



Walter SCHWEIGHOFER, BSc

# Entwicklung und Bau einer mobilen Fertigungszelle für robotergestützte Zerspanung mit integriertem Werkstück- und Werkzeugwechsel

## **MASTERARBEIT**

Zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Wirtschaftsingenieurwesen-Maschinenbau

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Pichler

Institut für Fertigungstechnik

Graz, November 2018

## EIDESSTÄTTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Masterarbeit identisch.

.....  
Datum

.....  
Unterschrift

---

## Kurzfassung

Produktionssysteme stehen durch Veränderungen in der Produktentwicklung einem starken Wandel gegenüber. Die aktuellen Tendenzen der Variantenvielfalt und der Produktindividualisierung in diversen Branchen fordern zu einem Umdenken des produzierenden Gewerbes und der Industrie auf, agilere Produktionssysteme zu schaffen. Industrieroboter stellen bei diesen Betrachtungen durch ihre universellen Einsatzmöglichkeiten in einer Vielzahl von Produktionsprozessen eine zentrale Komponente dar. Die aktuellen Entwicklungen zeigen auch die verstärkte Nutzung des Wertschöpfungspotenzials der robotergestützten Zerspanung.

Im Rahmen dieser Arbeit wird der gesamte Entstehungsprozess einer Fertigungszelle für robotergestützte Zerspanung detailliert dargestellt. Die daraus resultierende Fertigungseinheit wird in dem intendierten Produktionsablauf der Modellfabrik der *smartfactory@tugraz* eingebunden und soll auch für weiterführende Forschungsvorhaben im Bereich der robotergestützten Zerspanung zur Verfügung stehen.

Um die spezifischen Leistungsanforderungen der Fertigungszelle erfüllen zu können, mussten zu Beginn alle Forderungen identifiziert und entsprechend ihres Stellenwertes und ihrer Funktion evaluiert werden. Nachfolgend wurde im Zuge der Konzeptentwicklung nach realisierbaren Lösungsansätzen gesucht, die wiederum gegenübergestellt und zu einem Gesamtkonzept geformt wurden. Auf Basis der Auslegung elementarer Systemkomponenten und mittels der durch einen iterativen Verbesserungsprozess entwickelten Konstruktionsdetaillierung entstand ein umsetzbares Produktmodell, welches durch den begleitenden Beschaffungsprozess und der finalen Endmontage der Einzelkomponenten in einem physischen Endprodukt resultierte.

Auf Grundlage der erstellten Fertigungszelle kann das Institut für Fertigungstechnik anhand von realen Bearbeitungsversuchen die Leistungsfähigkeit der Roboterzerspanung im realen Produktionsprozess erfassen und intensivieren sowie weitere Forschungen im Bereich der robotergestützten Zerspanung durchführen.

## Abstract

Production systems are facing strong changes due to transitions in product development. The current tendencies of variety of versions and product customisation in various branches demand a rethink of the manufacturing industry to create more agile production systems. Industrial robots represent a central component of these considerations in a variety of production processes due to their universal application possibilities. The current developments are also shown in the increased usage of the added value potential of robot-assisted machining.

Within the scope of this thesis, the entire development process of a manufacturing cell for robotic machining is described in detail. The resulting production unit will be integrated into the intended production process of the model factory of *smartfactory@tugraz* and will also be used for further research activities in the field of robot-assisted machining.

In order to meet the specific performance goals of the production cell, all requirements had to be identified and evaluated according to their precedence and function. Subsequently as part of concept development, feasible solution approaches were sought, which were contrasted with each other and formed into an overall concept. Based on dimensioning of elementary system components and by an iterative improvement process developed design detailing, a viable product model was emerged, which resulted in the accompanying purchasing process and the concluding final assembly of the individual components in a physical final good.

Based on the created manufacturing cell, the Institute of Manufacturing can use real machining process experiments to record and intensify the performance of robot cutting in real production process and to carry out further research in the field of robot-assisted machining.



# Vorwort

Diese Arbeit entstand am Institut für Fertigungstechnik im Rahmen des Projektes *smartfactory@tugraz*, welches sich der Forschung an neuen und innovativen Produktions- und Montageprozessen widmet.

Mein besonderer Dank gilt meinem Betreuer Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Rudolf Pichler, der mich während des gesamten Entstehungsprozesses durch seine engagierte Beratung, sein Wissen und seine Erfahrung sowie durch das in mich gesetzte Vertrauen sehr unterstützt hat.

Zudem bedanke ich mich bei meinem Arbeitgeber, der Firma ASP Automationstechnik, für die Zurverfügungstellung von Spezialwerkzeugen und Normmaterialien, welche bei der Endmontage benötigt wurden.

Großen Dank möchte ich auch meinen Freunden und meiner Familie aussprechen. Insbesondere meinen Eltern Walter und Annemarie Schweighofer, die mich während der gesamten Studienzzeit bedingungslos in allen Belangen meines Studienlebens unterstützt haben.

# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
1.1	Aufgabenstellung.....	1
1.2	Anforderungsanalyse .....	3
2	Grundlagen der Industrierobotik .....	4
2.1	Industrieroboter .....	4
2.2	Roboterkinematik .....	5
2.3	Vertikale Knickarmroboter .....	7
2.4	Antriebsstrang .....	8
2.5	Absolut- und Wiederholgenauigkeit.....	9
2.6	Kenngrößen des projektbezogenen Roboters .....	9
3	Konzeptentwicklung.....	12
3.1	Zellenkonzept.....	12
3.2	Bearbeitungskonzept.....	15
3.3	Beladungskonzept.....	18
3.4	Endeffektorenkonzept .....	21
3.5	Gesamtkonzept .....	24
4	Komponentenauslegung.....	25
4.1	Berechnung der erforderlichen Spindelleistung.....	25
4.2	Berechnung der Beladungssituation.....	33
4.3	Greifkraftbestimmung .....	36
4.4	Ergebnisdiskussion .....	39
5	Konstruktionsbeschreibung .....	40
5.1	Aufspanntisch.....	41
5.2	Roboterbaugruppe .....	43
5.3	Beladungsgruppe .....	56
5.4	Maschineneinhausung .....	59
5.5	Werkzeugwechselstation.....	64
5.6	Werkstückspannsystem .....	68
5.7	Fertigbaugruppe Roboterzelle.....	69
5.8	Sicherheitstechnische Beurteilung .....	72
5.9	Steuerungsarchitektur .....	78
6	Zusammenfassung und Ausblick.....	82
7	Verzeichnisse .....	86
7.1	Literaturverzeichnis .....	86
7.2	Herstellerverzeichnis .....	88
7.3	Abbildungsverzeichnis.....	89
7.4	Tabellenverzeichnis.....	91
8	Anhang .....	92

# 1 Einleitung

In der heutigen Zeit stehen Produktionssysteme einem immer stärker werdenden Wandel gegenüber. Waren typischerweise Produktionssysteme der Massenproduktion auf hohe Leistungsfähigkeit in Bezug auf Produktionskapazität und Kostenreduzierung abgestimmt, liegt durch die Variantenvielfalt und Produktindividualisierung ein immer stärkerer Fokus auf der Gestaltung von agileren Produktionssystemen<sup>1</sup>. Roboter sind durch ihre universelle Einsatzfähigkeit ein solcher typischer Baustein, um Agilität in Produktionssystemen zu gewährleisten.

In der Fertigungstechnik werden Roboter oftmals für Hilfsprozesse eingesetzt, wie etwa für diverse Handhabungsprozesse. Der Roboter hat sich jedoch auch als wertschöpfende Fertigungskomponente, wie etwa in Lackier-, Schweiß und Entgratprozessen, bestens bewährt. In der spanabhebenden Fertigung haben Roboter, außer bei der Beladung von Werkzeugmaschinen, bisweilen eine eher untergeordnete Bedeutung.<sup>2</sup>

Jedoch stellen sie durch ihre Orientierungsfähigkeit, den großen Arbeitsraum, ihre Wandlungsfähigkeit und den mittlerweile überschaubaren Investitionskosten einen hohen Mehrwert für Bearbeitungstätigkeiten dar, in denen höchste Genauigkeit nicht immer das ausschlaggebende Kriterium ist.

Diese Arbeit behandelt die Konstruktion und technische Realisierung einer Roboterzelle mit angetriebenem Zerspanungswerkzeug für den betrieblichen Wertschöpfungsprozess. Dabei werden die verschiedenen Stadien der Maschinenentwicklung gezeigt und wie die Anforderungen an die Roboterzelle in technische Lösungen umgesetzt wurden.

## 1.1 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit war die Planung, Konzeption, Konstruktion und Aufbau einer Roboterzelle, in welcher ein vordefinierter Hochpräzisionsroboter durch Interaktion mit angetriebenen Werkzeugen spanabhebende Bearbeitungsprozesse durchführen kann. Diese Fertigungseinheit soll im Rahmen des Projektes *smartfactory@tugraz* einerseits in den dortigen Produktionsprozess eingegliedert werden und andererseits auch zu weiterführenden Forschungsaufgaben im Bereich der robotergestützten Zerspanung genutzt werden können. Die *smartfactory@tugraz* beschäftigt sich mit neuen Produktions- und Montageprozessen, die zur Erstellung eines realen, komplexen Produktes verwendet werden.

---

<sup>1</sup> Vgl. Pichler (2017), S. 28.

<sup>2</sup> Vgl. Schneider (2017), S. 1f.

### 1.1.1 Methodischer Entstehungsprozess

Bei der Umsetzung der Aufgabenstellung wurde die in Abbildung 1.1 beschriebene Vorgangsweise angewendet. Der erste Schritt war das Erfassen und Evaluieren aller Anforderungen an die Roboterzelle, der nächste Schritt war die Konzeptentwicklung, in der Lösungsansätze gesucht und miteinander verglichen werden. Die Ergebnisse aus der Konzeptentwicklung wurden in der Konstruktionsdetaillierung vom Entwurf zu einem funktionsfähigen, fertigen System weiterentwickelt. Dieser Vorgang unterlag einem ständigen iterativen Verbesserungsprozess nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten. Nach der Ausarbeitung von Fertigungszeichnung und der Auswahl von geeigneten Systemkomponenten, erfolgte die kaufmännische Begleitung beim Beschaffungsprozess, bis hin zur erfolgten Bestellung. Der letzte Vorgang umfasste mit der Endmontage das Zusammenfügen aller angeschafften Komponenten zum resultierenden Erzeugnis. Während des Entstehungsprozesses erfolgte fortwährend der Vergleich mit den festgelegten Anforderungen sowie auch das Ergänzen von neuen Anforderungen an die Roboterzelle.

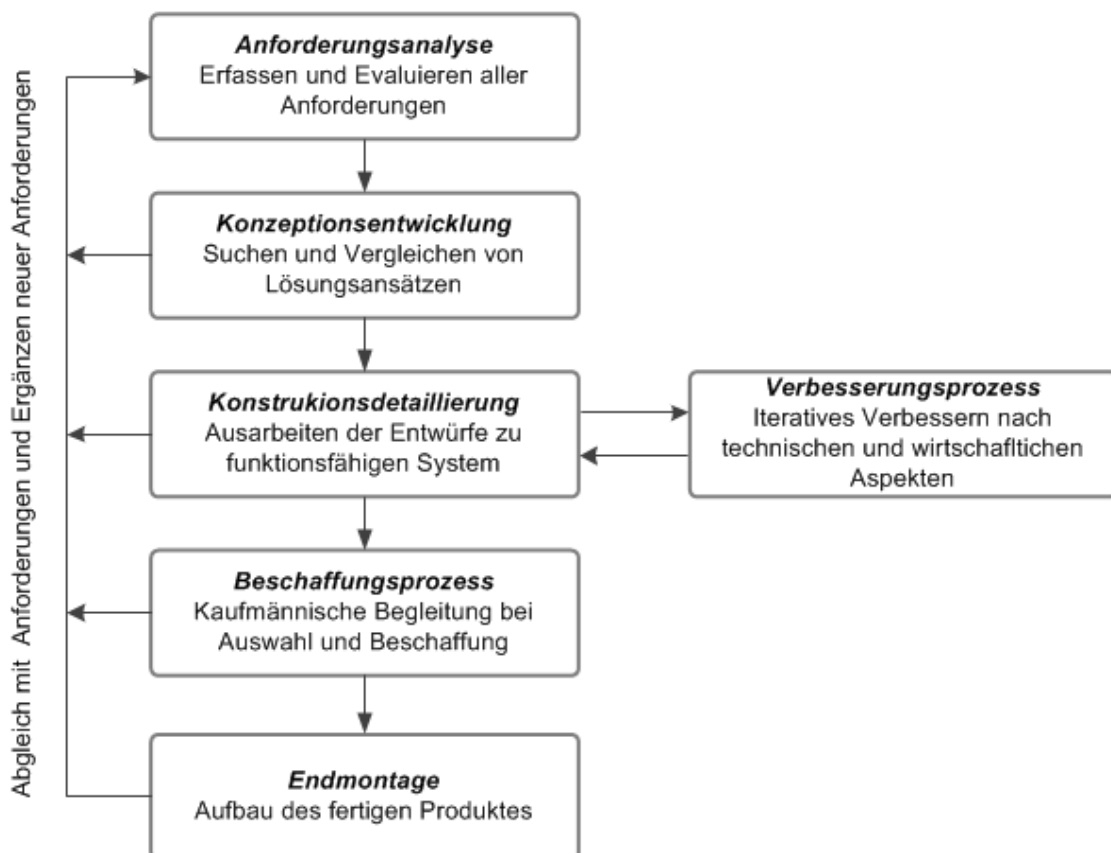


Abb. 1.1 Methodischer Entstehungsprozess, Quelle: Eigene Darstellung.

## 1.2 Anforderungsanalyse

In der Anforderungsanalyse wurden die Anforderungen an die Roboterzelle identifiziert, strukturiert und je nach Priorität in Forderung (F) und Wunsch (W) unterteilt. Die Anforderungen wurden während der Entstehungsphase laufend mit Hrn. Prof. Pichler als Projektleiter der *smartfactory@tugraz* in regelmäßigen Projektbesprechungen ausgearbeitet und laufend aktualisiert. Das Ergebnis ist die Anforderungsliste, lt. Tab. 1.1.

<b>Anforderungsliste</b>		
<b>Zuordnung</b>	<b>Anforderung</b>	<b>F / W</b>
<i>1. Geometrie</i>		
1.1 Grundabmessungen	Die quadratische Grundfläche soll 1,3 m x 1,3 m betragen.	F
1.1 Höhe	Die maximale Höhe darf 2,5 m nicht überschreiten.	F
<i>2. Bearbeitung</i>		
2.1 Aktorik	Ein frei programmierbarer, vertikaler Knickarmroboter mit hoher Orientierungsfähigkeit führt Vorschubbewegung aus.	F
2.2 definierte Bearbeitungsverfahren	Kernanforderung ist das Fräsen mit einem Ø 5 mm Schafffräser sowie das Vollbohren von Ø 3 mm.	F
2.3 Flexibilität	Bei der Bearbeitung soll einfach und automatisch zwischen den einzelnen Bearbeitungsverfahren gewechselt werden können.	W
2.4 Werkzeugantrieb	Eine effiziente Bereitstellung der Antriebsenergie bei hoher Adaptierfähigkeit der Schnittparameter ist vorzusehen.	W
<i>3. Werkstück</i>		
3.1 Materialart	Die verwendeten Materialien sind Aluminium und Stahl.	F
3.2 definierte Abmessungen	Die Werkstücke haben einen zylindrischen Gunkörper mit Ø 70mm x 80 mm.	F
3.3 Flexibilität	Die Anpassung an andere Werkstückgrößen und Materialien für weiterführende Aufgaben soll gewährleistet sein.	W
<i>4. Bedienung</i>		
4.1 Mobilität	Die Roboterzelle soll ortsungebunden und mobil sein und eine schnellwechselbare Medienschnittstelle besitzen.	F
4.2 Materialbeladung	Die Beladung soll mittels bestückten, standardisierten Teileträgern erfolgen.	F
4.3 Betrieb	Die Roboterzelle arbeitet autark, nur der Zu- und Abtransport von Teileträgern soll vorerst manuell erfolgen.	F
4.4 Beladungsautomatisierung	Die Umrüstbarkeit des Beladungsvorganges zu fahrerlosen Transportsystemen soll für weitere Ausbauschritte eingeplant werden.	W
4.5 Sicherheit	Die Roboterzelle muss höchsten Sicherheitsanforderungen genügen und darf kein Risiko für beteiligte Personen darstellen.	F
4.6 Montage & Wartung	Eine gute Zugänglichkeit für Montage- und Wartungsarbeiten sowie die leichte Auf- und Nachrüstbarkeit aller Systeme ist anzustreben.	W
<i>5. Umgebung</i>		
5.1 Lärm	Die Lärmemission durch den Bearbeitungsvorgang soll im Rahmen der vorgeschriebenen Grenzwerte liegen.	W
5.2 Verschmutzung	Anfallende Nebenprodukte der Bearbeitung dürfen keine Beeinträchtigung für die umliegende Arbeitsumgebung darstellen.	F
<i>6. Ökonomie</i>		
6.1 Kosteneffizienz	Die maximale Erfüllung der Anforderungen bei möglichst geringen Mitteleinsatz ist gefordert.	W

Tab. 1.1 Anforderungsliste, Quelle: Eigene Darstellung.

## 2 Grundlagen der Industrierobotik

In diesem Kapitel werden die elementaren Eigenschaften von Industrierobotern beschrieben und erläutert, wodurch sich die einzelnen Robotersysteme voneinander unterscheiden. Im Speziellen wird auf den Einsatz von vertikalen Knickarmrobotern als wichtige Komponente der Industrierobotik näher eingegangen.

### 2.1 Industrieroboter

Um die spezifischen Anforderungen an Orientierungsfähigkeit, Arbeitsraum, Dynamik, Tragfähigkeit und Genauigkeit im Einsatzbereich zu erfüllen, können Industrieroboter die unterschiedlichsten Bauformen aufweisen.<sup>3</sup> Industrieroboter zählen gemeinsam mit Teleoperatoren, Manipulatoren und Einlegegeräten zur Gruppe der Handhabungsgeräte.

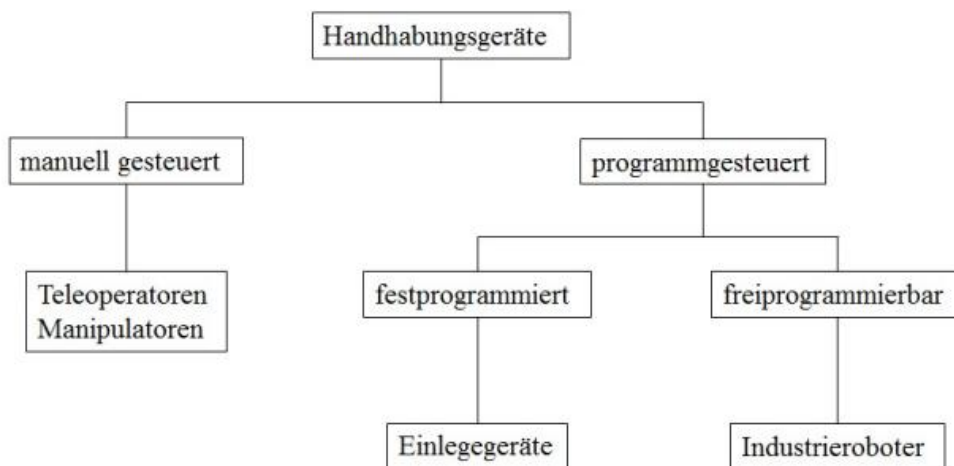


Abb. 2.1 Einteilung der Handhabungsgeräte, Quelle: Haas (2016), S. 3.

In Abbildung 2.1 wird gezeigt, dass sich Industrieroboter von anderen Handhabungsgeräten insofern unterscheiden, als sie nicht von Hand gesteuert werden und dass sie ihre Bewegungen freiprogrammiert und universell ausführen können. Als weiteres Klassifizierungskriterium wird bei Industrierobotern auf die Verwendung von drei oder mehr Bewegungsachsen Bezug genommen.<sup>4</sup>

---

<sup>3</sup> Vgl. Wenz (2008), S. 7f.

<sup>4</sup> Vgl. Haas (2016), S. 3.

## 2.2 Roboterkinematik

Die Lage eines Objektes wird durch seine Position und Orientierung beschrieben, das beinhaltet die Koordinaten bezüglich eines Basisbezugsystems und die Drehung um diese Achsen. Um die sechs Freiheitsgrade der Bewegung universell darstellen zu können, benötigt auch das Handhabungsgerät Roboter sechs verstellbare Bewegungsachsen. Roboter mit weniger als sechs Freiheitsgraden können Objekte nicht mehr beliebig universell in ihrer Lage im Raum abbilden.<sup>5</sup>

Die ersten drei Bewegungsachsen eines Industrieroboters werden als Hauptachsen bezeichnet, sie werden vornehmlich verwendet, um das durch den Roboter geführte Objekt zu positionieren. Die weiteren drei Achsen werden als Nebenachsen bezeichnet, sie dienen dazu, das Objekt im Raum zu orientieren. Die Gelenkachsen des Roboters können translatorisch oder rotatorisch ausgeführt sein. Translationsgelenke ermöglichen eine geradlinige Bewegung, wohingegen Rotationsgelenke eine Drehbewegung ausführen. Entsprechend der Kombination von Rotations- und Translationsgelenken an den Hauptachsen erfolgt die Klassifikation der Roboterbauarten, siehe Abb. 2.3.<sup>6</sup>

Zur übersichtlicheren Darstellung werden die Kinematikkonfigurationen mithilfe von grafischen Elementen abstrahiert, siehe Abb. 2.2.

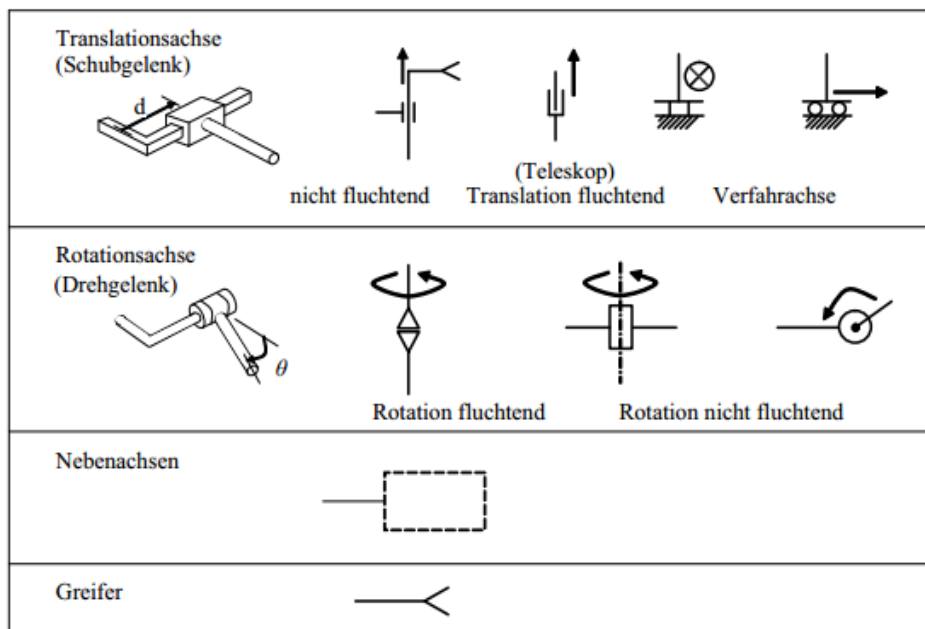


Abb. 2.2 Grafische Elemente zum Abstrahieren von Roboterachsen nach VDI 2861, Quelle: Gerke (2014), S. 147.

<sup>5</sup> Vgl. Haas (2016), S. 3.

<sup>6</sup> Vgl. Wenz (2008), S. 7f.

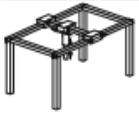
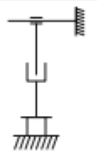
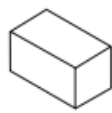

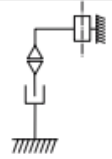

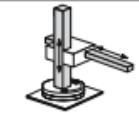
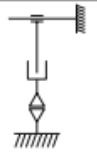


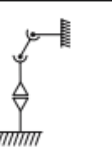

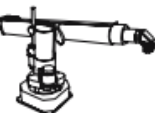



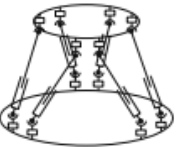

Robotertyp	Achskonfiguration		Robotertyp	Achskonfiguration	
	Hauptachsen	Arbeitsraum		Hauptachsen	Arbeitsraum
 Kartesischer Roboter			 Horizontaler Knickarmroboter		
 Zylindrischer Roboter			 Vertikaler Knickarmroboter		
 Polarroboter			 Parallelroboter		

Abb. 2.3 Darstellung von unterschiedlichen Roboterachskonfigurationen mit dem zugehörigen Arbeitsraum, Quelle: Gevatter/Grünhaupt (Hrsg.) (2006), S. 744.

In Abbildung 2.3 sind gängige Roboterbauarten mit dem zur Verfügung stehenden Arbeitsraum abgebildet. Bis auf den Parallelroboter besitzen alle dargestellten Roboterkonfigurationen eine serielle Kinematik. Bei einer seriellen Kinematik können die einzelnen Antriebsglieder nacheinander und voneinander unabhängig verwendet werden, um die Position und Orientierung des Endeffektors zu bestimmen. Bei der parallelen Kinematik arbeiten die Antriebe parallel und gemeinsam, um die gewünschte Bewegung am Endeffektor zu erzeugen.

Eine parallele Kinematik hat durch ihren strukturellen Aufbau eine höhere Steifigkeit und Positionsgenauigkeit als eine serielle Kinematik, da sich die Nachgiebigkeiten und Positionsungenauigkeiten der einzelnen Antriebsglieder nicht aufsummieren. Serielle Kinematiken verfügen hingegen über eine bessere Orientierungsfähigkeit und einen größeren Arbeitsraum, auch ist der Berechnungsaufwand der Bewegungssteuerung weniger komplex im Vergleich zu Robotern mit einem parallelen Kinematikaufbau.<sup>7</sup>

Beim kartesischen Roboter sind die Hauptachsen rein aus Translationsgelenken aufgebaut, der vertikale Knickarmroboter hingegen wird an seinen Hauptachsen rein rotatorisch bewegt. Dazwischen gibt es diverse Mischformen wie den Zylinderroboter, den Polarroboter oder den horizontalen Knickarmroboter, auch SCARA-Roboter, genannt.

Auch für die Nebenachsen gibt es unterschiedliche Variationsmöglichkeiten bei der Anordnung der Gelenkachsen, siehe Abb. 2.4.

<sup>7</sup> Vgl. Wenz (2008), S. 10f.



Nebenachsen	Doppelwinkelhand		3	Halbkugel-fläche
	Zentralhand		3	Halbkugel-fläche
	Dreh-Schwenk-gelenk		2	Halbkugel-fläche
	Dreh-gelenk		1	Kreis (Punkt)

Abb. 2.4 Konfiguration der Nebenachsen , Quelle: Weck/Brecher (2006), S. 546 (leicht modifiziert).

### 2.3 Vertikale Knickarmroboter

Der vertikale Knickarmroboter gehört zu den am weitest verarbeitesten Industrierobotern.<sup>8</sup> In Abbildung 2.5 ist ein vertikaler Knickarmroboter mit Zentralhand zu sehen, wie er auch zur Realisierung der Roboterzelle verwendet wird. Die sechs Bewegungsachsen zur Positionierung und Orientierung des Objektes im Raum sind als Rotationsgelenke ausgeführt. Der nutzbare Arbeitsraum von vertikalen Knickarmrobotern ist hohlkugelförmig, siehe Abb. 2.3.

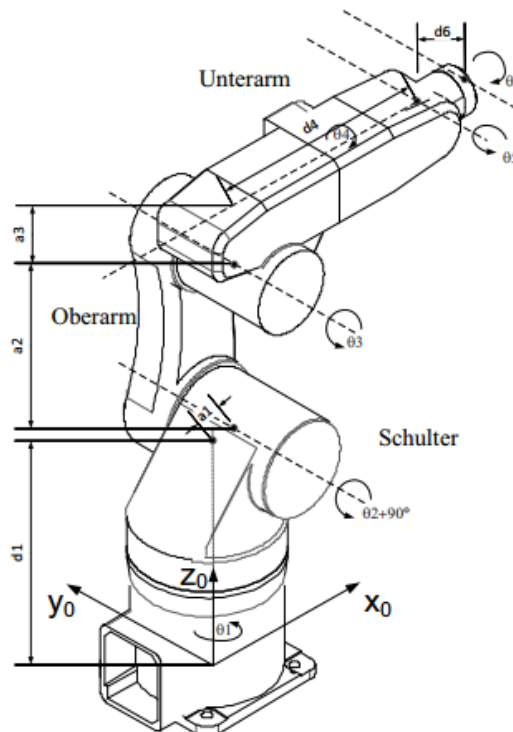


Abb. 2.5 Darstellung der sechs Achsen eines vertikalen Knickarmroboters: Quelle: Gerke (2014), S. 150.

<sup>8</sup> Vgl. Wenz (2008), S. 9.

Vorzüge dieses Robotersystems sind die hohe Beweglichkeit, die dynamischen Rotationsbewegungen, die gute Orientierungsfähigkeit, die universelle Einsatzfähigkeit, ein großzügiger Arbeitsraum bei gleichzeitigem geringem Raumbedarf und Störvolumen.<sup>9</sup>

## 2.4 Antriebsstrang

Bei modernen Industrierobotern werden bei höheren Leistungsanforderungen meist Servoantriebe verwendet. Die Struktur eines servomotorischen Antriebsstranges wird in Abbildung 2.6 gezeigt. Der Achscontroller wird von der Bewegungssteuerung mit den gewünschten Sollwerten der Gelenkpositionen gespeist und gibt Steuersignale an den Servoverstärker der entsprechenden Antriebsachse weiter. Vom Servoverstärker werden die verstärkten Steuerbefehle an den Servomotor übergeben, der die elektrischen Sollwerte in Drehmomente umsetzt. Messgeber geben Istwerte für Geschwindigkeit und Position an den Achscontroller zurück und schließen damit den Regelkreis. Das Motormoment wird durch spielarme Getriebe hoch untersetzt und an die Antriebsachse des Roboters übertragen.<sup>10</sup>

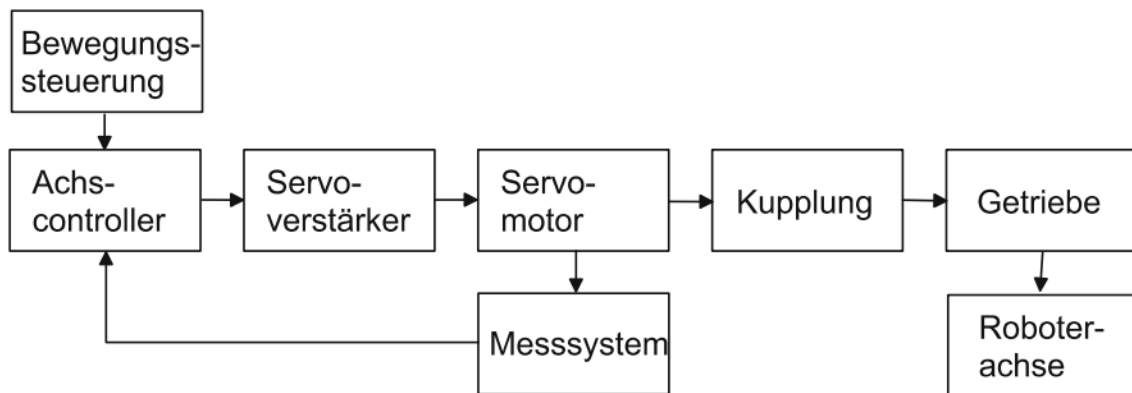


Abb. 2.6 Struktur des Antriebsstranges einer servomotorischen Bewegungsachse, Quelle: Gevatter/Grünhaupt (Hrsg.) (2006), S. 749.

<sup>9</sup> Vgl. Wenz (2008), S. 9f.

<sup>10</sup> Vgl. Gevatter/Grünhaupt (Hrsg.) (2006), S. 748ff.

## 2.5 Absolut- und Wiederholgenauigkeit

Zur Beurteilung eines Robotersystems wird zwischen zwei charakteristischen Genauigkeitsarten unterschieden. Die Absolut- oder Pose-Genauigkeit ist definiert als die Abweichung des durchschnittlichen Istwertes beim Positionieren von einem vorgegebenen Sollwert der Zielposition. Die Wiederholgenauigkeit gibt die Streuabweichung an, die sich beim mehrmaligen Anfahren einer Position ergibt. Bei der Beurteilung der Wiederholgenauigkeit wird kein Vergleich zum Sollwert der Position angestellt.<sup>11</sup>

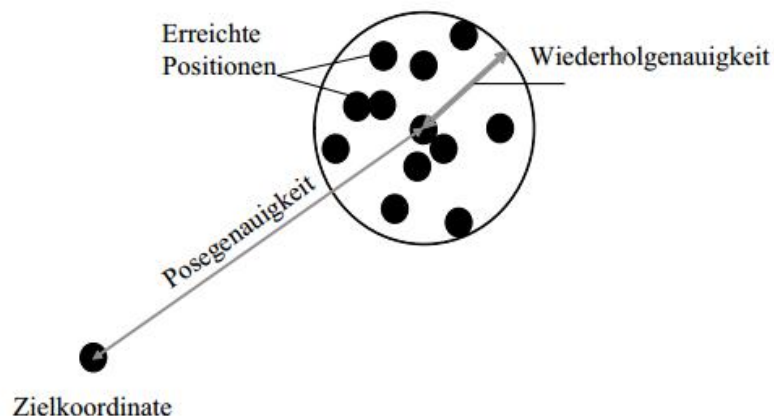


Abb. 2.7 Unterschied zwischen Absolut- und Wiederholgenauigkeit beim Industrieroboter, Quelle: Gerke (2014), S. 155.

## 2.6 Kenngrößen des projektbezogenen Roboters

Zur Umsetzung der Fertigungszelle für robotergestützte Zerspanung wurde vom Institut für Fertigungstechnik der Industrieroboter TX2–90 L der Fa. *Stäubli* bereitgestellt, siehe Abb. 2.8. Der verwendete Industrieroboter gehört bezüglich des kinematischen Aufbaus zu den vertikalen Knickarmrobotern mit Zentralhand. Seine sechs beweglichen Achsen sind als Rotationsgelenke ausgeführt, siehe Abb. 2.9. Die Bewegungen der Armglieder werden durch Servomotoren umgesetzt, dabei nehmen digitale Absolutwertgeber die Istwerte der Bewegung auf. Wenn die Servomotoren der Achsen nicht aktiv sind, halten integrierte Motorbremsen den Roboterarm in Position.<sup>12</sup>

<sup>11</sup> Gerke (2014), S. 153ff.

<sup>12</sup> Vgl. Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 9.



Abb. 2.8 TX2-90 L, Quelle: Staubli International AG (Hrsg.) (2018), S. 3 (leicht modifiziert).

In Abbildung 2.9 sind die Rotationsachsen des verwendeten Roboters erkennbar. Der TX2-90L hat mit dem Fuß (A), der Schulter (B), dem Oberarm (C), dem Ellbogen (D), dem Vorderarm (E) und dem Handgelenk (F) sechs Antriebsglieder. Die sechs Rotationsachsen beginnen chronologisch am Roboterfuß (A) und enden am Handgelenk (F).

Modell	TX2-90L
Technische Daten	
Höchstlast	15 kg
Nennlast	5 kg
Reichweite (zwischen Achse 1 und 6)	1200 mm
Anzahl der Freiheitsgrade	6
Wiederholbarkeit - ISO 9283	± 0.035 mm
Höchstgeschwindigkeit am Lastschwerpunkt	11.1 m/s
Lärm unter Nennbedingungen	70 dBA
Standardreinheit - ISO 14644-1	Klasse ISO5
Schutzklasse (*Handgelenk) - EN 60529	IP65 (*IP65 und IP67)
Gewicht	117 kg
Controller STÄUBLI	CS9

Tab. 2.1 Datenblatt wichtiger technische Merkmale, Quelle: in Anlehnung an Staubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 12.

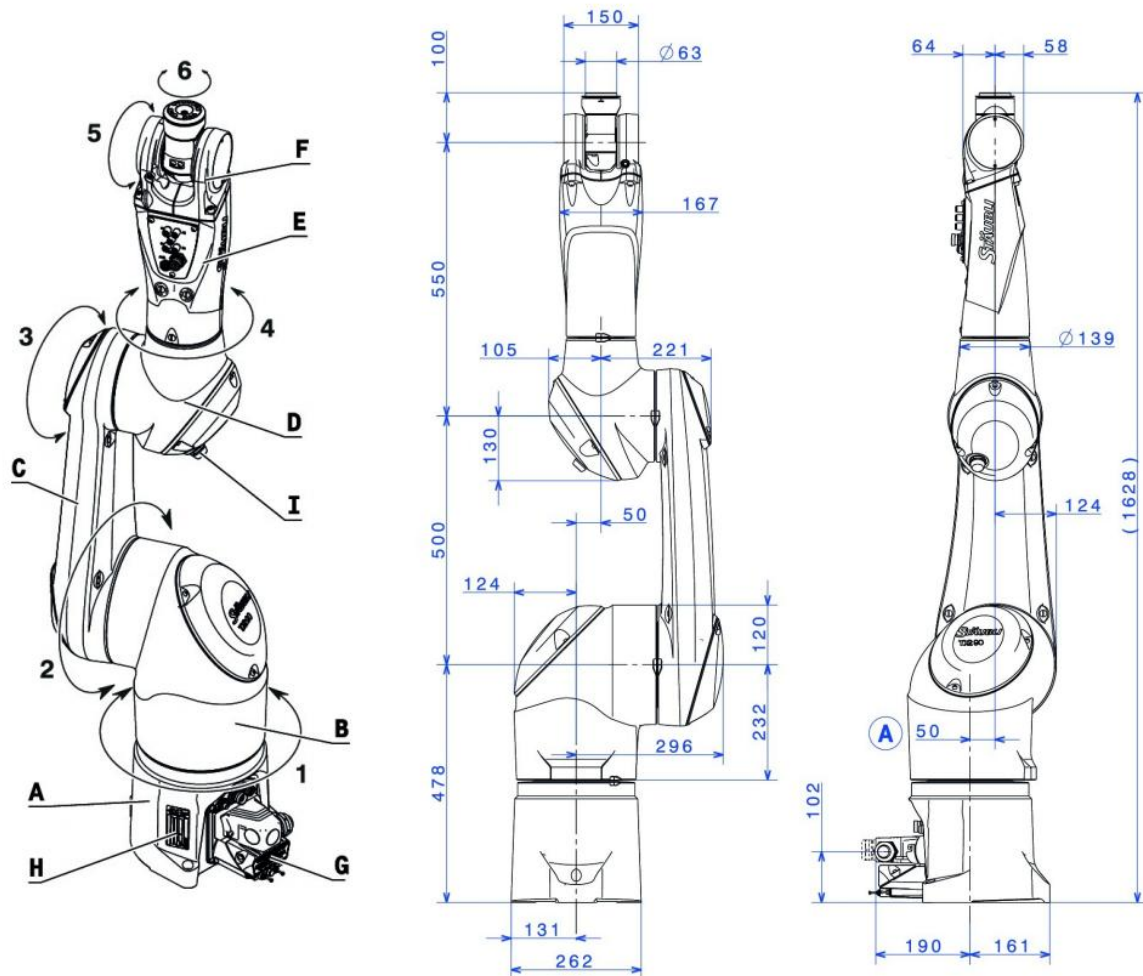


Abb. 2.9 Aufbau und Abmessungen der Bewegungsachsen des Roboterarms TX2-90 L, Quelle: Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 9/28 (leicht modifiziert).

In Tabelle 2.1 sind wichtige technische Merkmale des Robotersystems aufgeführt. Über die Absolutgenauigkeit wird in der Regel keine Angabe gemacht, da diese mitunter von lokalen Umgebungs- und Einflüssen abhängig ist. Die technischen Merkmale werden in der Konstruktionsbeschreibung in Kapitel 5.2 genauer erläutert.

In Kombination mit der dazugehörigen CS9 Steuerung bietet das verwendete Robotersystem umfassende Sicherheitsfunktionen. Es lassen sich verschiedene Sicherheitszonen definieren, in die der Roboter nur unter festgelegten Bedingungen arbeiten kann. Weiters kann bei Detektion von Personen parametrisiert werden, dass sich automatisch die Geschwindigkeit des Roboters immer stärker reduziert wird, je weiter sich eine Person dem Roboter annähert. Anschließend kann bei Verlassen der Person die Arbeit ohne Neustart fortgesetzt werden.

## 3 Konzeptentwicklung

In diesem Kapitel werden Lösungsansätze zu Teilfunktionen der Roboterzelle entwickelt und gegenübergestellt. Die Varianten werden nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten miteinander verglichen und bewertet. Die geeigneteren Varianten dienen anschließend als Ausgangspunkt für die Konstruktionsdetaillierung.

### 3.1 Zellenkonzept

Eine grundlegende Entscheidung ist die Konzeption der Zelle, beziehungsweise wie die Bearbeitungszelle mit ihrer Umgebung in Kontakt steht. In weiterer Folge werden das offene Zellenkonzept und das geschlossene Zellenkonzept genauer vorgestellt und Vorzüge und Schwächen der Gestaltungsvarianten beschrieben. Ausgangspunkt ist jeweils ein mobiler Arbeitstisch mit der Grundfläche von 1300 mm x 1300 mm.

#### 3.1.1 Offenes Zellenkonzept

Beim offenen Zellenkonzept existiert zwischen dem Roboter und seiner Umgebung keine feste Barriere. Dadurch besteht aber das Risiko, dass gefährliche Situationen zwischen dem Industrieroboter und den in der Umgebung befindlichen Personen entstehen. Aus diesem Grund müssen Schutzsysteme, z.B. in Form von optoelektronischen Sicherheitssensoren, vorgesehen werden, welche die Umgebung auf menschliches Betreten überwachen.

Beim offenen Konzept arbeiten der Maschinenbediener und der Roboter kooperativ, da sie sich gemeinsamen einen Arbeitsraum teilen. Die Arbeitsvorgänge werden jedoch zeitlich getrennt erledigt.<sup>13</sup> Dazu wird, wie in Abbildung 3.1 dargestellt, die Umgebung in zwei sicherheitskritische Bereiche unterteilt. Der Warnbereich liegt außerhalb des gefährdenden Bereiches, in dem der Roboterarm noch in Personenkontakt kommen könnte. Beim Betreten dieses Bereiches muss der Industrieroboter seine Arbeitsgeschwindigkeit reduzieren und Leuchtmelder oder Signaltöne warnen die beteiligte Person, sobald sie sich dem verletzungsgefährdenden Bereich nähert. Im Schutzbereich könnte es direkt zum Personenkontakt kommen, daher wird der Roboterarm beim Betreten dieses Bereiches gestoppt und kann seine Tätigkeit erst beim

---

<sup>13</sup> SICK AG (Hrsg) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018].

Verlassen der Person gegebenenfalls nach einem Reset oder einer Quittierung wieder aufnehmen.

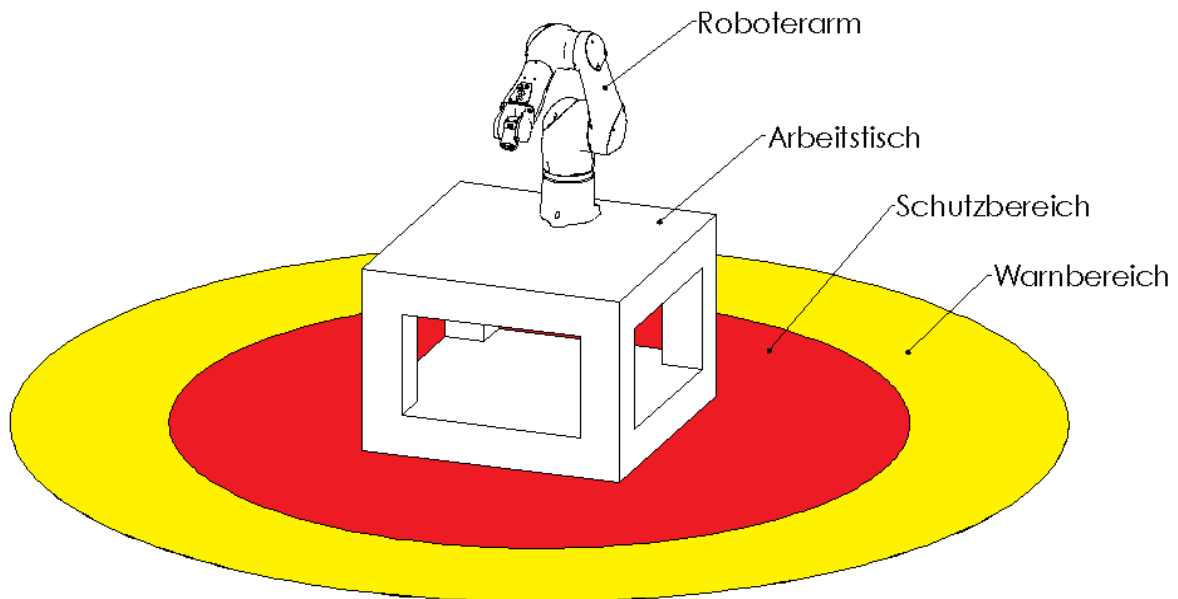


Abb. 3.1 Offenes Zellenkonzeptes mit Sicherheitszonen, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.1.2 Geschlossenes Zellenkonzept

Beim geschlossenen Zellenkonzept existiert zwischen dem Roboter und seiner Umgebung eine physisch feste Schutzbarriere. Der Arbeitsbereich des Industrieroboters und der Umgebungsbereich sind somit sichtbar getrennt. Bei dieser räumlichen Trennung der Arbeitsbereiche arbeiten Mensch und Roboter koexistent, im Gegensatz zur kooperativen Arbeitsweise können jedoch die Arbeiten zeitlich parallel ausgeführt werden.<sup>14</sup>

Als Schutzbarriere kommen dabei u.a. auch transparente Schutzscheiben mit ausreichender Stärke in Betracht. Bei der geschlossenen Zellenvariante, siehe Abb. 3.2, ist durch die räumliche Trennung der gesamte Umgebungsbereich dauerhaft sicher betretbar. Die Bewegungsmöglichkeiten des Roboterarmes sind durch die vorgegebenen Grenzen eingeschränkt, innerhalb dieser Grenzen kann jedoch die volle Dynamik des Roboterarms durchgehend genutzt werden. Der Bearbeitungsprozess ist insofern kontinuierlicher gesichert, als es durch die Annäherung von Personen zu keinen Verzögerungen oder Produktionsstopps kommt.

---

<sup>14</sup> SICK AG (Hrsg.) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018].

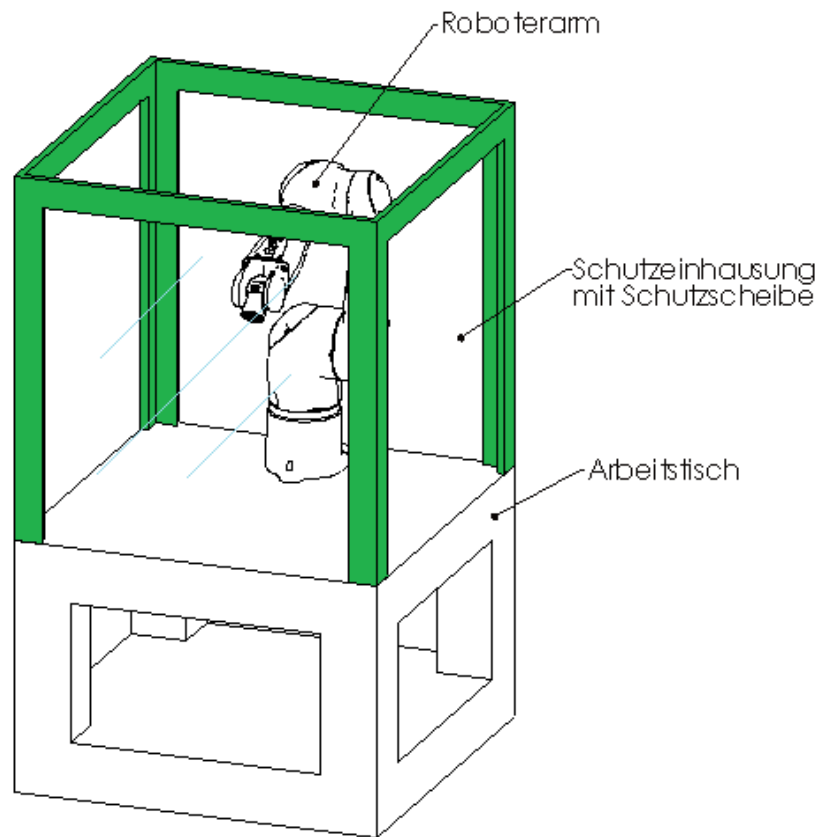


Abb. 3.2 Geschlossenes Zellenkonzept mit Schutzumhausung, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.1.3 Gegenüberstellung der Zellenkonzepte

Beim Systemvergleich müssen die Vorzüge und Schwächen der beiden Varianten gegeneinander abgewogen werden. Beim offenen Konzept ist die Bewegungsfreiheit des Roboterarmes klar ein Vorteil, da so die Orientierungsfähigkeit nicht eingeschränkt wird, andererseits birgt das offene Konzept ein höheres Risikopotential bzw. der Aufwand zur Herstellung der nötigen Arbeitssicherheit ist höher. Bei Schadenseintritt wären die Folgen ungleich höher. Der Platzbedarf ist beim offenen Konzept hoch, da der Mindestabstand von Gefahrenstelle zum Auslösepunkt genügend großzügig gewählt werden muss, um einen Nothaltevorgang rechtzeitig beginnen zu können. Einflussfaktoren des Mindestabstands sind die Gesamtnachlaufzeit des Systems und die Auflösung der gewählten berührungslos wirkenden Schutzumhausungen. Bei der geschlossenen Variante endet die Systemgrenze an der Außenseite der Schutzumhausung.



Eine Schwäche des offenen Konzeptes ist auch, dass es keine Möglichkeiten gibt, den Bediener von unkontrolliert fliegenden Teilen zu schützen, die aus dem Zelleninneren kommen. Das sind beim spanabhebenden Prozess typischerweise Späne, Kühlschmierkomponenten oder im schlechtesten Fall bei Werkzeugbruch, die Ausbrüche des Schneidmaterials. Bei der robotergestützten, spanabhebenden Bearbeitung überwiegen beim offenen Konzept, trotz der Vorzüge der größeren Flexibilität, die Risiken. Die einfache und robuste Sicherheitsarchitektur des geschlossenen Konzeptes wird daher als vorteilhafter erachtet und demzufolge wird das geschlossene Konzept weiterverfolgt.

## 3.2 Bearbeitungskonzept

Bei der robotergestützten, spanabhebenden Bearbeitung bedarf es neben dem Roboterarm, der für die Vorschubleistung sorgt, einer Bearbeitungsspindel, welche die Schnittleistung für die durchzuführende spanende Bearbeitung zur Verfügung stellt. Bei der Anordnung von Roboter, Bearbeitungsspindel und Werkstück stehen verschiedene Varianten zur Auswahl, welche nachstehend beschrieben werden. Das letzte Glied der kinematischen Kette beim Industrieroboter wird als Endeffektor bezeichnet, der Endeffektor ist am Werkzeugflansch des Roboterarms aufgebaut und kann je nach Funktionalität unterschiedlichste Formen annehmen.<sup>15</sup> Für die geplante Applikation besteht der Endeffektor aus einer Bearbeitungsspindel oder einer Spannvorrichtung für die Werkstücke, die am Roboterarm arrangiert werden.

### 3.2.1 Spindelaufbau am Roboter

Bei dieser Variante wird die Bearbeitungsspindel am Roboterflansch montiert, das Zerspanungswerkzeug wird somit durch den Roboterarm orientiert und führt eine Vorschubbewegung hin zum Werkstück aus. Das Werkstück ist währenddessen ortsfest in einer Spannvorrichtung fixiert. Bei der Bearbeitungsvariante ist das Werkstück senkrecht zur Arbeitsfläche positioniert, die Spannvorrichtung ist auf der Arbeitsfläche mit vertikaler Ausrichtung der Achse fixiert.

Die Bearbeitungsspindel benötigt Medienzuleitungen für Energie (Strom und Druckluft), Signale und Peripherie, diese werden über den Roboterarm intern oder extern über eine Energiekette an den Endeffektor zugeführt. Der Endeffektor unterliegt bei dieser Variante nur geringfügigen Änderungen, bis auf das in der Spindel gespannte Werkzeug bleibt der Aufbau im Normalfall unverändert.

---

<sup>15</sup> Haas (2016), S. 82f.

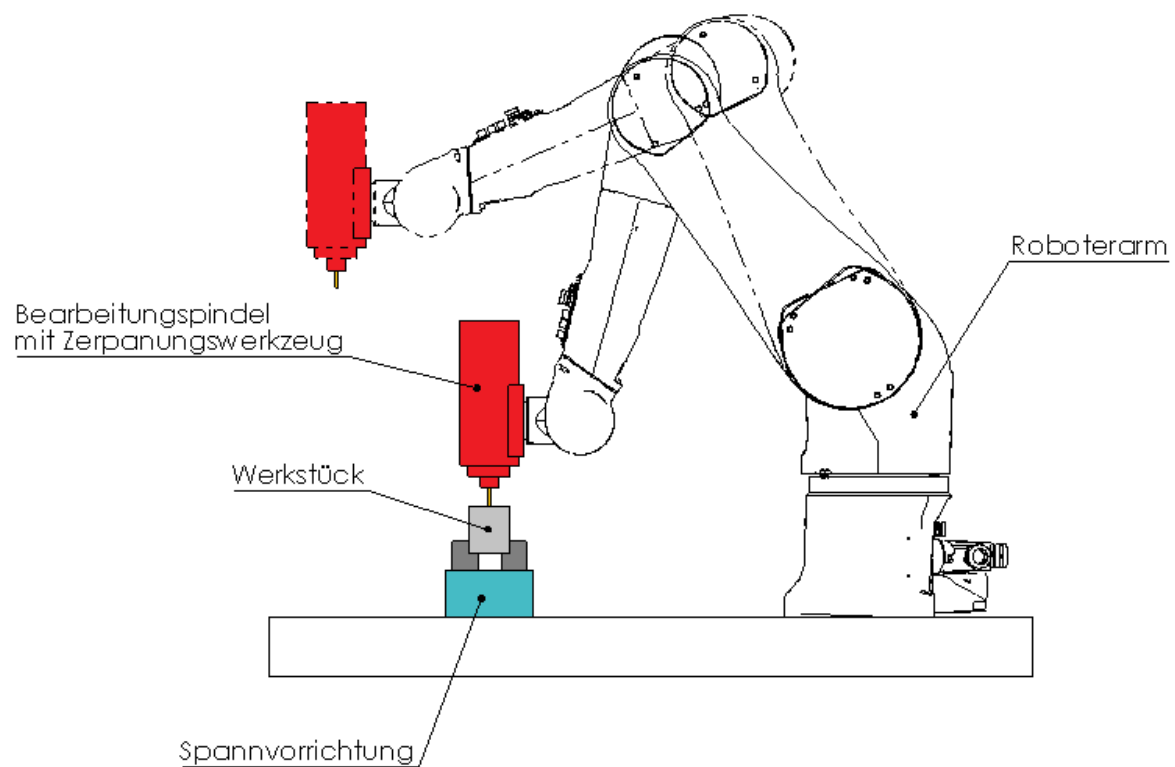


Abb. 3.3 Bewegungsvariante mit Spindelaufbau am Roboter, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.2.2 Ortsfester Spindelaufbau

Bei dieser Bearbeitungsvariante ist die Bearbeitungsspindel und in weiterer Folge auch das zerspannende Werkzeug ortsfest positioniert. Am Roboterarm wird eine Spannvorrichtung für die Aufnahme des Werkstücks befestigt und das Werkstück darin gespannt. Der Roboterarm verfährt bei dieser Variante das Werkstück gegen die ortsfeste Bearbeitungsspindel und führt damit die Vorschubbewegung aus.

Wie in Abbildung 3.4 dargestellt wird die Bearbeitungsspindel horizontal aufgebaut. Damit umseitig am Werkstück Bearbeitungen vorgenommen werden können, befindet sich die Werkzeugspindel auf einem erhöhten Podest. Die Spannvorrichtung muss nach den größten zu erwartenden Bearbeitungskräften dimensioniert werden, um das Werkstück während des Zerspaltungsvorganges nicht zu verlieren. Die Medienzuleitungen für die automatische Spannvorrichtung werden über den Roboterarm zum Endeffektor geführt.

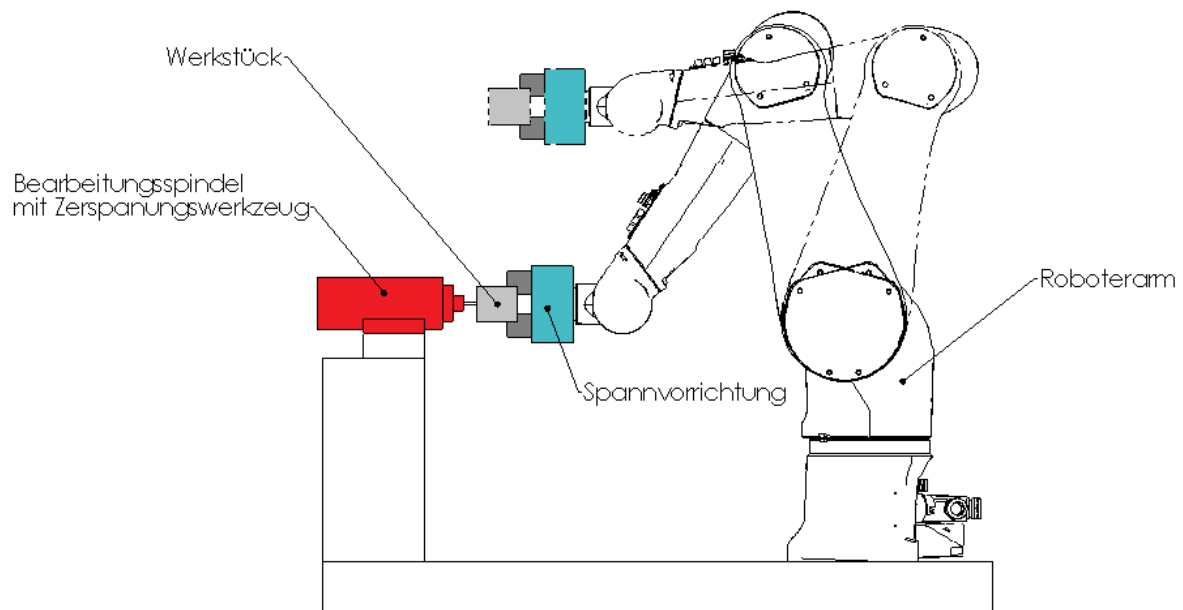


Abb. 3.4 Bewegungsvariante mit ortsfester Bearbeitungsspindel, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.2.3 Variantenvergleich des Bearbeitungskonzeptes

Ein Nachteil des Spindelaufbaus am Roboterarm ist die zu erwartende aufwändigere Medienzuführung zum Endeffektor. Der Bearbeitungsraum hingegen kann effektiver genutzt werden und ist bei Veränderung des zu bearbeitenden Werkstückes weniger stark eingeschränkt. In Abbildung 3.5 zeigt sich der Unterschied der beiden Vorschubvarianten. Beim ortsfesten Spindelaufbau wirkt sich das zu bearbeitende Werkstück stark auf den erforderlichen Raumbedarf aus. Auch die Veränderung bei Masse und Massenschwerpunkt durch wechselnde Werkstücktypen hat Auswirkungen auf den Bearbeitungsprozess und muss berücksichtigt werden. Die Geometrie des Endeffektors beim Spindelaufbau am Roboterarm hingegen bleibt ident. Unter Berücksichtigung der höheren Flexibilität und Raumnutzung überwiegen die Vorteile gegenüber der Variante mit ortsfestem Spindelaufbau. In weiterer Folge wird die Lösungsvariante Spindelaufbau am Roboter favorisiert.

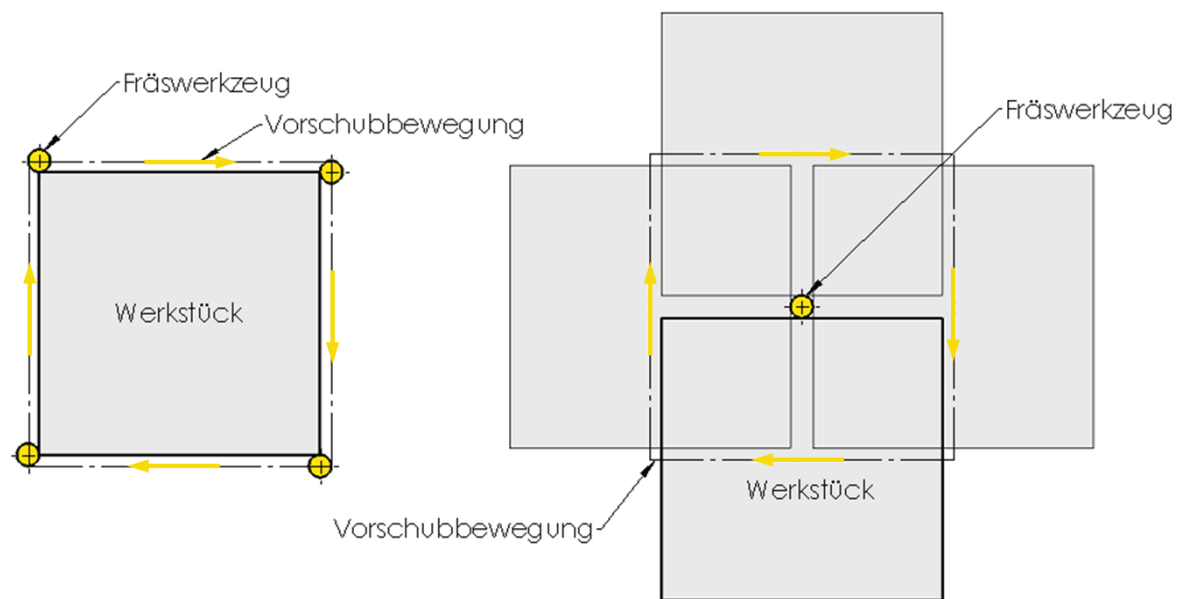


Abb. 3.5 Raumbedarf der Vorschubvarianten Spindelaufbau am Roboterarm (links) und ortsfester Spindelaufbau (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.3 Beladungskonzept

In der Anforderungsliste wurde bereits definiert, dass die Werkstückübergabe an die Roboterzelle mittels standardisierten Teileträgern erfolgen soll. Durch das in Kapitel 3.1.3 favorisierte geschlossene Zellenkonzept mit einer koexistenten Arbeitsweise benötigt es noch eine Vorrichtung, um die mit Werkstücken bestückten Teileträger in die geschlossene Schutzeinhausung zu transportieren, ohne dabei die Funktionalität der Schutzeinrichtung zu beeinträchtigen. In weiterer Folge werden die Charakteristiken der rotatorischen und translatorischen Beladungsvariante näher erklärt. Teileträger die mit noch zu bearbeitenden Werkstücke beladen sind, werden als Rohteileträger benannt. Teileträger mit fertig bearbeiteten Werkstücken werden als Fertigteilträger bezeichnet.

### 3.3.1 Translatorische Beladungsvariante

Bei der translatorischen Beladungsvariante werden die Teileträger entlang einer Bewegungsachse durch die Roboterzelle geführt, siehe Abb. 3.6. Die Rohteilträger werden an einer Seite der Zelle zugeführt und können an der gegenüberliegenden Seite als Fertigteilträger entnommen werden. Der Transport durch das Zelleninnere wird von einem flachen Bandförderer übernommen. Im Arbeitsbereich des Bearbeitungsroboters wird der Weitertransport unterbrochen. Der Roboter kann die Werkstücke zur weiteren Bearbeitung entnehmen, bearbeiten und wieder in den Träger zurücksetzen. Die Möglichkeiten der Bauteilentnahme werden in Kapitel 3.4 näher beschreiben. Am Ende der Bearbeitung aller im Teileträger befindlichen Werkstücke erfolgt der Abtransport aus der Roboterzelle. Der Fertigteilträger ist nun zum nachfolgenden innerbetrieblichen Weitertransport bereit.

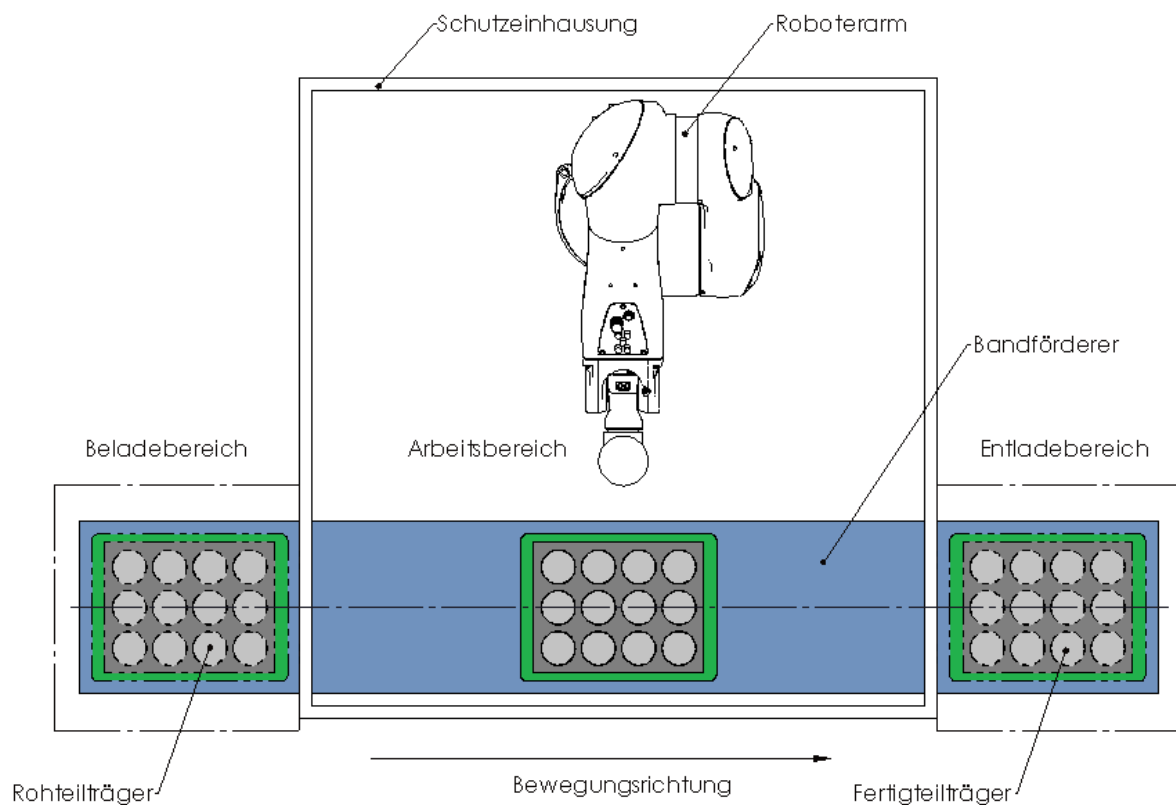


Abb. 3.6 Translatorische Beladungsvariante, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.3.2 Rotatorische Beladungsvariante

Bei der rotatorischen Beladungsvariante werden die Teileträger durch eine 180° Drehbewegung in das Zelleninnere transportiert. Ein pneumatisches oder elektromotorisches Schwenkelement sorgt für die Antriebsleistung, auf dem Schwenkelement befindet sich die Schwenkplatte, auf der die bestückten Teileträger postiert werden. Die Schwenkvorrichtung ist mit zwei Teileträgern beladen und wechselt bei jedem Schwenkvorgang zwischen dem Arbeitsbereich des Industrieroboters und dem Außenbereich der Roboterzelle, Abb. 3.7. Der Be- und Entladevorgang findet daher gleichzeitig statt. Bei der rotatorischen Beladungsvariante ist der Start- und Endpunkt der jeweils 180° Schwenkbewegung durch das Schwenkelement mit seinen Endlagen vorgegeben. Von Haltepositionen dazwischen wird in diesem Konzept abgesehen.

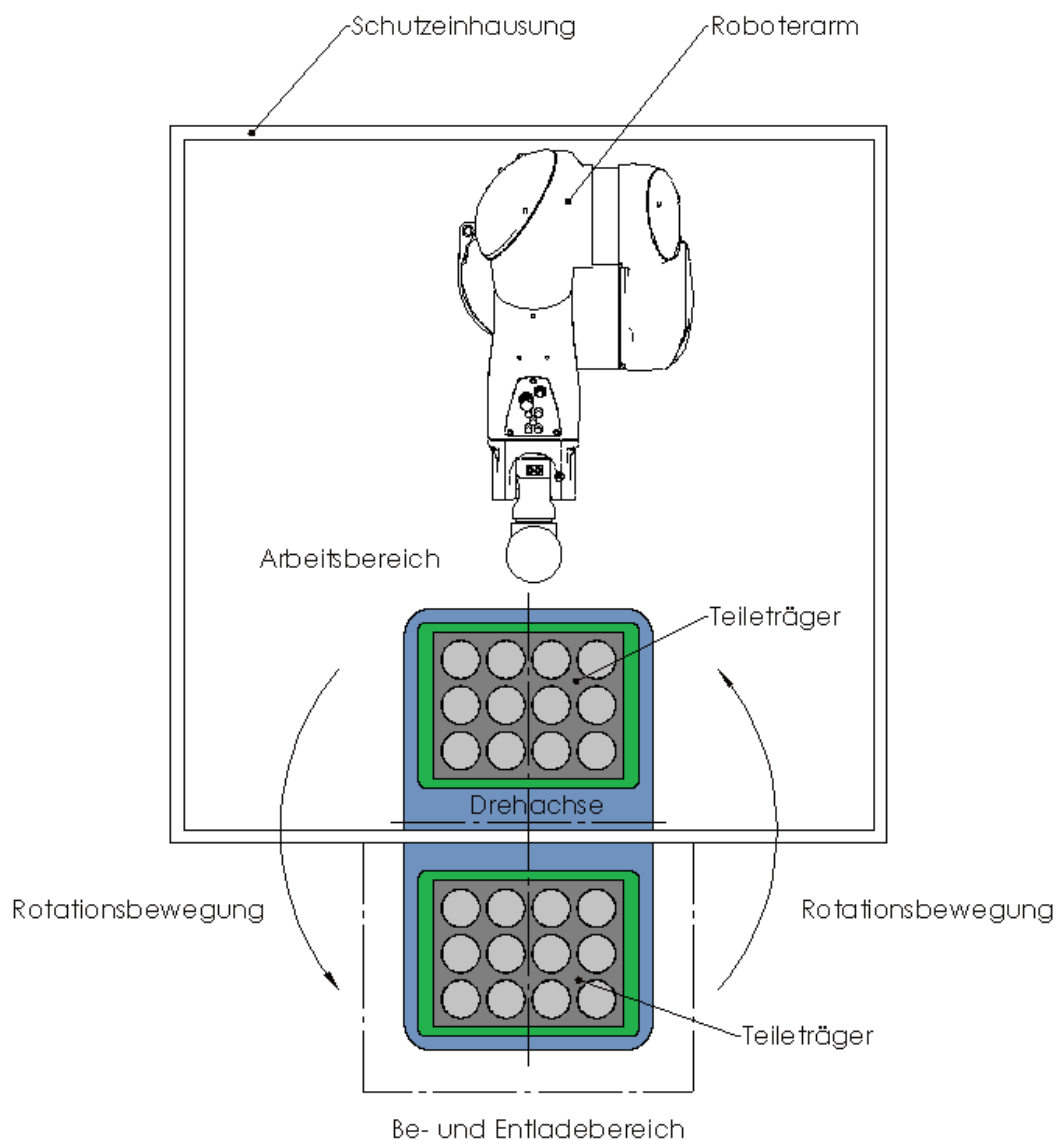


Abb. 3.7 Rotatorische Beladungsvariante, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.3.3 Variantenvergleich der Beladungskonzepte

Die unterschiedlichen Beladungskonzepte beruhen auf den verschiedenen Bewegungsarten beim Transport. Die rotatorische Beladungsvariante stellt eine einfache und effiziente Art der Materialzuführung dar. Die einfache Realisierbarkeit erhöht einerseits die Kosteneffizienz, andererseits wird auch der zur Verfügung stehende Raum effektiver genutzt. Einen weiteren Vorzug für diese Variante stellen die definierten Rahmenbedingungen der Bewegung dar. Nach 180° wird der Schwenkvorgang reproduzierbar beendet und die Teileträger stehen zur Abnahme durch den Roboterarm bereit, das Erfordernis einer optischen Detektionskontrolle ist nicht vorhanden. Bei der translatorischen Beladungsvariante ist der Raumbedarf höher, auch stellt der definierte Bewegungstopp im Zelleninneren einen höheren Aufwand als bei der rotatorischen Beladung dar. Von Vorteil, im betriebsorganisatorischen Sinne, sind die immer gleich bleibenden Orte für Materialzufuhr und -abfuhr. Weiters stellen bei dieser Variante die Möglichkeiten der Pufferspeicherung einen Nutzen dar. Bei der Gesamtbetrachtung für die geforderte Applikation überwiegen jedoch bei der rotatorischen Beladung die Vorteile durch die hohe Effizienz und Funktionalität. Daher wird der rotatorischen Beladung der Vorzug gegeben.

## 3.4 Endeffektorenkonzept

Die hauptsächliche Anforderung an die Roboterzelle ist, die zugeführten Rohlinge / Werkstücke aus den bereitgestellten Teileträgern zu entnehmen, in die Spannvorrichtung einzusetzen und in weiterer Folge zu bearbeiten. Um diese Anforderung zu bewerkstelligen, ist neben dem spanabhebenden Bearbeitungsprozess ein weiterer Hilfsprozess notwendig, der Handhabungsprozess. Die in die Roboterzelle transportierten Werkstücke müssen automatisiert aus den Teileträgern entnommen und in eine bereitgestellte Werkstückspannvorrichtung eingesetzt werden. Um diesen Ablauf zu ermöglichen, muss am Roboterarm eine Greifvorrichtung zum Aufnehmen und Manipulieren der Werkstücke vorgesehen werden. Zum Wechsel zwischen spanabhebender Bearbeitung und Manipulationsvorgang stehen unterschiedliche Lösungsvarianten zur Auswahl.

### 3.4.1 Multieffektor

Beim Multieffektor sind sowohl die Bearbeitungsspindel als auch die Greifeinheit gemeinsam am Roboterarm montiert. Die Bearbeitungsspindel ist eine relativ gewichtsintensive Komponente und wird, um das hohe Bauteilgewicht nicht zu stark außermittig zu führen, deshalb zentral mittels einer Flanschhalterung am Roboterarm befestigt, siehe Abb. 3.8. Der Greifer und der damit verbundene Handhabungsprozess unterstützen den Bearbeitungsvorgang durch den Materialtransport innerhalb der Bearbeitungszelle. Angeordnet wird er senkrecht zur Bearbeitungsspindel. Zum Greifen wird der Endeffektor in die passende Orientierung geschwenkt und zentrisch über das zu manipulierende Werkstück positioniert.

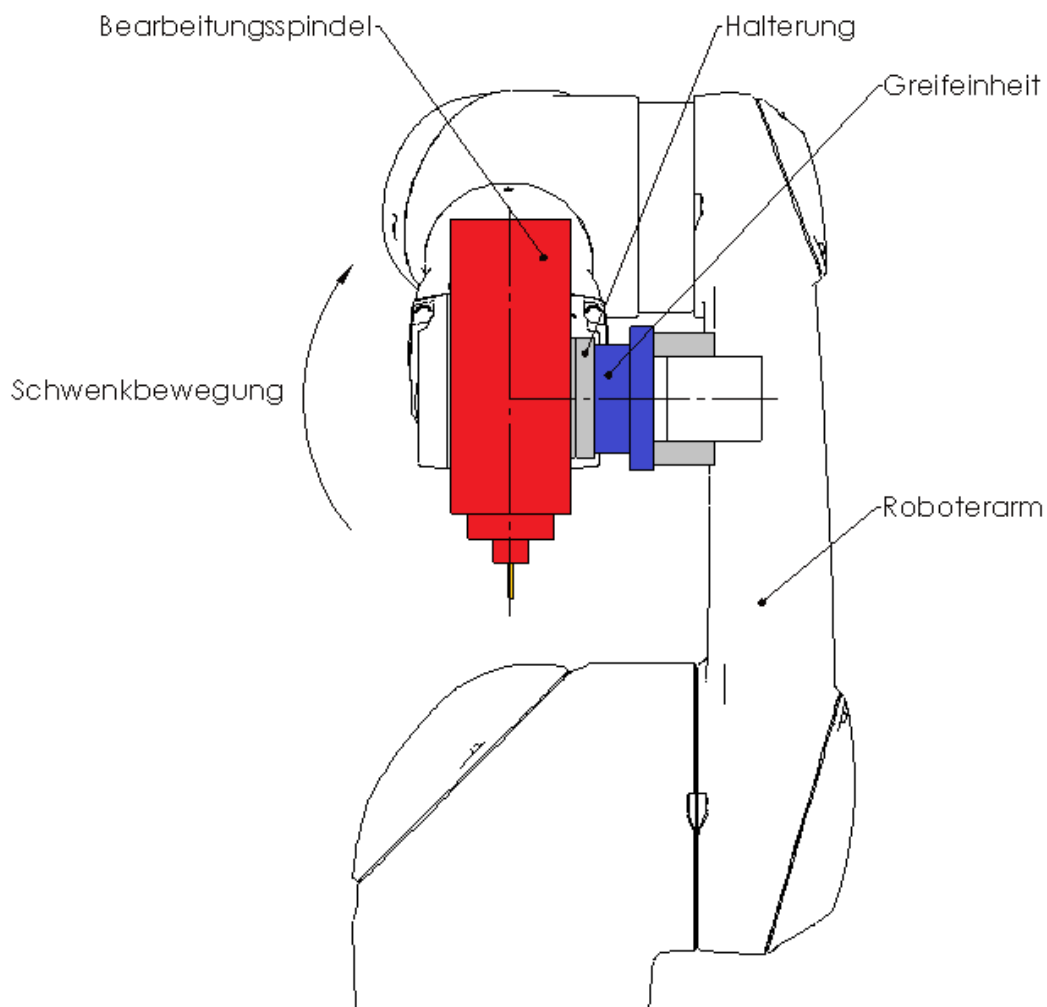


Abb. 3.8 Roboter mit Multieffektor, Quelle: Eigene Darstellung.



### 3.4.2 Wechselbarer Monoeffektor

Bei den Monoeffektoren handelt es sich wieder um die Bearbeitungsspindel und die Greifeinheit. Bei dieser Variante werden jedoch die Effektoren zwischen dem Bearbeitungsvorgang und dem Handhabungsvorgang vollständig gewechselt. Dafür werden die Effektoren mit Wechseladaptern ausgerüstet. Am Werkzeugflansch des Roboters wird der dazu passende Wechselkopf aufgebaut. Beim Effektorenwechsel wird der Wechselkopf in den Wechseladapter geführt und durch eine pneumatische Verriegelungsmechanik fest verbunden. Die Effektoren befinden sich in speziellen Ablagestationen und können je nach Bedarf automatisch mit dem Roboterarm verbunden und anschließend wieder dort abgelegt werden. Für jeden Bearbeitungszyklus eines Werkstücks sind zwei Effektorenwechsel erforderlich, vorausgesetzt das Werkstück muss nicht umgespannt werden.

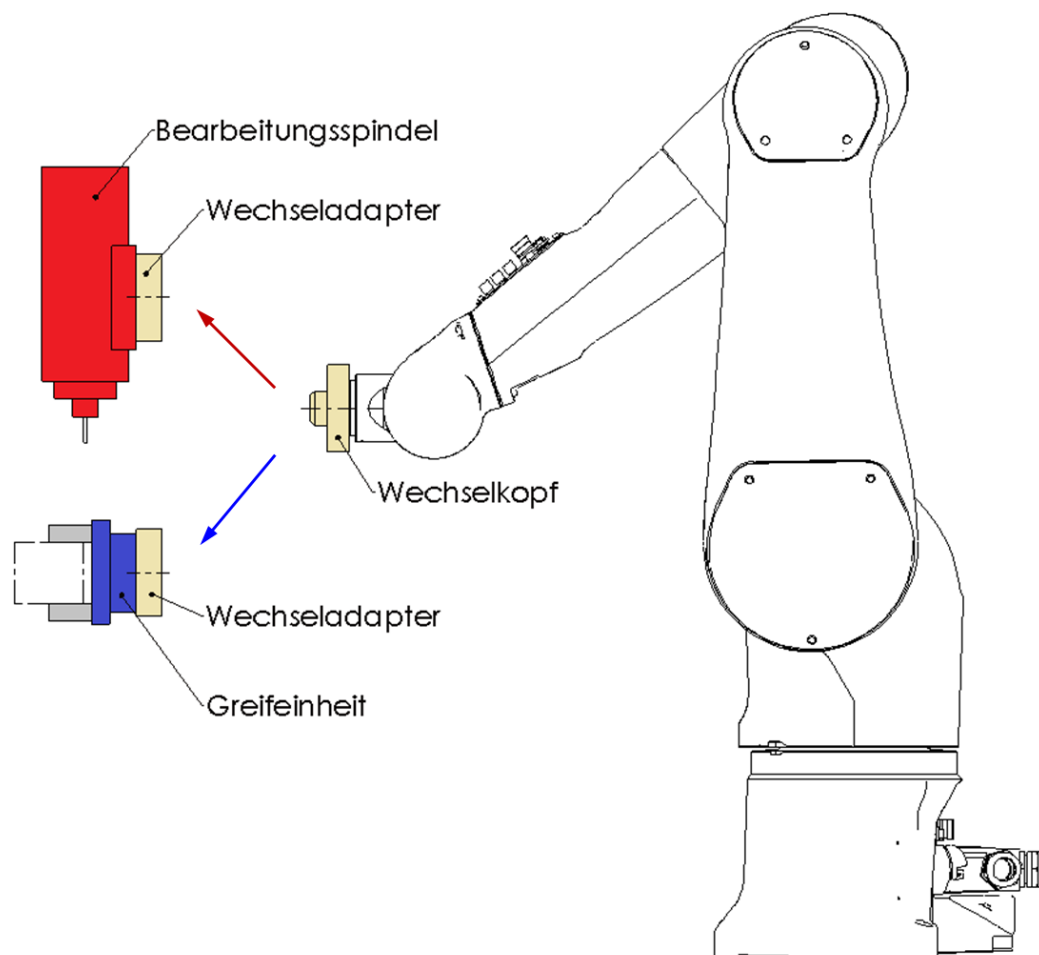


Abb. 3.9 Roboterarm mit wechselbaren Monoeffektoren, Quelle: Eigene Darstellung.

### 3.4.3 Gegenüberstellung der Endeffektorenkonzepte

In Betrachtung der beiden Effektorenvarianten erkennt man, dass bei der Monoeffektorenvariante der Vorteil darin besteht, die Gewichtsbelastung auf den Roboterarm reduzieren zu können, da zeitgleich immer nur ein Effektor im Einsatz ist. Der Gewichtsvorteil wird angesichts der zusätzlichen Belastung durch das Wechselelement geschmälert, zudem vergrößert sich der Abstand des Massenschwerpunkts, was Auswirkungen auf das Massenträgheitsmoment mit sich bringt. Die Vorzüge des Multieffektors liegen in der geringen Komplexität der Lösungsvariante, den damit verbunden geringeren Mitteleinsatz und in den kürzeren Wechselzeiten. Bei den Monoeffektoren entsteht durch die zusätzliche Schnittstelle am Roboterflansch eine zusätzliche Fehlerquelle. Die Wiederholungsgenauigkeiten beim Verriegelungsvorgang des Wechselelements haben somit auch Einfluss auf das Zerspanungsergebnis. Nach Abwägung der Vorzüge und Schwächen beider Varianten wird der Multieffektor als die für diese Applikation vorteilhaftere Variante erachtet und weiterverfolgt.

## 3.5 Gesamtkonzept

In diesem Kapitel wurden wichtige Konzeptvarianten aufgestellt, definiert und nach technischen und wirtschaftlichen Gesichtspunkten bewertet und gegenübergestellt. Die getroffenen Entscheidungen besitzen keine allgemeine Gültigkeit, sondern beziehen sich auf den expliziten Anwendungsfall und das konkrete Umsetzungsvorhaben. Das resultierende Gesamtkonzept ergibt sich aus dem geschlossenen Zellenkonzept, mit einem Spindelaufbau am Roboter, das mit einem rotatorischen Beladungssystem ausgestattet wird und mittels des Multieffektors Bearbeitungs- und Handhabungsprozesse in einem Aufbau ermöglicht. Das Gesamtkonzept wird in der nächsten Phase der Konstruktionsdetaillierung zu einem umsetzbaren System weiterentwickelt.

## 4 Komponentenauslegung

In diesem Kapitel werden kritische Komponenten, die aus der Konzeptentwicklung hervorgegangen sind, entsprechend ihres Leistungsbedarfs untersucht. Die Auslegung erfolgt für einen Einsatz bei *Worst Case* Zuständen und Umgebungsbedingungen. Dies stellt die Funktion bei jedem Betriebszustand sicher. Am Kapitelende werden die Ergebnisse evaluiert und das weitere Vorgehen diskutiert.

### 4.1 Berechnung der erforderlichen Spindelleistung

Zur Berechnung der Spindelleistung wird die erforderliche Schnittkraft für die definierten Bearbeitungsvorgänge ermittelt. Definiert wurden zwei verschiedene Applikationen:

1. Fräsen mit Schafffräser  $\varnothing$  5 mm
2. Bohren ins Volle  $\varnothing$  3mm

Die Auslegung erfolgt für eine Trockenbearbeitung mit Stahl E 295 (St 50-2).

In Abbildung 4.1 sind die Zerspankraftkomponenten beim Fräsen und Bohren räumlich dargestellt. Zur Berechnung der Schnittleistung ist die Schnittkraft  $F_c$  zu ermitteln. Die restlichen Zerspankraftkomponenten Vorschubkraft  $F_f$  und Passivkraft  $F_p$  sind bei der Bearbeitung von dem Roboterarm zu leisten.

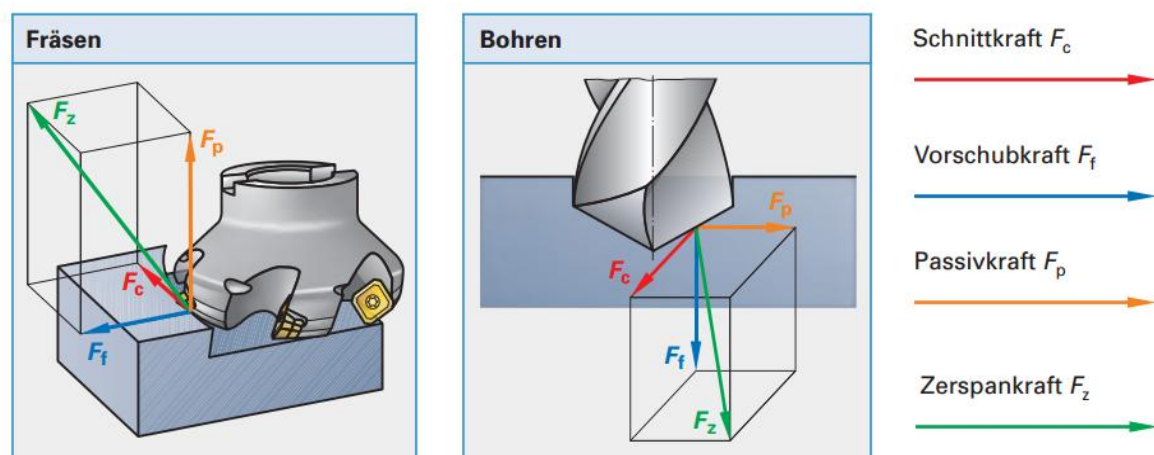


Abb. 4.1 Zerspankraftkomponenten beim Fräsen und Bohren, Quelle: Apprich u.a. (2015), S. 205 (leicht modifiziert).

Zur Berechnung der Schnittkraft muss der Spanungsquerschnitt, siehe Abb. 4.2, der einzelnen Operationen ermittelt werden. Mit Hilfe der Tabellenwerte der spezifischen Schnittkraft kann dann auf die erforderliche Schnittkraft rückgeschlossen werden. Einflussfaktoren, wie etwa der Schneidenschleiß, erhöhen die Schnittkraft und werden über Korrekturfaktoren mitberücksichtigt.

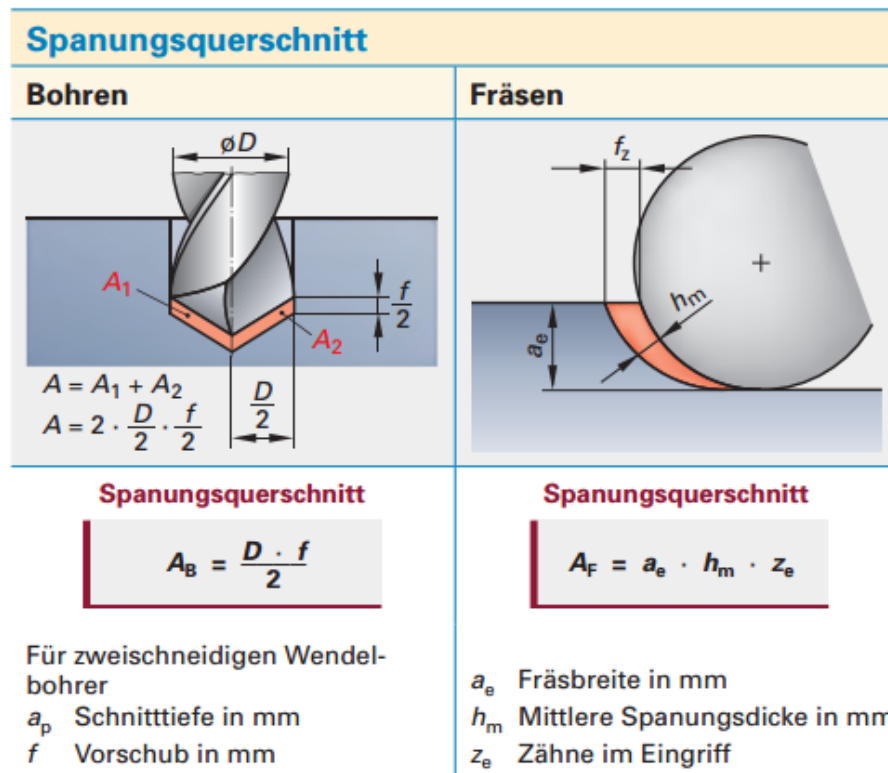


Abb. 4.2 Spanungsquerschnitt für Bohren und Fräsen, Apprich u.a. (2015), S. 206 (leicht modifiziert).

Die Berechnungsformeln sind aus dem Tabellenbuch Metalltechnik<sup>16</sup>, Angaben der spezifischen Schnittkraft sowie Korrekturfaktoren der Schnittkraft stammen aus dem Tabellenbuch für Zerspantechnik<sup>17</sup>, die Werkzeugdaten sind aus dem Katalog des Werkzeugherstellers entnommen<sup>18</sup>.

<sup>16</sup> Vgl. Fischerherz (2006), S. 247/258.


<sup>17</sup> Vgl. Apprich (2015), S. 208/211.

<sup>18</sup> Vgl. Hoffman Group (Hrsg.) (2017), S. 97/348.

### 4.1.1 Schnittkraftberechnung beim Fräsen

Für die Berechnung wird ein für Trockenbearbeitung geeigneter Vollhartmetallfräser mit 4 Schneiden der Fa. Hoffmann Group gewählt. Art. Nr.: 203035-5.


VHM
DIN 6527
Typ N
f8
4
38°
38°
38°
38°
38°
h6 DIN 6535 HB
HPC




**Garant MasterSteel VHM-Schruppfräser HPC**

**Zum Schruppen und Schlichten.**  
 20 3034 – Bis 1,5×D ins Volle **bei höchsten Vorschubwerten** und hoher Laufruhe. Für die maximal mögliche Bearbeitungstiefe das Verhältnis Maß L<sub>s</sub> (Schneidenlänge) / Ø (Nenngröße) beachten!  
 20 3035 – Bis 1×D ins Volle **bei höchsten Vorschubwerten** und hoher Laufruhe.

**Vorteil:** Optimierte Nutenform, exzentrischer Hinterschliff, große Spanräume.



20 3034



20 3035

Eignung/ v <sub>c</sub> [m/min]	Alu Kunststoffe	Alu Guss	Alu Guss > 10 % Si	< 500 N	< 750 N	< 900 N	< 1100 N	< 1400 N	< 55 HRC	< 60 HRC	< 65 HRC	< 67 HRC	< 70 HRC	INOX < 900 N	INOX > 900 N	Ti > 850 N	GG(G)	Uni				
ISO-Code	N	N	N	P	P	P	P	P	H	H	H	H	H	M	M	S	K					
20 3034/3035				260	240	190	180	150						80	70	250						

Ø f8 D <sub>c</sub>	20 3034	20 3035	MasterSteel VHM-Schruppfräser																		
	HPC				L <sub>s</sub>	L <sub>s</sub>	Ø D <sub>c</sub>	L <sub>ps</sub>			45°	f <sub>z</sub>	f <sub>z</sub>								
mm	TiAIN	TiAIN			20 3034	20 3035	20 3035	20 3035	20 3034	20 3035											
mm	5	5	31,20	32,90	9	13	-	-	54	57	6	0,1	0,03	0,04							

Abb. 4.3 Werkzeugdatenblatt des 5 mm VHM-Schruppfräasers, Quelle: Hoffmann Group (Hrsg.), S. 348 (leicht modifiziert).

#### Definition der Werkzeugvariablen

$v_c := 240 \frac{m}{min}$	v <sub>c</sub> ...Schnittgeschwindigkeit
$f_z := 0.02 \text{ mm}$	f <sub>z</sub> ...Vorschub je Schneide
$z := 4$	z ...Anzahl der Schneiden
$d := 5 \text{ mm}$	d ...Fräserdurchmesser
$a_e := 3 \text{ mm}$	a <sub>e</sub> ...Arbeitseingriff
$a_p := 1 \text{ mm}$	a <sub>p</sub> ...Schnitttiefe
$\kappa_r := 90^\circ$	κ <sub>r</sub> ...Einstellwinkel

## Definition der Werkstoffvariablen und Korrekturfaktoren

$k_{c1.1} := 1990 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$m_c := 0.26$	$k_{c1.1}$ ...Hauptwert der spezifischen Schnittkraft
$k_{f1.1} := 351 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$m_f := 0.7$	$k_{f1.1}$ ...Hauptwert der spezifischen Vorschubkraft
$k_{p1.1} := 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$m_p := 0.49$	$k_{p1.1}$ ...Hauptwert der spezifischen Passivkraft
		$m_c, m_f, m_p$ ...Werkstoffkonstanten
$\gamma := 3^\circ$		$\gamma$ ...Spanwinkel
$\gamma_0 := 6^\circ$		$\gamma_0$ ...Basisspanwinkel
$K_{vc} := 1$		$K_{vc}$ ...Korrekturfaktor Schnittgeschwindigkeit
$K_{sp} := 1.2$		$K_{sp}$ ...Korrekturfaktor Spanstauchung
$K_{ver} := 1.2$		$K_{ver}$ ...Korrekturfaktor Werkzeugverschleiß

## Ermittlung von Vorschub und Zeitspanungsvolumen

$n := \frac{v_c}{d \cdot \pi} = 15278.87 \frac{1}{\text{min}}$	$n$ ...Spindeldrehzahl
$v := f_z \cdot z = 0.08 \frac{\text{mm}}{1}$	$v$ ...Vorschub pro Umdrehung
$v_f := f_z \cdot z \cdot n = 1222.31 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$v_f$ ...Vorschubgeschwindigkeit
$Q_c := a_p \cdot a_e \cdot v_f = 3666.93 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$	$Q_c$ ...Zeitspanungsvolumen

Ermittlung des Leistungsbedarfs

$b := \frac{a_p}{\sin(\kappa_r)} = 1 \text{ mm}$	$b$ ...Spanungsbreite
$\Delta\varphi := \arccos\left(1 - \frac{2 \cdot a_e}{d}\right) = 101.54^\circ$	$\Delta\varphi$ ...Eingriffswinkel außermittiges Stirnfräsen
$z_e := z \cdot \frac{\Delta\varphi}{360^\circ} = 1.12819$	$z_e$ ...Zähne im Eingriff
$h_m := \frac{a_e}{d} \cdot \frac{360^\circ}{\pi \cdot \Delta\varphi} \cdot f_z \cdot \sin(\kappa_r) = 0.0135 \text{ mm}$	$h_m$ ...mittlere Spanungsdicke
$A := b \cdot h_m \cdot z_e = 0.01528 \text{ mm}^2$	$A$ ...Spanungsquerschnitt
$K_Y := 1 - \frac{Y - Y_0}{66.7} = 1.0008$	$K_Y$ ...Korrekturfaktor Spanwinkel
$k_c := \frac{k_{c1.1}}{h_m^{m_c}} \cdot K_Y \cdot K_{vc} \cdot K_{sp} \cdot K_{ver} = 8776.31 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$k_c$ ...spezifische Schnittkraft
$F_c := A \cdot k_c = 134.09 \text{ N}$	$F_c$ ...Schnittkraft
$F_f := A \cdot \frac{k_{f1.1}}{h_m^{m_f}} = 108.94 \text{ N}$	$F_f$ ...Vorschubkraft
$F_p := A \cdot \frac{k_{p1.1}}{h_m^{m_p}} = 34.58 \text{ N}$	$F_p$ ...Passivkraft
$P_c := F_c \cdot v_c = 536.37 \text{ W}$	$P_c$ ...Schnittleistung
$M_c := \frac{P_c}{2 \cdot \pi \cdot n} = 0.34 \text{ N} \cdot \text{m}$	$M_c$ ...Schnittmoment
$\eta_m := 0.9$	$\eta_m$ ...Spindelwirkungsgrad
$P_m := \frac{P_c}{\eta_m} = 595.96 \text{ W}$	$P_m$ ...Spindelleistung
$M_m := \frac{P_m}{2 \cdot \pi \cdot n} = 0.37 \text{ N} \cdot \text{m}$	$M_m$ ...Spindelmoment

### 4.1.2 Schnittkraftberechnung beim Bohren

Für die Berechnung wird ein für Trockenbearbeitung geeigneter Vollhartmetallbohrer der Fa. Hoffmann Group gewählt Art. Nr.: 122540-3.

VHM

DIN 6537


6xD

Typ FS

h7

140°

h6  
DIN 6535  
HA HB HE




**Garant** **Vollhartmetall-NC-Hochleistungsbohrer**


**Besonders stabil** durch verstärkte Kerndicke, **Spezialprofil**.  
 Ausspitzung **spezial**.  
**Hohe Rundlaufgenauigkeit** und **Standzeiten**.  
**Genauere Bohrungsqualitäten**.

**Empfehlung:** **Maximale Bohrtiefe:**  
 Spannutenlänge (siehe Tabelle) abzüglich 1,5×Nenn-Ø.


**Hinweis:** Form HB und HE zum gleichen Preis wie HA lieferbar.  
 Form **HB**: mit **Nr. 122545** bestellen.  
 Form **HE**: mit **Nr. 122540 + 129100HE** bestellen.



zylindrischer Schaft DIN 6535 HA 122540



Schaft mit Mitnahmefläche DIN 6535 HB 122545



Schaft mit Mitnahmefläche DIN 6535 HE 122540 + 129100HE

Eignung/ v <sub>c</sub> [m/min]	Alu			Guss				HRC				INOX			Ti	GG(G)	CuZn	Uni	Kühlung									
	Kunststoffe 02/02	Alu 02/02	Alu 10/10	> 10% Si	< 500 N	< 750 N	< 900 N	< 1100 N	< 1400 N	< 55 HRC	< 60 HRC	< 65 HRC	< 67 HRC	< 900 N	> 900 N	> 850 N												
ISO-Code	N	N	N	P	P	P	P	P	H	H	H	H	M	M	S	K	N											
122540	190	170	140	90	85	75	65	40					40	30	25	70	160	●	●	●								

Ø h7 **12 2540**  
 VHM-NC-Hochleistungsbohrer FS  
 zylindrischer Schaft  
 DIN 6535 HA

mm	TIAIN				
3	57,80	28	66	6	0,14

Ø h7 **12 2540**  
 VHM-NC-Hochleistungsbohrer FS  
 zylindrischer Schaft  
 DIN 6535 HA

mm	TIAIN				
7,9	72,20	53	91	8	0,2

Abb. 4.4 Werkzeugdatenblatt des 3 mm VHM-Bohrers, Quelle: Hoffmann Group (Hrsg.), S. 97 (leicht modifiziert).

#### Definition der Werkzeugvariablen

$$v_c := 85 \frac{m}{min}$$

$$f := 0.03 \text{ mm}$$

$$z := 2$$

$$d := 3 \text{ mm}$$

$$\sigma_s := 140^\circ$$

v<sub>c</sub> ...Schnittgeschwindigkeit

f ...Vorschub pro Umdrehung

z ...Anzahl der Schneiden

d ...Bohrdurchmesser

σ<sub>s</sub> ...Spitzenwinkel



## Definition der Werkstoffvariablen und Korrekturfaktoren

$k_{c1.1} := 1990 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$m_c := 0.26$	$k_{c1.1}$ ...Hauptwert der spezifischen Schnittkraft
$k_{f1.1} := 351 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$m_f := 0.7$	$k_{f1.1}$ ...Hauptwert der spezifischen Vorschubkraft
$k_{p1.1} := 275 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$	$m_p := 0.49$	$k_{p1.1}$ ...Hauptwert der spezifischen Passivkraft
		$m_c, m_f, m_p$ ...Werkstoffkonstanten
$\gamma := 16^\circ$		$\gamma$ ...Spanwinkel
$\gamma_0 := 6^\circ$		$\gamma_0$ ...Basisspanwinkel
$K_{vc} := 1$		$K_{vc}$ ...Korrekturfaktor Schnittgeschwindigkeit
$K_{sp} := 1.2$		$K_{sp}$ ...Korrekturfaktor Spanstauchung
$K_{ver} := 1.2$		$K_{ver}$ ...Korrekturfaktor Werkzeugverschleiß

## Ermittlung von Vorschub und Zeitspanungsvolumen

$f_z := \frac{f}{z} = 0.015 \text{ mm}$	$f_z$ ...Vorschub einer Schneide
$n := \frac{v_c}{d \cdot \pi} = 9018.78 \frac{1}{\text{min}}$	$n$ ...Spindeldrehzahl
$v_f := f \cdot n = 270.56 \frac{\text{mm}}{\text{min}}$	$v_f$ ...Vorschubgeschwindigkeit
$Q_c := \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot v_f = 1912.5 \frac{\text{mm}^3}{\text{min}}$	$Q_c$ ...Zeitspanungsvolumen

Ermittlung der Schnittkraft und -moment

$$A_z := \frac{d}{2} \cdot f_z = 0.0225 \text{ mm}^2$$

$A_z$  ... Spanungsquerschnitt pro Schneide

$$h := \frac{f}{2} \cdot \sin\left(\frac{\sigma_s}{2}\right) = 0.0141 \text{ mm}$$

$h$  ... Spanungsdicke

$$K_Y := 1 - \frac{Y - Y_0}{100} = 0.9983$$

$K_Y$  ... Korrekturfaktor Spanwinkel

$$k_c := \frac{k_{c1.1}}{h^{m_c}} \cdot K_Y \cdot K_{vc} \cdot K_{sp} \cdot K_{ver} = 8663.57 \frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$$

$k_c$  ... spezifische Schnittkraft

$$F_{cz} := A_z \cdot k_c = 194.93 \text{ N}$$

$F_{cz}$  ... Schnittkraft pro Schneide

$$F_c := F_{cz} \cdot z = 389.86 \text{ N}$$

$F_c$  ... Schnittkraft

$$F_{fz} := A_z \cdot \frac{k_{f1.1}}{h^{m_r}} = 160.43 \text{ N}$$

$F_{fz}$  ... Vorschubkraft pro Schneide

$$F_f := F_{fz} \cdot z = 320.87 \text{ N}$$

$F_f$  ... Vorschubkraft

Die Passiveinzelkräfte  $F_{pz}$  der Einzelschneiden heben sich beim Bohren gegenseitig auf. Die Passivkraft  $F_p = 0 \text{ N}$

$$P_c := F_c \cdot \frac{v_c}{2} = 276.15 \text{ W}$$

$P_c$  ... Schnittleistung

$$M_c := F_c \cdot \frac{d}{4} = 0.29 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_c$  ... Schnittmoment

$$\eta_m := 0.9$$

$\eta_m$  ... Maschinenwirkungsgrad

$$P_m := \frac{P_c}{\eta_m} = 306.83 \text{ W}$$

$P_m$  ... Spindelleistung

$$M_m := \frac{M_c}{\eta_m} = 0.32 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_m$  ... Spindelmoment

## 4.2 Berechnung der Beladungssituation

Der Be- und Entladeprozess setzt sich aus folgenden Vorgängen zusammen:

1. Bestückung der Beladungsvorrichtung mit bestückten Rohteileträger
2. Einschwenken der Rohteile in den Roboterarbeitsbereich
3. Entnahme des Fertigteileträgers im maschinenbedienerzugänglichen Bereich

Zur Auslegung der Schwenkeinheit muss das Gesamtmassenträgheitsmoment der bewegten Rotationmassen ermittelt werden. Weiters sind die durch die transportierten Lasten entstehenden Kräfte und Momente zu errechnen, um diese mit der Tragfähigkeit der Schwenkeinheit zu vergleichen.

Die zur Berechnung des Schwenkantriebes herangezogenen Werkstücke haben einen zylindrischen Grundkörper von  $\varnothing 70 \times 80$  mm und sind aus Vollmaterial E 295 (St 50-2). Die Werkstücke werden in einem Teileträger mit den Maßen 400 mm x 300 mm x 150 mm eingelegt. Dafür sind 11 Werkstückaufnahmen im Teileträger vorgesehen. Die Teileträgermitte befindet sich 250 mm von der Drehachse entfernt. Die Schwenkplatte wird mit einer rechteckigen Grundfläche von 900 mm x 500 mm und einer Plattenhöhe von 15mm angenommen. Sämtliche Körper werden als homogen angesehen ( $\rho = \text{konstant}$ ).

Da die Beladungseinheit personenzugänglich ist, wird in die Berechnung mit einbezogen, dass sich eine Person mit halbem Gewicht an der Außenkante der Schwenkplatte abstützt. Die Tragfähigkeit der Dreheinheit soll auch diesen Belastungsfall abdecken.

Die Formeln zur Berechnung des Massenträgheitsmoments homogener Körper sind dem Dubbel - Taschenbuch für Maschinenbau entnommen<sup>19</sup>.

---

<sup>19</sup> Grote (Hrsg.), Feldhusen (Hrsg.) (2014), S. B33.

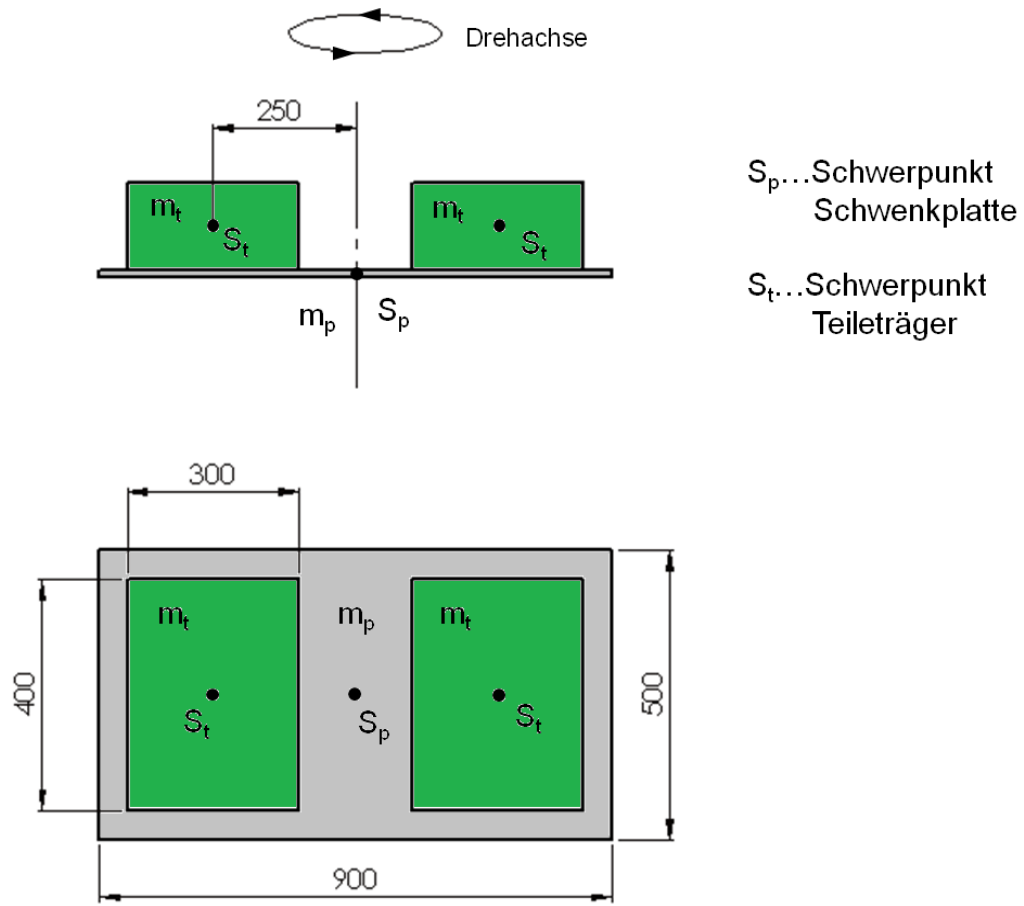


Abb. 4.5 Abstraktionsmodell der drehenden Massen, Quelle: Eigene Darstellung.

## Definition der Variablen

$d := 70 \text{ mm}$	$d$ ...Werkstückdurchmesser
$h := 80 \text{ mm}$	$h$ ...Werkstückhöhe
$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_s$ ...Dichte Stahl
$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$	$g$ ...Erdbeschleunigung
$l_t := 400 \text{ mm}$	$l_t$ ...Teileträgerlänge
$b_t := 300 \text{ mm}$	$b_t$ ...Teileträgerbreite
$a_t := 250 \text{ mm}$	$a_t$ ...Teileträgerabstand zur Rotationsmitte
$a := 11$	$a$ ...Werkstücke pro Teileträger

$l_p := 900 \text{ mm}$	$l_p$ ...Plattenlänge
$b_p := 500 \text{ mm}$	$b_p$ ...Plattenbreite
$h_p := 15 \text{ mm}$	$h_p$ ...Plattenhöhe
$\rho_a := 2700 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\rho_a$ ...Dichte Aluminium
$m_{be} := 80 \text{ kg}$	$m_{be}$ ...Gewicht des Maschinenbedieners

Berechnung der Massenträgheit und der Belastungsgrößen

$V := \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h = 307.876 \text{ cm}^3$	$V$ ...Bauteilvolumen
$m := V \cdot \rho_s = 2.417 \text{ kg}$	$m$ ...Bauteilmasse
$m_b := 1.5 \text{ kg}$	$m_b$ ...Behältermasse
$m_t := a \cdot m + m_b = 28.085 \text{ kg}$	$m_t$ ...Masse der bestückten Teileträger
$V_p := l_p \cdot b_p \cdot h_p = 6750 \text{ cm}^3$	$V_p$ ...Plattenvolumen
$m_p := V_p \cdot \rho_a = 18.225 \text{ kg}$	$m_p$ ...Plattenmasse
$I_{pt} := m_p \cdot \frac{(l_p^2 + b_p^2)}{12} = 1.61 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$I_{pt}$ ...Plattenträgheitsmoment
$I_t := m_t \cdot \frac{(l_t^2 + b_t^2)}{12} = 0.585 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$I_t$ ...Teileträgerträgheitsmoment
$I_{tr} := I_t + m_t \cdot a_t^2 = 2.34 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$I_{tr}$ ...Teileträgerträgheitsmoment zur Rotationsmitte
$I_g := I_{pt} + 2 \cdot I_{tr} = 6.291 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$	$I_g$ ...Gesamträgheitsmoment
$F_n := \left( 2 \cdot m_t + m_p + \frac{m_{be}}{2} \right) \cdot g = 1122.22 \text{ N}$	$F_n$ ...Normalkraft
$M_k := \left( m_t \cdot a_t + \frac{m_{be}}{2} \cdot \frac{l_p}{2} \right) \cdot g = 245.459 \text{ N} \cdot \text{m}$	$M_k$ ...Kippmoment

## 4.3 Greifkraftbestimmung

Bei der Werkstückmanipulation sind folgende Handhabungsoperationen durchzuführen:

1. Entnahme der Rohteile aus bereitgestelltem Teileträger
2. Einsetzen in die Spannvorrichtung
3. Ablage der Fertigteile im bereitgestelltem Teileträger

Die zur Greifkraftberechnung herangezogenen Werkstücke haben einen zylindrischen Grundkörper von  $\varnothing 70 \times 80$  mm, und sind aus Vollmaterial E 295 (St 50-2). Der Greifvorgang erfolgt reibschlüssig, der Reibungskoeffizient zwischen Greiffinger und Werkstück wird mit 0,1 (Materialpaarung Stahl/ Stahl) festgelegt.

Ein Roboterarm kann sich in unzähligen Bewegungsmustern von einem Punkt zu einem anderen bewegen. Je nach Werkstückbeschleunigung verändert sich auch die Belastungssituation am Greifer. Zur Ermittlung der Greifkraft werden zwei kritische Bewegungsmanipulationen genauer untersucht. Bei Manipulation I wird das Anheben des Werkstücks durch eine vertikale Beschleunigung nach oben abstrahiert. Bei Manipulation II die horizontale Beschleunigung, welche die Bewegung zur Spannvorrichtung nachbildet.

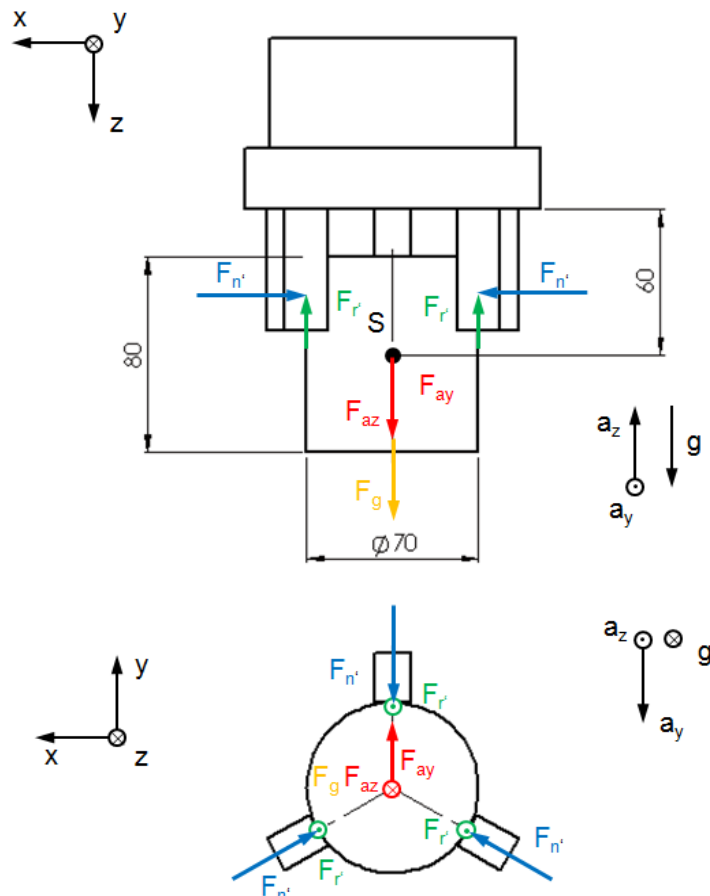


Abb. 4.6 Kräftesituation beim Greifen, Quelle: Eigene Darstellung.

## Definition der Manipulationsvariablen

$$d := 70 \text{ mm}$$

$d$  ...Werkstückdurchmesser

$$h := 80 \text{ mm}$$

$h$  ...Werkstückhöhe

$$\rho_s := 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

$\rho_s$  ...Dichte Stahl

$$g := 9.81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$g$  ...Erdbeschleunigung

$$a_z := 10 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$a_z$  ...Beschleunigung des  
Roboterarms in z-Richtung

$$a_y := 20 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$a_y$  ...Beschleunigung des  
Roboterarms in y-Richtung

$$\mu := 0.1$$

$\mu$  ...Reibkoeffizient Stahl-Stahl

$$n := 3$$

$n$  ...Backenzahl

$$l_s := 60 \text{ mm}$$

$l_s$  ...Schwerpunktastand  
Werkstück zu Greifer

$$S := 1.5$$

$S$  ...Sicherheitsfaktor

## Berechnung der erforderlichen Greifkraft und der auftretenden Greifbelastung

$$V := \frac{d^2 \cdot \pi}{4} \cdot h = 307.876 \text{ cm}^3$$

$V$  ...Bauteilvolumen

$$m := V \cdot \rho_s = 2.417 \text{ kg}$$

$m$  ...Bauteilmasse

## I.) vertikale Manipulation des Werkstücks

$$n \cdot F_r \geq (F_{az} + F_g) \cdot S \quad \dots \text{Haltebedingung}$$

$F_r$ ...erforderliche Reibkraft  
pro Backe

$$n \cdot F_n \cdot \mu \geq m \cdot (g + a_z) \cdot S$$

$F_{az}$ ...Trägheitskraft in  
z-Richtung

$$F_n \geq \frac{m \cdot (g + a_z) \cdot S}{n \cdot \mu}$$

$F_g$ ...Gewichtskraft

$$F_n := \frac{m \cdot (g + a_z) \cdot S}{n \cdot \mu} = 239.387 \text{ N}$$

$F_n$ ...erforderliche Normalkraft  
pro Backe

$$F_{kg} := n \cdot F_n = 718.16 \text{ N}$$

$F_{kg}$ ...kumulierte Greifkraft

## II.) horizontale Manipulation des Werkstücks

$$F_n \geq F_{ay} \cdot S \quad \dots \text{Haltebedingung}$$

$F_n$ ...erforderliche Normalkraft  
pro Backe

$$F_n \geq m \cdot a_y \cdot S$$

$F_{ay}$ ...Trägheitskraft in  
y-Richtung

$$F_n := m \cdot a_y \cdot S = 72.505 \text{ N}$$

$$F_{kg} := n \cdot F_n = 217.51 \text{ N}$$

$F_{kg}$ ...kumulierte Greifkraft

## Manipulationskräfte und -momente des Greifers

$$F_a := m \cdot (g + a_z) \cdot S = 71.82 \text{ N}$$

$F_a$ ...Axialkraft

$$M_k := m \cdot a_y \cdot l_s \cdot S = 4.35 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_k$ ...Kippmoment

$$M_r := 0 \text{ N} \cdot \text{m}$$

$M_r$ ...Torsionsmoment



## 4.4 Ergebnisdiskussion

In Kapitel 4.1 wurden zwei relevante Bearbeitungssituationen untersucht. Berechnet wurden das benötigte Spindelmoment und die erforderliche Spindelleistung für beide Applikationen. Beim Vergleich der Ergebnisse kann festgestellt werden, dass für die gewählten Schnittparameter der aufzubringende Leistungsbedarf bei der Fräsapplikation mit dem  $\varnothing$  5 mm Schafffräser höher ist als beim  $\varnothing$  3 mm Vollbohren. Die erforderlichen Spindelmomente liegen in etwa gleicher Höhe, aufgrund der niedrigeren Drehzahl beim Bohren. Bei der Auswahl einer geeigneten Bearbeitungsspindel ist der Momentenverlauf über die Drehzahl abzugleichen mit den errechneten Betriebspunkten. Die Spindelleistung ergibt sich aus dem Produkt beider Variablen und steht somit im erforderlichen Maße bereit, siehe Kapitel 5.2.1.1.

Für den rotativen Beladungsvorgang wurde in Kapitel 4.2 das Gesamtmassenträgheitsmoment der zu bewegenden Körper ermittelt. Weiters wurden die Belastungsgrößen errechnet, welche auf die Schwenkeinheit während des Betriebes wirken können. Mit dem errechneten Trägheitsmoment können mittels herstellerseitigen Diagrammen die Tauglichkeit und die zu erwartenden Schwenkzeiten überprüft werden, siehe Kapitel 5.3.

Die erforderliche Greifkraft wurde in Kapitel 4.3 für die vertikale und horizontale Werkstückmanipulation gegenübergestellt. Anhand der Resultate kann festgestellt werden, dass für die vertikale Manipulation aufgrund des Einflusses des Reibungskoeffizienten eine höhere Greifkraft erforderlich ist. Für die Auswahl geeigneter Greifer wird folglich dieser Wert als Ausgangsbasis herangezogen. Im Greifkraftdiagramm wird, abhängig von der Greifbackenlänge, die zur Verfügung stehende Greifkraft mit der berechneten Greifkraft verglichen. Außerdem müssen die durch den Handhabungsvorgang auf die Greifeinheit wirkenden Kräfte und Momente kontrolliert werden, siehe Kapitel 5.2.1.4.

## 5 Konstruktionsbeschreibung

Dieses Kapitel beschreibt das Resultat der Konstruktionsdetaillierung, die auf Basis der Überlegungen aus Konzeptentwicklung und Komponentenauslegung ausgearbeitet wurde. Die Konstruktionsstruktur der entstehenden Roboterzelle wird detailliert dargestellt und auf relevante Systemfaktoren wird eingegangen. Darüber hinaus werden die sicherheitstechnische Beurteilung und Steuerungsarchitektur am Kapitelende dargelegt. Die Roboterzelle ist funktional in folgende Hauptbaugruppen gegliedert:

- Aufspanntisch
- Roboterbaugruppe
- Beladungsgruppe
- Maschineneinhausung
- Werkzeugwechselstation
- Werkstückspannsystem

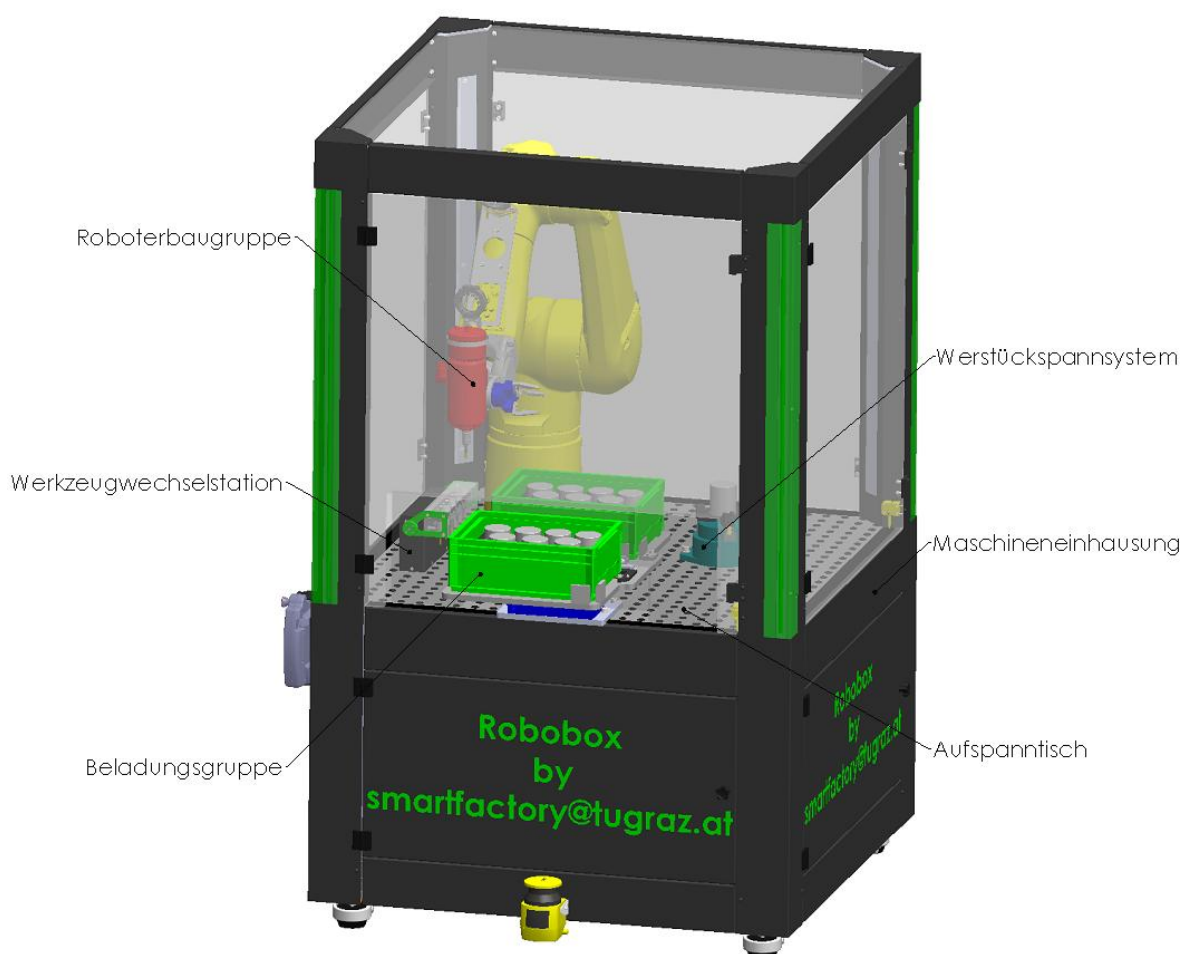


Abb. 5.1 Hauptbaugruppen der Roboterzelle, Quelle: Eigene Darstellung.

## 5.1 Aufspanntisch

Der mobile Aufspanntisch stellt das Fundament der Roboterzelle dar, über ihn erfolgt die Krafteinleitung der statischen und dynamischen Belastungsgrößen in den Boden. Der Roboterarm TX2–90 L der Fa. *Stäubli* weist hohe Nenngeschwindigkeits- und Beschleunigungsparameter auf. Typische lineare Beschleunigungswerte des Werkzeugflansches können mit  $72 \text{ ms}^{-2}$ , über der siebenfachen Erdbeschleunigung betragen.<sup>20</sup> Die Verwendung eines hochstabilen Fundaments hat daher hohen Stellenwert. Der Aufspanntisch wurde gemeinsam mit dem ehemaligen Institutsmitarbeiter Hrn. Pfeifer konzipiert und vom Hrn. Pfeifer konstruktiv ausgearbeitet sowie durch das Institut für Fertigungstechnik bereitgestellt. Der Aufspanntisch besteht aus der Aufspannplatte, dem Unterbau, vier Heberollen und Anschlagblechen sowie Aluminiumsystemprofilen.

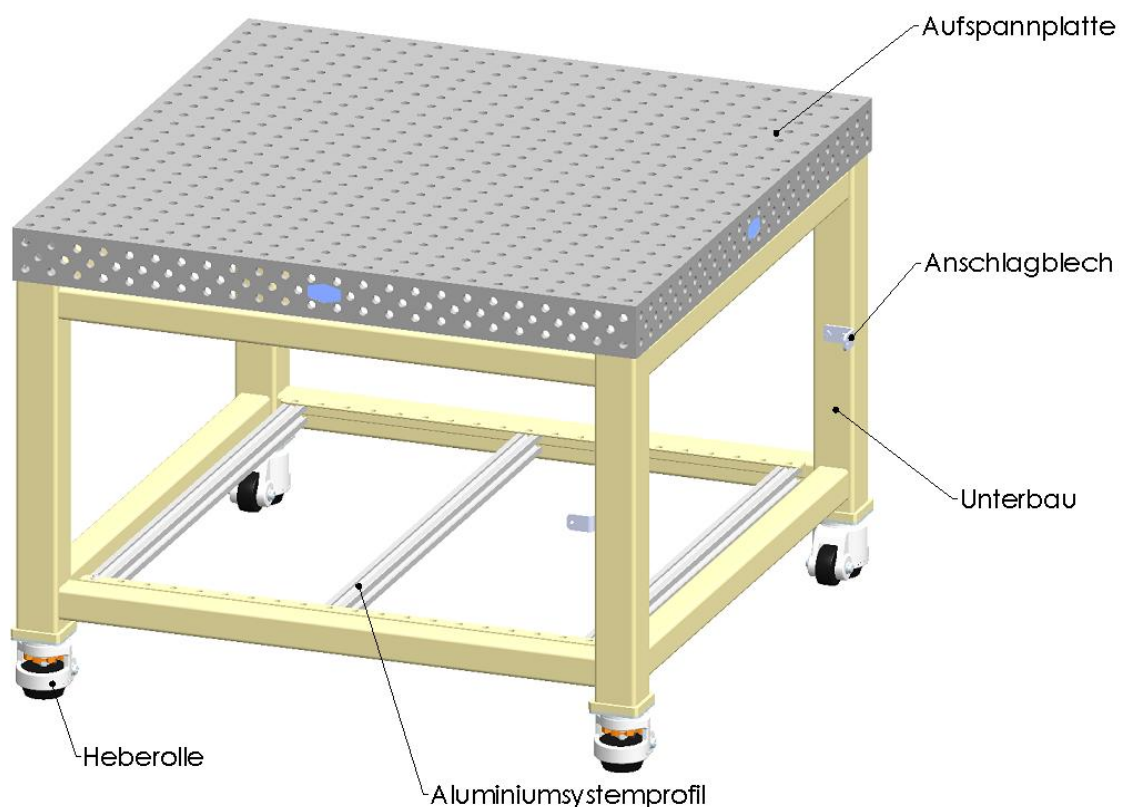


Abb. 5.2 Aufspanntisch, Quelle: Eigene Darstellung.

---

<sup>20</sup> Vgl. Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 40.

Als Aufspannplatte wird eine Schweißtischplatte der Fa. *Demmeler* verwendet. Sie hat eine Grundfläche von 1200 mm x 1200 mm und ist mit Ø 16 mm Systembohrungen versehen. Schweißtische dieser Art werden in der Industrie und im Apparatebau zur Herstellung von Schweißserzeugnissen verwendet. In den Systembohrungen können Anschlag- und Spannmittel schnell und flexibel mittels Kugelspannbolzen befestigt werden. Vorteile dieser Schweißtischplatten sind die hohe Steifigkeit, die Belastbarkeit, ihre Flexibilität und die geringen Maßtoleranzen der Tischplatte. Da es sich um ein industrielles Serienprodukt handelt, ist auch die Kosteneffizienz hoch.

Der Unterbau ist ein Schweißserzeugnis aus Stahlformrohrprofilen. Am Unterbau werden die Aufspannplatte und die Heberollen angebracht. Aus diesem Grund werden in die Rahmenkonstruktion an Ober- und Unterseite entsprechende Aufnahmeplatten mit eingeschweißt. Im Inneren des Unterbaus können die elektrischen und pneumatischen Steuerungskomponenten untergebracht werden. Zur Fixierung der Komponenten sind am Unterbau Aluminiumsystemprofile vorgesehen. In den Nuten der Systemprofile lassen sich Schraubverbindungen einfach einsetzen und die Steuerungsbauteile können flexibel positioniert werden.

Um Mobilität und Stabilität der Roboterzelle zu gewährleisten, wird der Aufspanntisch mit Heberollen ausgestattet. Die Heberollen verfügen über einen integrierten Feststellfuß aus Hartgummi. Nach Positionierung des Aufspanntisches kann dieser Feststellfuß gegen den Boden fixiert werden. Die Räder aus bruchfestem Polyamid sind ortsfest angebracht und haben nur während des Transportes mit versenktem Feststellfuß Bodenkontakt. Jede Heberolle ist für eine maximale Traglast von 750 kg konzipiert.<sup>21</sup>

Die Anschlagbleche werden am Unterbau mit Bohrschrauben befestigt. Sie dienen als Befestigungspunkt für die Blechtüren der Maschineneinhausung, siehe Kapitel 5.4.

---

<sup>21</sup> Vgl. Padberg + Palatec Logistic GmbH, Onlinequelle [06.11.2018].

## 5.2 Roboterbaugruppe

Die Roboterbaugruppe ist der Mittelpunkt der Roboterzelle und besteht aus dem Roboterarm selbst, dem Multieffektor, der aus der Konzeptentwicklung in Kapitel 3.4.1 hervorgegangen ist, sowie der notwendigen Peripherie wie Versorgungsleitungen, Energiekette, Energiekettenhalter und den diversen Befestigungselementen und Halblechen. Die Energiekette und die Versorgungsleitungen wurden aus Reduktionsgründen der Rechnerleistung nicht im 3D-Modell visualisiert.

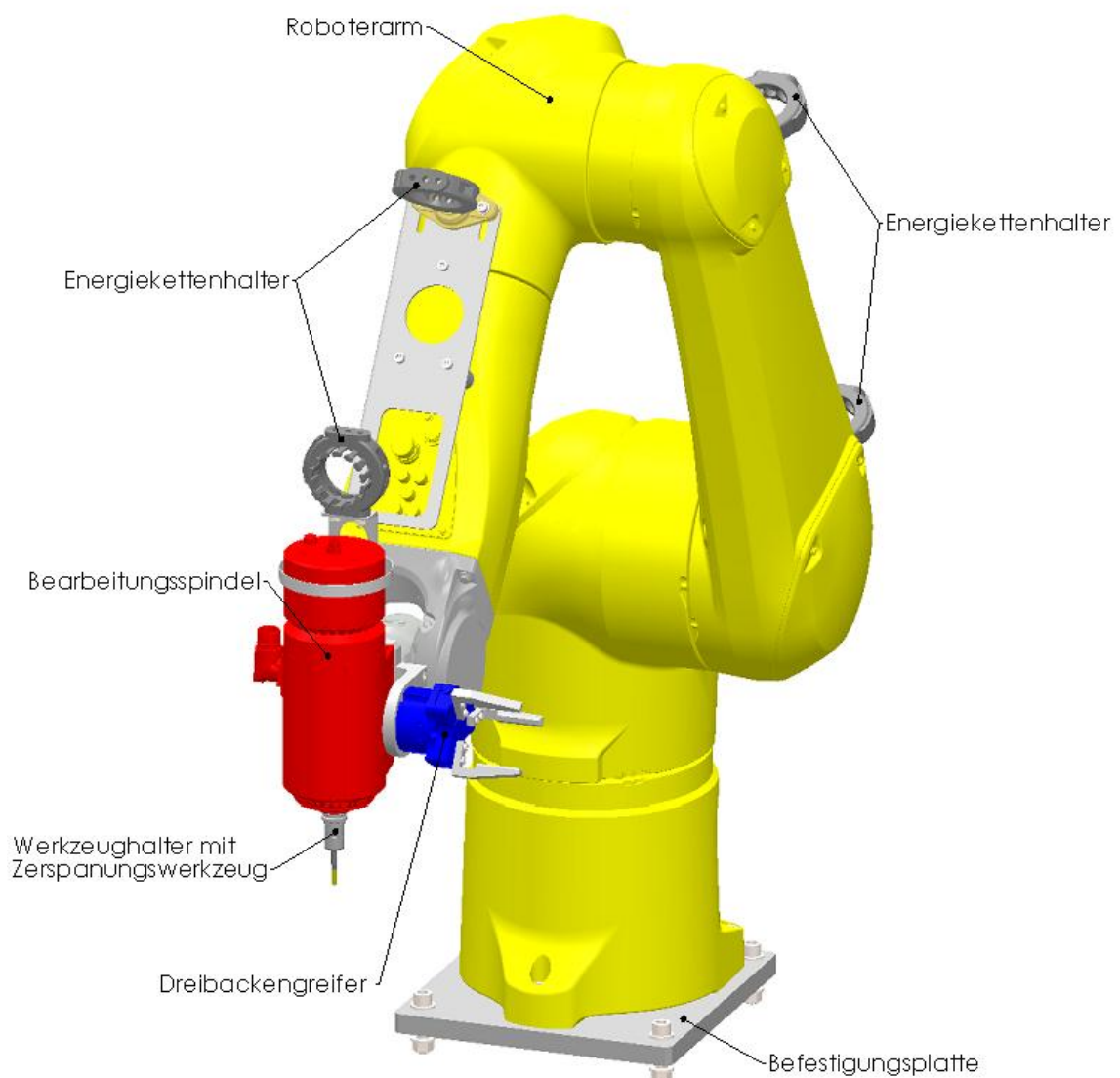


Abb. 5.3 Roboterbaugruppe, Quelle: Eigene Darstellung.

Der Roboterarm TX2-90 L der Fa. *Stäubli* weist viele Vorteile für den geplanten spanabhebenden Fertigungsprozess auf. Er verfügt über einen großzügigen, annähernd kugelförmigen Arbeitsraum und einer hohen Reichweite  $R.M1 = 1100$  mm, siehe Abb. 5.4.

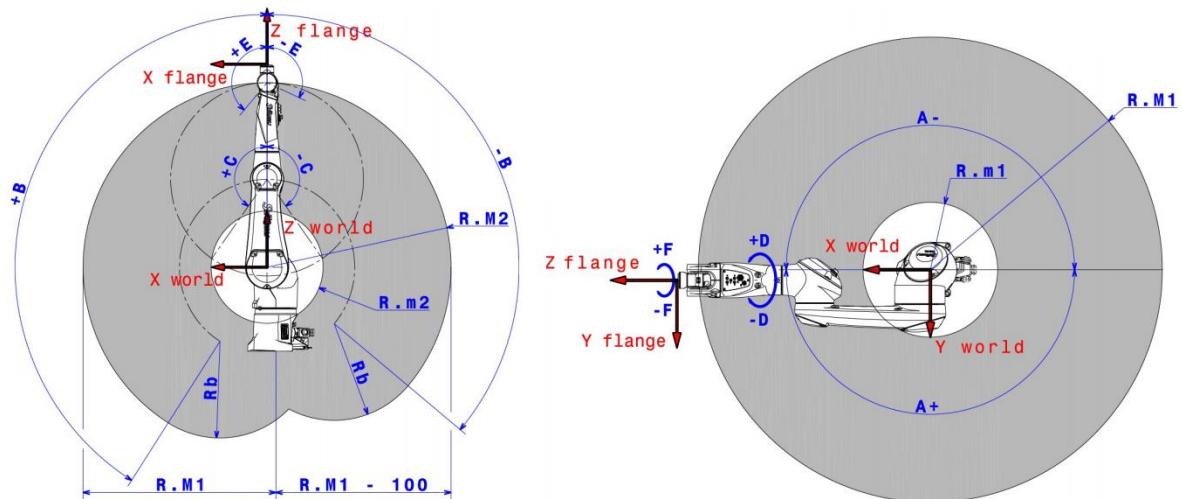


Abb. 5.4 Arbeitsraum TX2-90 L, Quelle: Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 32 (leicht modifiziert).

Die angegebene Schutzklasse liegt durch die verkapselte Bauweise bei IP65 für den Roboterarm und für das Handgelenk ist die Schutzklasse partiell bis IP67 deklariert, dies kann für spanabhebende Applikationen mit Minimalmengenschmierung bzw. Trockenbearbeitung als ausreichend angenommen werden. Für Bearbeitungen mit stärkeren Umwelteinflüssen müsste zusätzlich ein Druckbeaufschlagungssystem nachgerüstet werden. Hierbei werden durch einen leichten Überdruck von 40mbar Flüssigkeiten und Stäube am Eindringen in den Roboterarm gehindert. Die Wiederholgenauigkeit gibt an, wie genau ein Punkt bei mehrmaliger Wiederholung angefahren werden kann und liegt laut Herstellerangaben nach Normmessung ISO 9283 bei  $\pm 0,035$  mm. Die Höchstlast bei reduzierter Geschwindigkeit ist mit 15 kg angeführt.<sup>22</sup>

### 5.2.1 Multieffektor

Der Endeffektor stellt das letzte Element der kinematischen Kette dar und er ist jener Teil des Industrieroboters, der für die Modifikationen am Werkstück sorgt. Der Endeffektor ist speziell auf die individuelle Anforderung der in der Roboterzelle auszuführenden Produktionsprozesse abgestimmt.<sup>23</sup>

Die auszuführenden Tätigkeiten der Roboterzelle umfassen neben der spanabhebenden Bearbeitung auch die Werkstückmanipulation innerhalb der Zelle. Generell stellt die spanende Bearbeitung einen wertschöpfenden Prozess dar, die Manipulation hingegen ist ein Hilfsprozess um die Werkschöpfung zu ermöglichen.

<sup>22</sup> Vgl. Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 12/63/82.

<sup>23</sup> Vgl. Haas (2016), S. 57/82f.

Der Multieffektor besteht aus der Bearbeitungsspindel mit dem eingespannten Werkzeughalter, dem Dreibackengreifer, dem Spindelflansch, der Greiferhalterung, den Greiffingern sowie dem Energiekettenhalter mit Zugentlastung und der zur Befestigung verwendeten Spindelkopfhalterung mit einer Bandschelle, siehe Abb. 5.6.

Bei der Gestaltung des Endeffektors ist es wichtig, möglichst gewichtssparend und vor allem kompakt zu bauen. Dies soll anhand der nachfolgenden Abbildung 5.5 und dem aufgestellten formularen Zusammenhang verdeutlicht werden. Es wird ein idealisiertes Modell herangezogen, bei dem der seitlich aufgebaute Greifer vernachlässigt und die Spindel als homogener Kreiszyylinder an einer masselosen Halterung angesehen wird.

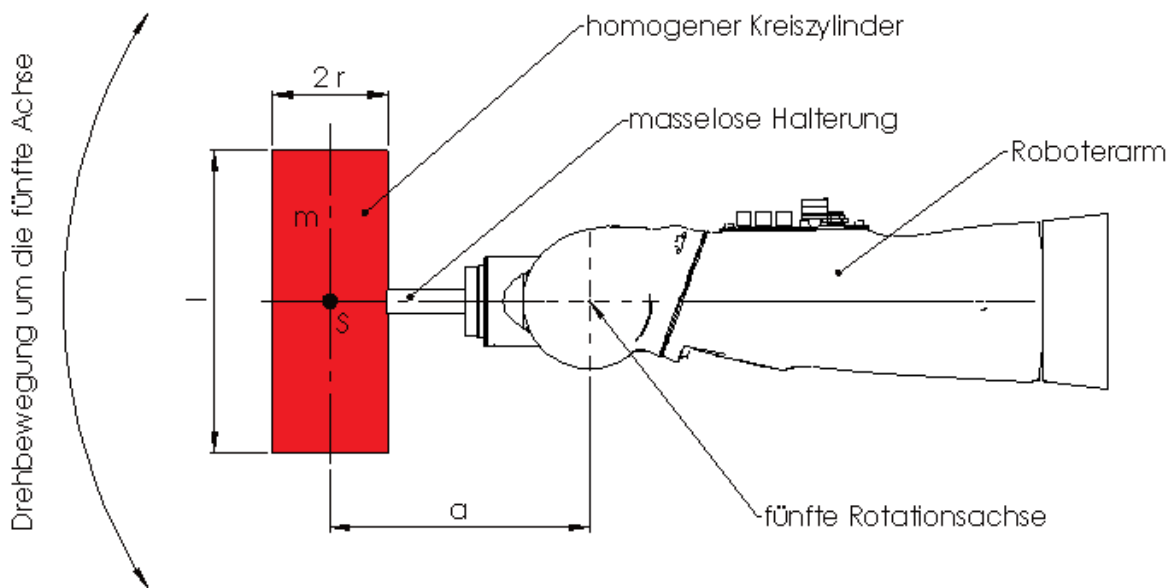


Abb. 5.5 Abstraktion des Endeffektors, Quelle: Eigene Darstellung.

Es wird das Massenträgheitsmoment um die kritische fünfte Roboterachse des Roboterarms untersucht. Dazu wird das Trägheitsmoment für den dargestellten Kreiszyylinder um seine Schwerpunktsachse betrachtet. Die verwendeten Formeln stammen aus dem Dubbel – Taschenbuch für Maschinenbau<sup>24</sup>.

$$I_s = \left( \frac{1}{4} r^2 + \frac{1}{12} l^2 \right) \cdot m$$

Mit Hilfe des Satzes von Steiner wird der Zylinder um den Schwerpunktabstand  $a$  zur neuen Rotationsachse 5 verschoben:

$$I_5 = I_s + m \cdot a^2$$

$$I_5 = \left( \frac{1}{4} r^2 + \frac{1}{12} l^2 + a^2 \right) \cdot m$$

<sup>24</sup> Vgl. Grote (Hrsg.), Feldhusen (Hrsg.) (2014), S. B33.

Beim abstrahierten Modell des Endeffektors zeigt sich, dass der Abstand zur Drehachse den größten Einfluss auf das resultierende Massenträgheitsmoment hat. Der Schwerpunktabstand steht in einem quadratischen Verhältnis zum resultierenden Massenträgheitsmoment. Auch die Länge und der Radius stehen in einem quadratischen Verhältnis zum Massenträgheitsmoment, jedoch gehen sie mit Koeffizienten kleiner 1 in die Gesamtbetrachtung ein. Die Masse des Zylinders steht im direkt proportionalen Verhältnis zum resultierenden Massenträgheitsmoment. Anhand dieser Erkenntnisse wird der Endeffektor mit einer möglichst kompakten, leichten und leistungsfähigen Spindel bestückt und diese wiederum so nah wie möglich am Werkzeugflansch angeordnet.

Bei zunehmenden Trägheitsmomenten um die einzelnen Roboterachsen muss die Dynamik des Roboters immer stärker reduziert werden, um so eine Überbelastung der motorischen Antriebseinheiten zu vermeiden.

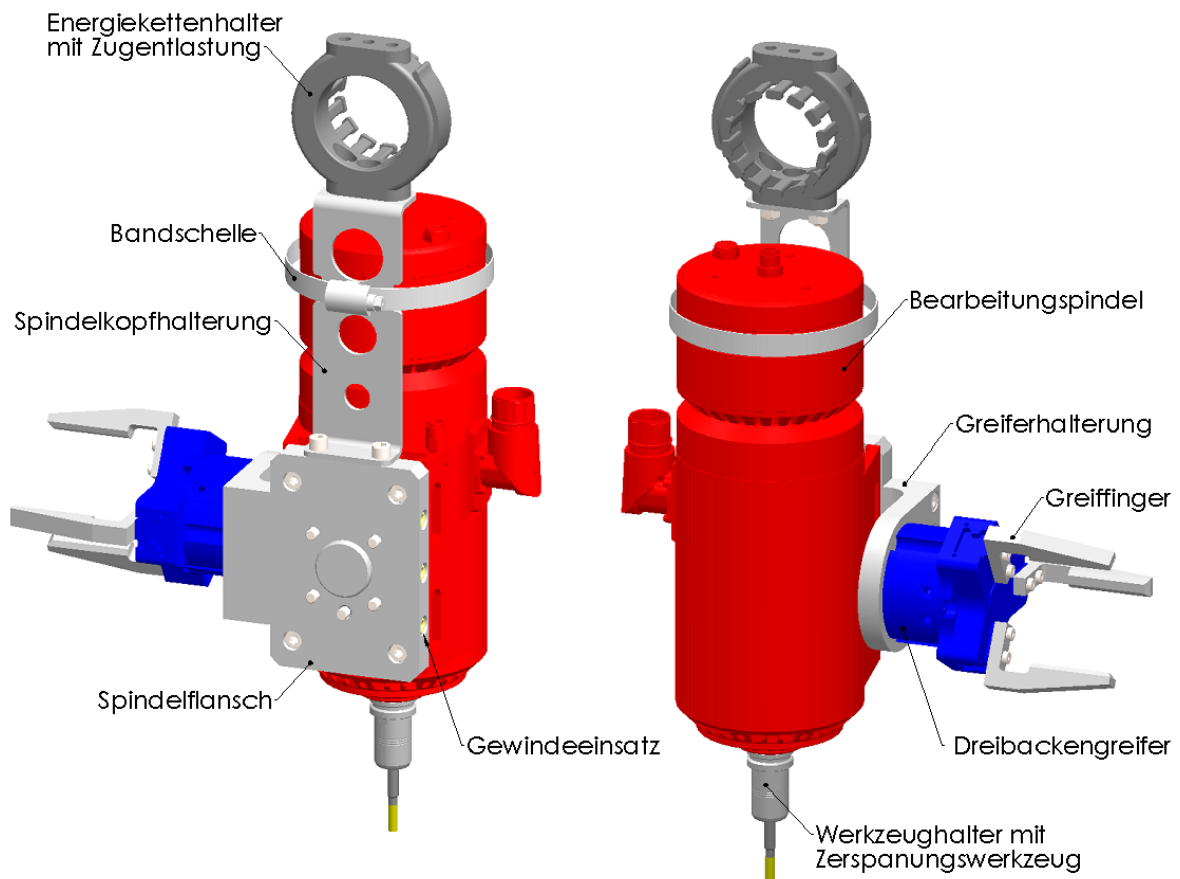


Abb. 5.6 Multieffektor in Rückansicht (links) und Vorderansicht (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.



### 5.2.1.1 Bearbeitungsspindel

Die Abbildung 5.6 zeigt die einzelnen Bestandteile des Endeffektors. Die Hauptkomponente bildet die Schnellfrequenzspindel Chopper 1500 HSK S5A der Fa. Alfred Jäger GmbH. Zur Spindelauswahl werden die Ergebnisse der Spindelleistungsberechnung aus Kapitel 4.1 herangezogen und mit den Leistungsdaten der Spindel verglichen.

Wie in Abbildung 5.7 zu sehen, weist die verwendete Bearbeitungsspindel über einen großen Drehzahlbereich einen annähernd gleichbleibenden Drehmomentverlauf auf. Die Nennleistung steigt mit steigender Drehzahl in etwa linear an. S1 bezieht sich auf die Leistungskurve, welche die Spindel dauerhaft, also zu 100% motorisch leisten kann. Bei der Leistungskurve S 6 hat die Spindel eine höhere Stromaufnahme, in diesem Zustand sollte die Spindel nur zu 60% der Einsatzzeit betrieben werden, ansonsten könnte dies zu einer motorischen Überlastung führen. Zur Auslegung im Dauerbetrieb wird daher die S1 Kennlinie herangezogen.<sup>25</sup>

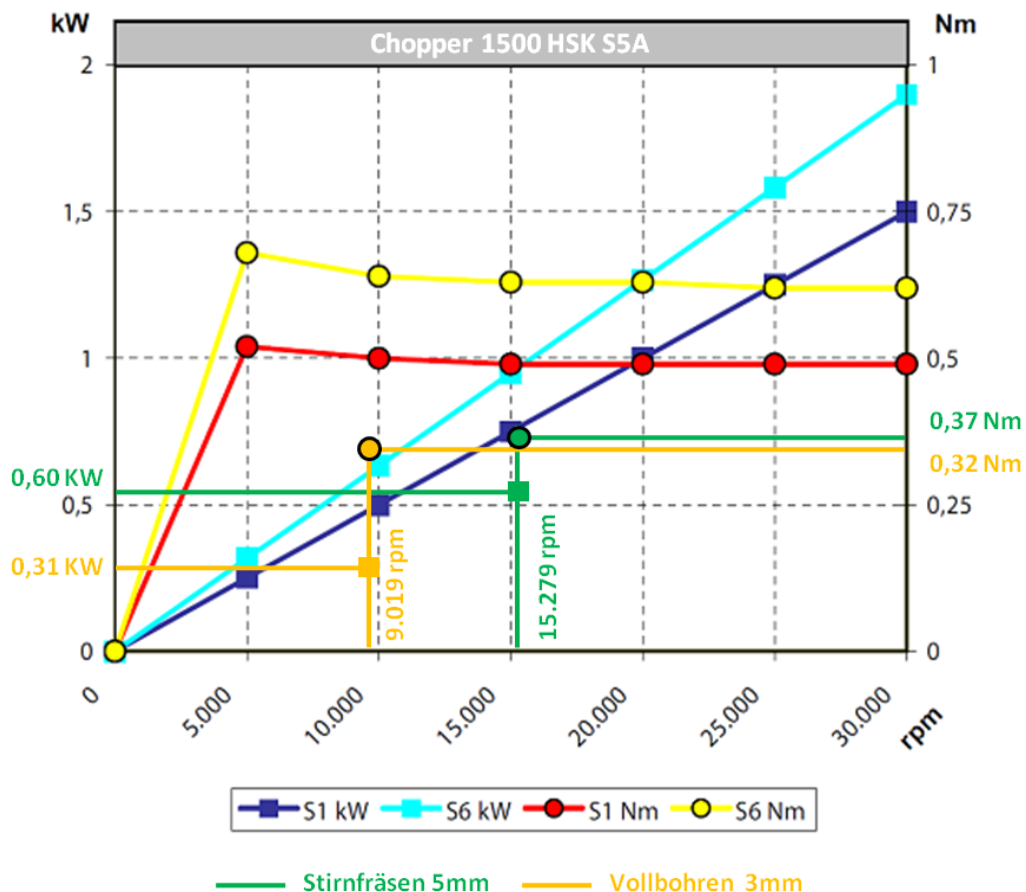


Abb. 5.7 Leistungsdiagramm der Bearbeitungsspindel mit dargestellten Betriebszuständen, Quelle: Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018] (leicht modifiziert).

<sup>25</sup> Vgl. Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (2018), S. 16f.

Die in Kapitel 4.1 berechneten Betriebszustände, Stirnfräsen mit  $\varnothing 5$  mm Schafffräser und  $\varnothing 3$  mm Vollbohren sind in Abbildung 5.7 dargestellt. Bei der Auswahl einer geeigneten Spindel wurde darauf geachtet, dass die erforderliche Spindelleistung und Spindelmoment unterhalb der S1 Kennlinien liegen.

Die Bearbeitungsspindel Chopper 1500 HSK S5A wiegt 7 kg, hat eine Länge von 267 mm und einen Durchmesser von 101 mm, siehe Abb. 5.8. Angetrieben wird sie von einem 3-phasigen Asynchronmotor mit einer Nennleistung von 1500 W bei einer Nenndrehzahl von  $30000 \text{ min}^{-1}$ . Die Drehzahlregelung erfolgt mittels eines Frequenzumrichters, welcher die Ausgangsfrequenz in einem Frequenzbereich bis zur Nennfrequenz von 500 Hz stufenlos variieren kann. Die Spindel verfügt über eine zweifache Stahlkugellagerung mit wartungsfreier Lebensdauerschmierung, der Rundlauf ist mit  $< 2 \mu\text{m}$  deklariert. Um eine Überlastung zu vermeiden ist ein PTC  $130^\circ\text{C}$  Motorschutz vorgesehen. Die Werkzeughalteraufnahme der Spindel ist für HSK-E 25 Werkzeughalter konzipiert, welche durch eine pneumatisch betätigte Spannzange gewechselt werden können. Dieses Merkmal ist besonders wichtig, um die Wandlungsfähigkeit der Roboterzelle zu steigern, denn dadurch können wechselnde Bearbeitungsverfahren automatisch durchgeführt werden. Die integrierte Kegelreinigung der Werkzeughalteraufnahme erfolgt bei jedem Kegelwechsel mittels Druckluft. Die Schutzklasse wird bei betätigter Sperrluft mit IP 54 angegeben. Vorteilhaft ist die im Aluminiumgehäuse integrierte Spindelhalterung, in den eingebetteten T-Nuten kann die Bearbeitungsspindel mittels Nutmuttern am Spindelflansch befestigt werden.<sup>26</sup>

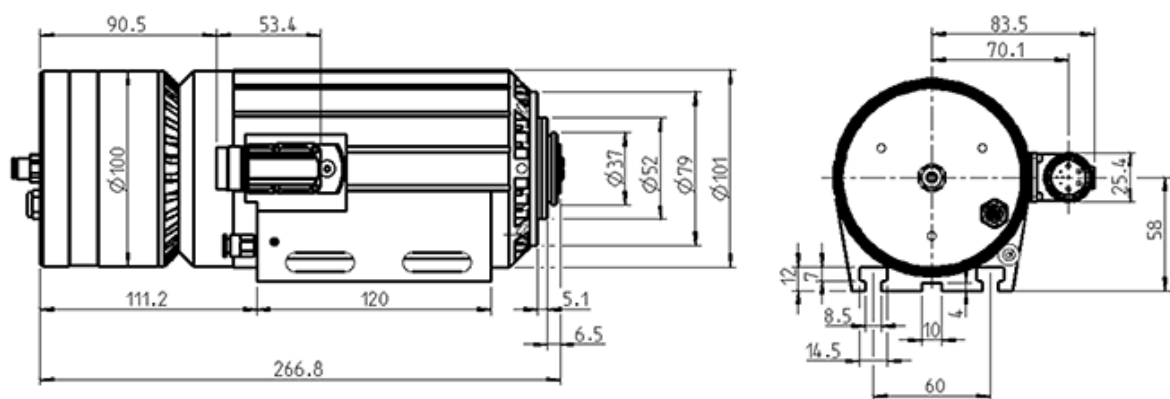


Abb. 5.8 Abmessungen Chopper 1500 HSK S5A, Quelle: Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018].

<sup>26</sup> Vgl. Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (2018), S. 14ff.

Vergleichbare zylindrische Bearbeitungsspindeln benötigen meist einen zusätzlichen Spindelträger, an welchem die Spindel befestigt wird, dies hat aber einerseits den Nachteil einer zusätzlichen Gewichtsbelastung und andererseits vergrößert sich auch der Schwerpunkt Abstand zum Werkzeugflansch des Roboterarms.

Das gewählte Spindelsystem weist eine hohe Kosteneffizienz auf, wobei auch die Art der Spindelkühlung mit beiträgt. Im Gegensatz zu konventionellen wassergekühlten Bearbeitungsspindeln, wurde bei der Chopper-Serie seitens des Herstellers eine zwangsgetriebene Luftkühlung vorgesehen. Es entfällt für den Anwender somit die Anschaffung eines externen Kühlaggregats. Nachteilig sind jedoch die Abhängigkeit der Kühlleistung von der Motordrehzahl, sowie die leicht erhöhte Bauform des Gehäuses und das Zusatzgewicht des Lüfters.

### 5.2.1.2 Werkzeughalter

Werkzeughalter bilden die Schnittstelle zwischen Werkzeug und Antriebsspindel. Für die eingesetzte Bearbeitungsspindel werden Werkzeughalter mit Hohlschaftkegel, kurz HSK, verwendet. Werkzeughalter mit HSK-Aufnahmen sind aufgrund Ihrer Vorteile bei rotierenden Zerspanungswerkzeugen stark verbreitet. Sie können für automatischen und manuellen Werkzeugwechsel verwendet werden. Der Hohlschaftkegel ist radial elastisch, dadurch ist trotz Überbestimmung des Werkzeughalters die Plananlage an der Spindelaufgabe ermöglicht. Diese Plananlage an der Spindel sorgt durch den größeren Stützdurchmesser für eine höhere Steifigkeit der Aufnahme. Darüber hinaus ist die Einwechselwiederholgenauigkeit durch den Plananschlag besser als bei vergleichbaren Steilkegelschnittstellen. HSK-Aufnahmen sind durch ihre kurze Bauweise, auch kompakter und leichter als Steilkegelhalter, wodurch die Werkzeugwechselvorgänge erleichtert werden. Nach DIN 69893 gibt es sechs verschiedene Varianten von HSK-Aufnahmen, siehe Abb. 5.9, welche unterschiedliche Charakteristiken aufweisen. Für die Hochgeschwindigkeitsspindel des vorliegenden Projekts wird ein HSK-E 25 Werkzeughalter verwendet. Die Form E hat eine schmale Plananlage und wird durch die vollständig rotationssymmetrische Bauart vornehmlich für Hochgeschwindigkeitsanwendungen verwendet. Die Norm DIN 69893 bezieht sich auf die Schnittstelle zur Antriebsspindel, werkzeugseitig gibt es hingegen die verschiedensten Spannvarianten zur Aufnahme des Werkzeuges.<sup>27</sup>

---

<sup>27</sup> Vgl. Weck/Brecher (2006), S. 479-481.

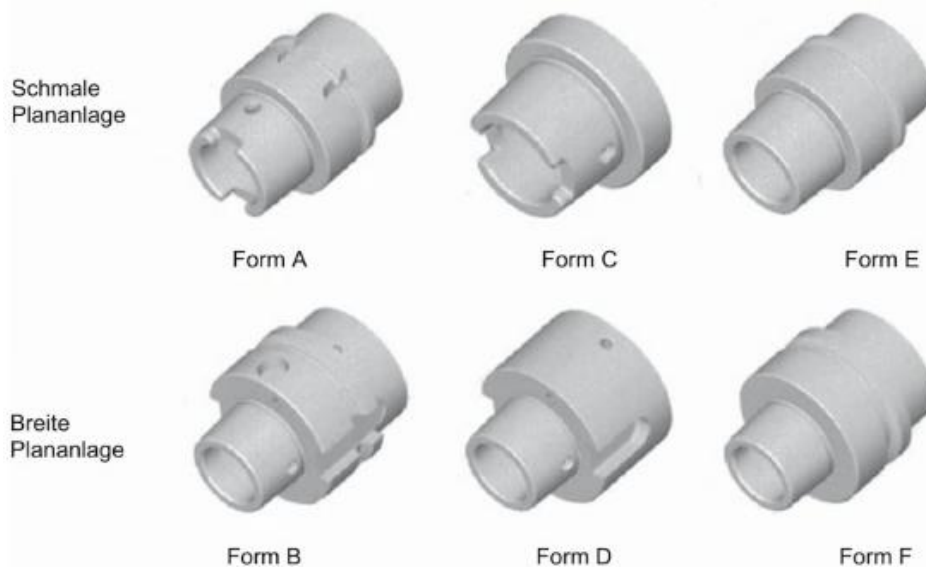


Abb. 5.9 Bauformenübersicht von HSK-Aufnahmen nach DIN 69893, Quelle: Weck/Brecher (2006), S. 481.

Zur Aufnahme des Zerspanungswerkzeuges beim Multieffektor werden TRIBOS-RM HSK-E 25 Werkzeughalter der Fa. *Schunk* verwendet. Bei dieser Ausführung ist der gesamte Werkzeughalter vollständig aus einem Stück gefertigt. Werkzeugseitig ist ein polygonförmiger Spanndurchmesser vorgesehen, der durch spezielle Spannvorrichtungen rund gedrückt werden kann. In den rundgedrückten Spanndurchmesser kann der Werkzeugschaft leicht eingeführt werden. Anschließend wird der Druck auf den Spanndurchmesser wieder entfernt, wodurch die polygene Form wieder angenommen wird. Das Werkzeug ist nun prozesssicher gespannt.<sup>28</sup>

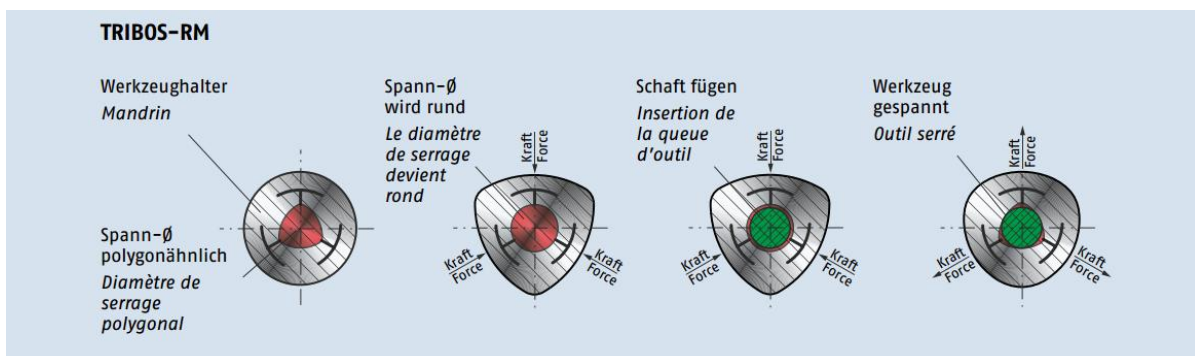


Abb. 5.10 Spannvorgang von Werkzeugen beim TRIBOS-RM Polygonspannfutter, Quelle: Schunk (Hrsg.) (2014), S. 17.

<sup>28</sup> Vgl. SCHUNK GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2018a), S. 182-188.

Laut Herstellerangaben verfügen die Werkzeughalter über eine hohe Radialsteifigkeit und gute Schwingungsdämpfung, sie haben eine hohe Rundlaufgenauigkeit von  $< 0,003 \text{ mm}$ . Die Wuchtgüte G ist mit  $2,5 \text{ mm/sec}$  bei  $25000 \text{ min}^{-1}$  angegeben und das Gewicht der HSK- E25 Werkzeughalter liegt bei  $0,12 \text{ kg}$ .<sup>29</sup>

### 5.2.1.3 Spindelflansch

Der Spindelflansch ist das Verbindungselement zwischen Werkzeugflansch des Roboters und der Bearbeitungsspindel. Um den passgenauen Sitz bei Montage- und Umbauarbeiten am Endeffektor sicherzustellen, werden Zentrierungen und Verstiftungen an Vorder- und Rückseite des Spindelflansches vorgesehen. Der Spindelflansch ist, um Gewicht zu reduzieren, aus Aluminium gefertigt, umseitig sind an den vier Seitenflächen des Spindelflansches Befestigungsmöglichkeiten für weitere Effektorkomponenten vorgesehen, wie etwa den Dreibackengreifer, der Energiekettenhalterung sowie weitere Anbauten, siehe Abb. 5.6.

Um die Anzugsfestigkeit und Widerstandsfähigkeit der Schraubverbindung speziell im Aluminiumgrundkörper zu erhöhen, werden *Ensat* - Gewindeeinsätze der Fa. *Kerb-Konus* verwendet. Abbildung 5.11 zeigt die Vorzüge der gleichmäßigeren Kräfteverteilung auf die im Eingriff befindlichen Gewindegänge. Das Ergebnis ist eine statisch und dynamisch hochbelastbare Schraubverbindung, die hohe Axialkräfte aufnehmen kann.<sup>30</sup>

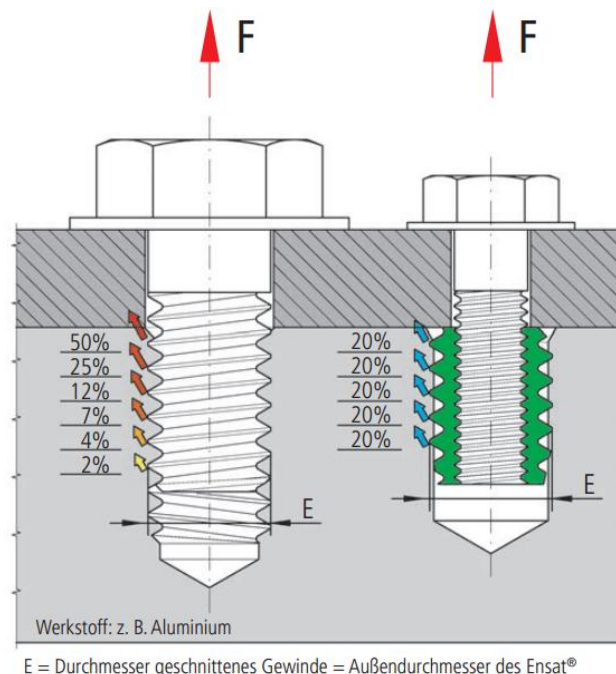


Abb. 5.11 Gegenüberstellung von Schraubverbindungen mit und ohne Gewindeeinsatz , Quelle: Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH (Hrsg.) (o.J.), S. 5.

<sup>29</sup> Vgl. Schunk GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2018a), S. 187f/219.

<sup>30</sup> Vgl. Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH (Hrsg.) (o.J.), S. 4f.

### 5.2.1.4 Dreibackengreifer

Eine Hauptanforderung der Roboterzelle ist die autarke Handhabung der Werkstücke aus dem bereitgestellten Teileträger. Um diese Anforderung zu erfüllen, wird der Multieffektor mit dem pneumatischen Dreibackenparallelgreifer GPD5006-NC der Fa. *Zimmer Group* ausgestattet. Vorteile gegenüber elektrischen Greifsystemen liegen im höheren Leistungsgewicht der pneumatischen Greifeinheiten. Dreibacken- oder auch Zentrischgreifer werden meist zum wiederholgenauen, zentrischen Spannen rotationssymmetrischer Bauteile eingesetzt.

Beim pneumatischen Dreibackenbackengreifer wird die axial wirkende Kolbenkraft mittels Keilprinzip in die radial wirkenden Kraftkomponenten übersetzt. Dazu ist ein zwangsgeführtes Keilhakengetriebe eingebaut, es sorgt auch für die synchrone, zentrische Bewegung der Greifbacken beim Öffnen und Schließen, siehe Abb. 5.13.

Um einen geeigneten Greifer zu bestimmen, wird die in Kapitel 4.3 bestimmte erforderliche Greifkraft mit dem Greifkraftdiagramm des Herstellers abgeglichen.

#### ► Greifkraftdiagramm

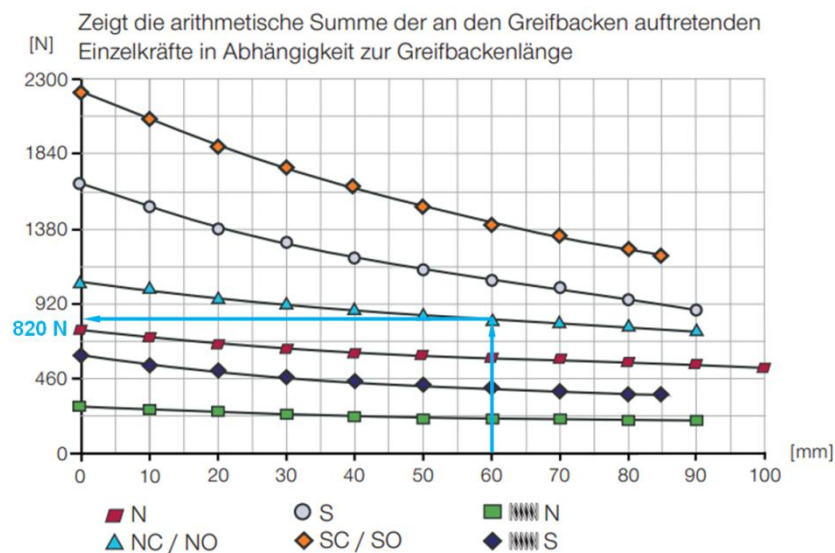


Abb. 5.12 Greifkraftdiagramm GPD5006-NC, Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017.), S. 304 (leicht modifiziert).

Der Kraftangriffspunkt des Greifers zum Werkstück liegt bei der geplanten Konstruktion bei 60mm. Das ergibt laut Abbildung 5.12 eine zur Verfügung stehende Greifkraft von 820 N, somit kann die erforderliche Greifkraft von 718 N abgedeckt werden. Weiters liegen die errechneten Belastungsgrößen unterhalb der Herstellerdaten.

Die verwendete Greifeinheit hat einen Hub von 6 mm pro Backe und eine kumulierte Greifkraft von maximal 1020 N bei 6 bar Druckbeaufschlagung. Die kumulierte Greifkraft bildet sich aus der arithmetischen Summe der an den drei Greifbacken bereitstehenden Einzelgreifkräften. Der Greifer verfügt über eine integrierte Greifkraftsicherung, die bei Druckabfall das Werkstück durch Federbetätigung weiterhin mit Kraft beaufschlägt. Dadurch soll unkontrollierter Teileverlust vermieden werden. Das Gehäuse des Dreibackengreifers besteht aus Aluminium, wodurch das Gesamtgewicht bei nur 0,58 kg liegt. Die stählernen Greifbacken hingegen sind in Stahlführungen gelagert, wodurch eine hohe Kraft- und Momentenaufnahme möglich ist. Durch die verwendete Doppellippendichtung ist der Greifer mit einer Schutzklasse von IP64 gegen das Eindringen von Fremdstoffen geschützt.<sup>31</sup>

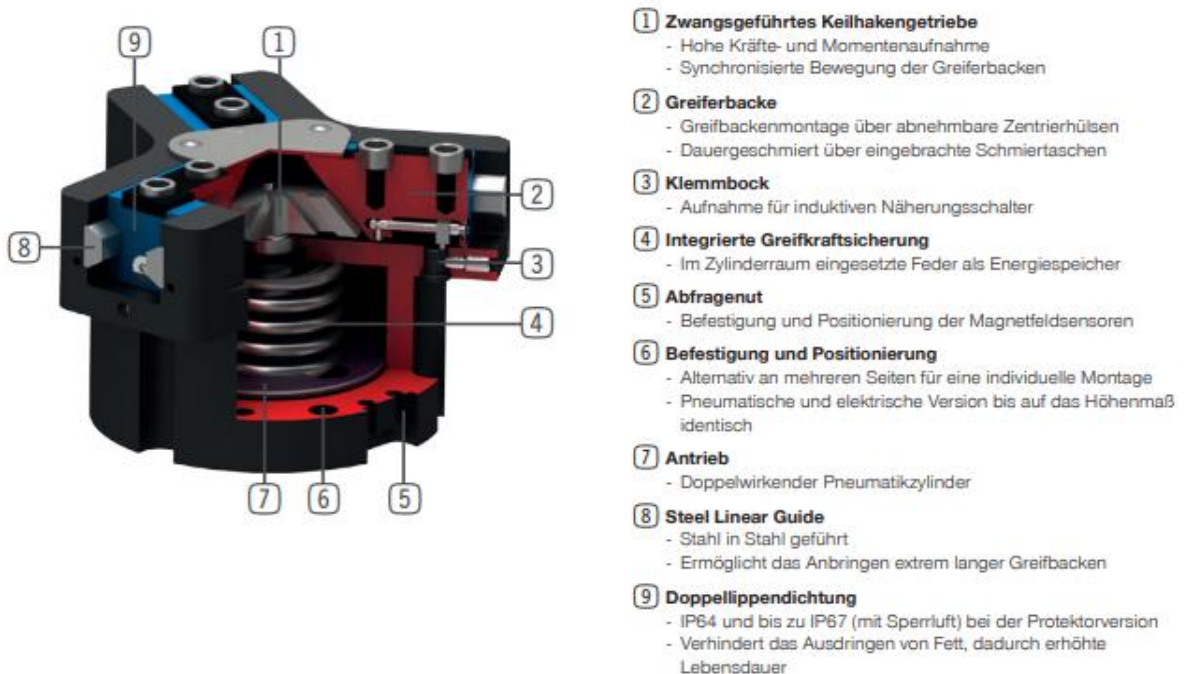


Abb. 5.13 Aufbau des Dreibacken- Zentrischgreifers GPD 5006-NC im Schnitt, Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017.), S. 295.

<sup>31</sup> Vgl. Zimmer Group (Hrsg.) (2017), S. 304



## 5.2.2 Energiezuführung

Um den Multieffektor zu betreiben, ist die Übertragung von elektrischer und pneumatischer Energie essentiell. Der Roboterarm TX2-90 L verfügt über eine integrierte Mediendurchführung zum Betrieb von pneumatischen und elektrischen Komponenten am Endeffektor. Stromaufnahme und Betriebsspannung der Spindel übersteigen jedoch die vom Roboterhersteller zulässigen Strom- und Spannungswerte für die im Roboterarm verlegten Leitungen.<sup>32</sup> Aus diesem Grund muss die Energieversorgung der Spindel über eine außenliegende Zuleitung realisiert werden. Zum Schutz der Leitungen vor einer zu starken Verformung durch Umknicken, also dem Unterschreiten des zulässigen Mindestbiegeradius oder einer zu hohen Torsion und zur besseren Führung wird eine Energieführungskette, kurz Energiekette, verwendet.

Da eine externe Energiezuführung für den Betrieb der Spindel notwendig ist, werden auch die restlichen Komponenten des Multieffektors über diese versorgt. Neben dem Motorkabel der Bearbeitungsspindel, werden zwei Druckluftleitungen für den pneumatischen Greifer und zwei Sensorleitungen für die beiden Magnetfeldsensoren, welche die Kolbenstellung des Greifers abfragen, benötigt.

Verwendet wird die Energiekette Triflex R TRE.50 der Fa. *Igus*, siehe Abb. 5.14Abb. 1.1. Um eine dreidimensionale Bewegung zu ermöglichen, sind die Kettenglieder um drei Achsen verdrehbar, jedoch nur bis zum Erreichen eines definierten Mindestradius, beziehungsweise des Torsionsanschlages, dies soll ein Abknicken oder Abdrehen der Leitungen verhindern. Bei der TRE Serie sind die einzelnen Kettenglieder nicht komplett geschlossen, durch diese Gestaltung lässt sich die Energiekette einfach von außen mit Leitungen befüllen.<sup>33</sup>



Abb. 5.14 Energiekette Triflex R Serie TRE, Quelle: Igus GmbH (Hrsg.) (2017), S. 739.

<sup>32</sup> Vgl. Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 59ff.

<sup>33</sup> Vgl. Igus GmbH (Hrsg.) (2017), S. 730ff.



Um die Energiekette am Roboterarm zu montieren bedarf es unterschiedlicher Energiekettenhalter. Abbildung 5.15 zeigt deren räumliche Anordnung am Roboterarm. Die Energiekette und die Versorgungsleitungen wurden aus Vereinfachungsgründen nicht visualisiert. Das Ende der Leitungszuführung ist am Endeffektor, dort ist ein Energiekettenhalter mit Zugentlastung angebracht. Durch Kabelbinder können die verschiedenen Leitungen ortsfest fixiert werden. Die Zugentlastung soll während der Bewegung des Roboterarmes eine Beschädigung an den Steckverbindungen verhindern. An der vierten Roboterachse ist ein Pendellager-Energiekettenhalter angebracht, er erhöht die Nachgiebigkeit an dieser Aufnahmestelle. Zwei weitere Energiekettenhalter sind an der zweiten Roboterachse vorgesehen. Speziell angefertigte Halterungsbleche aus Aluminium werden bei dem am Roboterarm vorgesehen Befestigungsstellen verschraubt. An ihnen wiederum werden die Energiekettenhalter befestigt.

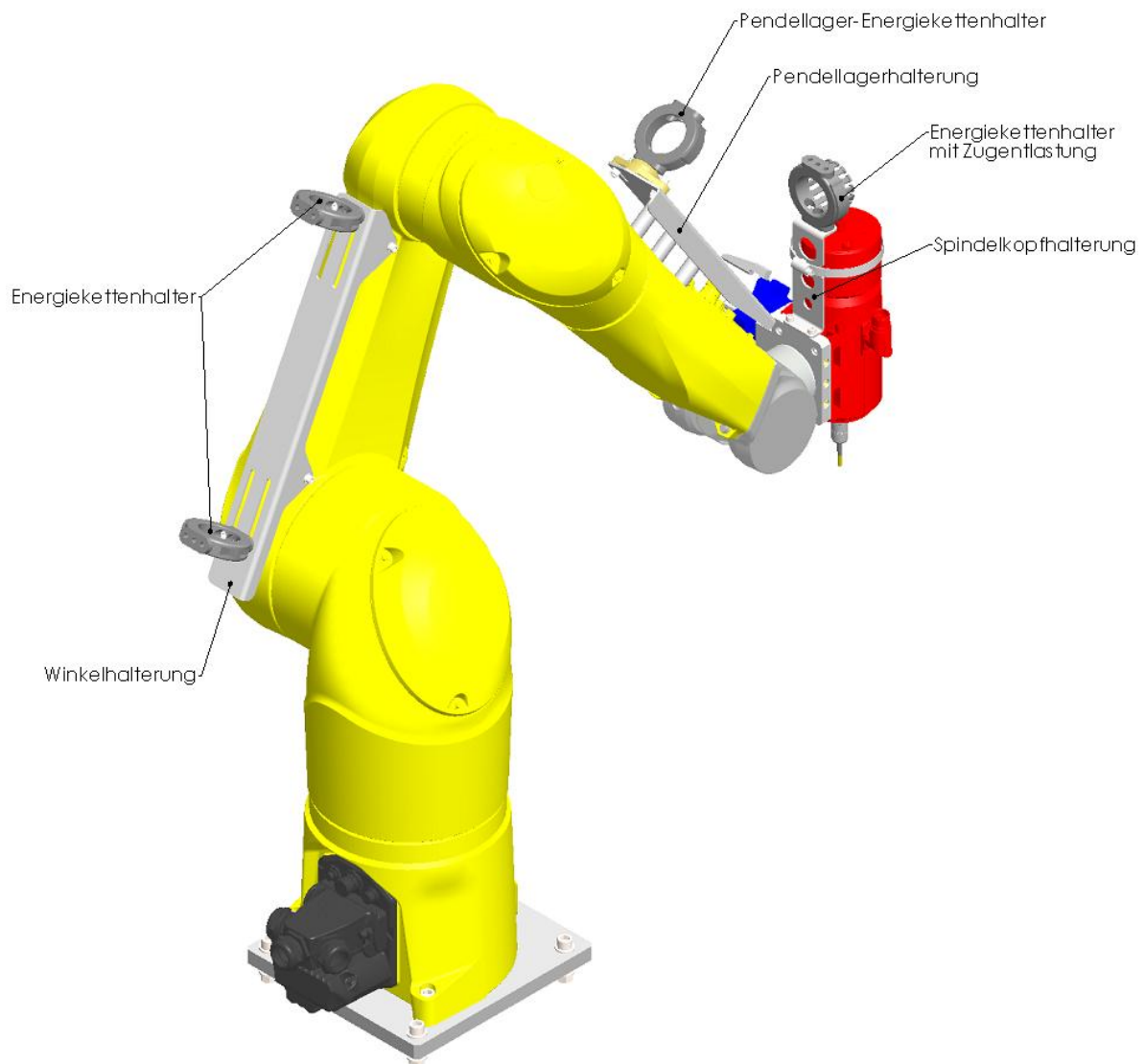


Abb. 5.15 Anordnung der Energiekettenhalter, Quelle: Eigene Darstellung.

## 5.3 Beladungsgruppe

Die Beladungsgruppe hat die Aufgabe, der Roboterzelle die zu bearbeitenden Werkstücke zuzuführen und fertig bearbeitete Werkstücke abzutransportieren. Das System Roboterzelle und der umliegende Arbeitsraum sind voneinander durch Schutzeinrichtungen getrennt, die einzige Ausnahme wird von der Beladungsgruppe gebildet, sie stellt die Verbindung beider Systeme über den Materialtransport dar.

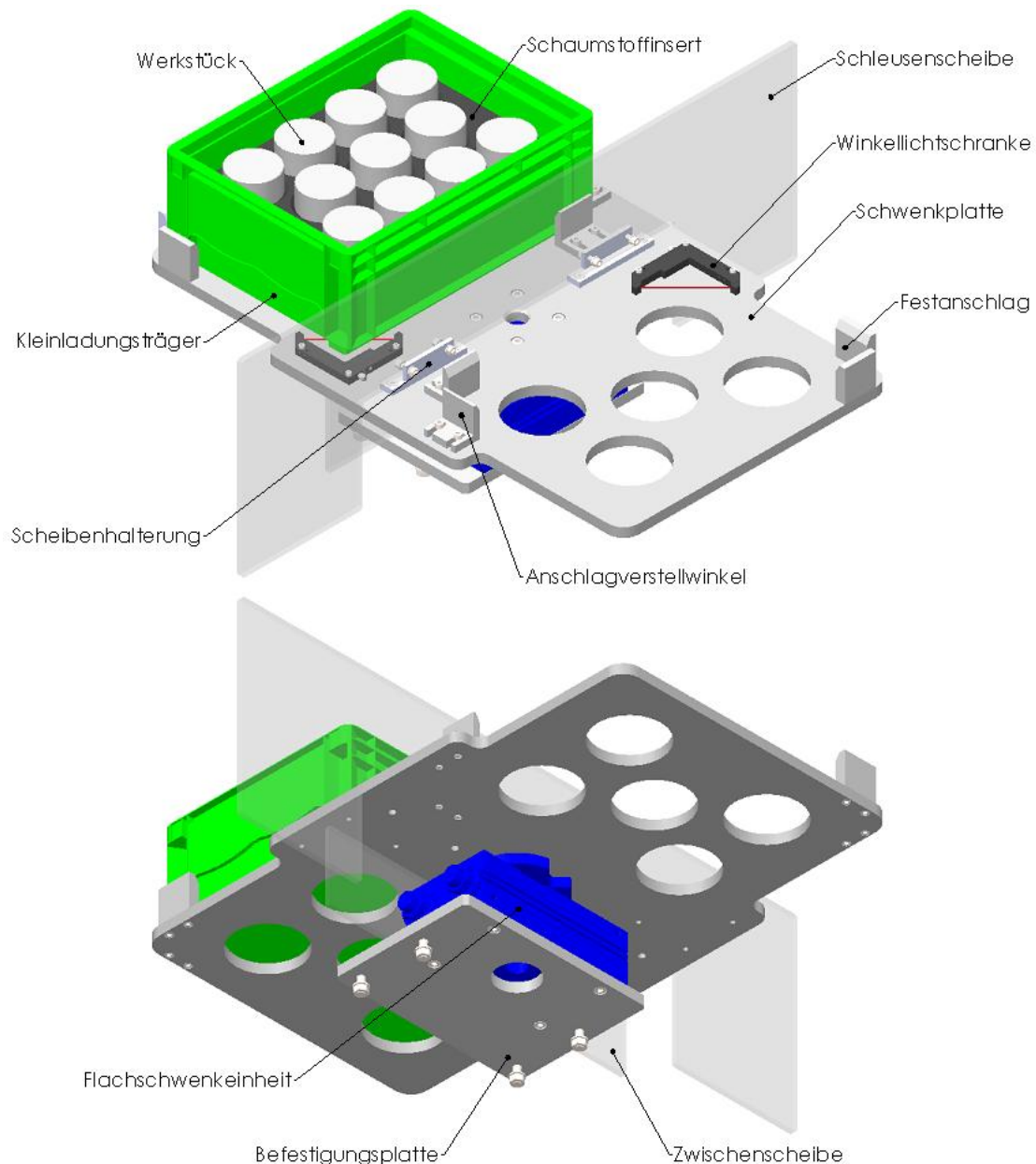


Abb. 5.16 Aufbau der Beladungsgruppe, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.16 zeigt den Aufbau der Beladungsgruppe, zur besseren Anschauung ist nur eine Seite beladen. Eine Anforderung an die autarke Roboterzelle besteht in der Zuführung der Werkstücke in standardisierten Teileträgern. Hierfür werden

Kleinladungsträger, kurz KLT, der Type R-KLT 4315 mit den Abmessungen 400 mm x 300 mm x 150 mm verwendet. KLT Systembehälter sind vom Verband der Automobilindustrie standardisierte Lager- und Transportbehälter. Die Grundabmessungen der Kleinladungsträger sind passend zu Europoolpaletten abgestimmt.

In den Kleinladungsträgern sind Schaumstoffinserts eingebettet, die wiederum mit den Werkstücken magaziniert werden. Der bestückte Kleinladungsträger wird auf die Schwenkplatte gesetzt und in die Roboterzelle mittels einer pneumatischen Flachschenkeinheit rotatorisch eingeschwenkt. Die Rohteile können nun nacheinander aus dem KLT entnommen, bearbeitet und wieder zurückgelegt werden. Während der Roboter die einzelnen Werkstücke abarbeitet, kann von der Maschinenaußenseite ein neuer KLT, bestückt mit Rohteilen, eingelegt werden. Wenn die Bearbeitung aller zu bearbeiteten Werkstücke abgeschlossen ist, wird der KLT mit den fertigen Werkstücken aus der Roboterzelle geschwenkt, dabei wird der zuvor eingesetzte Rohteilträger gleichzeitig ins Zelleninnere befördert. Der Fertigteileträger kann nun von der Beladungsgruppe entnommen werden. Ein neuer Träger mit Rohteilen kann bestückt werden und der Prozess beginnt von Neuem.

Zum definierten Einlegen der KLT sind auf der Schwenkplatte feste und verstellbare Anschläge vorgesehen. Durch die verstellbaren Anschläge kann das Einlegespiel eingestellt werden, während des Schwenkvorganges halten die Anschläge den Teileträger in Position. Der Antrieb für die Schwenkbewegung, wird von der pneumatischen Flachschenkeinheit SF 125-180N-C der Fa. *Zimmer Group* bereitgestellt.

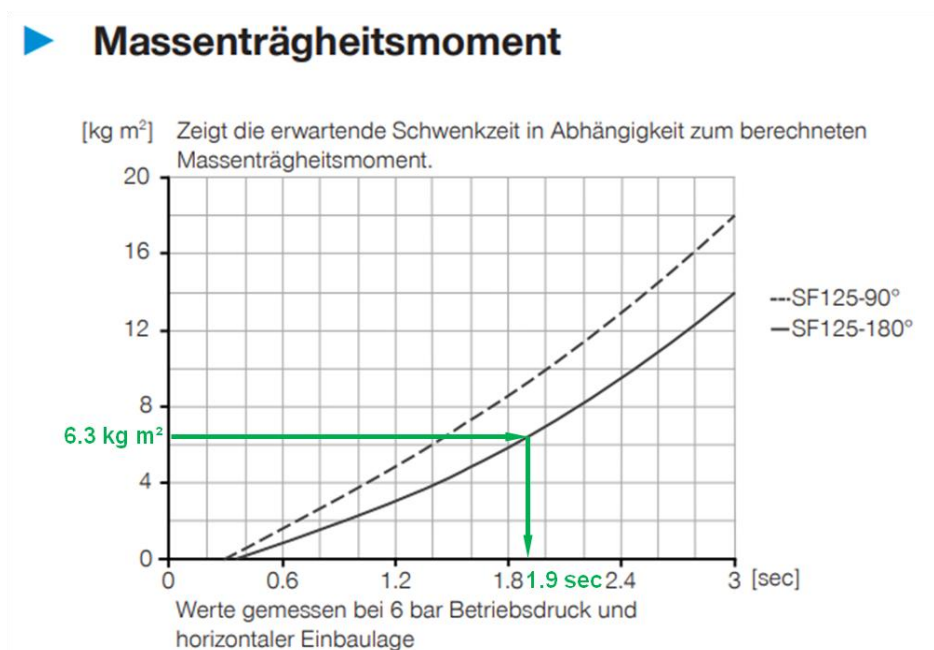
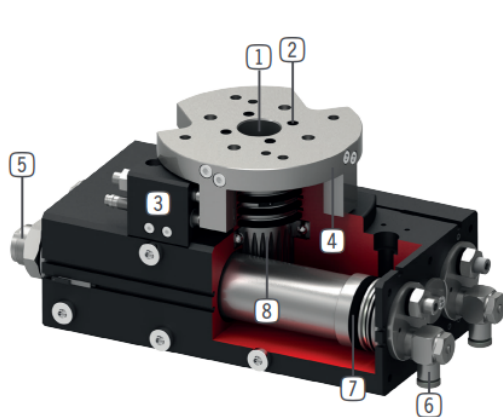


Abb. 5.17 Leistungsdiagramm SF-125-180N-C, Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017), S. 583 (leicht modifiziert).

Das in Kapitel 4.2 errechnete Gesamtmassenträgheitsmoment von  $6,3 \text{ kgm}^2$  kann laut Herstellerdiagramm, siehe Abb. 5.17, in 1,9 Sekunden den  $180^\circ$  Schwenkvorgang bewerkstelligen. Ebenso liegen die errechneten Belastungsgrößen unterhalb der Herstellerangaben.

Die verwendete Schwenkeinheit hat einen Schwenkwinkel von  $180^\circ$ , daher erfolgt die Beladung im Pendelbetrieb, das bedeutet die Drehbewegung wechselt periodisch die Drehrichtung zwischen Uhrzeigersinn und Gegenuhrzeigersinn. Die Drehbewegung entsteht durch zwei gegenläufige Pneumatikzylinder, welche über Zahnstangen das Antriebsmoment von  $38 \text{ Nm}$  synchronisiert über die Hohlwelle an den Aufnahmeflansch übertragen. Die Schwenkeinheit hat einstellbare Stoßdämpfer in den Endlagen integriert, wodurch die kinetische Energie zum Ende der Schwenkbewegung kontrolliert abgebaut wird. Die Geschwindigkeitsregulierung erfolgt über die angeschlossenen Schwenk-Drosselrückschlagventile.<sup>34</sup>



- ① **zweifach kugelgelagerte Hohlwelle**
  - zur Durchführung von Versorgungsleitungen
  - Hohe Kräfte- und Momentenaufnahme
- ② **bis zu 8-fach integrierte Luftdurchführung**
  - zur schlauchlosen Übertragung von Druckluft
  - Schlauchpaket muss nicht mitgeschwenkt werden
- ③ **Einstellbare Endposition**
  - +/-  $3^\circ$  einstellbare Endlage
- ④ **großer, präziser Aufnahmeflansch**
  - einfache Werkzeuganbindung
- ⑤ **integrierte Stoßdämpfer mit Wendelnut-Technologie**
  - einstellbare Endlagendämpfung
  - Erwärmung wird durch Einbau in pneumatischen Druckraum verhindert
- ⑥ **Drosselverschraubung**
  - zur Geschwindigkeitsregulierung (im Lieferumfang enthalten)
- ⑦ **Kraftübertragung**
  - Zahnstangen und Zahnrad
- ⑧ **Antrieb**
  - zwei doppelwirkende Pneumatikzylinder
  - hohes Drehmoment

Abb. 5.18 Aufbau der Flachschenkeinheit SF125-180N-C im Schnitt, Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017), S. 583.

Zur Einlegeüberwachung der Teileträger werden zwei Winkellichtschranken an der Schwenkplatte verbaut. Die Sensorleitungen werden über die Mittenbohrungen in Befestigungsplatte, Schwenkeinheit und Schwenkplatte zu den Sensoren geführt. Die Beladungsgruppe hat auch die Funktion einer Schleuse, daher werden Scheiben aus Polycarbonat vorgesehen. Im eingeschwenkten Zustand der Beladungsgruppe ist die Roboterzelle vollständig von der Umgebung abgeschirmt.

<sup>34</sup> Vgl. Zimmer Group (Hrsg.) (2017), S. 583/619.

## 5.4 Maschineneinhausung

Die Maschineneinhausung hat mehrere wichtige Funktionen für den Betrieb der Roboterzelle. Eine sichere Konstruktion zum Schutz vor Verletzungen durch den Roboterarm oder der Bearbeitungsspindel steht dabei an oberster Stelle. Die Schutzhäuserung muss auch dem Risiko umherfliegender Teile, die eventuell bei der Hochgeschwindigkeitszerspanung entstehen könnten, wie etwa durch einen Werkzeugbruch, entgegenwirken.

Ein weiterer nicht zu unterschätzender Faktor ist die Lärmbelastung, die bei diversen Bearbeitungsprozessen entstehen kann. Tabelle 5.1 zeigt die Auslöse- und Expositionsgrenzwerte durch Schallemissionen laut §§ 3-5 der „Verordnung Lärm und Vibrationen“ (VOLV), welche die Richtlinie 2003/10/EG in Österreich umsetzt. Oberhalb dieser Werte müssen Schutzmaßnahmen zur Vermeidung und Verringerung erfolgen.<sup>35</sup>

Auslösewerte und Expositionsgrenzwerte der Schallemission	
Expositionsgrenzwert für gehörgefährdenden Lärm	$L_{A,EX,8h} = 85 \text{ dB}$
Expositionsgrenzwert für gehörgefährdenden Impulslärm	$L_{C,peak} = 137 \text{ dB}$
Auslösewert für gehörgefährdenden Lärm	$L_{A,EX,8h} = 80 \text{ dB}$
Auslösewert für gehörgefährdenden Impulslärm	$L_{C,peak} = 135 \text{ dB}$

Tab. 5.1 Auslöse- und Grenzwerte der Schallemission, Quelle: In Anlehnung an Schenk u.a. (2008), S. 16.

Laut Spindelhersteller liegt eine Überschreitung der 80 dBA Grenze bei einer Drehzahl von  $20.000 \text{ min}^{-1}$  vor.<sup>36</sup> Die Maschineneinhausung muss also auch dazu beitragen, positiv auf die Schallemissionreduzierung zu wirken.

Eine sekundäre Funktion der Maschineneinhausung ist auch das räumliche Begrenzen von Spänen und Staub, die durch die Bearbeitungsprozesse in der Roboterzelle entstehen. Ein sauberer Arbeitsplatz trägt mitunter auch zu einer sichereren und produktiveren Arbeitsstätte bei.

Bei der Gestaltung der Maschineneinhausung sind mehrere Ziele definiert. Die Konstruktion soll möglichst sicher und kosteneffizient sein und zugleich der modernen Bearbeitungsmaschine eine entsprechend progressive, gut einsehbare und ästhetische Form geben.

<sup>35</sup> Vgl. Schenk u.a. (2008), S. 5ff.

<sup>36</sup> Vgl. Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (2018), S. 20.

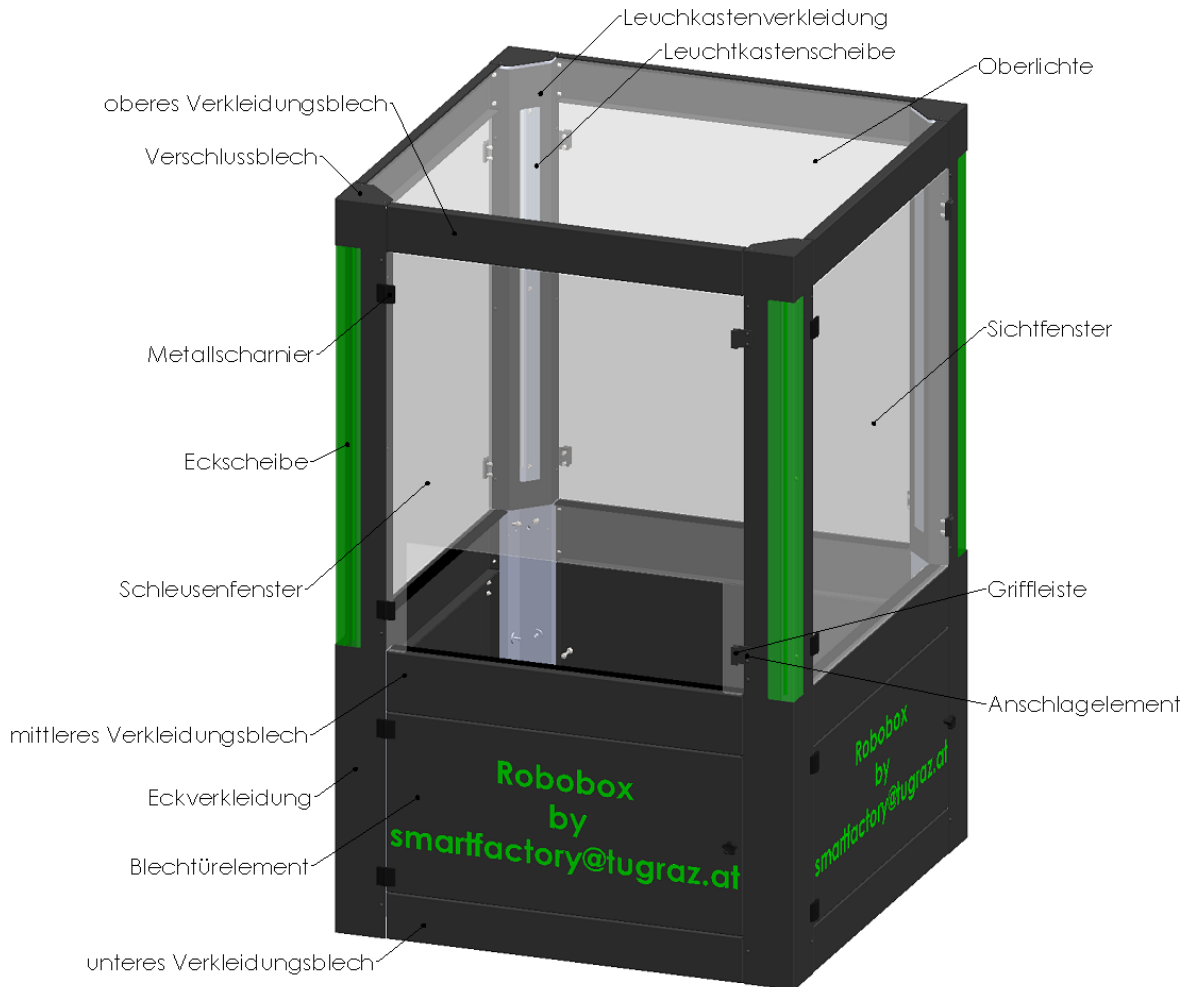


Abb. 5.19 Außenansicht der Maschineneinhausung, Quelle: Eigene Darstellung.

In Abbildung 5.19 sind die außenliegenden Bestandteile der Maschineneinhausung zu sehen. Die Einhausung besitzt mit den Abmessungen 1304 mm x 1304 mm eine quadratische Grundfläche und eine Höhe von 2065 mm. Abgesehen vom Schleusenfenster sind sämtliche Bestandteile der Maschineneinhausung für alle vier Seiten ident. Das Schleusenfenster benötigt eine Ausnehmung, weil dort die Beladungsgruppe den Materialtransport bereitstellen soll. Da es sich um eine Forschungsmaschine handelt, werden für eine gute Einsehbarkeit umseitig großzügige Sichtfenster und auch auf der Oberseite eine Oberlichte verbaut. Zum Schutz umstehender Personen bestehen die Schutzscheiben aus transparenten 8 mm Polycarbonatplatten. Polycarbonat eignet sich aufgrund der guten Schlagfestigkeit und der hohen Rückhaltefähigkeit optimal zur Aufnahme von Auftreffenergien<sup>37</sup>.

<sup>37</sup> Vgl. Fachbereich Holz und Metall der DGUV (Hrsg.) (2018), S.1ff.

In der Anforderungsliste wurde auch gute Zugänglichkeit für Wartungs- und Montagearbeiten gefordert, aus diesem Grund sind sowohl die Fenster im oberen Bereich, als auch die Blechtüren im unteren Bereich der Schutzeinhausung allseitig zu öffnen. Sichtscheiben und Blechtürelemente sind einseitig mit stabilen Metallscharnieren angeschlagen. Eingefasst sind die Fenster und Türen von dem unteren, mittleren und oberen Verkleidungsblech sowie den Eckverkleidungen. Die Blechverkleidungen für die Maschineneinhausung werden aus 2 mm Stahlblech gefertigt und mit einer Pulverbeschichtung in Anthrazitgrau RAL 7016 matt veredelt. Zur Darstellung der Maschinenzustände sind an den Einhausungsaußenecken Leuchtmelder vorgesehen.

Farbe	Bedeutung	Erklärung	Handlung durch den Bediener
Rot	Notfall	Gefahrbringender Zustand	Sofortige Handlung, um auf einen gefahrbringenden Zustand zu reagieren
Gelb	Anormal	Anormaler Zustand; bevorstehender kritischer Zustand	Überwachen und/oder Eingreifen
Blau	Zwingend	Anzeige eines Zustands, der Handlung durch den Bediener erfordert	Zwingende Handlung
Grün	Normal	Normaler Zustand	Optional
Weiß	Neutral	Andere Zustände; darf verwendet werden, wenn Zweifel über die Anwendung von Rot, Gelb, Grün oder Blau bestehen	Überwachen

Abb. 5.20 Empfohlene Farbkennzeichnung von Leuchtmeldern und Warnleuchten nach EN 60204-1, Quelle: Gehlen (2010), S. 118.

Abbildung 5.20 zeigt eine normübliche, empfohlene Farbkennzeichnung von Leuchtmeldern und Warnleuchten. Nach diesem Vorbild werden auch die Leuchtmelder der Maschineneinhausung gestaltet.

In Tabelle 5.2 ist die für die Roboterzelle adaptierte Farbkennzeichnung der unterschiedlichen Maschinenzustände und den entsprechend verbundenen Handlungsordern aufgelistet.



Farbkennzeichnung	Zustand	Handlung
Leuchtmelder rot blinkend	kritischer Zustand	Not-Aus betätigen, Gefahrenstelle verlassen
Leuchtmelder rot	kritischer Zustand	Not-Aus wurde betätigt, Zelle ist im Teach-Mode
Leuchtmelder gelb blinkend	anormaler Zustand	Beladungsgruppe schwenkt, Beladungsbereich umgehend verlassen
Leuchtmelder gelb	anormaler Zustand	Beladungsgruppe schwenkt in Kürze, Beladungsbereich verlassen
Leuchtmelder blau	Bedienerzustand	Austausch der Teileträger erforderlich
Leuchtmelder grün	optimaler Zustand	keine Handlung
Leuchtmelder weiß	Ruhezustand	Bearbeitung wurde beendet

Tab. 5.2 Maschinenzustände und erforderliche Bedienerhandlungen, Quelle: Eigene Darstellung.

Im Detailschnitt, siehe Abb. 5.21, ist der Aufbau der Eckkonstruktion erkennbar, zur besseren Darstellung ist die Baugruppe Aufspanntisch mit dargestellt. Die Maschineneinhausung ist ausschließlich an den Ecken mit dem Aufspanntisch verbunden. Die tragenden Säulen der Maschineneinhausung bilden vier Winkelsteher mit jeweils zwei aufgeschraubten Stabstehern. Die Winkelsteher bestehen aus Aluminium Winkelstangen 100 mm x 100 mm mit 10 mm Stärke, sie sind pro Ecke mittels zwei M8 Verschraubungen mit der Aufspannplatte des Aufspanntisches, sowie 4 Bohrschrauben mit dem Unterbau des Aufspanntisches verbunden. Die Stabsteher sind aus 40 mm x 20 mm Aluminium Flachstangenmaterial und dienen zum Befestigen der Verkleidungsbleche, außerdem geben sie den Raum für die Beleuchtung und versteifen die Eckkonstruktion. Um die Tragfähigkeit der Verschraubungen zu erhöhen, werden erneut Gewindeeinsätze der Fa. *Kerb-Konus* verwendet, siehe Abb. 5.11.

Die Maschineneinhausung soll die in Tabelle 5.2 beschriebenen Zustände darstellen können, dazu werden RGBW LED - Streifen im Inneren der Eckverkleidungen vorgesehen. Die selbstklebenden LED - Streifen werden an dafür vorgesehene Halterungsbleche angebracht. Um einen homogenen Lichtaustritt zu gewährleisten, sind vor den Lichtauslässen der Eckverkleidungen, Eckscheiben aus satiniertem Acrylglas aufgeklebt.

Zur Ausleuchtung des Innenbereiches der Roboterzelle werden an den Innenecken zusätzliche Leuchtkästen vorgesehen. Analog zu den Außenbeleuchtungen werden auch hier satinierte Acrylglasscheiben vor den Lichtauslässen der Leuchtkastenverkleidungen angebracht. Die Innenbeleuchtung der Roboterzelle erfolgt jedoch nur mit weißem Licht,



um den Bediener nicht von den außen angezeigten Warnsignalen abzulenken. Dazu werden wiederum selbstklebende weiße LED-Streifen an speziell angefertigten Halblechen angebracht.

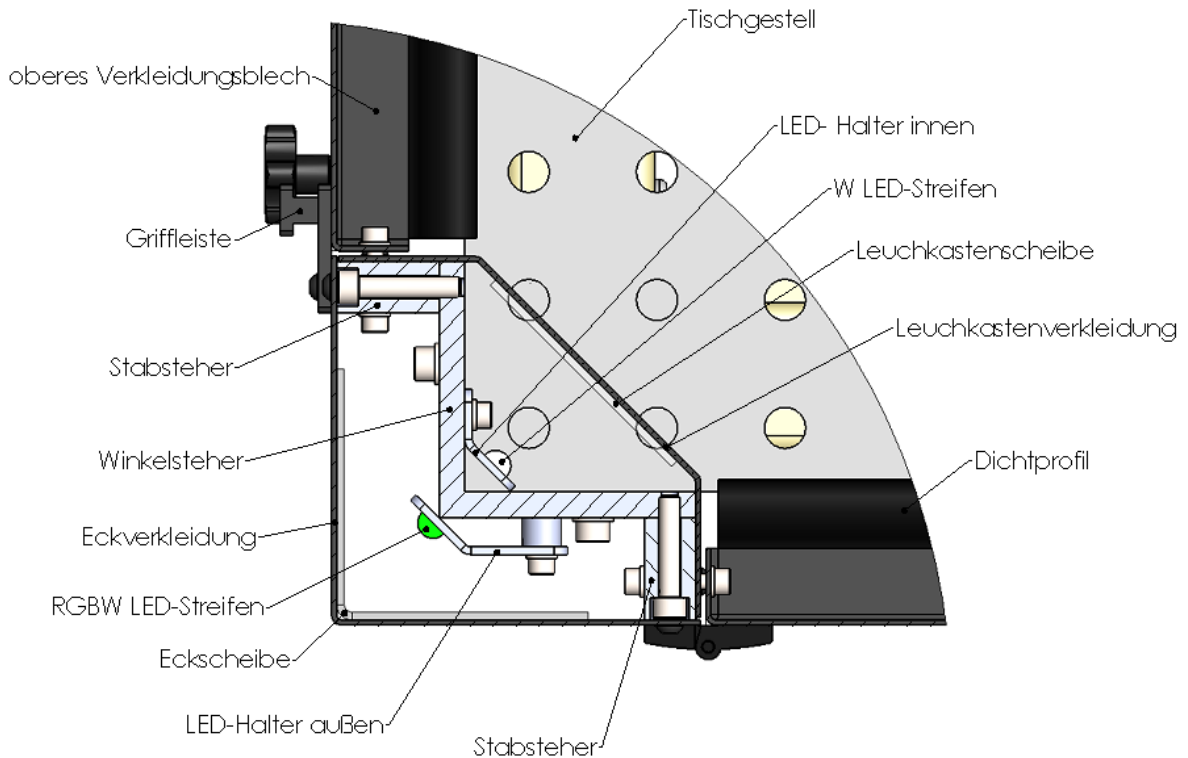


Abb. 5.21 Eckkonstruktion im Detailschnitt I, Quelle: Eigene Darstellung.

Abbildung 5.22 zeigt den Detailschnitt der Eckkonstruktion im unteren Bereich der Maschineneinhausung. Zur besseren Darstellung wird erneut der Aufspanntisch mit dargestellt. Gut sichtbar ist, wie der Verschluss der Blechtüren funktioniert. Das Anschlagblech ist am Unterbau des Aufspanntisches montiert und weist eine M8 Gewindebohrung auf. Durch Drehen der Sterngriffschraube während des Schließvorganges kann das Blechtürelement bis zum Erreichen des Anschlages fixiert werden. Durch diesen Aufbau sind Anschlag, Verschluss und Bediengriff in einem realisiert.

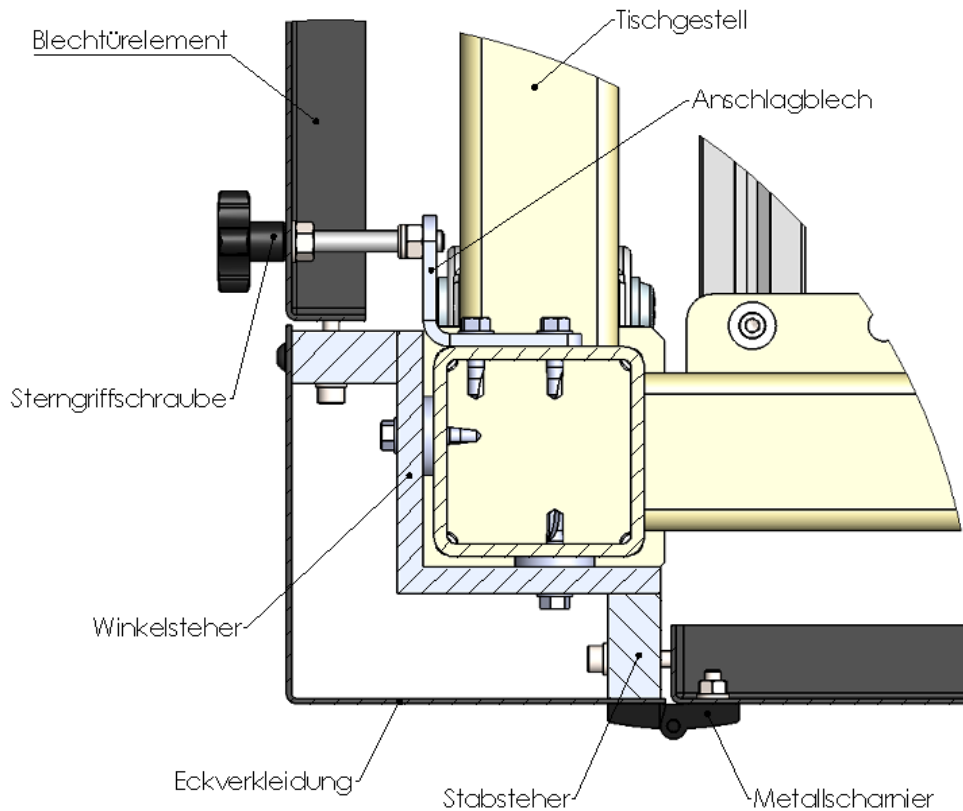


Abb. 5.22 Eckkonstruktion im Detailschnitt II, Quelle: Eigene Darstellung.

## 5.5 Werkzeugwechselstation

Die Werkzeugwechselstation dient als Flexibilitätserweiterung der Roboterzelle. Die Bearbeitungsspindel verfügt über einen pneumatischen Kegelwechsel. Die Spannzange ist während der Bearbeitung über Federbetätigung geschlossen, während des Werkzeugwechsels wird durch Druckbeaufschlagung die Spannzange geöffnet und der HSK-E 25 Werkzeughalter kann aus der Werkzeugkegelaufnahme der Spindel entfernt werden. Um einen automatischen Werkzeugwechsel zu ermöglichen, benötigt man eine spezielle Halterung, in welche der Roboter den auszuwechselnden Werkzeughalter positioniert. Erst dann kann durch Betätigung des pneumatischen Spannsystems der Werkzeughalter gelöst werden. Ohne diese Aufnahme würde der Werkzeughalter samt Werkzeug einfach hinunterfallen. Der Bewegungsablauf beim automatischen Werkzeugwechsel wird in Abbildung 5.23 genauer dargestellt.

## Bewegungsablauf Werkzeughalterwechsel

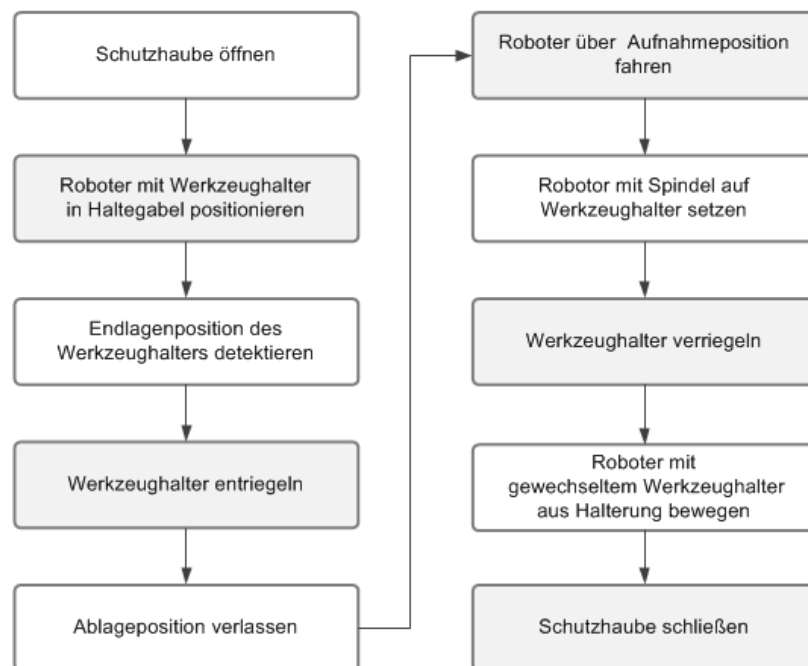


Abb. 5.23 schematischer Bewegungsablauf beim Werkzeugwechsel, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Werkzeugwechselstation, Abb. 5.24, ist für eine Aufnahmekapazität von fünf Werkzeughaltern konzipiert. Die Werkzeughalter bleiben grundsätzlich in der Aufnahmevorrichtung, nur beim Umrüsten oder bei Verschleißerscheinungen der Werkzeuge werden die Werkzeughalter außerhalb der Roboterzelle mit neuen Bearbeitungswerkzeugen bestückt. Um die HSK-E 25 Werkzeughalter vor Ablagerungen durch Späne und Staub zu schützen, werden sie durch eine Schutzhaube von der Umgebung abgeschirmt. Verunreinigungen am Hohlchaftkegel könnten zu einem schlechten Sitz des Werkzeughalters am Spannsystem der Spindel führen und das Spannsystem der Spindel beschädigen<sup>38</sup>.

Die transparente Schutzhaube besteht aus 3 mm starken verklebten Acrylglasplatten und kann um 180° geöffnet werden. Zwei fest verbaute Anschlagpuffer dienen zum Begrenzen der Schwenkbewegung und zum Dämpfen der Endlagen. Zur Aufnahme der Werkzeughalter werden HSK - 25 Werkzeuggabeln der Fa. *IseI* verwendet. Die Werkzeughalter haben Ausnehmungen, sogenannte Greifrillen. Die Werkzeuggabel umschließt den Werkzeughalter an diesen Ausnehmungen. Beim Werkzeugwechsel muss der Roboter die Spindel mit dem gespannten Werkzeughalter von vorne, waagrecht in den leeren Ablageplatz bewegen. Nach Entspannen des Werkzeughalters kann die Bearbeitungsspindel senkrecht nach oben wegbewegt werden.

<sup>38</sup> Vgl. Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (2018), S. 25/28.

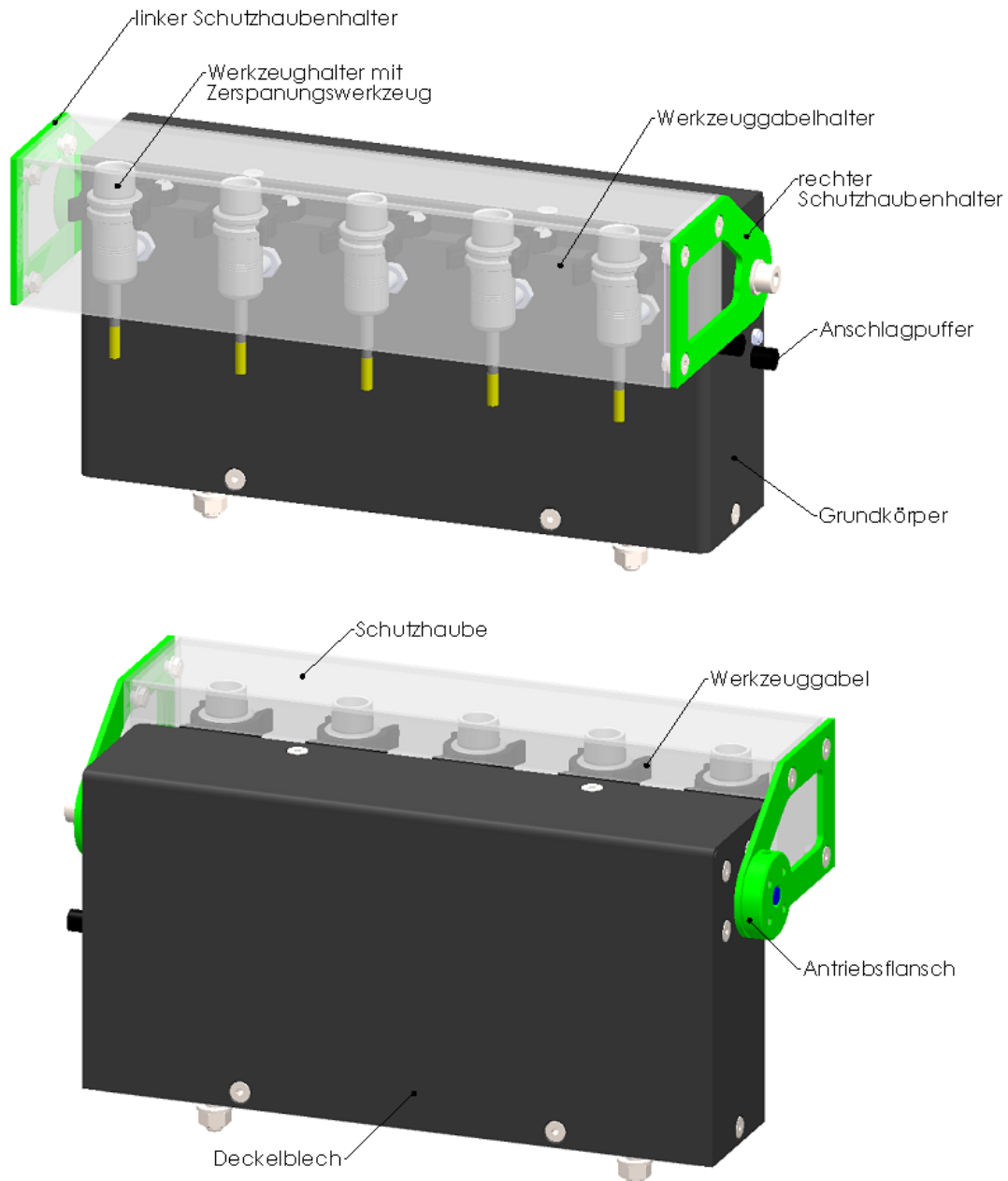


Abb. 5.24 Werkzeugwechselstation in Vorderansicht (oben) und Rückansicht (unten), Quelle: Eigene Darstellung.

Die Schutzhaube ist am linken und rechten Schutzhaubenhalter befestigt. Die Antriebsenergie zum Öffnen und Schließen der Schutzhaube wird vom 180° schwenkbaren Drehflügelzylinder PRN20-180 der Fa. *Zimmer Group* bereitgestellt. Über den Antriebsflansch erfolgt die Kraftübertragung zum linken Schutzhaubenhalter. Der rechte Schutzhaubenhalter wird von einer M8 Schraube gehalten, die zugleich als Achse für die Drehbewegung fungiert. Der Grundkörper der Werkzeugwechselstation besteht aus einem U-förmigen 3 mm Blechbiegeteil, das mit der Grundplatte verbunden ist. Die Grundplatte wird mit der Aufspannplatte des Aufspanntisches verschraubt. Durch die Grundplatte verlaufen auch die Leitungsdurchführungen zur Energieversorgung der Werkzeugwechselstation, siehe Abb. 5.25.

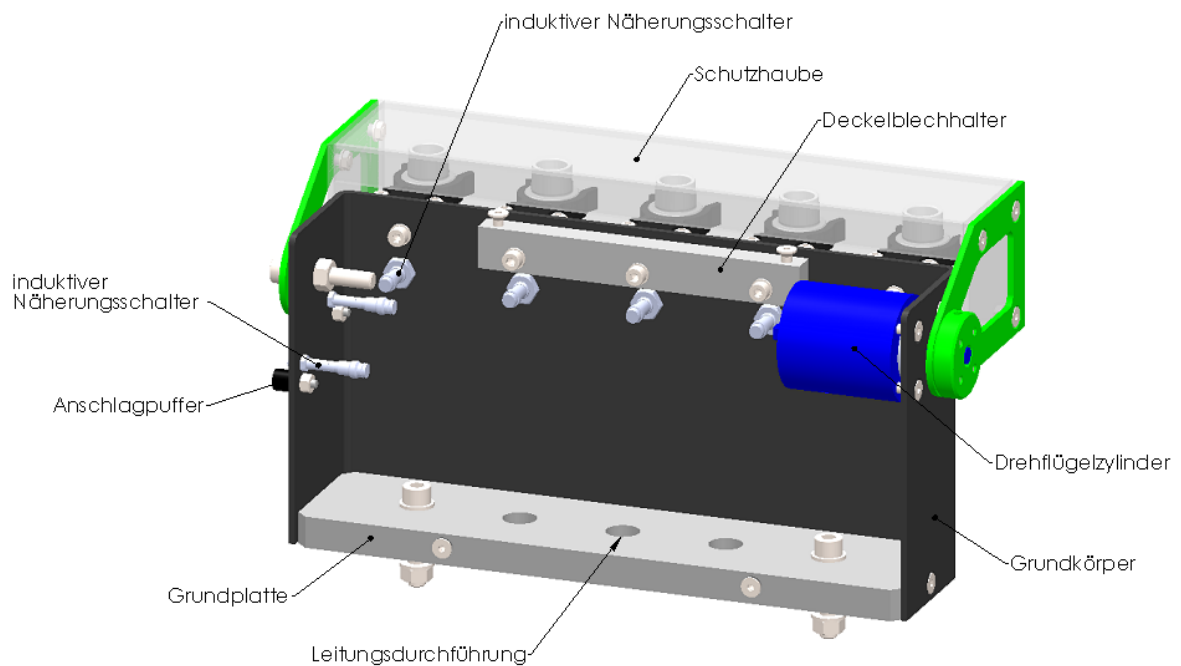


Abb. 5.25 Werkzeugwechselstation bei geöffnetem Deckelblech, Quelle: Eigene Darstellung.

Zur Kontrolle der Endlagendetektion ist an jeder Ablageposition ein induktiver Näherungsschalter verbaut. Seitlich befinden sich zwei weitere induktive Näherungsschalter, welche detektieren, ob sich die Schutzhaube im offenen oder geschlossenen Zustand befindet.

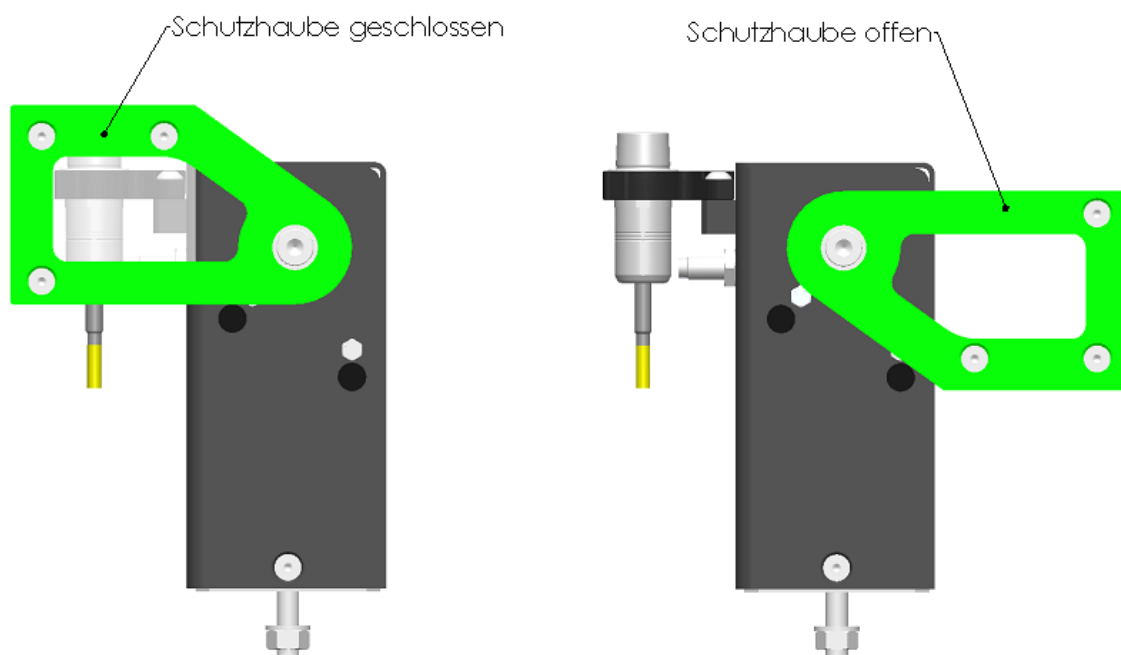


Abb. 5.26 geschlossener und offener Zustand der Schutzhaube, Quelle: Eigene Darstellung.

## 5.6 Werkstückspannsystem

Um eine autarke Bearbeitung in der Roboterzelle zu ermöglichen, wird noch ein automatisierbares Spannsystem benötigt, in welchem der Roboter die Werkstücke zum Bearbeiten fixieren kann. Wichtig für die Auswahl ist neben einer hohen Spannkraft, ein kompaktes Design und eine einfache Einbindung in die Roboterzelle. Eingesetzt wird das stationäre Dreibacken-Kraftspannfutter mit pneumatischer Betätigung ROTA TPS 125-26/K der Fa. Schunk.

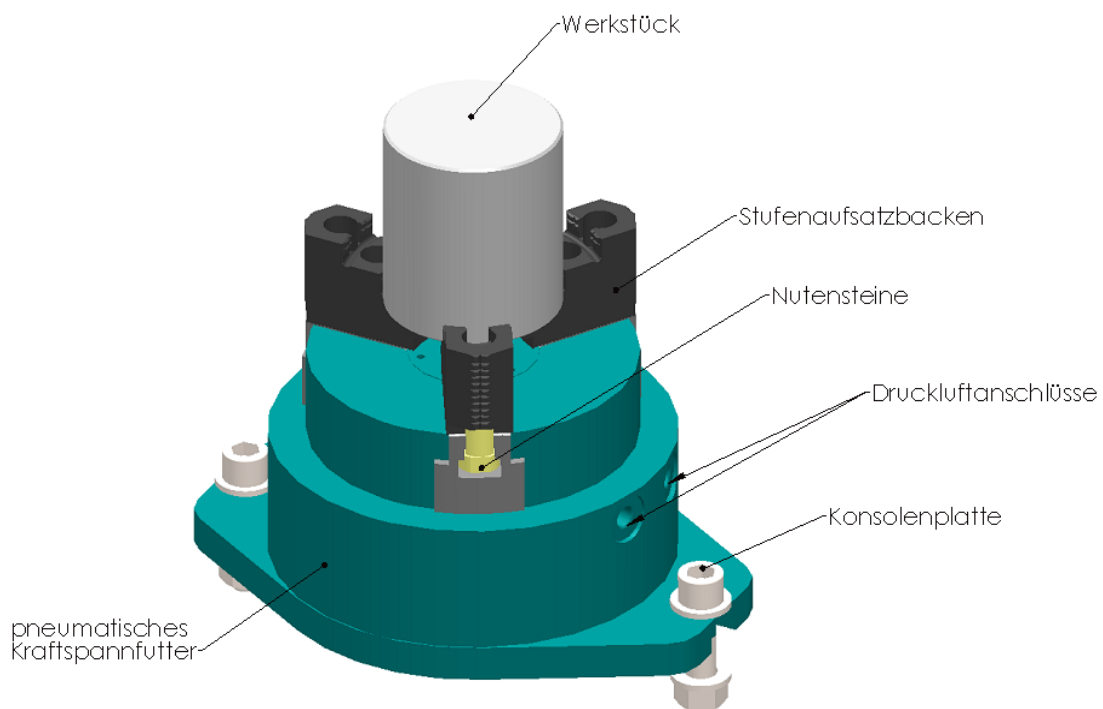


Abb. 5.27 Spannsituation des Werkstücks im pneumatischen Spannfutter, Quelle: Eigene Darstellung.

Das pneumatische Spannfutter ROTA TPS 125-26/K verfügt über eine große wirksame Kolbenfläche, die axiale Kolbenkraft über ein Keilhakengetriebe radial in die Spannböden übersetzt. Dem Spannfutter steht eine maximale Spannkraft von 22 kN bei 3 mm Hub zur Verfügung, die Spannkraftregelung erfolgt über den zugeführten Betriebsdruck. Über die angeflanschte Konsolenplatte kann das Spannfutter direkt mit der Aufspannplatte des Tischgestells verbunden werden. Die Stufenaufsatzböden zum Außenspannen und die Spannböden des pneumatischen Kraftspannfutters besitzen eine 1/16" Spitzverzahnung. Über diese Verzahnung können die Aufsatzböden in einem Verstellraster von ca. 1,6 mm auf den Spannböden positioniert werden. Fixiert werden die Aufsatzböden über die in den Spannböden eingesetzten Nutensteine.<sup>39</sup>

<sup>39</sup> Vgl. Schunk GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2018b), S. 365-368.

## 5.7 Fertigbaugruppe Roboterzelle

Die aufgebaute Roboterzelle hat eine Grundfläche von 1304 mm x 1304 mm und eine Höhe von 2150 mm. Die Ausladung der Beladungsgruppe beträgt 333 mm und verbreitert so auf einer Seite die Zelle auf 1637 mm. Die Oberkante der beladenen Teileträger liegt bei 1185 mm.

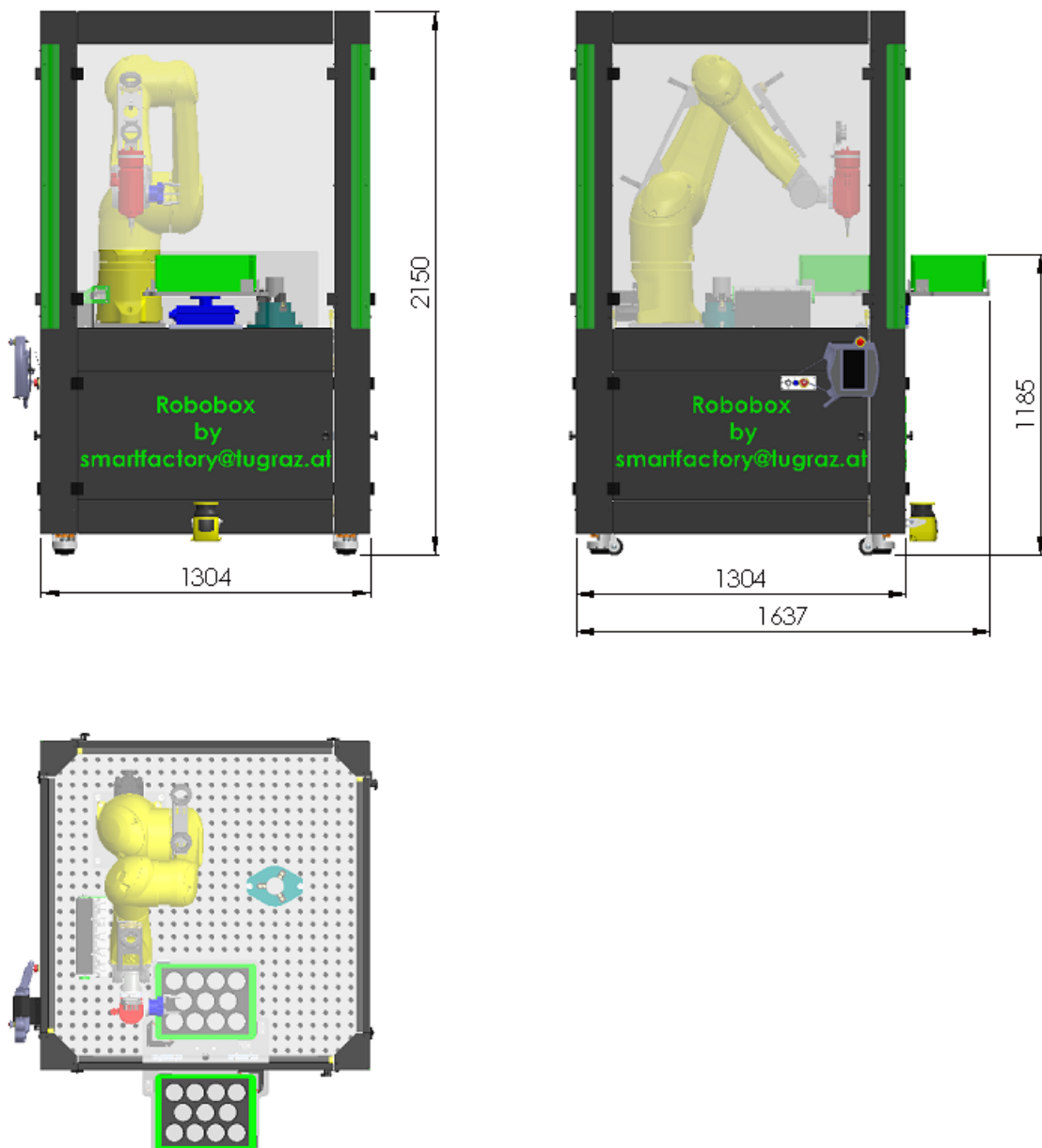


Abb. 5.28 Hauptabmessungen der Roboterzelle, Quelle: Eigene Darstellung.

Die trennende Funktion der Schleuse ist durch die Anordnung von drei Polycarbonatplatten mit 8 mm Stärke gewährleistet. Das Schleusenfenster ist im Normalbetrieb ein feststehender Teil der Maschineneinhausung, siehe Abb. 5.19. Es kann jedoch ebenso wie die anderen Schutzfenster der Maschineneinhausung zu

Wartungs- und Montagearbeiten geöffnet werden. An der Beladungsgruppe sind die durch den Schwenkvorgang bewegte Schleusenscheibe und die feststehende Zwischenscheibe aufgebaut. Die Zwischenscheibe befindet sich zwischen der Schleusenscheibe und verschließt den offenen Bereich, der sich durch den Aufbau der Beladungsgruppe ergibt, siehe Abb. 5.16. Durch die beschriebene Anordnung ist der gesamte Bereich der Schutzeinhausung im eingeschwenkten Zustand der Beladungsgruppe fest von der Umgebung getrennt. Beim Schwenkvorgang selbst ist kurzzeitig eine Öffnung vorhanden, jedoch überprüft ein 2-D Laserscanner über die gesamte Dauer der Schwenkbewegung die Abwesenheit von Personen im Beladebereich, siehe Abb. 5.29.

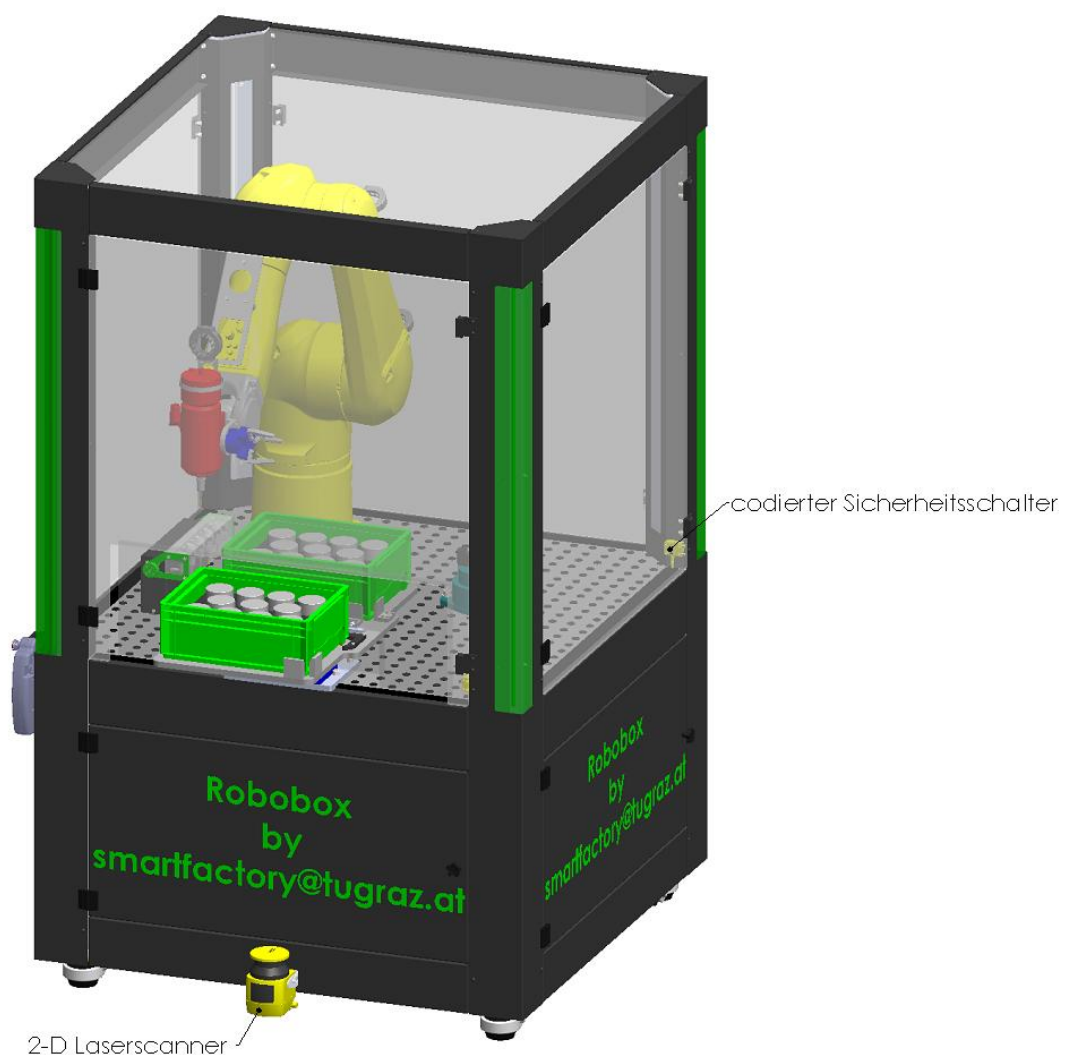


Abb. 5.29 Anordnung der sicherheitstechnischen Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung.

Wie in Abbildung 5.29 zu sehen, werden an den Sichtfenstern und am Schleusenfenster der Maschineneinhausung vier codierte Sicherheitsschalter angebracht. Sie überprüfen, ob im Normalbetrieb der robotergestützten Fertigungszelle alle Schutzfenster geschlossen



sind. Unterhalb der Beladungsgruppe wird ein 2-D Laserscanner vorgesehen, der detektiert, ob sich Personen in der Umgebung der Beladungsgruppe befinden. Im Falle dessen wird der Schwenkvorgang der Beladungsgruppe erst nach Verlassen der Person aus dem Gefahrenbereich gestartet. Bei Wiedereintritt der Person in den Gefahrenbereich wird der Beladungsvorgang gestoppt und die Beladungsgruppe verharrt in der aktuellen Stellung, bis die Person den Gefahrenbereich wieder verlassen hat. Die sicherheitstechnische Beurteilung der Roboterzelle ist detailliert in Kapitel 5.8 aufgeführt.

Damit keine Späne durch die Aufspannplatte in den unteren Bereich des Aufspanntisches geraten und dort mit den Steuerungskomponenten in Kontakt kommen, werden die nicht verwendeten Systembohrungen der Aufspannplatte mit Kunststoff-Blindstopfen verschlossen. Bei Neupositionierung einer Komponente am Aufspanntisch müssen die Blindstopfen entfernt, die entsprechende Baugruppe umgesetzt und anschließend die freiliegenden Bohrungen wieder mit Blindstopfen verschlossen werden.

## 5.8 Sicherheitstechnische Beurteilung

Der Betrieb der Roboterzelle mit angetriebenem Zerspanungswerkzeug birgt eine Reihe potentieller Gefahren, es liegt daher höchstes Augenmerk auf eine ganzheitlich sichere Konstruktion.

Dazu wird eine Risikobeurteilung nach EN ISO 12100:2010 durchgeführt. Im ersten Schritt werden die Risiken analysiert, indem die einzelnen Gefährdungen identifiziert und mittels Risikografen nach ISO TR 14121-2 eingeschätzt werden. Dann werden die Risiken bewertet und anschließend erforderliche Maßnahmen getroffen, um das Risiko zu senken.

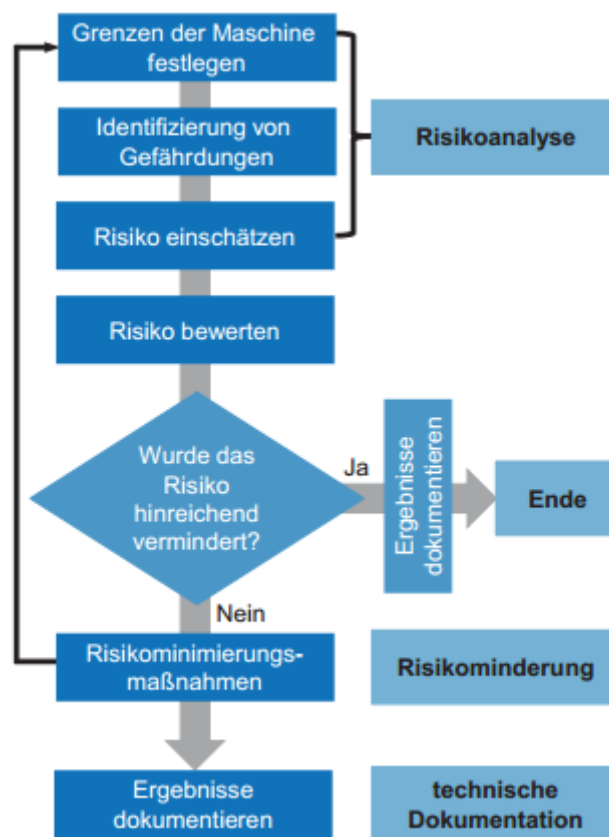


Abb. 5.30 Risikobeurteilung nach EN ISO 12100:2010, Quelle: Brecher/Weck (2017), S. 443.

Um das Risiko objektiv einschätzen zu können, wird ein Risikograph verwendet. Das Risiko einer Gefährdungssituation wird mit Hilfe der Faktoren der Gefährdungssituation, wie Schadensausmaß, Aufenthaltsdauer oder Exposition, Eintrittswahrscheinlichkeit und Möglichkeit zur Anwendung des Schadens kategorisiert.

Das Ergebnis ist der Risikoindex, der als Bewertungsgrundlage dient, ob eine Risikominderung erforderlich ist oder ob das zu erwartende Risiko vertretbar ist.

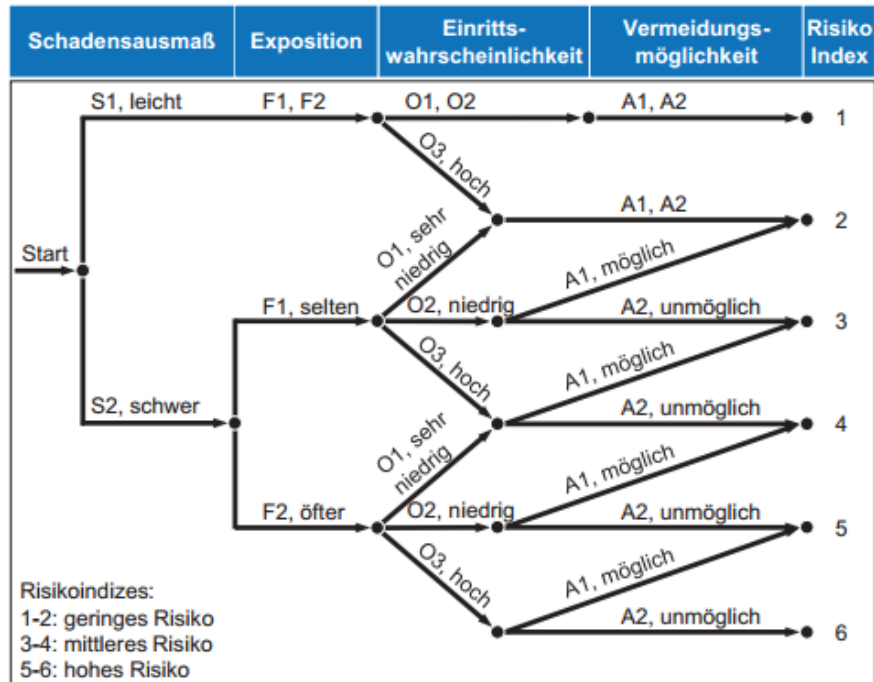


Abb. 5.31 Risikograph nach ISO/TR 14121-2, Quelle: Brecher/Weck (2017), S. 446.

Bei der Verwendung von sicherheitstechnischen Schutzeinrichtungen muss die Zuverlässigkeit der sicherheitsbezogenen Funktion evaluiert werden. Der Performance Level, kurz PL, ist ein Maß für die Zuverlässigkeit. Der Performance Level ist auf einer Skala von a bis e unterteilt, wobei e den höchsten PL mit der geringsten Ausfallwahrscheinlichkeit darstellt. Zur Beurteilung wird der erforderliche Performance Level (PL<sub>r</sub>) mittels Risikografen, siehe Abb. 5.32, bestimmt und mit dem realisierten, tatsächlich vorhandenen Performance Level (PL) der Sicherheitsfunktion verglichen. Der erreichte Performance Level darf nicht unter dem erforderlichen PL<sub>r</sub> liegen.

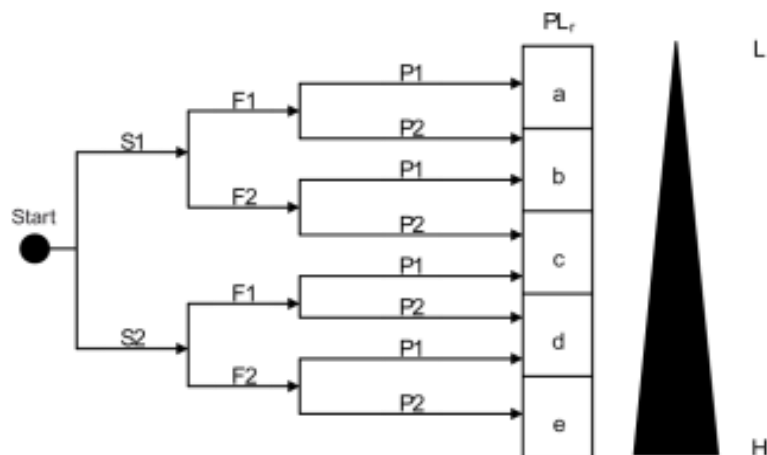


Abb. 5.32 Risikograf zur Ermittlung des Performance Levels nach EN 13849-1, Quelle Leuze electronic GmbH + Co. KG (Hrsg.) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018].

S steht für die Schwere der Verletzung, F für die Häufigkeit und/oder Dauer der Gefährdungsexposition und P für die Möglichkeit zur Vermeidung der Gefährdung oder Begrenzung des Schadens.

Die nachfolgenden Tabellen 5.3 - 5.6 zeigen die durchgeführten Risikobeurteilungen der kritischen Gefährdungen der Roboterzelle.

<b>Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch sich bewegende Teile</b>				
Gefährdung tritt auf	Quetschen, Scheren, Stoß, Durchstich oder Einstich			
Gefahrenstelle(n)	Bewegungsbereich des Roboterarms mit Endeffektor			
<b>Gefahrenstelle/Lebensphase</b>				
Gefahrenstelle	Bewegungsbereich des Roboterarms mit Endeffektor			
Lebensphase	Montage, Zusammenbau, Installation Einrichten, Einlernen, Programmieren Inbetriebnahme Betrieb, Normalbetrieb Umrüsten Reinigung, Instandhaltung			
Gefahrenbeschreibung	Gefährdung hervorgerufen durch die Bewegung des Roboterarms, sowie durch den aufgebauten Endeffektor und dessen spitzes Werkzeug			
Betroffene Personen	Bediener, Techniker			
<b>Risikoeinschätzung ohne Maßnahmen(Ursprungsrisko) nach ISO/TR 14121-2</b>				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S2) :hoch	(F2): häufig	(O2): gering	(A2): unmöglich	E: 5 (S2-F2-O2-A2)
Maßnahmen	<input type="checkbox"/>	konstruktiv		
	<input checked="" type="checkbox"/>	technisch		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko		
Beschreibung der Maßnahmen	Anbringung einer überwiegend feststehend trennenden Schutzeinrichtung (Maschineneinhausung mit Schutzfenstern). Bei gelöstem Zustand der Schutzfenster für Wartungs- und Montagearbeiten sind diese als beweglich trennende Schutzeinrichtung zu betrachten. Daher erfolgt das Anbringen einer Positionserkennung (codierter Sicherheitsschalter) an den Schutzfenstern.			
<b>Bewertung nach EN13849-1</b>				
Schwere der Verletzung	Häufigkeit	Vermeidung	PL <sub>r</sub> (erforderlich)	
(S2):schwer	(F1) selten bis weniger häufig	(P2): kaum möglich	PL: d (S2-F1-P2)	
Bemerkung zur Bewertung nach EN 13849-1	Der geforderte Performance Level (PL <sub>r</sub> ) muss mindestens PL = d entsprechen			
<b>Bewertung mit Maßnahmen (Ausgangsrisiko) nach ISO/TR14121-2</b>				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S1): gering	(F1): selten	(O1): sehr gering	(A1): möglich	E: 1 (S1-F1-O1-A1)
Bemerkung zur Risikoeinschätzung	Durch technische Schutzmaßnahmen kann der Risikoindex von 5 auf 1 reduziert werden.			
Risiko hinreichend vermindert:	<input type="checkbox"/>	ja		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko vorhanden Unterweisung des Fachpersonals, Warnhinweise Angaben zu Restrisiken für Wartungs- und Montagearbeiten		

Tab. 5.3 Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch sich bewegende Teile, Quelle: Eigene Darstellung.

Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch schneidende Teile				
Gefährdung tritt auf	Schneiden oder Abschneiden			
Gefahrenstelle(n)	Rotierendes Werkzeug des Endeffektors am Roboterarm			
Gefahrenstelle/Lebensphase				
Gefahrenstelle	Rotierendes Werkzeug des Endeffektors am Roboterarm			
Lebensphase	Montage, Zusammenbau, Installation Einrichten, Einlernen, Programmieren Inbetriebnahme Betrieb, Normalbetrieb Reinigung, Instandhaltung			
Gefahrenbeschreibung	Gefährdung hervorgerufen durch rotierendes Werkzeug der Bearbeitungsspindel, Bediener kann durch Bewegung der am Roboterarm befestigten Spindel in den Gefahrenbereich kommen			
Betroffene Personen	Bediener, Techniker			
Risikoeinschätzung ohne Maßnahmen (Ursprungsrisiko) nach ISO/TR 14121-2				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S2): hoch	(F2): häufig	(O2): gering	(A2): unmöglich	E: 5 (S2-F2-O2-A2)
Maßnahmen	<input type="checkbox"/>	konstruktiv		
	<input checked="" type="checkbox"/>	technisch		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko		
Beschreibung der Maßnahmen	Anbringung einer überwiegend feststehend trennenden Schutzeinrichtung (Maschineneinhausung mit Schutzfenstern). Bei gelöstem Zustand der Schutzfenster für Wartungs- und Montagearbeiten sind diese als beweglich trennende Schutzeinrichtung zu betrachten. Daher erfolgt das Anbringen einer Positionserkennung (codierter Sicherheitsschalter) an den Schutzfenstern.			
Bewertung nach EN13849-1				
Schwere der Verletzung	Häufigkeit	Vermeidung	PL <sub>r</sub> (erforderlich)	
(S2): schwer	(F1) selten bis weniger häufig	(P2): kaum möglich	PL: d (S2-F1-P2)	
Bemerkung zur Bewertung nach EN 13849-1	Der geforderte Performance Level (PL <sub>r</sub> ) muss mindestens PL = d entsprechen			
Bewertung mit Maßnahmen (Ausgangsrisiko) nach ISO/TR14121-2				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S1): gering	(F1): häufig	(O1): sehr gering	(A1): möglich	E: 1 (S1-F1-O1-A1)
Bemerkung zur Risikoeinschätzung	Durch technische Schutzmaßnahmen kann der Risikoindex von 5 auf 1 reduziert werden.			
Risiko hinreichend vermindert:	<input type="checkbox"/>	ja		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko vorhanden Unterweisung des Fachpersonals, Warnhinweise Angaben zu Restrisiken für Wartungs- und Montagearbeiten		

Tab. 5.4 Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch schneidende Teile, Quelle: Eigene Darstellung.

<b>Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch rotierende Teile</b>				
Gefährdung tritt auf	Quetschen, Stoßen, Einziehen, Abschneiden			
Gefahrenstelle(n)	Bereich der Teileträgerübergabe der Beladungszone			
<b>Gefahrenstelle/Lebensphase</b>				
Gefahrenstelle	Bereich der Teileträgerübergabe der Beladungszone			
Lebensphase	Montage, Zusammenbau, Installation Einrichten, Einlernen, Programmieren Inbetriebnahme Betrieb, Normalbetrieb Umrüsten Reinigung, Instandhaltung			
Gefahrenbeschreibung	Gefährdung besteht durch schwenkende Teile der Beladungsgruppe und den darauf transportierten Teileträgern. Der Bediener kommt bei Materialübergabe in den Gefahrenbereich.			
Betroffene Personen	Maschinenbediener, Techniker			
<b>Risikoeinschätzung ohne Maßnahmen (Ursprungsrisiko) nach ISO/TR 14121-2</b>				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S2): hoch	(F2): häufig	(O2): gering	(A2): unmöglich	E: 5 (S2-F2-O2-A2)
Maßnahmen	<input type="checkbox"/>	konstruktiv		
	<input checked="" type="checkbox"/>	technisch		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko		
Beschreibung der Maßnahmen	Anbringung eines optoelektronischen Laserscanners unterhalb der Beladungsgruppe zur zweidimensionalen Flächenüberwachung. Einteilung der Umgebung vor der Beladungsgruppe in Sicherheits- und Warnzone. Das Eindringen in die Warnzone wird mit Leuchtmeldern angezeigt, beim Eindringen in die Sicherheitszone erfolgt der Bewegungsstopp der Beladungsgruppe.			
<b>Bewertung nach EN13849-1</b>				
Schwere der Verletzung	Häufigkeit	Vermeidung	PL <sub>r</sub> (erforderlich)	
(S2): schwer	(F2) häufig bis dauernd	(P2): kaum möglich	PL: e (S2-F2-P2)	
Bemerkung zur Bewertung nach EN 13849-1	Der geforderte Performance Level (PL <sub>r</sub> ) muss mindestens PL = e entsprechen			
<b>Bewertung mit Maßnahmen (Ausgangsrisiko) nach ISO/TR14121-2</b>				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S2): hoch	(F1): selten	(O1): sehr gering	(A1): möglich	E: 2 (S2-F1-O1-A1)
Bemerkung zur Risikoeinschätzung	Durch technische Schutzmaßnahmen kann der Risikoindex von 5 auf 2 reduziert werden.			
Risiko hinreichend vermindert:	<input type="checkbox"/>	ja		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko vorhanden Unterweisung des Fachpersonals, Warnhinweise Angabe zu Restrisiken im Betrieb		

Tab. 5.5 Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch rotierende Teile, Quelle: Eigene Darstellung.



Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch sich bewegende Teile				
Gefährdung tritt auf	Einstich, Stoß			
Gefahrenstelle(n)	Bereich der spanabhebenden Bearbeitung			
Gefahrenstelle/Lebensphase				
Gefahrenstelle	Bereich der spanabhebenden Bearbeitung			
Lebensphase	Montage, Zusammenbau, Installation Einrichten, Einlernen, Programmieren Inbetriebnahme Betrieb, Normalbetrieb Reinigung, Instandhaltung			
Gefahrenbeschreibung	Gefährdung wird hervorgerufen durch die beim Bearbeitungsprozess mit schnell rotierenden Werkzeugen eventuell umherfliegenden Teilen (Werkzeugbruch, etc.)			
Betroffene Personen	Bediener, Techniker			
Risikoeinschätzung ohne Maßnahmen (Ursprungsrisiko) nach ISO/TR 14121-2				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S2) : hoch	(F2):häufig	(O1): sehr gering	(A2): unmöglich	E: 4 (S2-F2-O1-A2)
Maßnahmen	<input type="checkbox"/>	konstruktiv		
	<input checked="" type="checkbox"/>	technisch		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko		
Beschreibung der Maßnahmen	Anbringung einer überwiegend feststehend trennenden Schutzeinrichtung (Maschineneinhausung mit Schutzfenstern). Bei gelöstem Zustand der Schutzfenster für Wartungs- und Montagearbeiten sind diese als beweglich trennende Schutzeinrichtung zu betrachten. Daher erfolgt das Anbringen einer Positionserkennung (codierter Sicherheitsschalter) an den Schutzfenstern.			
Bewertung nach EN13849-1				
Schwere der Verletzung	Häufigkeit	Vermeidung	PL <sub>r</sub> (erforderlich)	
(S2):schwer	(F1) selten bis weniger häufig	(P2): kaum möglich	PL: d (S2-F1-P2)	
Bemerkung zur Bewertung nach EN 13849-1	Der geforderte Performance Level (Plr) muss mindestens PI = d entsprechen			
Bewertung mit Maßnahmen (Ausgangsrisiko) nach ISO/TR14121-2				
Schweregrad	Aufenthaltsdauer	Eintrittswahrs.	Abwendung	Ergebnis
(S1): gering	(F1): selten	(O1): sehr gering	(A1): möglich	E:1 (S1-F1-O1-A1)
Bemerkung zur Risikoeinschätzung	Durch technische Schutzmaßnahmen kann der Risikoindex von 4 auf 1 reduziert werden.			
Risiko hinreichend vermindert:	<input type="checkbox"/>	ja		
	<input checked="" type="checkbox"/>	Restrisiko vorhanden Unterweisung des Fachpersonals, Warnhinweise Angaben zu Restrisiken für Wartungs- und Montagearbeiten		

Tab. 5.6 Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch sich bewegende Teile, Quelle: Eigene Darstellung.

## 5.9 Steuerungsarchitektur

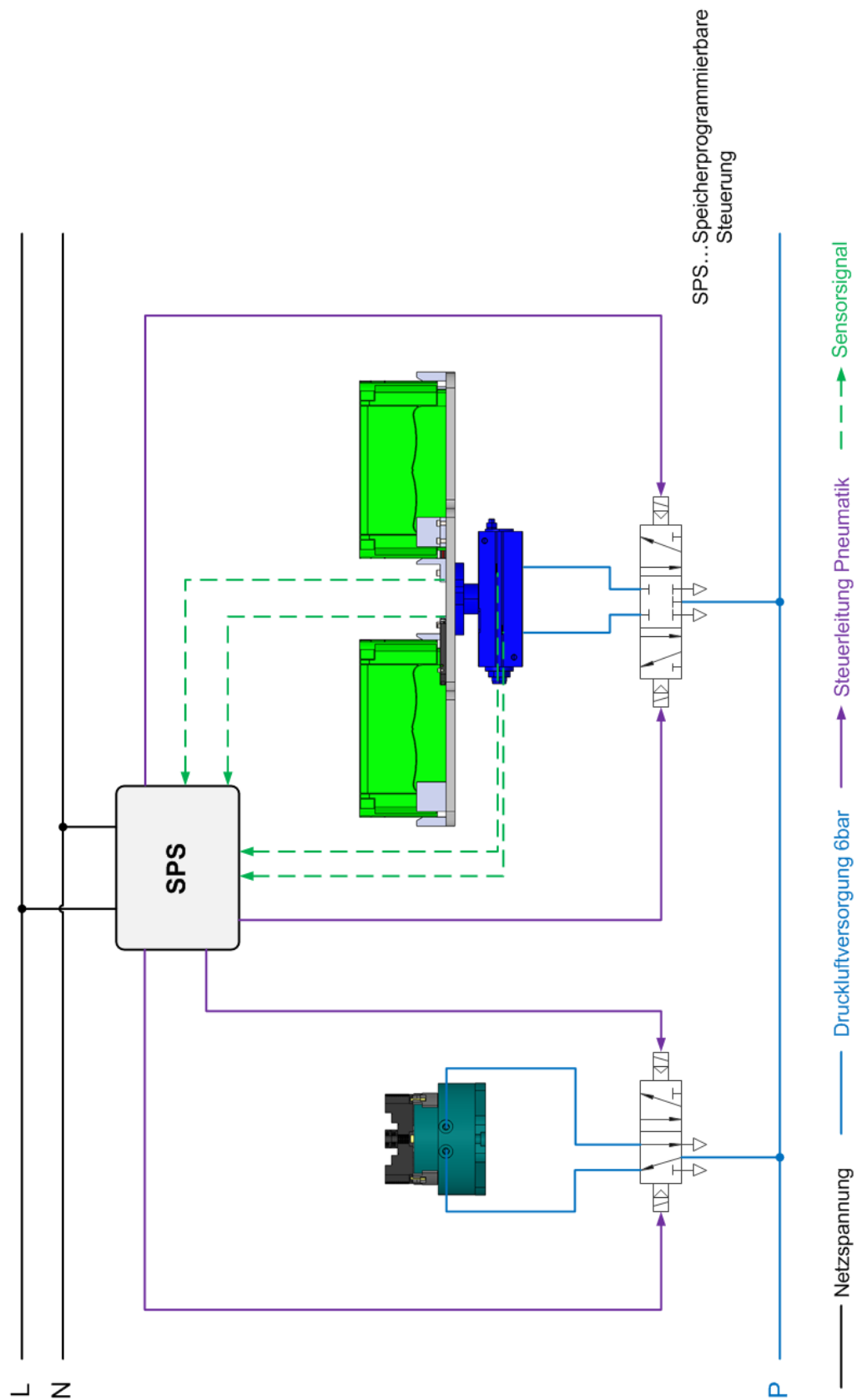


Abb. 5.33 Steuerungsstruktur des Werkstückspannsystems und der Beladungsgruppe, Quelle: Eigene Darstellung.



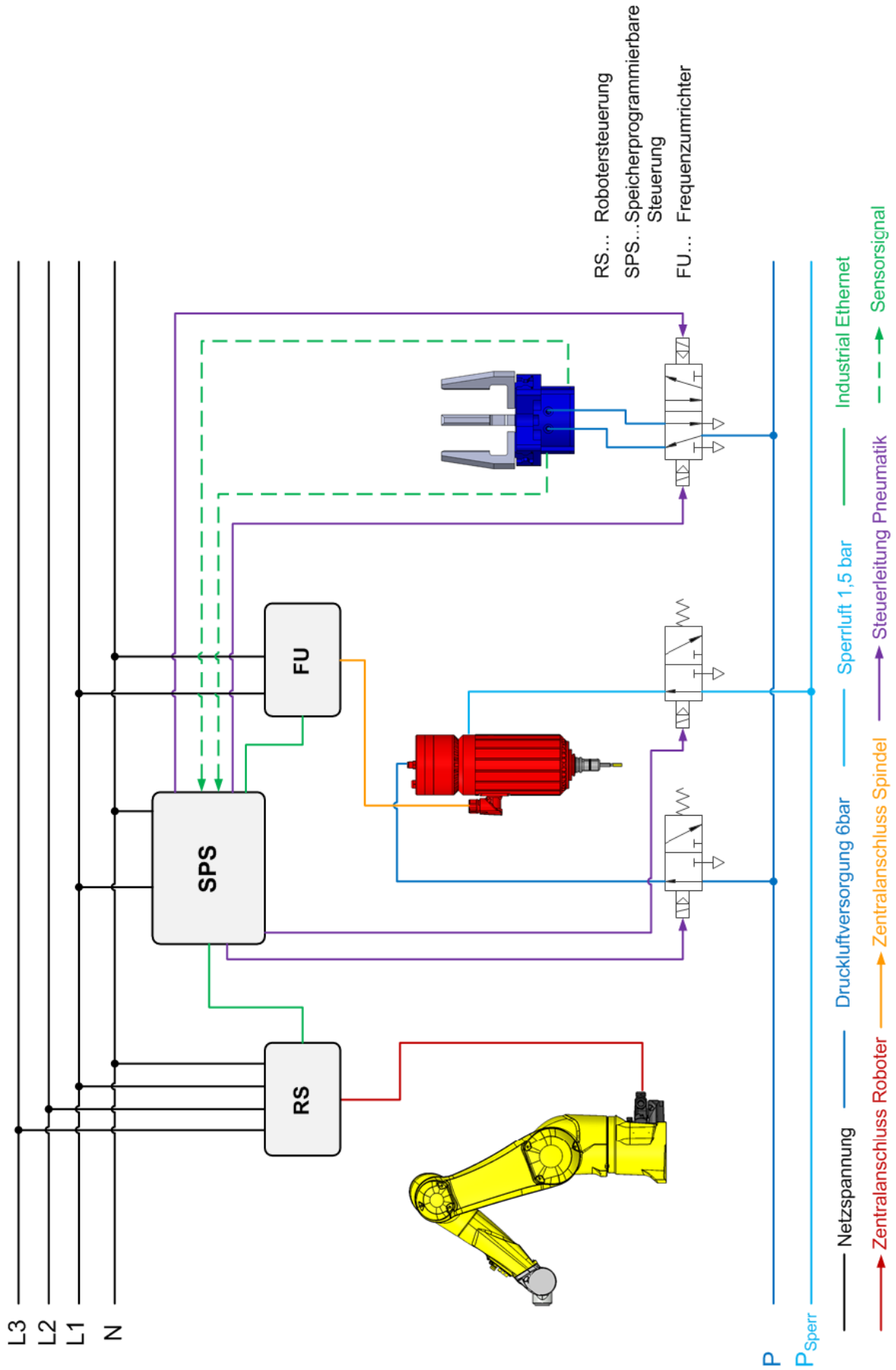


Abb. 5.34 Steuerungsstruktur der Roboterbaugruppe, Quelle: Eigene Darstellung.

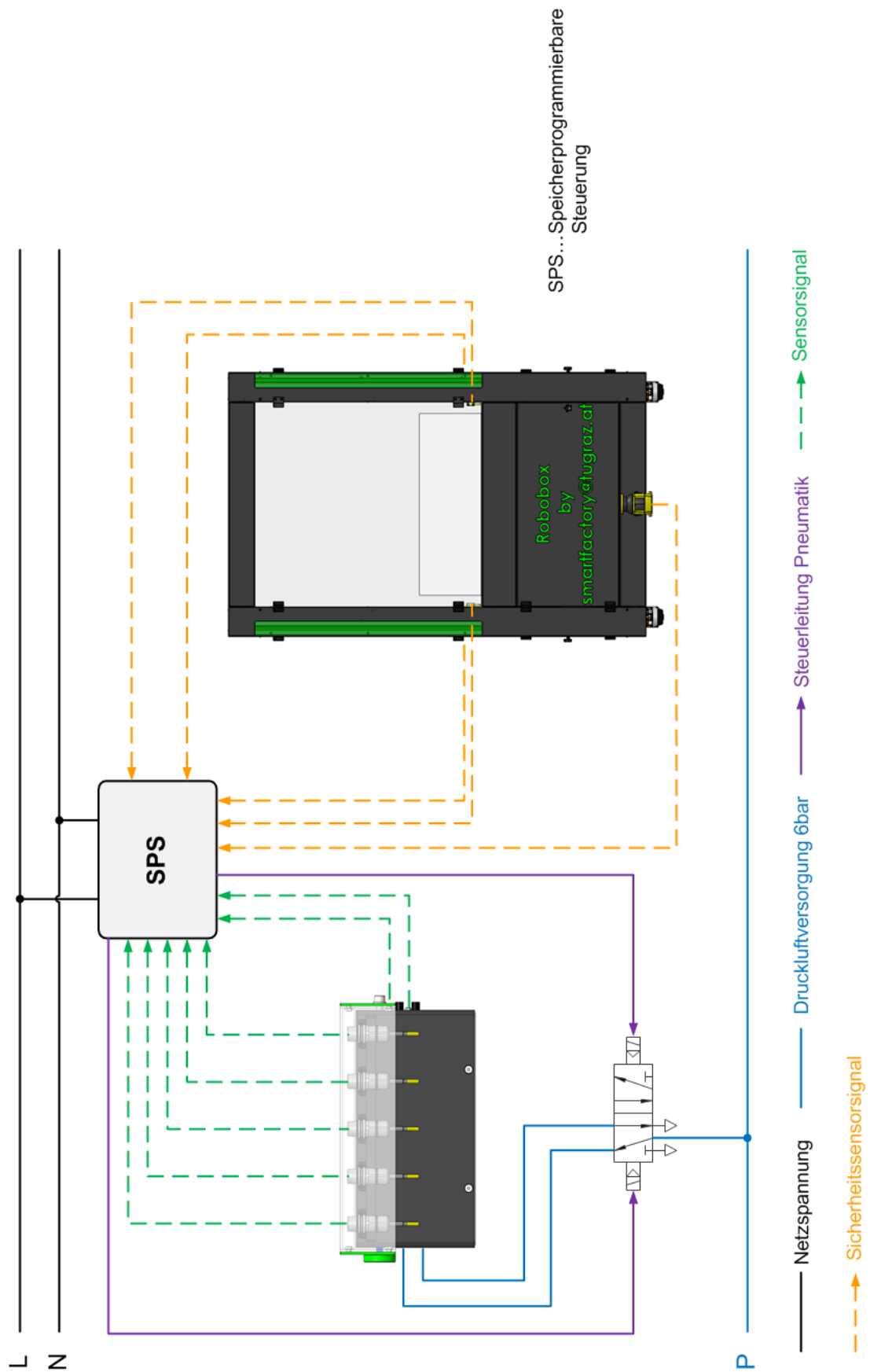


Abb. 5.35 Steuerungsstruktur des Werkzeugwechslers und der Sicherheitszelle, Quelle: Eigene Darstellung.

Die Fertigimplementierung der speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) und der restlichen steuerungstechnischen Komponenten wird entsprechend der Abbildungen 5.33 – 5.35 durch das Institut für Fertigungstechnik vom Institutsmitarbeiter Hrn. Pichler M. vorgenommen.

Die SPS sowie die sicherheitstechnischen Komponenten, siehe Abb. 5.29, befinden sich aktuell in der Bestellphase und werden vom Hrn. Pichler M. gemäß den Anforderungen der Roboterzelle ausgelegt. Als Grundlage bei der Auswahl geeigneter Sicherheitskomponenten werden die in den Risikobeurteilungen Tab. 5.3 – Tab. 5.6 ermittelten erforderlichen Performance Level verwendet.

## 6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Anforderungen an Produktionssysteme unterliegen einem starken Wandel. Getrieben durch die aktuellen Entwicklungen der Variantenvielfalt und der Produktindividualisierung, steht als Reaktion auch die Integration von kleineren, agileren Produktionselementen im stärkeren Fokus. Ebenso Produktionselemente die auf das Wertschöpfungspotenzial der robotergestützten Zerspanung nutzend zurückgreifen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden die verschiedenen Stadien des Entstehungsprozesses einer Fertigungszelle für die robotergestützte Zerspanung vorgezeigt. Am Beginn der Arbeit stand das Definieren und Evaluieren der Anforderungen, gefolgt von dem Ausarbeiten von Lösungskonzepten. Durch die Berechnungen von Systemkomponenten und einem iterativen Verbesserungsprozess der Konstruktionsentwürfe wurde das virtuelle Modell bis zur physischen Umsetzbarkeit weiterentwickelt. Nach dem Beschaffungsprozess erfolgte die Montage zu einem physischen Endprodukt, siehe Abb. 6.1, Abb. 6.2 sowie den Anhang Kapitel 8.

Bei der Entwicklung wurde neben der einfachen Umrüstbarkeit und Adaptierfähigkeit zu erweiterbaren Systemen der geplanten Roboterzelle besonders auf eine hohe Funktionalität Wert gelegt. Übergeordnet hatte die Ausführung der sicherheitstechnischen Gestaltungsaspekte hohe Priorität. Als Fertigungsbaustein soll die Roboterzelle zukünftig in den Produktionsprozess der *smartfactory@tugraz* eingegliedert werden und ebenso zu weiterführenden Forschungsversuchen in der robotergestützten Zerspanung bereitstehen.

Die nächsten Schritte, welche am Institut für Fertigungstechnik durchgeführt werden, umfassen die restliche Implementierung der Steuerungskomponenten und die Fertiginbetriebnahme der Roboterzelle, um erste Bearbeitungsversuche unter Realbedingungen durchzuführen. Nach Abschluss der Bearbeitungsversuche kann durch Messungen der Zerspanungsergebnisse der bearbeiteten Produkte die Leistungsfähigkeit der Roboterzelle bezüglich der erzielbaren Genauigkeiten ermittelt werden.

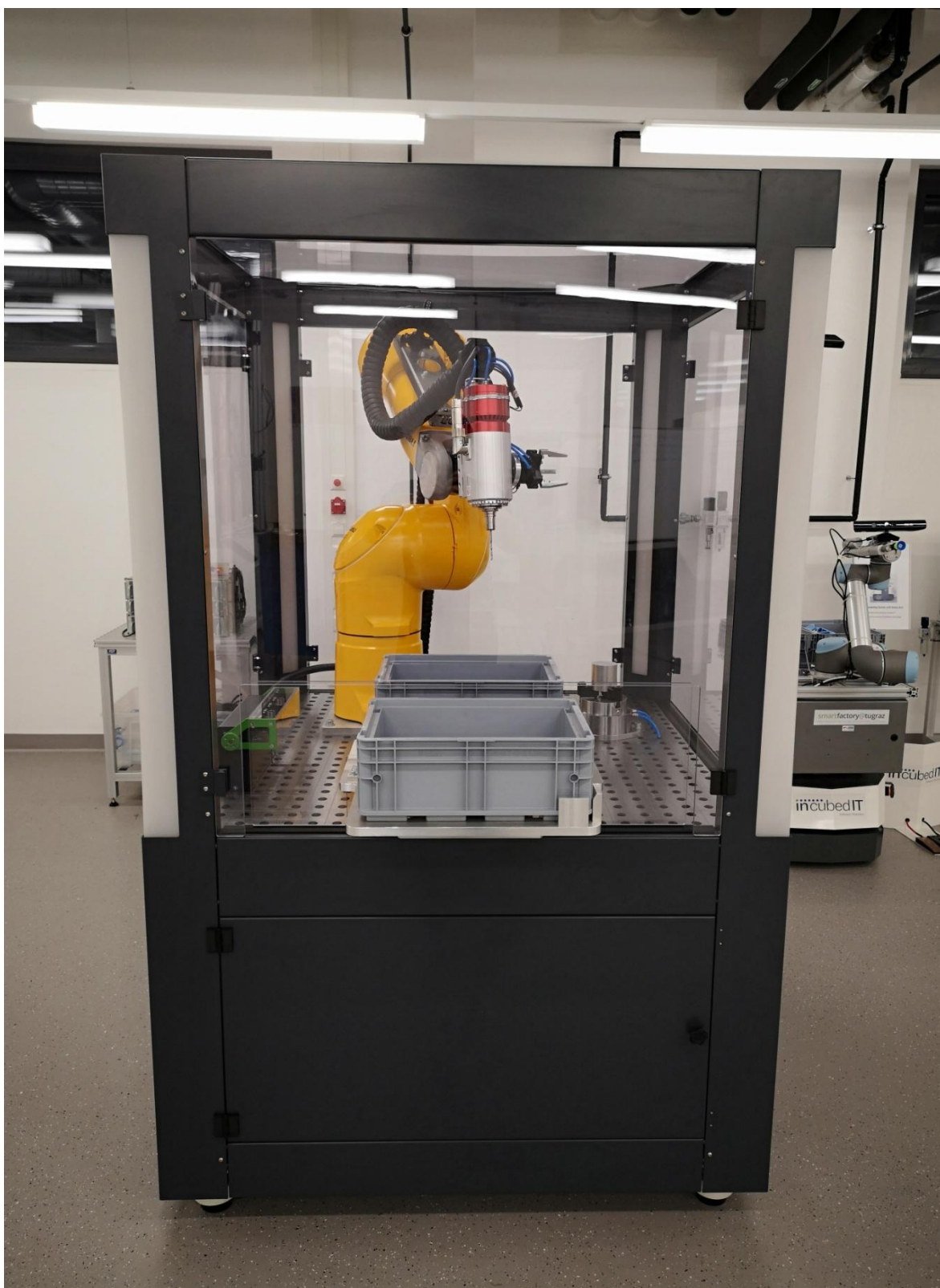


Abb. 6.1 Fertige Roboterzelle nach abgeschlossener Endmontage I, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. 6.2 Fertige Roboterzelle nach abgeschlossener Endmontage II, Quelle: Eigene Darstellung.

Weitere Forschungsfragen befassen sich mit der Genauigkeitssteigerung des robotergestützten Zerspanungsprozesses. Aus diesem Grund müssen die Ursachen der Abweichungen ermittelt und Methoden zur Fehlerkompensation entwickelt werden. Beim Zerspanungsprozess haben mitunter die Bearbeitungsstrategie und die gewählten Schnittparameter Einfluss auf die Genauigkeitswerte der bearbeiteten Endprodukte. Demnach müssen die Bearbeitungsstrategien untersucht, auf Tauglichkeit überprüft und gegebenenfalls adaptiert werden. Durch Kalibrierung des Industrieroboters und der Vermessung der Bahnbewegungen in der Fertigungszelle können unter Umständen die Fehlerquellen erkannt und reduziert werden.

Ein weiterführendes Thema beschäftigt sich mit der Einbindung und Verwendung von CAD/CAM basierenden Offline-Programmiersystemen, wie etwa der CAD/CAM-Software *Robotmaster*. Der Nutzen beim Einsatz eines solchen Systems ist die Reduzierung des Programmieraufwandes, da auf Basis von CAD Modellen der zu fertigenden Endprodukte die erforderliche Bahnplanung durch die Software errechnet wird und nicht durch den Maschinenbediener manuell programmiert werden muss. Die Vorzüge dieser Programmiervariante sind vor allem bei komplexeren Bearbeitungsgeometrien und Bewegungsabläufen deutlich.

Überdies wurde bereits die Aufrüstung der Roboterzelle von einer manuellen Beladung hin zu einer automatischen Beladung durch frei navigierbare fahrerlose Transportsysteme (FTS) ins Auge gefasst. Um dieses Vorhaben zu konkretisieren, sind Versuche angedacht, in welchen validiert wird, ob und mit welchen Strategien sich die standardisierten Kleinladungsträger automatisch und prozesssicher zuführen lassen und wie der Prozessablauf der robotergestützten Fertigungszelle dahingehend angepasst werden könnte.

## 7 Verzeichnisse

### 7.1 Literaturverzeichnis

Apprich, Thomas; Brenner, Josef; Dambacher, Michael; et. al. (2015): *Tabellenbuch für Zerspantechnik*, Verlag Europa-Lehrmittel Nourney, Vollmer, Haan-Gruiten

Brecher, Christian; Weck, Manfred (2017): *Werkzeugmaschinen Fertigungssysteme: Konstruktion, Berechnung und messtechnische Beurteilung*, 9.Auflage, Springer Vieweg, Berlin Heidelberg

Fachbereich Holz und Metall der DGUV (Hrsg.) (2018): *DGUV Information - Schutzscheiben an Werkzeugmaschinen der Metallbearbeitung*  
[https://www.bghm.de/fileadmin/user\\_upload/Arbeitsschuetzer/Praxishilfen/Fachbereichs-Informationenblaetter/040\\_Schutzscheiben.pdf](https://www.bghm.de/fileadmin/user_upload/Arbeitsschuetzer/Praxishilfen/Fachbereichs-Informationenblaetter/040_Schutzscheiben.pdf) [Stand 06.11.2018]

Frischherz, Adolf (2006): *Tabellenbuch Metalltechnik*, 7. Auflage, Jugend & Volk Verlag, Wien

Gehlen, Patrick; Siemens Aktiengesellschaft (Hrsg.) (2010): *Funktionale Sicherheit von Maschinen und Anlagen: Umsetzung der Europäischen Maschinenrichtlinie in der Praxis*, 2. Auflage, Publicis Publishing, Erlangen

Gerke, Wolfgang (2014): *Technische Assistenzsysteme - vom Industrieroboter zum Roboterassistenten*, Walter de Gruyter GmbH , Berlin München Boston

Gevatter, Hans-Jürgen; Grünhaupt Ulrich (Hrsg.) (2006): *Handbuch der Mess- und Automatisierungstechnik in der Produktion*, 2.Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Haas, Franz (2016): *Industrieroboter - VO 301.032*, Institut für Fertigungstechnik Technische Universität Graz, ohne Verlagsangaben



Leuze electronic GmbH + Co. KG (Hrsg.) (o.J.): 2.4.1 EN ISO 13849-1 „Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze“

[https://leuze.com/de/deutschland/loesungen/anwenderwissen/arbeitsicherheit/2\\_maschinensicherheit\\_in\\_der\\_eu/2\\_4\\_1\\_en\\_iso\\_13849\\_1\\_teil\\_1\\_allgemeine\\_gestaltungsleitsaetze/2\\_4\\_1\\_en\\_iso\\_13849\\_1\\_\\_teil\\_1\\_\\_allgemeine\\_gestaltungsleitsaetze.php](https://leuze.com/de/deutschland/loesungen/anwenderwissen/arbeitsicherheit/2_maschinensicherheit_in_der_eu/2_4_1_en_iso_13849_1_teil_1_allgemeine_gestaltungsleitsaetze/2_4_1_en_iso_13849_1__teil_1__allgemeine_gestaltungsleitsaetze.php) [06.11.2018]

Pichler, Rudolf (2017): *Forschungsraum smartfactory@tugraz – Die Sichtbarmachung einer agilen Fertigung*, in: WINGbusiness, Heft 3/2017, S.28-31

Schenk, Christian; Decker, Christian; Gruber, Harald; IVSS Sektion Metall (2008): *Leitfaden für die Gefährdungsbeurteilung in Klein- und Mittelbetrieben: Lärm - Ermittlung und Bewertung von Gefährdungen; Festlegen von Maßnahmen*, Verlag Technik & Information e.K, Bochum

Schneider, Ulrich Johannes; Bauernhansl, Thomas (Hrsg.); Verl, Alexander (Hrsg.); Westkämper, Engelbert (Hrsg.) (2017): *Stuttgarter Beiträge zur Produktionsforschung: Untersuchung von modellbasierter Fehlerkompensation und erweiterter Positionsregelung zur Genauigkeitssteigerung von roboterbasierten Zerspanungsprozesse*, Fraunhofer Verlag, Stuttgart

SICK AG (Hrsg) (o.J.): *Funktionale Sicherheit bei der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK)* <https://www.sick.com/de/de/unsere-kompetenz-in-maschinensicherheit/mensch-roboter-kollaboration/w/human-robot-collaboration/> [Stand 06.11.2018]

Weck, Manfred; Brecher, Christian (2006): *Werkzeugmaschinen 1 : Maschinenarten und Anwendungsbereiche*, 6. Auflage, Springer-Verlag, Berlin Heidelberg

Wenz, Michael (2008): *Automatische Konfiguration der Bewegungssteuerung von Industrierobotern*, Logos Verlag Berlin GmbH, Berlin

## 7.2 Herstellerverzeichnis

Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (2018): *Chopper 1500 HSK S5A - Schnellfrequenzspindel*, ohne Verlagsangaben, Ober-Mörlen

Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (o.J.): *Chopper 1500 HSK S5A*  
<https://www.alfredjaeger.de/de/chopper/Chopper-1500-HSK-S5A.html> [Stand 06.11.2018]

Hoffman Group (Hrsg.) (2017): *Zerspanung/Spanntechnik*, ohne Verlagsangaben, München

Igus GmbH (Hrsg.) (2017): *e-ketten und e-kettensysteme*, ohne Verlagsangaben, Köln

Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH (Hrsg.) (o.J.): *Gewinde-Einsätze für Metalle*, ohne Verlagsangaben, Amberg

Padberg + Palatec Logistic GmbH (Hrsg.) (o.J.): *rollbare Maschinenfüße - Traglast: 750 kg*  
<https://www.padberg.de/shop/transportwagen/rollbare-maschinenfuesse-106956-750-kg.html> [Stand 06.11.2018]

Schunk GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2015): *Tribos Polygonspanntechnik: Präzisionswerkzeughalter für die Mikrozerspanung*, ohne Verlagsangaben, Lauffen/Necker

Schunk GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2018a): *Werkzeughalter*, ohne Verlagsangaben, Lauffen/Necker

Schunk GmbH & Co. KG (Hrsg.) (2018b): *Stationäre Spanntechnik*, ohne Verlagsangaben, Mengen

Stäubli International AG (Hrsg.) (2017): *Roboterarm - Baureihe TX2 90*, ohne Verlagsangaben, Pfäffikon

Stäubli International AG (Hrsg.) (2018): *Produktübersicht : Robotics Man and Maschine*, ohne Verlagsangaben, Pfäffikon

Zimmer Group (Hrsg.) (2017): *Handhabungstechnik 1*, ohne Verlagsangaben, Rheinau

## 7.3 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1.1	Methodischer Entstehungsprozess, Quelle: Eigene Darstellung.....	2
Abb. 2.1	Einteilung der Handhabungsgeräte, Quelle: Haas (2016), S. 3. ....	4
Abb. 2.2	Grafische Elemente zum Abstrahieren von Roboterachsen nach VDI 2861, Quelle: Gerke (2014), S. 147.....	5
Abb. 2.3	Darstellung von unterschiedlichen Roboterachskonfigurationen mit dem zugehörigen Arbeitsraum, Quelle: Gevatter/Grünhaupt (Hrsg.) (2006), S. 744.....	6
Abb. 2.4	Konfiguration der Nebenachsen , Quelle: Weck/Brecher (2006), S. 546 (leicht modifiziert). ....	7
Abb. 2.5	Darstellung der sechs Achsen eines vertikalen Knickarmroboters: Quelle: Gerke (2014), S. 150. ....	7
Abb. 2.6	Struktur des Antriebstranges einer servomotorischen Bewegungsachse, Quelle: Gevatter/Grünhaupt (Hrsg.) (2006), S. 749.....	8
Abb. 2.7	Unterschied zwischen Absolut- und Wiederholgenauigkeit beim Industrieroboter, Quelle: Gerke (2014), S. 155. ....	9
Abb. 2.8	TX2-90 L, Quelle: Stäubli International AG (Hrsg.) (2018), S. 3 (leicht modifiziert). ....	10
Abb. 2.9	Aufbau und Abmessungen der Bewegungsachsen des Roboterarms TX2-90 L, Quelle: Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 9/28 (leicht modifiziert). ....	11
Abb. 3.1	Offenes Zellenkonzeptes mit Sicherheitszonen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	13
Abb. 3.2	Geschlossenes Zellenkonzept mit Schutzeinhausung, Quelle: Eigene Darstellung. ....	14
Abb. 3.3	Bewegungsvariante mit Spindelaufbau am Roboter, Quelle: Eigene Darstellung. ....	16
Abb. 3.4	Bewegungsvariante mit ortsfester Bearbeitungsspindel, Quelle: Eigene Darstellung. ....	17
Abb. 3.5	Raumbedarf der Vorschubvarianten Spindelaufbau am Roboterarm (links) und ortsfester Spindelaufbau (rechts), Quelle: Eigene Darstellung.....	18
Abb. 3.6	Translatorische Beladungsvariante, Quelle: Eigene Darstellung. ....	19
Abb. 3.7	Rotatorische Beladungsvariante, Quelle: Eigene Darstellung. ....	20
Abb. 3.8	Roboter mit Multieffektor, Quelle: Eigene Darstellung.....	22
Abb. 3.9	Roboterarm mit wechselbaren Monoeffektoren, Quelle: Eigene Darstellung. ....	23
Abb. 4.1	Zerspankraftkomponenten beim Fräsen und Bohren, Quelle: Apprich u.a. (2015), S. 205 (leicht modifiziert).....	25
Abb. 4.2	Spanungsquerschnitt für Bohren und Fräsen, Apprich u.a. (2015), S. 206 (leicht modifiziert). ....	26
Abb. 4.3	Werkzeugdatenblatt des 5 mm VHM-Schrupfräasers, Quelle: Hoffmann Group (Hrsg.), S. 348 (leicht modifiziert). ....	27

Abb. 4.4	Werkzeugdatenblatt des 3 mm VHM-Bohrers, Quelle: Hoffmann Group (Hrsg.), S. 97 (leicht modifiziert).....	30
Abb. 4.5	Abstraktionsmodell der drehenden Massen, Quelle: Eigene Darstellung. .	34
Abb. 4.6	Kräfte-situation beim Greifen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	36
Abb. 5.1	Hauptbaugruppen der Roboterzelle, Quelle: Eigene Darstellung.....	40
Abb. 5.2	Aufspanntisch, Quelle: Eigene Darstellung. ....	41
Abb. 5.3	Roboterbaugruppe, Quelle: Eigene Darstellung.....	43
Abb. 5.4	Arbeitsraum TX2-90 L, Quelle: Staubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 32 (leicht modifiziert). ....	44
Abb. 5.5	Abstraktion des Endeffektors, Quelle: Eigene Darstellung. ....	45
Abb. 5.6	Multi-effektor in Rückansicht (links) und Vorderansicht (rechts), Quelle: Eigene Darstellung. ....	46
Abb. 5.7	Leistungsdiagramm der Bearbeitungsspindel mit dargestellten Betriebszuständen, Quelle: Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018] (leicht modifiziert). ....	47
Abb. 5.8	Abmessungen Chopper 1500 HSK S5A, Quelle: Alfred Jäger GmbH (Hrsg.) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018]. ....	48
Abb. 5.9	Bauformenübersicht von HSK-Aufnahmen nach DIN 69893, Quelle: Weck/Brecher (2006), S. 481. ....	50
Abb. 5.10	Spannvorgang von Werkzeugen beim TRIBOS-RM Polygonspannfutter, Quelle: Schunk (Hrsg.) (2014), S. 17. ....	50
Abb. 5.11	Gegenüberstellung von Schraubverbindungen mit und ohne Gewindeeinsatz , Quelle: Kerb-Konus-Vertriebs-GmbH (Hrsg.) (o.J.), S. 5. ....	51
Abb. 5.12	Greifkraftdiagramm GPD5006-NC ,Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017.), S. 304 (leicht modifiziert). ....	52
Abb. 5.13	Aufbau des Dreibacken- Zentrischgreifers GPD 5006-NC im Schnitt, Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017.), S. 295. ....	53
Abb. 5.14	Energiekette Triflex R Serie TRE, Quelle: Igus GmbH (Hrsg.) (2017), S. 739.....	54
Abb. 5.15	Anordnung der Energiekettenhalter, Quelle: Eigene Darstellung.....	55
Abb. 5.16	Aufbau der Beladungsgruppe, Quelle: Eigene Darstellung. ....	56
Abb. 5.17	Leistungsdiagramm SF-125-180N-C, Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017), S. 583 (leicht modifiziert). ....	57
Abb. 5.18	Aufbau der Flachschenkelheit SF125-180N-C im Schnitt, Quelle: Zimmer Group (Hrsg.) (2017), S. 583.....	58
Abb. 5.19	Außenansicht der Maschineneinhausung, Quelle: Eigene Darstellung.....	60
Abb. 5.20	Empfohlene Farbkennzeichnung von Leuchtmeldern und Warnleuchten nach EN 60204-1, Quelle: Gehlen (2010), S. 118.....	61
Abb. 5.21	Eckkonstruktion im Detailschnitt I, Quelle: Eigene Darstellung. ....	63
Abb. 5.22	Eckkonstruktion im Detailschnitt II, Quelle: Eigene Darstellung. ....	64
Abb. 5.23	schematischer Bewegungsablauf beim Werkzeugwechsel, Quelle: Eigene Darstellung. ....	65

Abb. 5.24	Werkzeugwechselstation in Vorderansicht (oben) und Rückansicht (unten), Quelle: Eigene Darstellung.....	66
Abb. 5.25	Werkzeugwechselstation bei geöffnetem Deckelblech, Quelle: Eigene Darstellung. ....	67
Abb. 5.26	geschlossener und offener Zustand der Schutzhaube, Quelle: Eigene Darstellung. ....	67
Abb. 5.27	Spannsituation des Werkstücks im pneumatischen Spannfutter, Quelle: Eigene Darstellung. ....	68
Abb. 5.28	Hauptabmessungen der Roboterzelle, Quelle: Eigene Darstellung. ....	69
Abb. 5.29	Anordnung der sicherheitstechnischen Komponenten, Quelle: Eigene Darstellung. ....	70
Abb. 5.30	Risikobeurteilung nach EN ISO 12100:2010, Quelle: Brecher/Weck (2017), S. 443. ....	72
Abb. 5.31	Risikograph nach ISO/TR 14121-2, Quelle: Brecher/Weck (2017), S. 446. .....	73
Abb. 5.32	Risikograf zur Ermittlung des Performance Levels nach EN 13849-1, Quelle Leuze electronic GmbH + Co. KG (Hrsg.) (o.J.), Onlinequelle [06.11.2018]. .....	73
Abb. 5.33	Steuerungsstruktur des Werkstückspannsystems und der Beladungsgruppe, Quelle: Eigene Darstellung.....	78
Abb. 5.34	Steuerungsstruktur der Roboterbaugruppe, Quelle: Eigene Darstellung. ..	79
Abb. 5.35	Steuerungsstruktur des Werkzeugwechslers und der Sicherheitszelle, Quelle: Eigene Darstellung.....	80
Abb. 6.1	Fertige Roboterzelle nach abgeschlossener Endmontage I, Quelle: Eigene Darstellung. ....	83
Abb. 6.2	Fertige Roboterzelle nach abgeschlossener Endmontage II, Quelle: Eigene Darstellung. ....	84

## 7.4 Tabellenverzeichnis

Tab. 1.1	Anforderungsliste, Quelle: Eigene Darstellung.....	3
Tab. 2.1	Datenblatt wichtiger technische Merkmale, Quelle: in Anlehnung an Stäubli International AG (Hrsg.) (2017), S. 12.....	10
Tab. 5.1	Auslöse- und Grenzwerte der Schallemission, Quelle: In Anlehnung an Schenk u.a. (2008), S. 16.....	59
Tab. 5.2	Maschinenzustände und erforderliche Bedienerhandlungen, Quelle: Eigene Darstellung. ....	62
Tab. 5.3	Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch sich bewegende Teile, Quelle: Eigene Darstellung. ....	74
Tab. 5.4	Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch schneidende Teile, Quelle: Eigene Darstellung.....	75
Tab. 5.5	Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch rotierende Teile, Quelle: Eigene Darstellung.....	76
Tab. 5.6	Risikobeurteilung der mechanischen Gefährdung durch sich bewegende Teile, Quelle: Eigene Darstellung. ....	77

## 8 Anhang

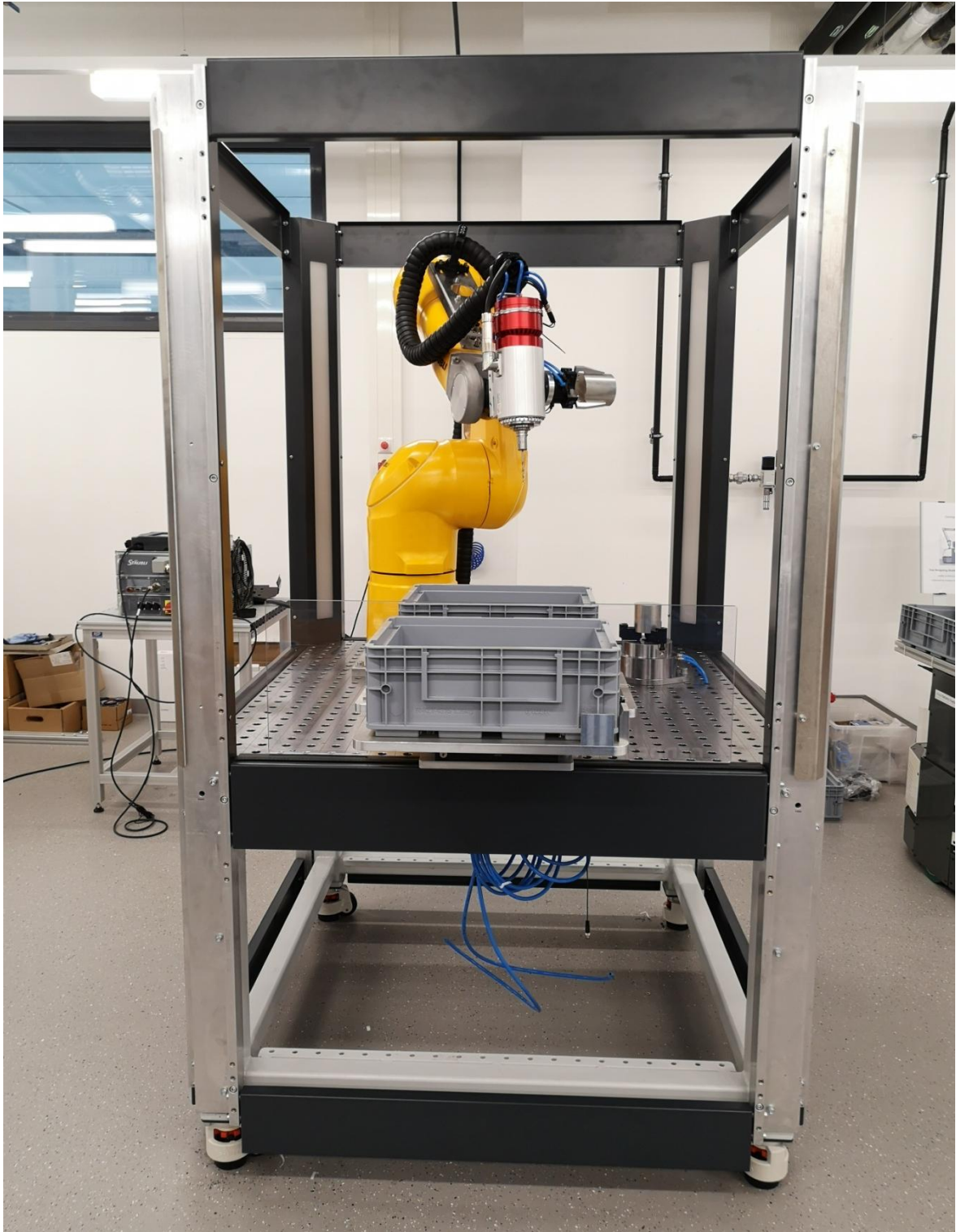


Abb. A 1 Maschineneinhausung im Bau, Quelle: Eigene Darstellung.



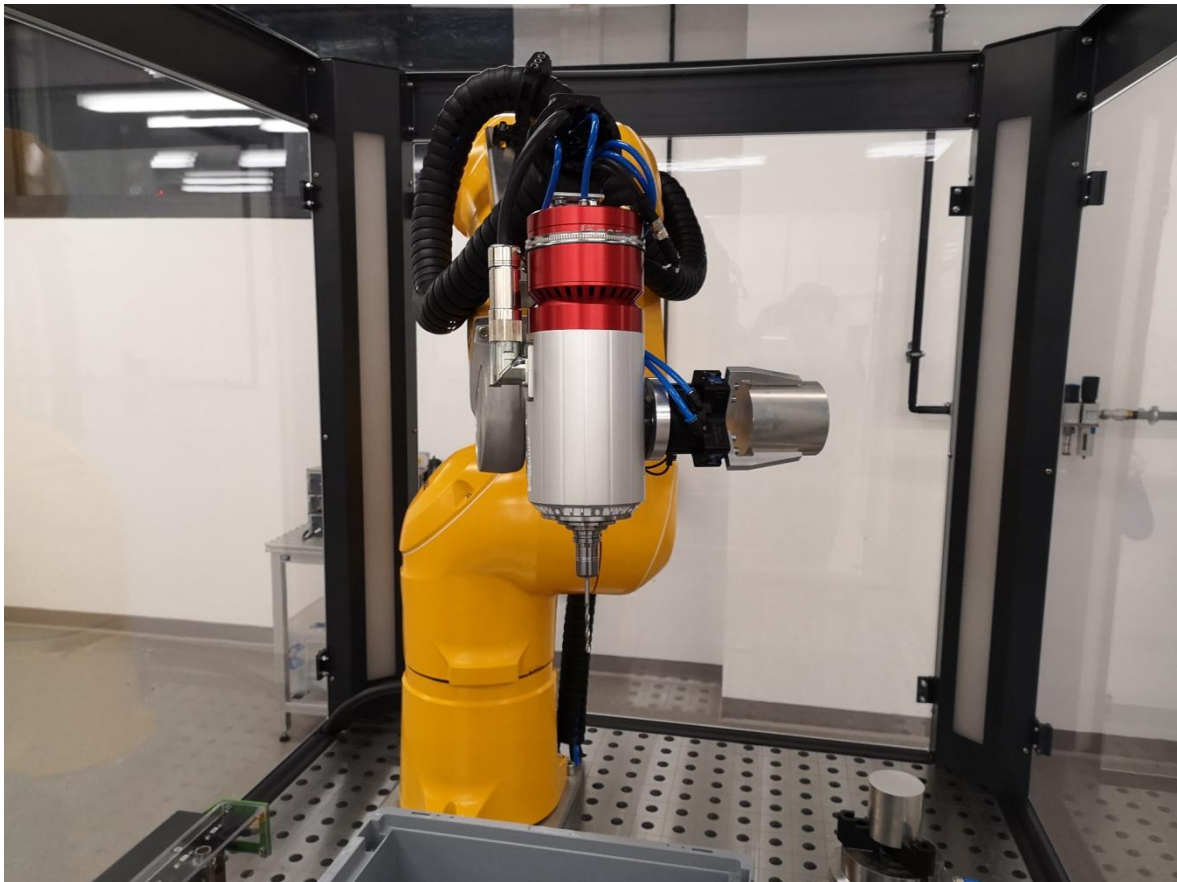


Abb. A 2 Multieffektor mit gespanntem Werkstück, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 3 Multieffektor I, Quelle: Eigene Darstellung.

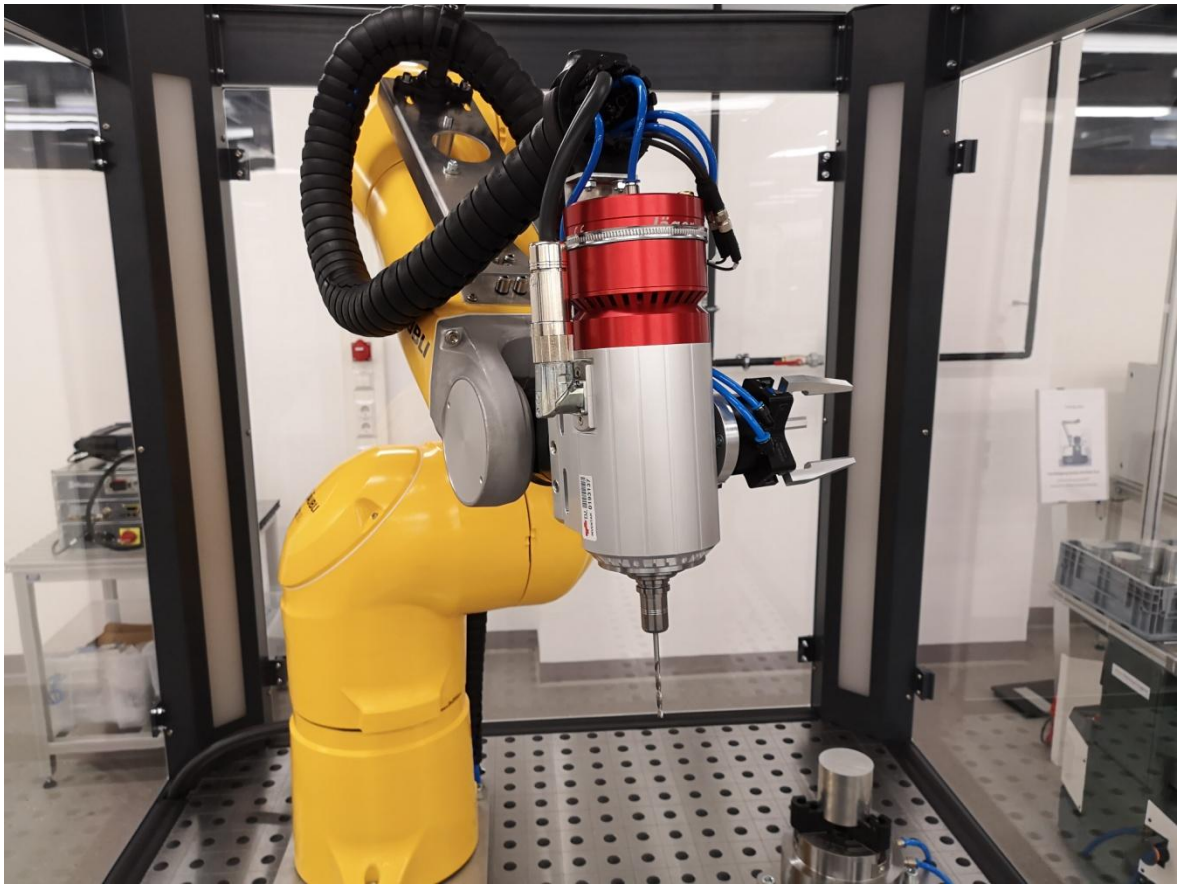


Abb. A 4 Roboterbaugruppe, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 5 Roboterbaugruppe II, Quelle: Eigene Darstellung.





Abb. A 6 Multieffektor II, Quelle: Eigene Darstellung.

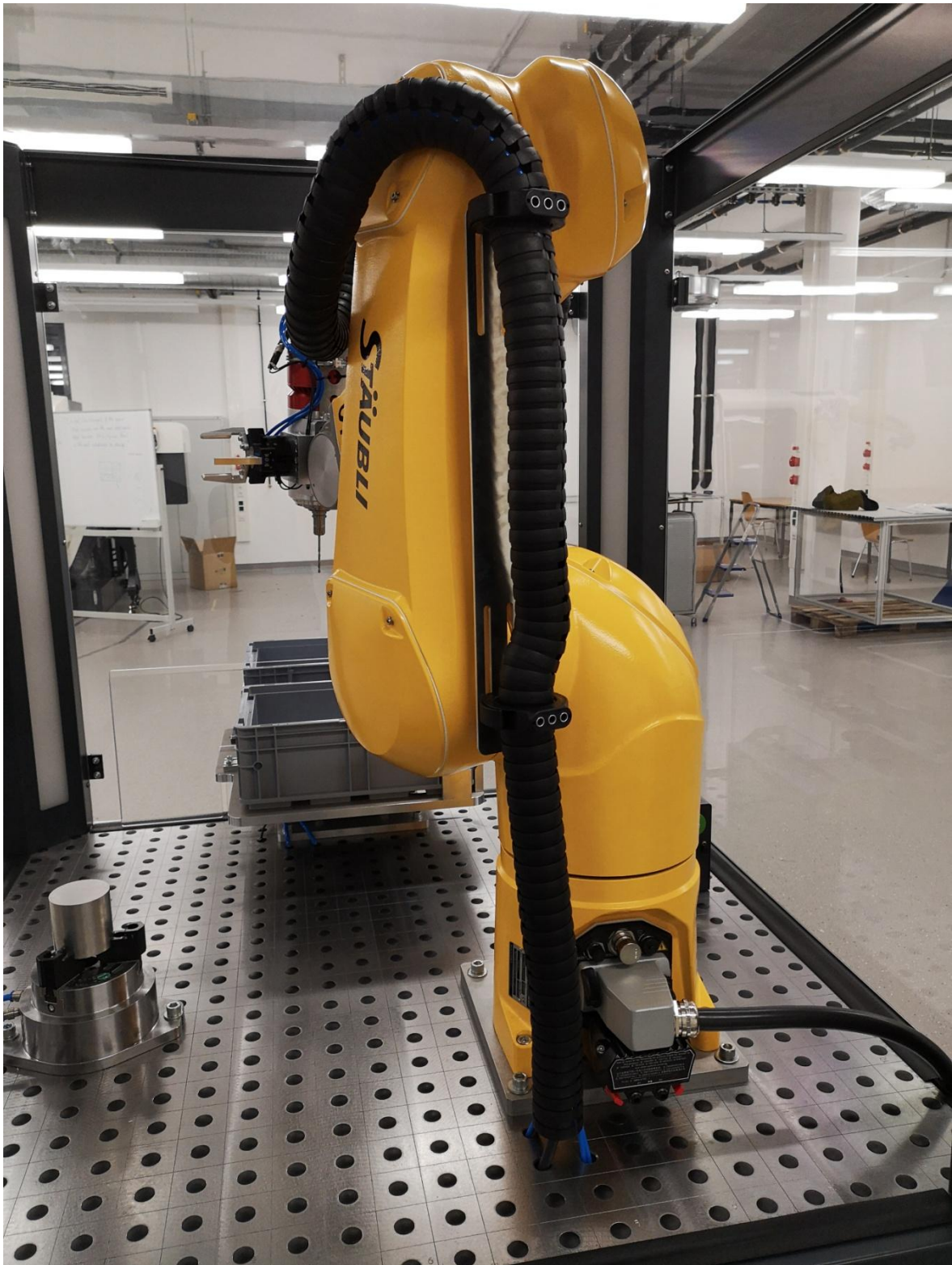


Abb. A 7 Leitungszuführung der Energiekette, Quelle: Eigene Darstellung.



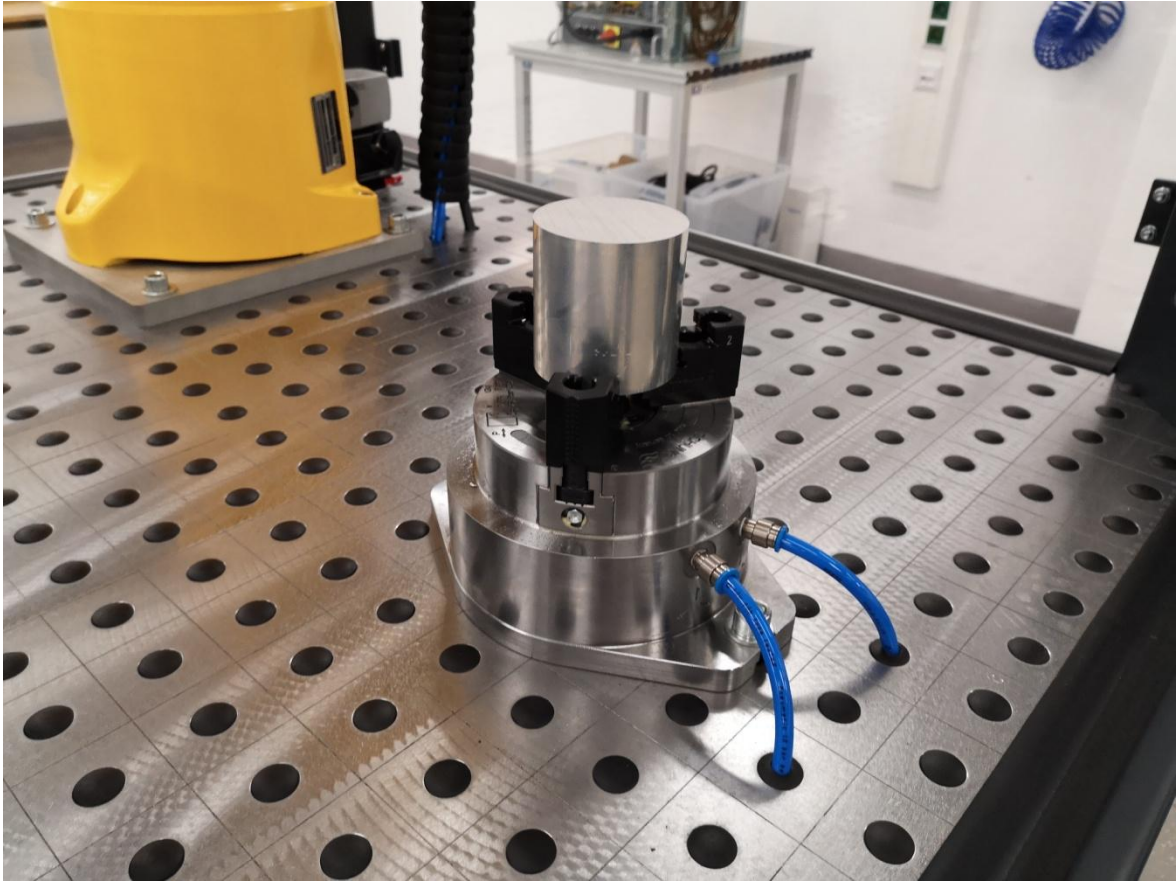


Abb. A 8 Werkstückspannsystem mit gespanntem Werkstück, Quelle: Eigene Darstellung.

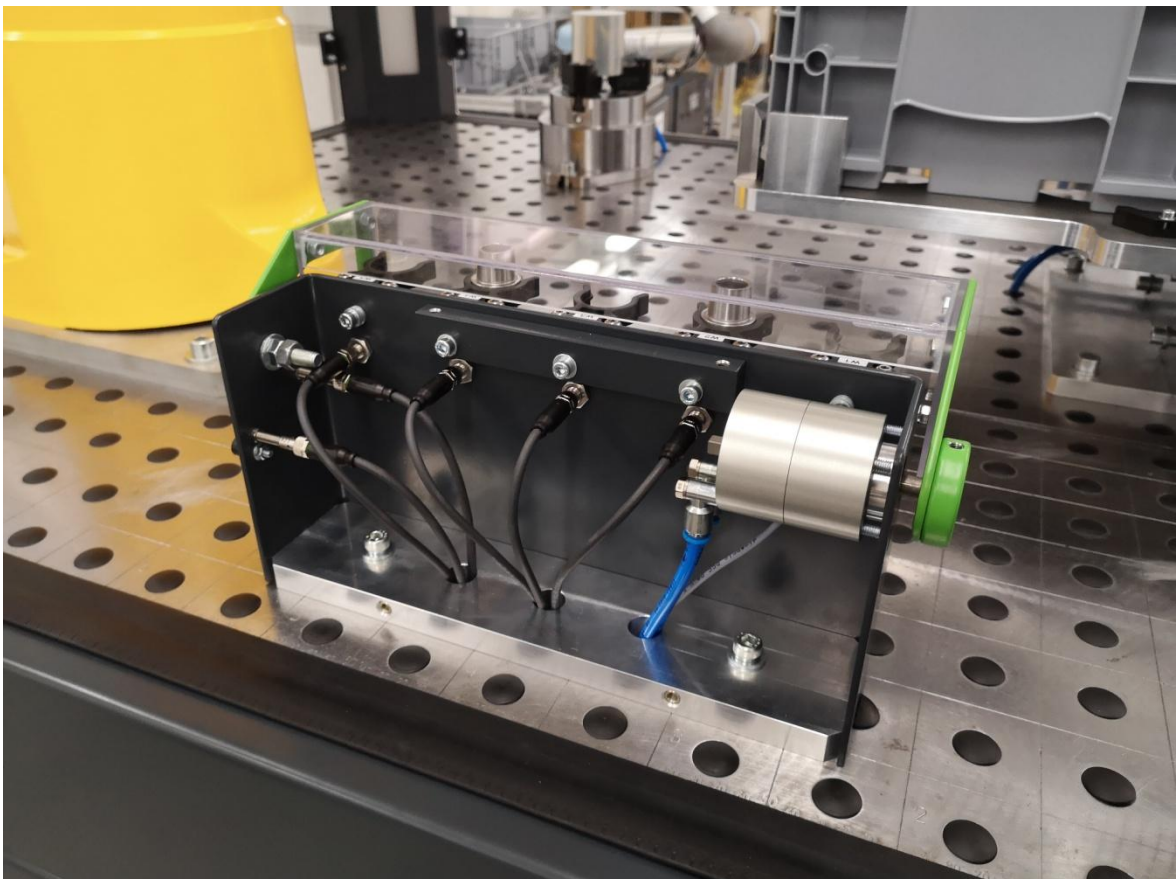


Abb. A 9 Werkzeugwechselstation bei geöffnetem Deckelblech, Quelle: Eigene Darstellung.

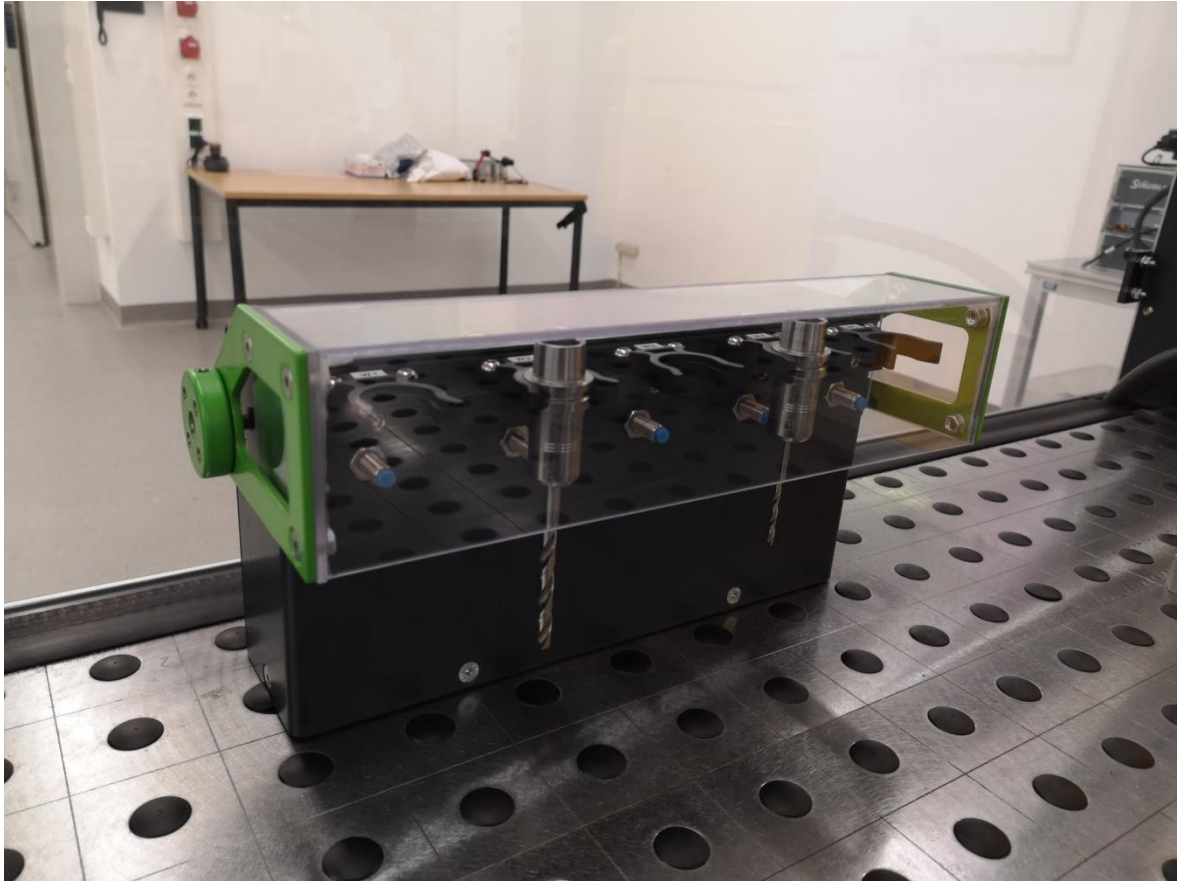


Abb. A 10 Werkzeugwechselstation mit geschlossener Schutzhaube, Quelle: Eigene Darstellung.

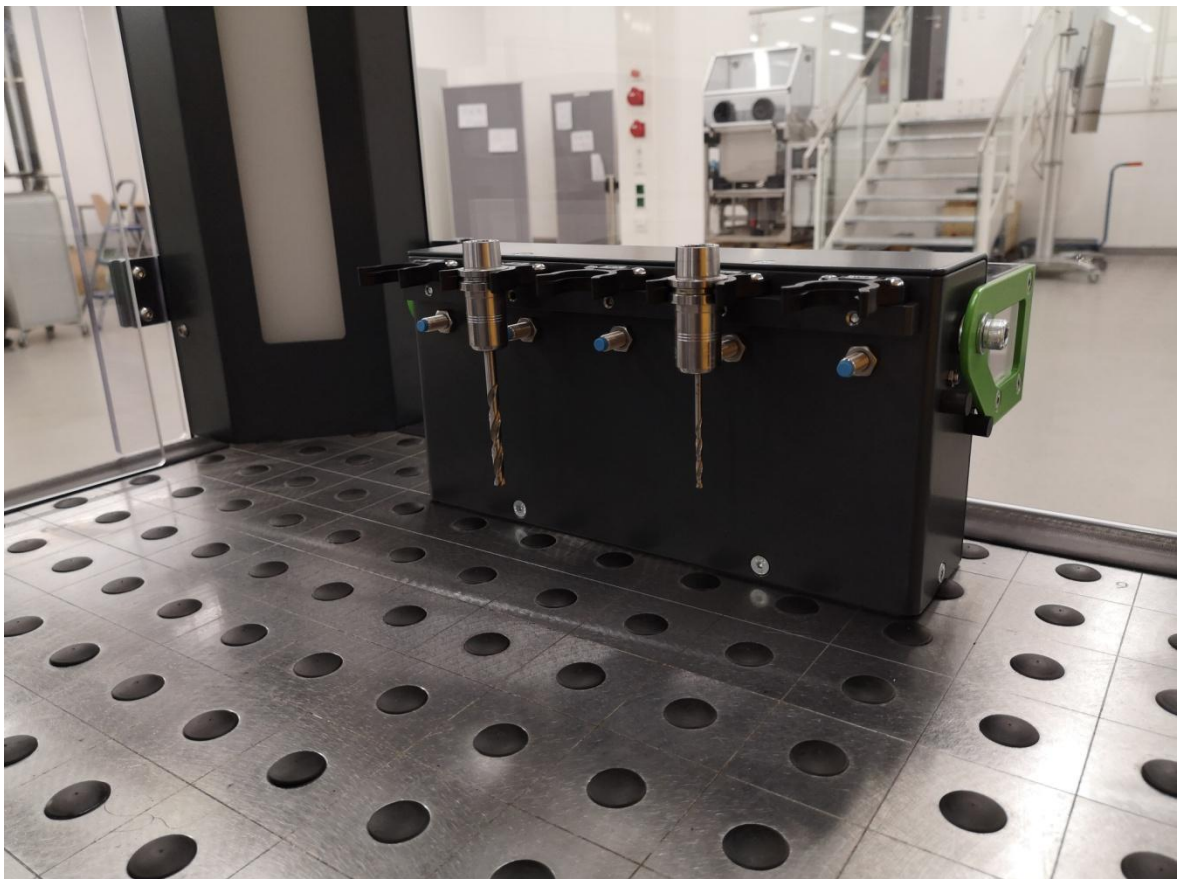


Abb. A 11 Werkzeugwechselstation mit geöffneter Schutzhaube, Quelle: Eigene Darstellung.



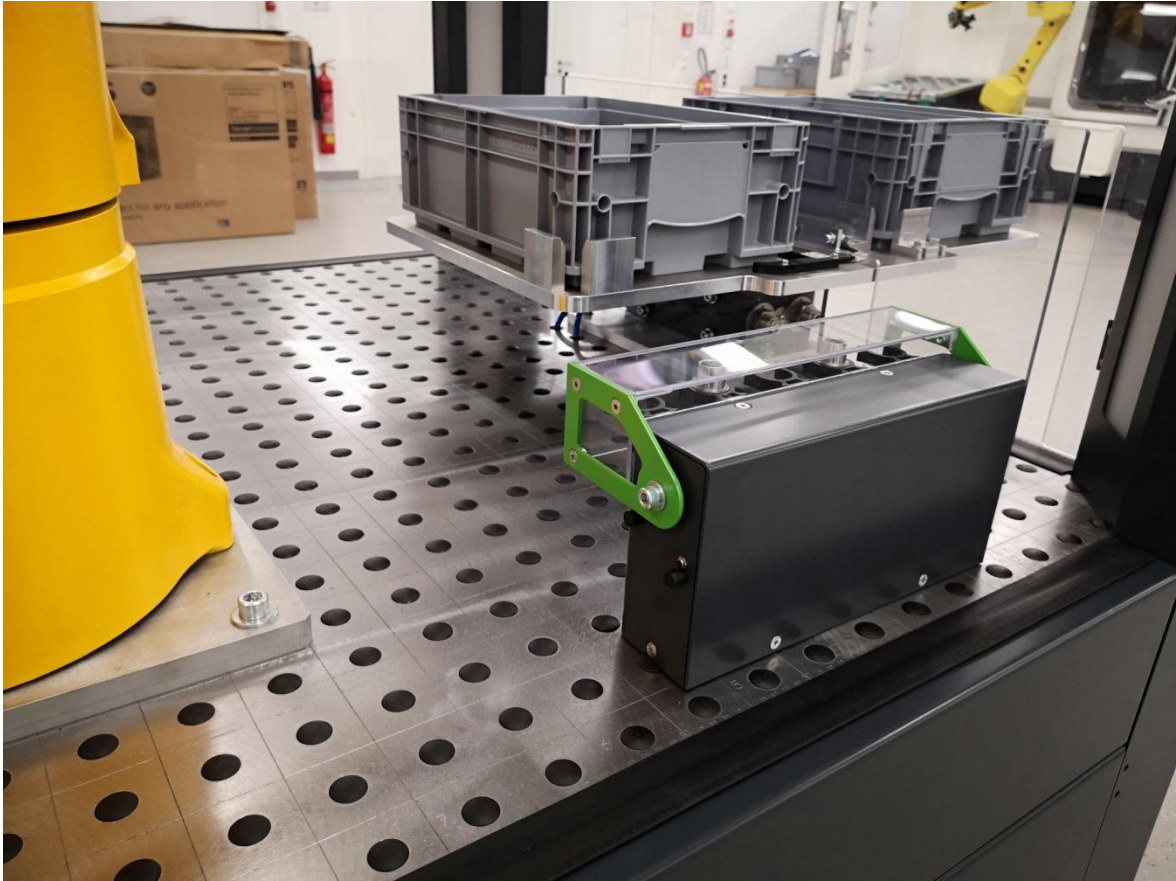


Abb. A 12 Geschlossene Werkzeugwechselstation in Rückansicht, Quelle: Eigene Darstellung.

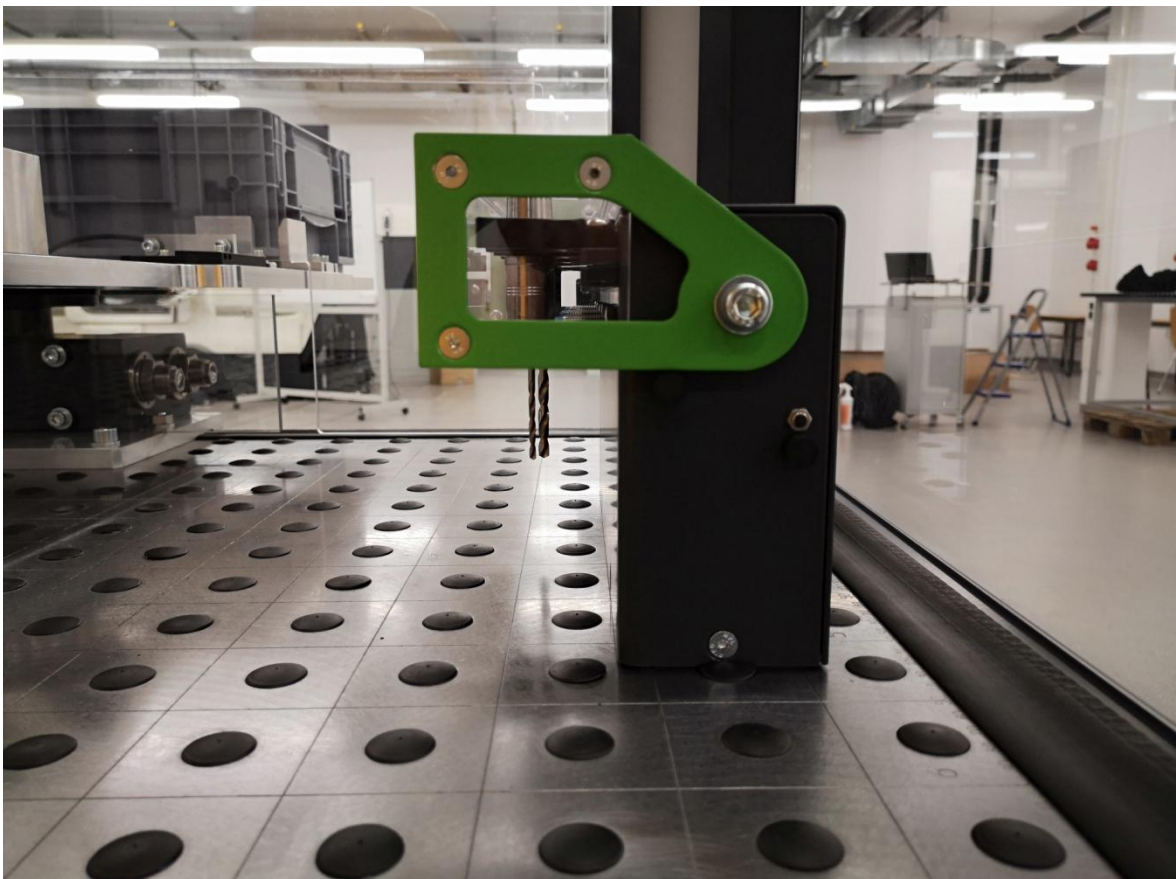


Abb. A 13 Geschlossene Werkzeugwechselstation in Seitenansicht, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 14 Beladungsgruppe mit einem eingeschwenkten KLT, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 15 Flaschenkeineinheit der Beladungsgruppe, Quelle: Eigene Darstellung.





Abb. A 16 Beladungsgruppe I, Quelle: Eigene Darstellung.

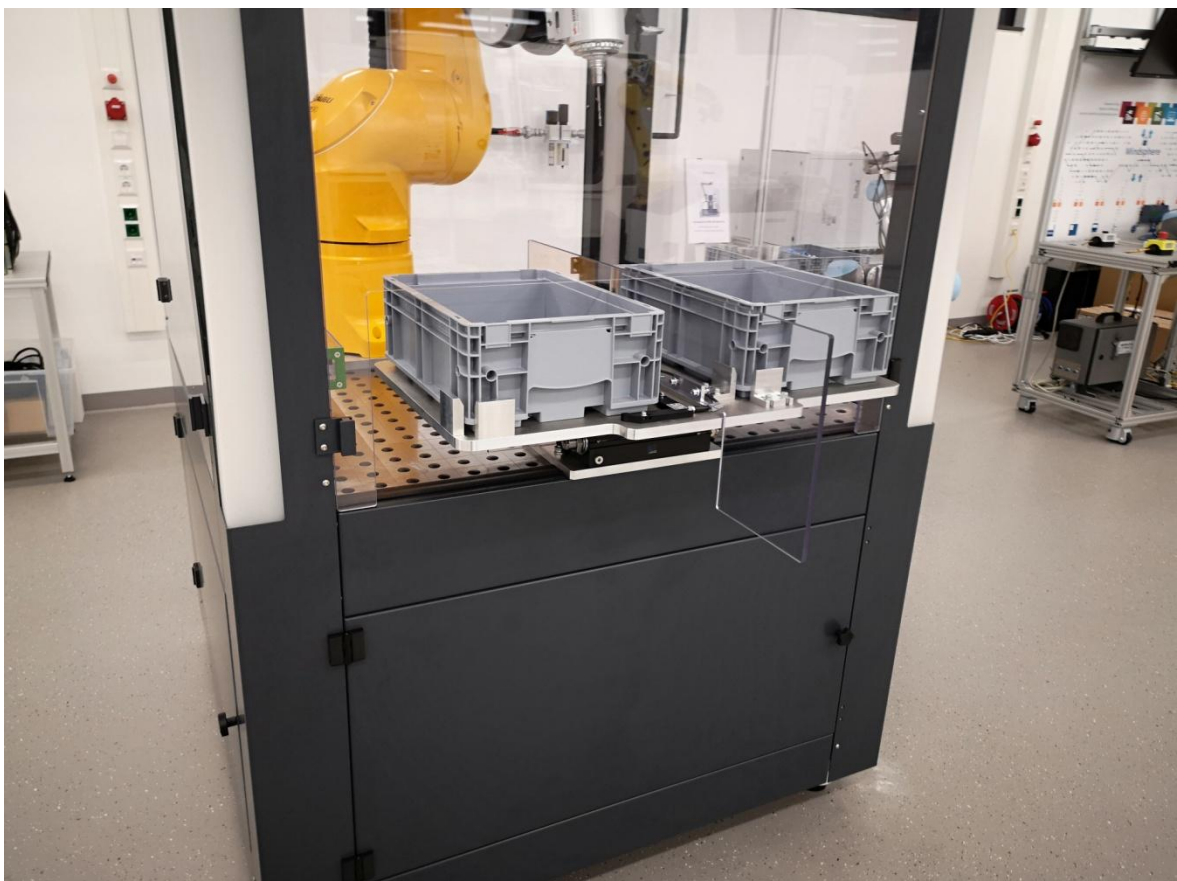


Abb. A 17 Beladungsgruppe beim Schenkvorgang, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 18 Vorderansicht der Beladungsgruppe, Quelle: Eigene Darstellung.

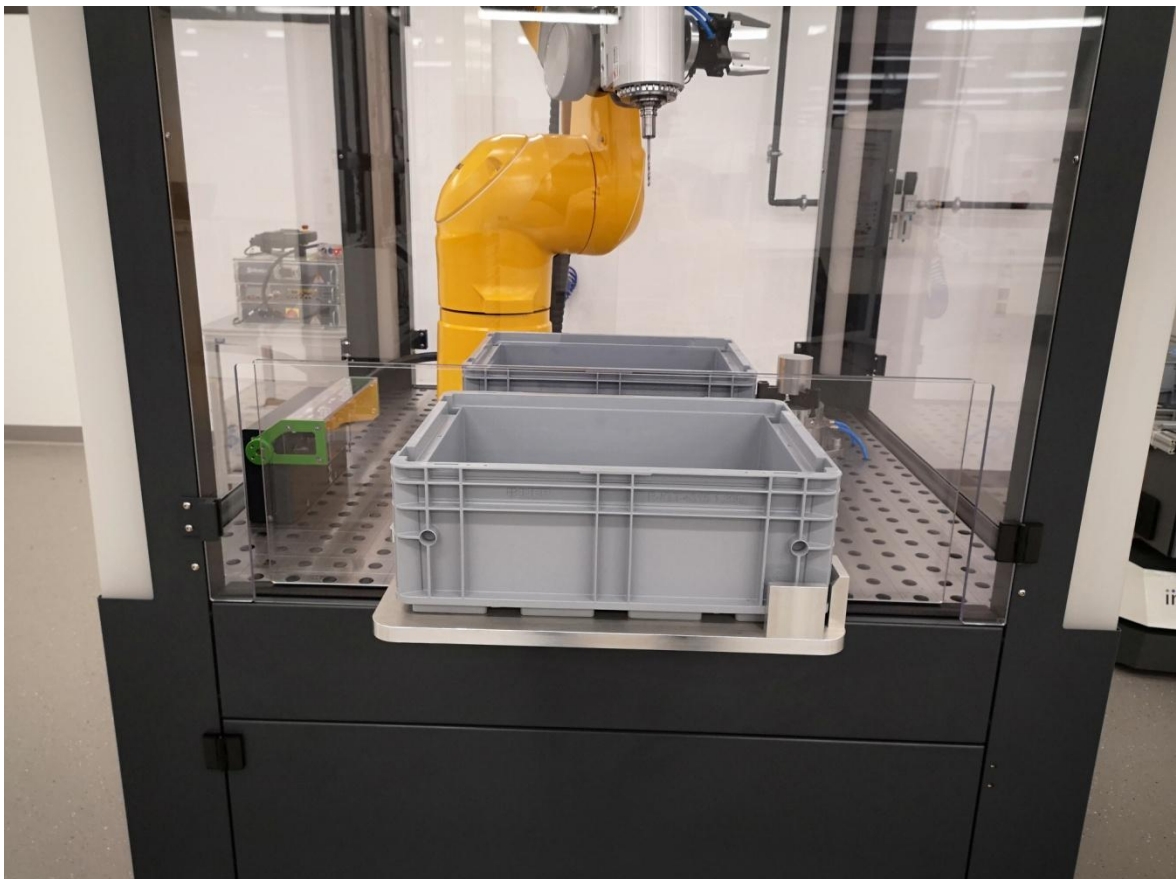


Abb. A 19 Beladungsgruppe II, Quelle: Eigene Darstellung.



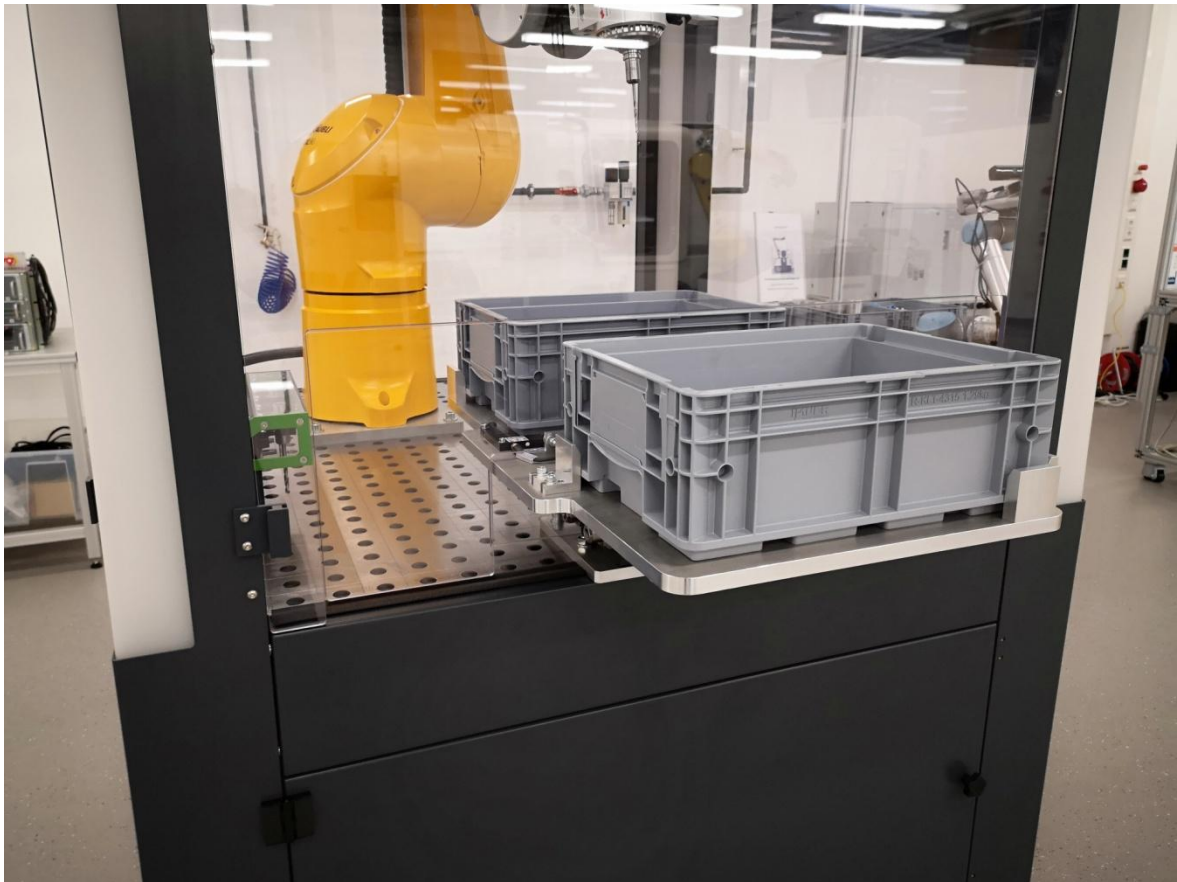


Abb. A 20 Beladungsgruppe III, Quelle: Eigene Darstellung.

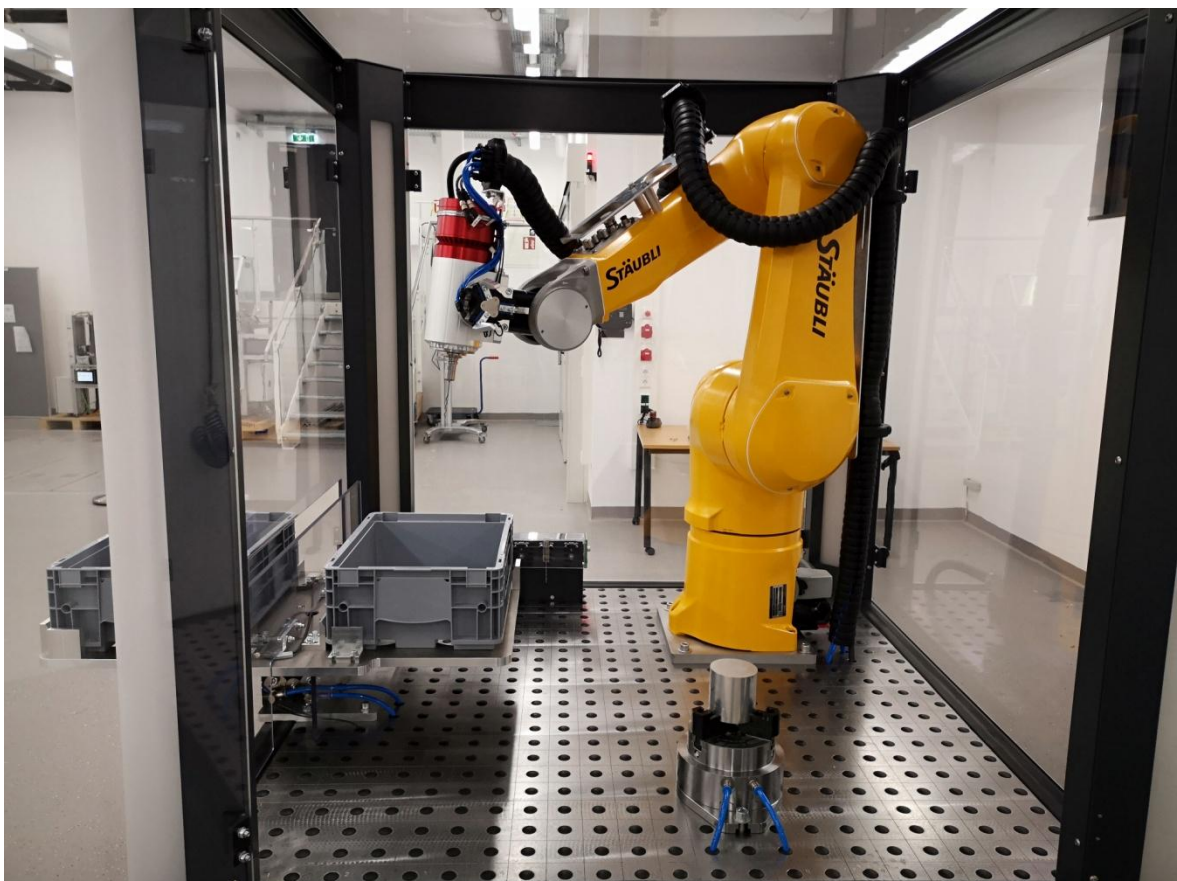


Abb. A 21 Anordnung der Hauptbaugruppen im Zelleninneren, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 22 Geöffnetes Schleusenfenster, Quelle: Eigene Darstellung.





Abb. A 23 Roboterzelle in Vorderansicht I, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 24 Roboterzelle in Vorderansicht II, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 25 Roboterzelle in Seitenansicht I, Quelle: Eigene Darstellung.





Abb. A 26 Roboterzelle in Seitenansicht II, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 27 Roboterzelle in Rückansicht, Quelle: Eigene Darstellung.

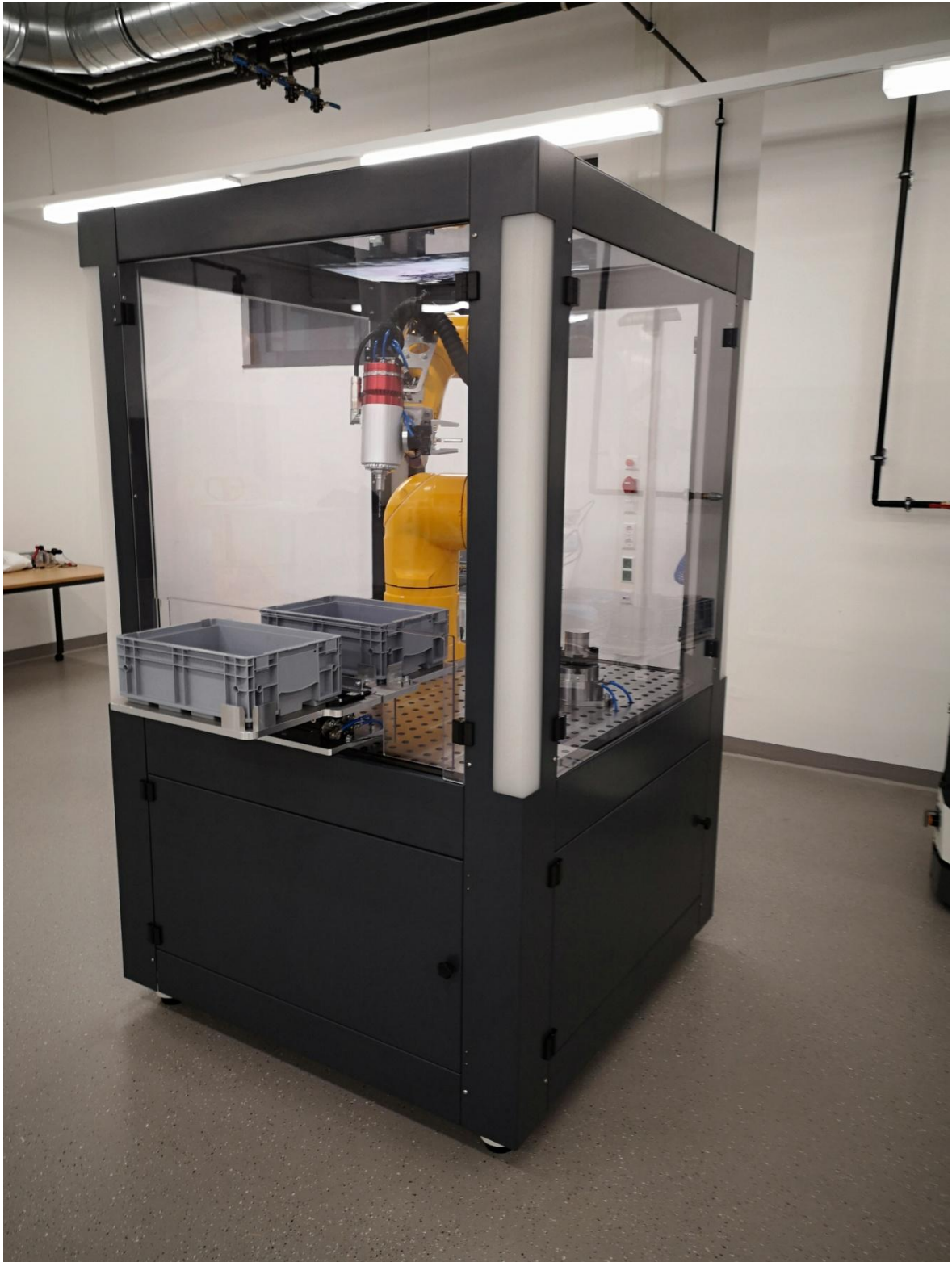


Abb. A 28 Roboterzelle I, Quelle: Eigene Darstellung.





Abb. A 29 Roboterzelle II, Quelle: Eigene Darstellung.



Abb. A 30 Roboterzelle III, Quelle: Eigene Darstellung.