu den Federn würde die Entdeckung des Fehlers erleichtern und somit auch den Faktor deutlich reduzieren.

Als Teil der Risikobewertung können die beiden Konzepte nun verglichen werden. Nach der ersten FMEA ist deutlich zu sehen, dass die Merkmale des Zwei-Fingergreifers ein mittleres Risikopotential haben. Allerdings liegen die Risikoprioritätszahlen im verbesserten Zustand bei beiden Konzepten im selben Risikobereich.

Nachdem bei der Beurteilung noch Risiken vorhanden sind, die vermindert werden können, wird im weiteren Verlauf der sicherheitsgerechten Konstruktion eine Risikominderung in Form der inhärent sicheren Konstruktion vorgenommen. Hier wird auch auf etwaige Verrundungen verwiesen, die hinzugefügt werden sollten. Da keine neuen Gefahren hinzugekommen sind, endet die sicherheitsgerechte Gestaltung hier.

Abschließend werden technische Zeichnungen für die Herstellung des Drei-Fingergreifers erstellt (siehe Anhang B).

## 6.2 Modellierung

Für die Simulation der Anwendung des zu entwickelnden Werkzeugs sind die Modelle der Übergabestation in der digitalen Fabrik, des zu transportierenden Bauteils und des mobilen Roboters inklusive dem Werkzeug erforderlich.

Das von der Fachhochschule Technikum Wien zur Verfügung gestellte CAD-Modell der Übergabestation (siehe Abbildung 8) entspricht nicht des derzeitigen Aufbaus in der Realität. Daher müssen die fehlenden Elemente ergänzt werden, um eine realistische Simulationsumgebung erschaffen zu können.

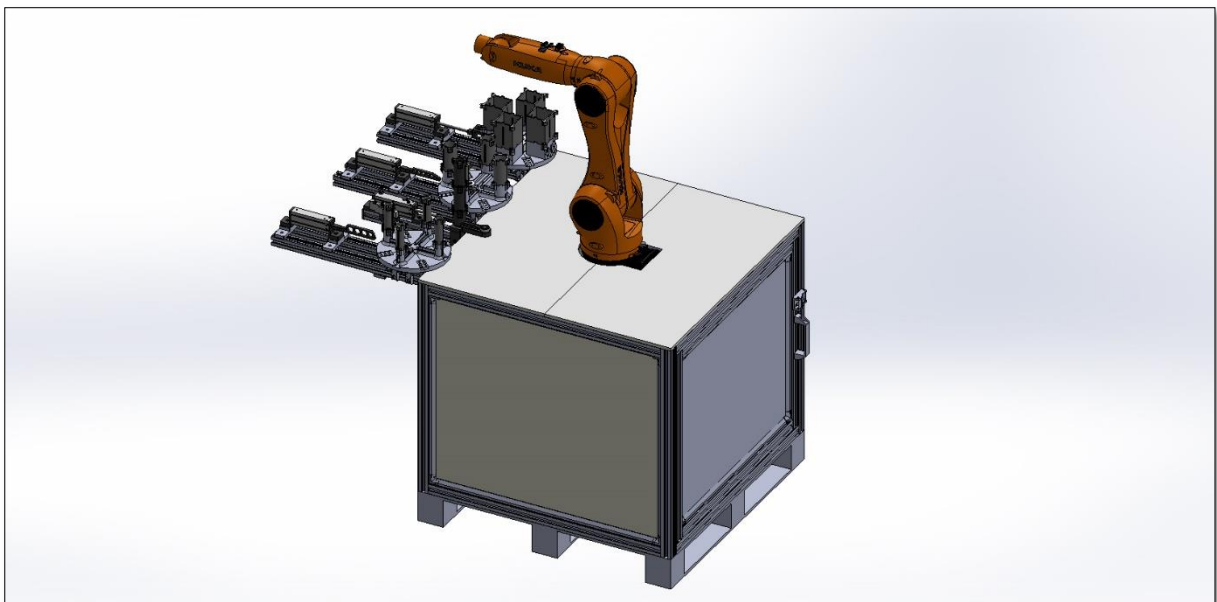


Abbildung 8: CAD Modell der Übergabestation

Die Modellierung der Komponenten erfolgt mit dem CAD-Programm SolidWorks 2018.

Zunächst müssen weitere Aluminiumprofile hinzugefügt werden. Damit alle Profile einheitlich sind, wird ein bereits vorhandenes Profil aus der Baugruppe entnommen und als separates Teil auf die gewünschte Länge zugeschnitten und abgespeichert. Im Anschluss werden diese mithilfe von Verknüpfungen an die richtige Position platziert.

Die Abdeckung der Seite wird ebenfalls als separates Teil geöffnet und bearbeitet. Hier wird ein Rechteck ausgeschnitten, das in der Baugruppe als Sichtfenster dient. Die neue Abdeckung soll schließlich die vorherige volle Abdeckung ersetzen.

Die Halterung, auf der das zu transportierende Bauteil liegt, muss noch konstruiert werden. Diese besteht aus einem schmalen I-Träger und zwei Elementen jeweils zur Befestigung an die Übergabestation sowie zur Montage der eigentlichen Ablagekomponente der Halterung. Für die Kegel, die das Bauteil derzeit bei den Stationen in der sicheren Position halten, müssen Hilfsebenen hinzugefügt werden (siehe Abbildung 9).

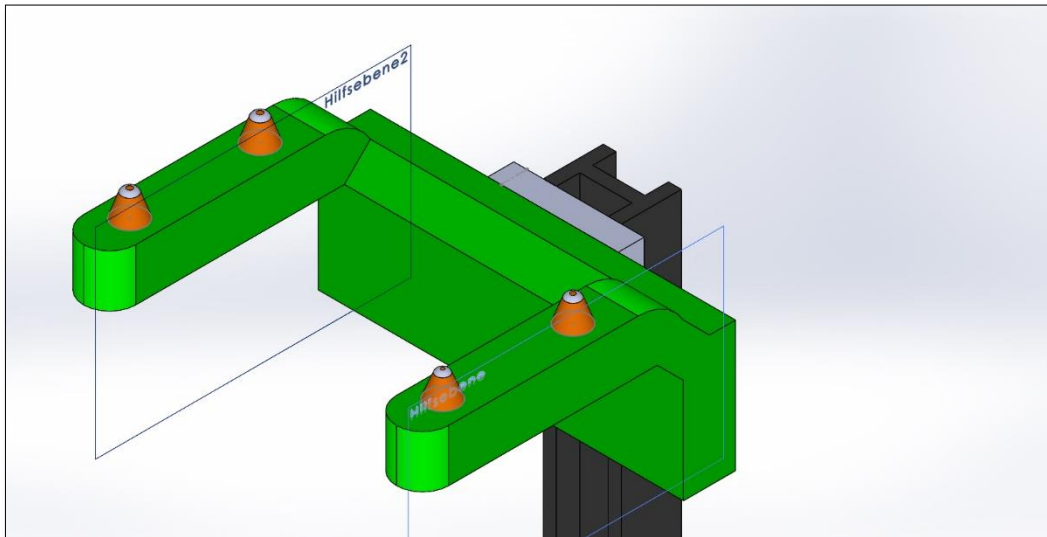


Abbildung 9: Bauteilhalterung der Übergabestation

Die Ebenen werden mit einem Offset vom Rand zur Mitte des Stützträgers platziert. In den jeweiligen Ebenen werden rechtwinklige Dreiecke gezeichnet, die im Anschluss als Fläche für den Rotationskörper dienen. Dabei wird die Ankathete als Rotationsachse definiert, sodass ein Kegel entstehen kann. Abschließend werden Rundungen hinzugefügt. Die gesamte Halterung wird schlussendlich auf das in der Mitte befindliche Aluminiumprofil mit Verknüpfungen angebracht (siehe Abbildung 10).

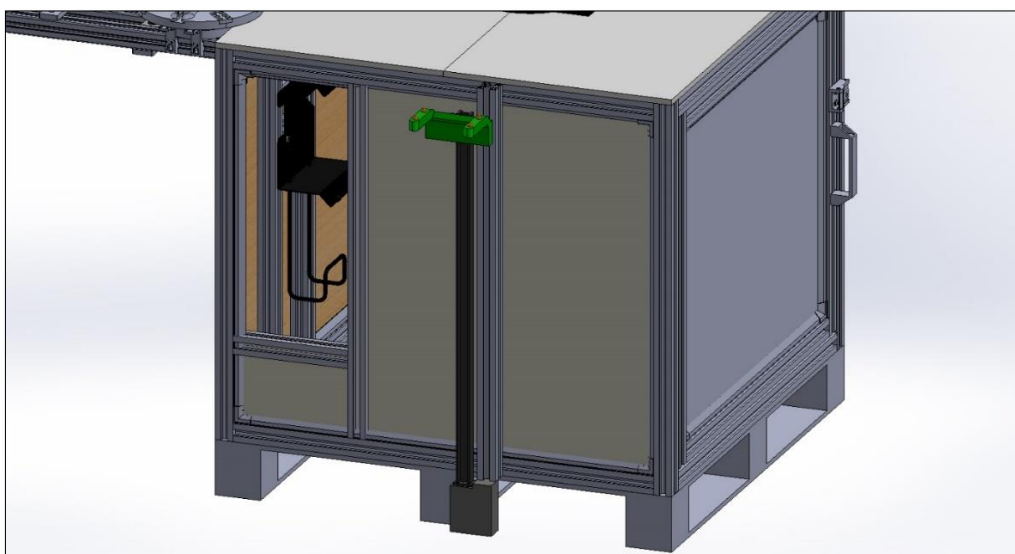


Abbildung 10: Übergabestation ergänzt auf den neusten Stand

Das Bauteil hat auf der Unterseite mindestens vier Bohrungen, damit das Bauteil auf die Kegel der beiden Stützträger platziert werden kann, ohne dabei die Position zu verlassen. Auf der Oberseite werden verschiedene Elemente der digitalen Fabrik abgelegt (siehe



Abbildung 11). Daher müssen hier Vertiefungen, Bohrungen und zylinderförmige Volumenkörper hinzugefügt werden. Anschließend werden noch Verrundungen und Fasen erstellt. Bei der Konstruktion des Bauteils muss auch im Hinblick auf die Simulation darauf geachtet werden, dass nicht alle Volumenkörper miteinander verschmolzen sind. Folglich wird jenes Teilstück, das das Werkzeug des Roboterarms greifen wird, als separater Volumenkörper erstellt, damit dieser in der Simulation anwählbar ist.

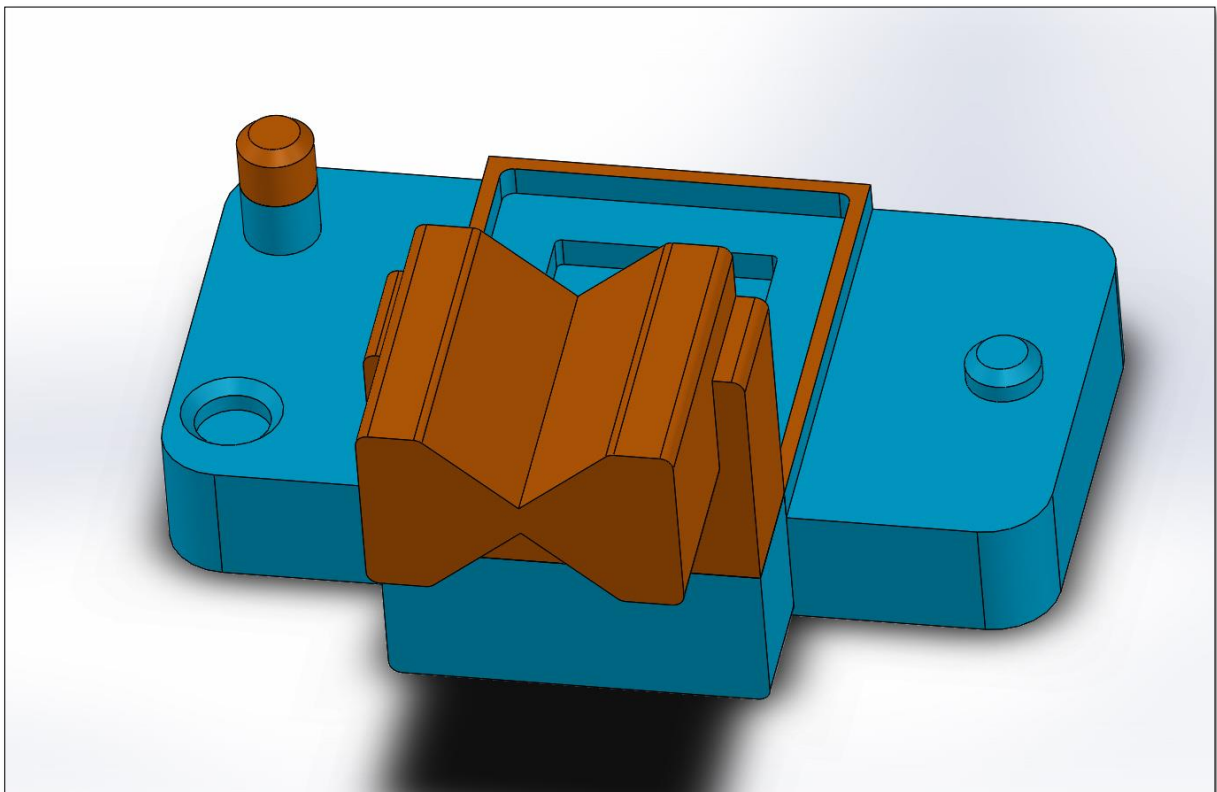


Abbildung 11: CAD-Modell des Bauteils

Das Werkzeug des Roboters muss in jedem Fall auf den Roboterarm UR5 des Herstellers Universal Robots abgestimmt werden. Damit das Werkzeug an den einzuspannenden Volumenkörper befestigt werden kann, werden die entsprechenden Bohrungen und Vertiefungen auf einer Seite des Werkzeugs erstellt, sodass beide Elemente bei Verknüpfungen ineinander vereinigt sind.

Der Drei-Fingergreifer besteht aus einem Rohrmantel und einem Kolben auf dem sich die Roboterhand befindet (siehe Abbildung 12). Die Roboterhand besteht zu Beginn aus einem quadratischen Volumenkörper. Für die Positionierung der Finger werden linear ausgetragene Schnitte verwendet, um eine Rotationsachse erschaffen zu können. Für die beiden Finger an den Ecken werden Ebenen erstellt um den linear ausgetragenen Schnitt normal auf die gewünschte Fläche erzeugen zu können. Überschüssige Flächen werden ebenfalls mittels linear ausgetragenen Schnitten entfernt.

Die Finger bestehen aus zwei beweglichen Abschnitten. Der untere Abschnitt wurde bis zur Hälfte modelliert und anschließend mit dem gespiegelten Modell zu einem Teil kombiniert.

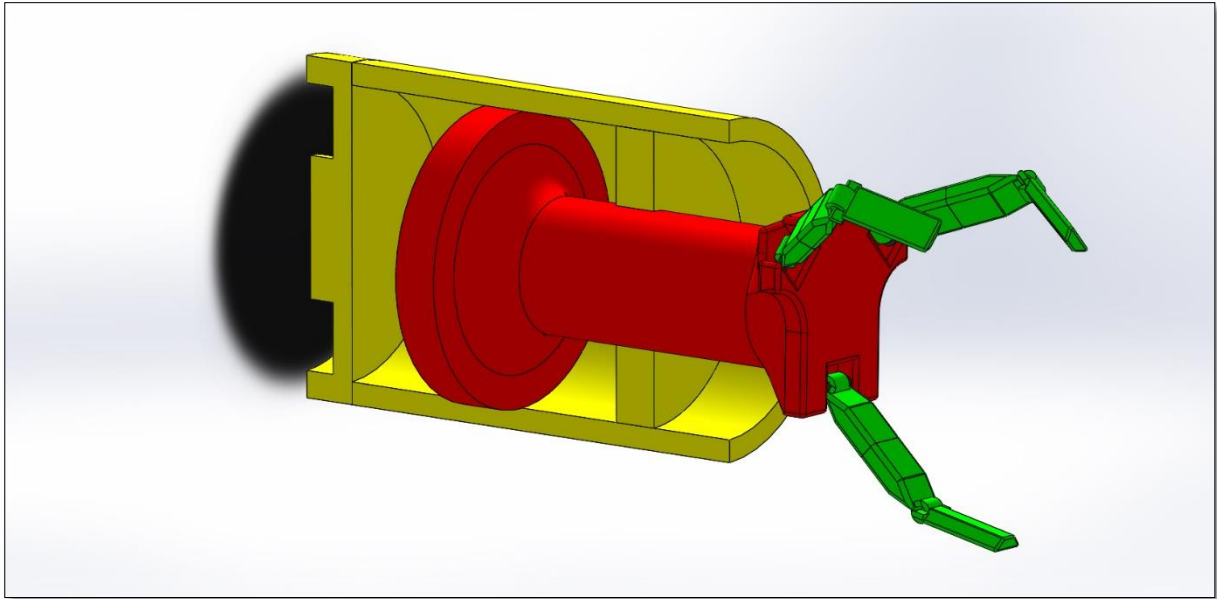


Abbildung 12: Konstruktion des Drei-Fingergreifers

## 6.3 Simulation

Die Simulation der Roboteranwendung erfolgt mit der Software RobotStudio von ABB. Für gewöhnlich werden hier auch die Roboter des Herstellers ABB simuliert. Daher existiert zu jedem Roboter in der Bibliothek eine dazugehörige Steuerung, die dem Programmierer bzw. dem Benutzer der Software das Abarbeiten von Befehlen ermöglichen. Unter anderem gehört dazu das Anfahren von Positionen, einem definierten Pfad folgen oder aber auch das Simulieren von verschiedensten Werkzeuganwendungen.

Bei dem Fallbeispiel, das hier bearbeitet wird, handelt es sich allerdings um einen Roboter, der nicht von ABB unterstützt wird. Folglich existiert hierzu auch keine Steuerung. Nichtsdestotrotz besteht die Möglichkeit auch Nicht-ABB-Roboter in der Software zu simulieren. Hierfür muss eine Kinematik für das CAD-Modell des Roboters erstellt werden. Die Simulationssoftware hat hierfür eine eigene Funktion, um eine solche Kinematik für Roboter zu erstellen.

Der erste Schritt umfasst die Definition der Verknüpfungen. Hier werden die einzelnen Teilelemente des Roboters zu sogenannten Links zusammengefasst und stellen damit Achsverbindungen dar. Damit die Komponenten im Auswahlfenster bei der Erstellung eines Links verfügbar sind, werden entsprechende Elemente zu gemeinsamen Teilen zusammengefasst (siehe Abbildung 13).

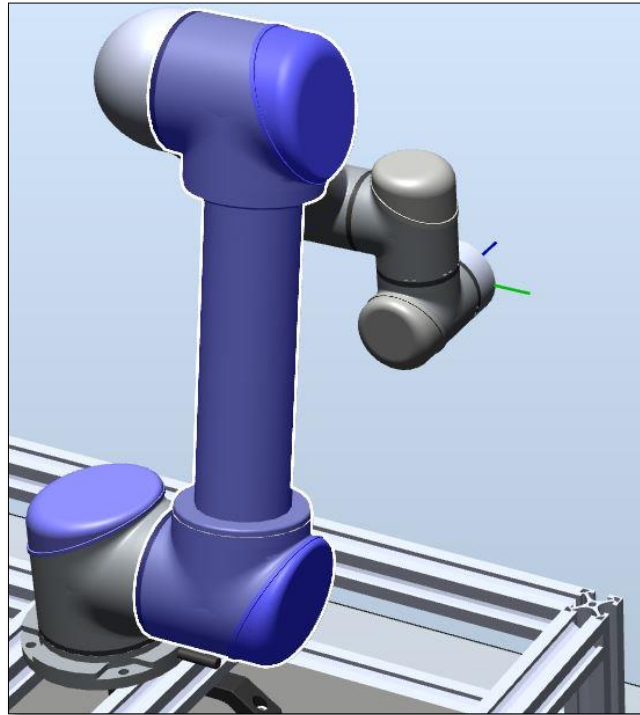


Abbildung 13: Zusammenfügen der Elemente zu einem Teil

Bei der Definition der Verknüpfungen wird die mobile Plattform sowie das Aluminiumgestell als Basislink definiert. Der Roboterarm wird auf sechs Links aufgeteilt, da dieser auch sechs Gelenke besitzt.

Anschließend werden die Achsen konfiguriert. Hier muss stets ein übergeordneter Link sowie der untergeordnete Link, den es zu konfigurieren gilt, ausgewählt werden. Da der UR5 Roboterarm ausschließlich aus Rotationsgelenken besteht, muss der Achsentyp „Drehend“ ausgewählt werden. Für die Definition der Rotationsachsen können zwei Positionen angegeben sowie eine Ober -und Untergrenze für die Rotation in Grad gesetzt werden. Eine grün gefärbte Linie zeigt die definierte Rotationsachse in der Vorschau an (siehe Abbildung 14).

Im nächsten Schritt wird ein Koordinatensystem hinzugefügt, um etwaige Werkzeuge auf den Flansch des Roboterarms platzieren zu können. Abschließend muss für den Roboter eine Kalibrierung erstellt werden, um die Kinematik kompilieren zu können. Zusätzlich ist es hier möglich Positionen zu erstellen, die der Roboter in der Simulation einnehmen kann.

Die Erstellung der Kinematik für den Greifer bzw. des Werkzeugs erfolgt analog zu der des Roboters. Hier muss nur zusätzlich darauf geachtet werden, dass auch der Achsentyp „Prismatisch“ für die Linearachse ausgewählt wird.

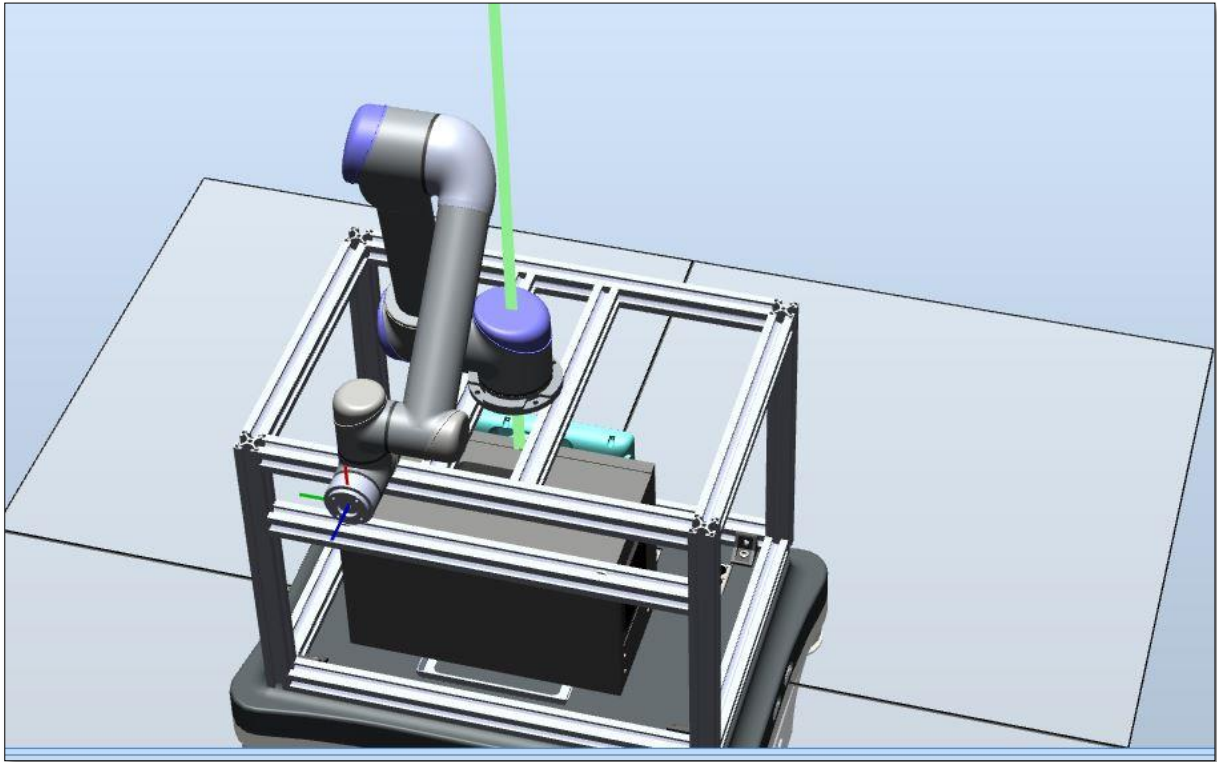


Abbildung 14: Definition der Rotationsachse

Da die Anwendung des Roboters eine Interaktion mit den Stationen der digitalen Fabrik erfordert, werden die wichtigsten Elemente in die Simulationsumgebung platziert. Dies umfasst die beiden Stationen zur Aufnahme und Übergabe sowie das zu transportierende Bauteil.

Als Ersatz für die Steuerung des Roboters muss eine Smart-Komponente benutzt werden, um den Bewegungsablauf für den Roboterarm kreieren zu können. Mit der Komponente „PoseMover“ kann der Roboterarm zu einer vordefinierten Position bewegt werden. Hierfür wird der entsprechende Roboter-Mechanismus und die zuvor definierte Pose ausgewählt und die Abarbeitungszeit festgelegt. Analog dazu werden die Bewegungen zum Öffnen und Schließen des Greifers erstellt.

Damit das Bauteil auch tatsächlich in der Simulation transportiert werden kann, muss dieses mit dem Greifer verknüpft werden. Dies wird mit der Komponente „Attacher“ realisiert. Dabei wird der das Bauteil als „Child“ deklariert und der Greifer fungiert als „Parent“. Das Pendant dazu ist der „Detacher“. Hier muss lediglich das Bauteil ausgewählt sein, um dieses vom Greifer zu lösen und die aktuelle Position beizubehalten.

Um die Roboterplattform über eine vorgegebene Strecke fahren lassen zu können, muss die Richtung sowie die Distanz in der Komponente „LinearMover“ angegeben werden.

Nun muss eine Abarbeitungsfolge erstellt werden. Die einzelnen Komponenten werden durch das Ziehen von Pfeilen miteinander verbunden. Da die Komponenten nacheinander

abgearbeitet werden sollen, muss darauf geachtet werden, dass die darauffolgende Komponente mit dem Feld „Executed“ verbunden ist. Damit die Ablaufkette gestartet werden kann, muss ein Eingang erstellt werden. Mit dem Signaltyp „DigitalInput“ wird ein digitaler Eingang erstellt. Dieser muss mit dem ersten Glied der Komponentenkette verbunden sein, um die Abfolge in Gang setzen zu können (siehe Abbildung 15).

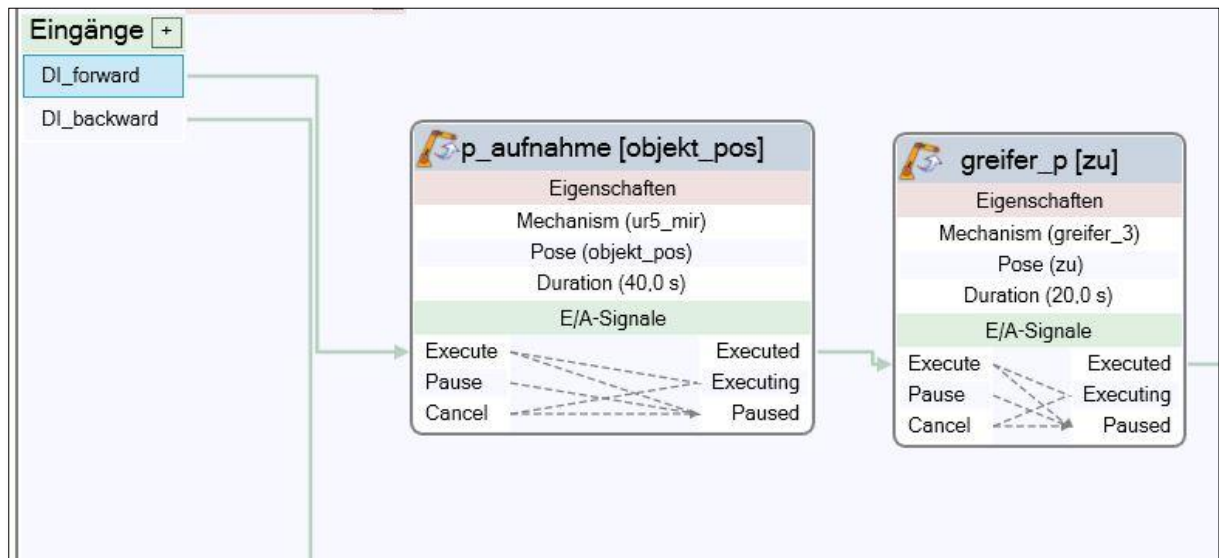


Abbildung 15: Komponentenkette

## 7 Ergebnisse

Durch die Anwendung der erstellten Roadmap und der Einhaltung des Prozesses der sicherheitsgerechten Gestaltung konnten die anfänglichen Merkmale des Zwei-Fingergreifers von mittleren Risikopotentialen auf geringe Risikopotentiale reduziert werden. Die Risikoprioritätszahlen der Anpassungskonstruktion liegen damit in einem Wertebereich von 1 bis 125. Das Konzept des Drei-Fingergreifers wurde zusammen mit den wichtigsten Elementen der Handhabungsanwendung in der digitalen Fabrik konstruiert und in eine RobotStudio Simulation implementiert. Die Simulation umfasst nun die Kerntätigkeiten des MIR-Roboters – die Aufnahme des Bauteils, den Transport sowie die Übergabe an die hierfür vorgesehene Station. Die Konstruktions-FMEA des Drei-Fingergreifers lieferte bereits im unbehandelten Zustand Risikoprioritätszahlen von 1 bis 125. Die erkannten Fehlermerkmale haben somit ein geringes Risikopotential.

## 8 Diskussion

Obwohl die Ergebnisse der Konstruktions-FMEA befriedigende Werte aufweisen, muss berücksichtigt werden, dass eine Risikobeurteilung stets eine subjektive Wahrnehmung von Risiken beinhaltet und damit auch abhängig vom Anwender ist. Der Drei-Fingergreifer weist zwar mit den erkannten Fehlermerkmalen nur ein geringes Risikopotential auf, dennoch könnte eine mechanische Auslegung des Greifers mehr Daten zum Vergleichen der beiden Konzepte bieten. So könnte etwa die Greifkraft mit den Einträgen der Schmerzschwellentabelle von Körperteilen verglichen werden. Dennoch trägt die Roadmap dazu bei, die Schritte der Konstruktionsphasen auch ohne speziellem Fachwissen einzuhalten und damit den Prozess der sicherheitsgerechten Konstruktion zu folgen sowie Risiken zu vermindern.

Die Simulation der Handhabungsanwendung konnte zwar in RobotStudio simuliert werden, allerdings fehlte hier eine Steuerung für den Roboter, die das Programmieren der Bewegungen erleichtert hätte.

## 9 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurden wesentliche Normen zur Sicherheit von Maschinen für die Handhabungsanwendungen mit mobilen Robotern abgeleitet und daraus ein Sicherheitsleitfaden in Form einer Roadmap erstellt. Durch die Anwendung dieser Roadmap konnten Risiken eines Fallbeispiels vermindert werden. Des Weiteren wurde ein neues Konzept eines Greifers entwickelt und konstruiert, dessen Anwendung in einer Simulation veranschaulicht wurde. Als Teil des SIP 4.0 Forschungsprojekts können Teile des Sicherheitsleitfadens auch auf zukünftige Normen Einfluss haben, da der TÜV auch einen Sitz im technischen Komitee hat und somit auch Vorschläge machen darf. Außerdem kann

der Ablauf der Roadmap bereits für Projekte verwendet werden – insbesondere die Risikobeurteilung sowie die Risikominderung.

## Literaturverzeichnis

- Ballier, F., Dmytruk, T & Fleischer, J., 2018. A Gripper System Design method for the Handling of Textile Parts. In: Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, 5. April 2018, Berlin. Berlin, Deutschland: Springer Vieweg, S. 73-82.
- Beuth Verlag, 2017. Technische Regel. [Online] Verfügbar unter: <<https://www.beuth.de/de/technische-regel/din-iso-ts-15066/263754912>> [Zugang am 18.03.2019].
- Bundesministerium für Digitalisierung und Wirtschaftsstandort der Republik Österreich, 2019. Maschinen-Sicherheitsverordnung 2010. [Online] Verfügbar unter: <<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20005922>> [Zugang am 16.03.2019].
- Feldhusen, J. & Grote, K., 2013. Pahl/Beitz Konstruktionslehre. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg.
- FH Technikum Wien, 2018. SIP 4.0 - Sicherheit in intelligenten Produktionsumgebungen. [Online] Verfügbar unter: <[https://www.technikum-wien.at/forschung/forschungsschwerpunkte/automation\\_robotics/](https://www.technikum-wien.at/forschung/forschungsschwerpunkte/automation_robotics/)> [Zugang am 01.02.2019].
- Freiling, F., Grimm, R., Großpietsch, K., Keller, H., Mottok, J., Münch, I., Rannenberg, K. & Saglietti, F., 2014. Technische Sicherheit und Informationssicherheit. Informatik-Spektrum. 37(1), S. 14-24.
- International Federation of Robotics, 2019. New U.S. Standard Sets the Bar for Industrial Mobile Robot Safety. [Online] Verfügbar unter <<https://ifr.org/post/new-u.s.-standard-sets-the-bar-for-industrial-mobile-robot-safety>> [Zugang am 24.03.2019].
- International Organization for Standardization, 2018. Flurförderzeuge – Sicherheitstechnische Anforderungen und Verifizierung – Teil 4: Fahrerlose Flurförderzeuge und ihre Systeme (ISO/DIS 3691-4:2018). [Norm] Wien: Austrian Standards Institute.
- International Organization for Standardization, 2013. Sicherheit von Maschinen – Allgemeine Gestaltungsleitsätze – Risikobeurteilung und Risikominderung (ISO 12100:2010). [Norm] Wien: Austrian Standards Institute.
- Millibar, 2019. Manual Tool Changers Fast and Easy. [Online] Verfügbar unter <<https://www.millibar.com/manual-tool-changer/>> [Zugang am 21.03.2019].



- Schlotzhauer, A., Kaiser, L. & Brandstötter, M., 2018. Safety of Industrial Applications with Sensitive Mobile Manipulators – Hazards and Related Safety Measures. In: Proceedings of the Austrian Robotics Workshop 2018, 17.-18. Mai 2018, Innsbruck. Innsbruck, Österreich: innsbruck university press (IUP) , S.43-48.
- Spies, S., Portela, M. A V., Bartelt, M., Hypki, A., Ebert, B., Ramirez, R. E. & Kuhlenkötter, B., 2018. Force-controlled Solution for Non-destructive Handling of Sensitive Objects. In: Tagungsband des 3. Kongresses Montage Handhabung Industrieroboter, 5. April 2018, Berlin. Berlin, Deutschland: Springer Vieweg, S. 57-64.
- Universal Robots, 2017. Kollaborative Robotik. [Online] Verfügbar unter: <[https://www.universal-robots.com/media/1800204/ur\\_we\\_whitepaper\\_kollaborative\\_robotik.pdf](https://www.universal-robots.com/media/1800204/ur_we_whitepaper_kollaborative_robotik.pdf)> [Zugang am 18.03.2019].
- Verein Deutscher Ingenieure, 1993. Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte. [Norm] Berlin: VDI-Fachbereich Produktentwicklung und Mechatronik.

# Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Greifer des MIR100 Roboters in der digitalen Fabrik.....	13
Abbildung 2: Roadmap.....	21
Abbildung 3: Prozess der sicherheitsgerechten Gestaltung .....	23
Abbildung 4: Abfragen in der inhärent sicheren Konstruktion .....	24
Abbildung 5: Festgelegtes Bauteil .....	26
Abbildung 6: Funktionsfolge.....	27
Abbildung 7: Drei-Fingergreifer mit Federrückstellung.....	28
Abbildung 8: CAD Modell der Übergabestation.....	31
Abbildung 9: Bauteilhalterung der Übergabestation.....	32
Abbildung 10: Übergabestation ergänzt auf den neusten Stand .....	32
Abbildung 11: CAD-Modell des Bauteils.....	33
Abbildung 12: Konstruktion des Drei-Fingergreifers.....	34
Abbildung 13: Zusammenfügen der Elemente zu einem Teil .....	35
Abbildung 14: Definition der Rotationsachse.....	36
Abbildung 15: Komponentenkette.....	37

# Anhang A: Konstruktions-FMEA

## A.1 Kennzahlen zur Kategorisierung der Risikoprioritätszahl

### A\* ... Auftreten

Wahrscheinlichkeit des Auftretens  
(Fehler kann vorkommen)

unwahrscheinlich	= 1
sehr gering	= 2 - 3
gering	= 4 - 6
mäßig	= 7 - 8
hoch	= 9 -10

### B\* ... Bedeutung

Auswirkungen auf den Kunden

kaum wahrnehmbar	= 1
unbedeutender Fehler	= 2 - 3
mäßig schwerer Fehler	= 4 - 6
schwerer Fehler	= 7 - 8
äußerst schwerer Fehler	= 9 -10

### E\* ... Entdeckung

Wahrscheinlichkeit der  
Entdeckung  
(vor Auslieferung an Kunden)

hoch	= 1
mäßig	= 2 - 3
gering	= 4 - 6
sehr gering	= 7 - 8
unwahrscheinlich	= 9 -10

### RPZ\* ... Risiko-Prioritätszahl

hoch	$\leq 1000$
mittel	$\leq 250$
gering	$\leq 125$
kein	= 1

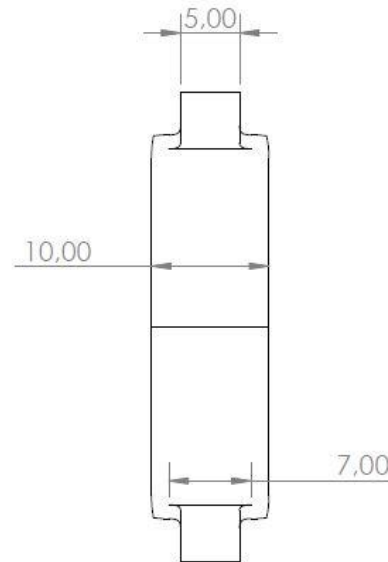
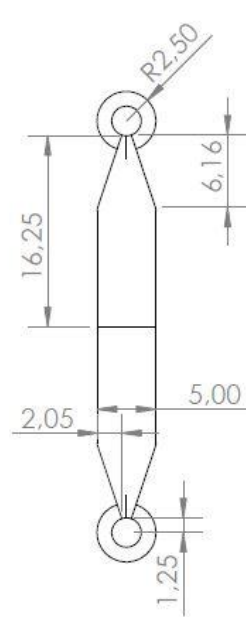
## A.2 Konstruktions-FMEA des Zwei-Fingergreifers

KONSTRUKTIONS-FMEA															
Fehlerort/ Fehlermerkmal	Potentielle Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	Derzeitiger Zustand				Empfohlene Maßnahmen	Verantwortlich	Verbesserter Zustand					
				Kontroll- maßnahmen	A	B	E			RPZ	Getroffene Maßnahmen	A	B	E	RPZ
scharfe Kanten bei den Greiferbacken	Mensch kommt in Berührung	Verletzungs- gefahr	unbeabsichtigt e Bewegung des Roboters, ungeschicktes Verhalten des Menschen	keine					Verrundung im Modell einfügen	Konstrukteur	siehe Empfohlene Maßnahmen				
					3	5	9	135				3	2	9	54
spitze Ecken bei den Greiferbacken	Umgebung kommt in Berührung	Verletzungs- gefahr, Schaden an Objekten	unbeabsichtigt e Bewegung des Roboters	keine					Verrundung im Modell einfügen	Konstrukteur	siehe Empfohlene Maßnahmen				
					7	7	8	392				7	2	8	112
Zwei-Finger- greifer	Greifer verfehlt das Ziel	Schaden am Bauteil, Zeitver- zögerung	Toleranz in der Greif- genauigkeit	keine					neues Konzept- anderer Greiftyp	Konstrukteur	siehe Empfohlene Maßnahmen				
					8	8	5	320				5	5	5	125
ungepolsterte Greiferbacken	Roboterar m bewegt sich zu schnell	Verletzungs- gefahr, Schaden an Objekten	Fehler in der Objekt- erkennung, unterschätzte Ausfahr- geschwindigkei t des Roboters	keine					anderes Material, Polsterung hinzufügen	Konstrukteur	siehe Empfohlene Maßnahmen				
					2	10	9	180				2	2	9	36

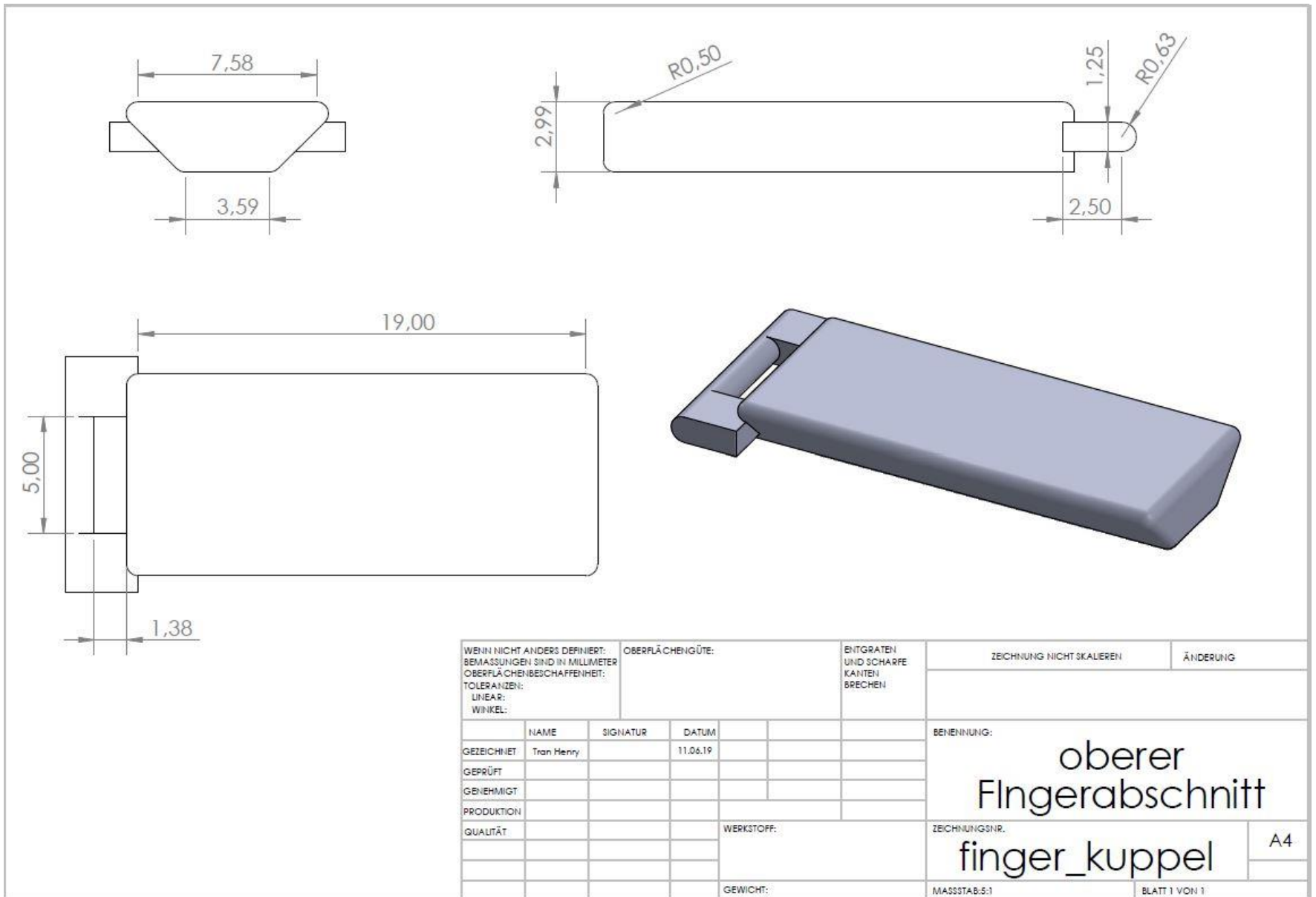
### A.3 Konstruktions-FMEA des Drei-Fingergreifers

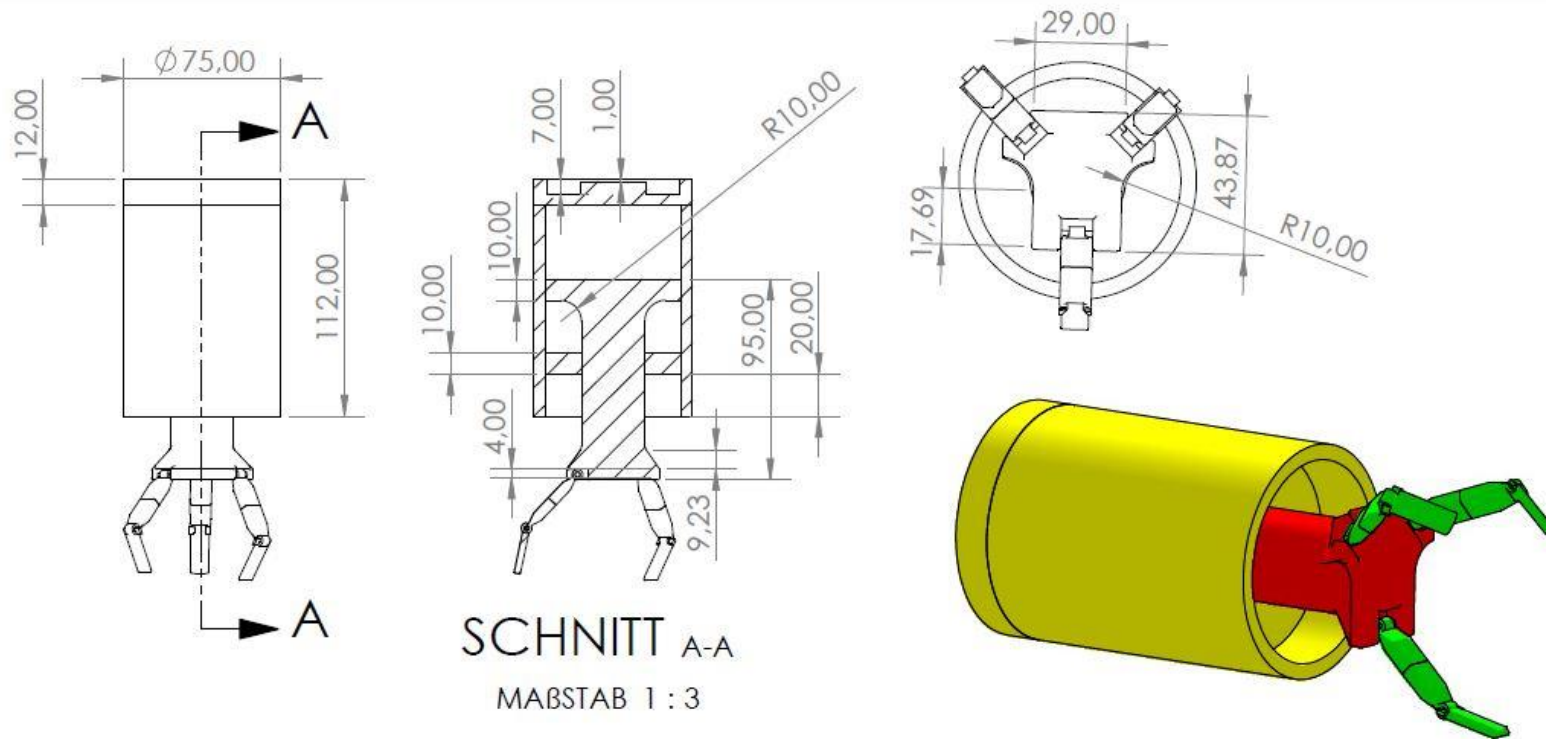
KONSTRUKTIONS-FMEA															
Fehlerort/ Fehlermerkmal	Potentielle Fehler	Fehlerfolge	Fehlerursache	Derzeitiger Zustand					Empfohlene Maßnahmen	Verantwortlich	Verbesserter Zustand				
				Kontroll- maßnahmen	A	B	E	RPZ			Getroffene Maßnahmen	A	B	E	RPZ
Linearachse	Körperteil beim Einfahren im Weg	Einklemm- gefahr	Unaufmerksam- keit des Menschen	keine					Geschwindig- keit des Greifers reduzieren, den Greifer im Notfall manuell ausziehbar	Konstrukteur, Program- mierer	siehe Empfohlene Maßnahmen				
					2	10	5	100				2	5	5	50
Länge des Greifers	nahe- liegende Umgebung wird falsch einge- schätzt	Kollisions- gefahr	Arbeitsraum vergrößert, Sensorikausfall bei MIR- Plattform	keine					Polsterung um die Linear- achse hinzu- fügen	Konstrukteur	siehe Empfohlene Maßnahmen				
					3	8	5	120				3	3	5	45
Feder- rückstellung	Greifsicher- ung fällt aus	Objekt fällt, Zeitverzöge- rung, Schaden am Bauteil	Federn defekt	keine					Sichtbereich für die Mechanik schaffen	Konstrukteur	siehe Empfohlene Maßnahmen				
					2	5	9	90				2	5	4	40

## Anhang B: Technische Zeichnung des Drei-Fingergreifers

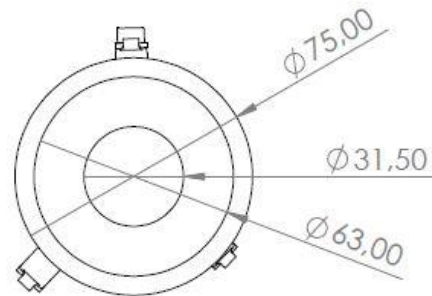


WEENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMAASSUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:			OBERFLÄCHENGÜTE:			EDITORATEN UND SCHARPE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN	ÄNDERUNG
GEZEICHNET	NAME	SIGNATUR	DATUM					BEMERKUNG:  unterer Fingerabschnitt	
GEPRÜFT	Tran Henry		11.04.19						
GEHEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT						WERKSTOFF:		ZEICHNUNGSSNR.	A4
								finger2	
						GEWICHT:		MASSSTAB: 2:1	BLATT 1 VON 1





SCHNITT A-A  
MAßSTAB 1 : 3



WENN NICHT ANDERS DEFINIERT: BEMAßUNGEN SIND IN MILLIMETER OBERFLÄCHENBESCHAFFENHEIT: TOLERANZEN: LINEAR: WINKEL:				OBERFLÄCHENGÜTE:		ENTGRATEN UND SCHARPE KANTEN BRECHEN		ZEICHNUNG NICHT SKALIEREN	ÄNDERUNG
GEZEICHNET	Tran Henry	SIGNATUR	DATUM	11.06.19				BEZEICHNUNG: <b>Drei-Fingergreifer</b>	
GEPRÜFT									
GENEHMIGT									
PRODUKTION									
QUALITÄT							WERKSTOFF:	ZEICHNUNGSNR. <b>gripper_all</b>	
							GEWICHT:	MAßSTAB: 1:5	A4
								BLATT 1 VON 1	