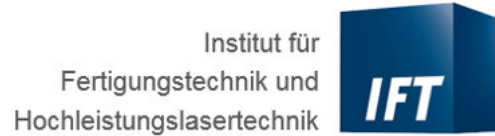




TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
WIEN
Vienna University of Technology



Diplomarbeit

Mensch-Roboter-Kollaboration

Biegen mit einem Leichtbauroboter

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Master of Science unter der Leitung von

a.o.Univ.-Prof. Dr. Kittl

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

Projektass. Dipl.-Ing. Florian Pauker, BSc, MSc

(Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik)

Dipl.-Ing.(FH) Kabir Secibovic, MSc

(Entwicklung Mechatronik - TRUMPF Maschinen Austria)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Michael Fichtinger, BSc

Matr. Nr. 1025245



St. Marienkirchen, im Mai 2017

Michael Fichtinger

Ich habe zur Kenntnis genommen, dass ich zur Drucklegung meiner Arbeit unter der Bezeichnung

Diplomarbeit

nur mit Bewilligung der Prüfungskommission berechtigt bin.

Ich erkläre weiters Eides statt, dass ich meine Diplomarbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen selbstständig ausgeführt habe und alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, genannt habe.

Weiters erkläre ich, dass ich dieses Diplomarbeitsthema bisher weder im In- noch Ausland (einer Beurteilerin/einem Beurteiler zur Begutachtung) in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt habe und dass diese Arbeit mit der vom Begutachter beurteilten Arbeit übereinstimmt.

St. Marienkirchen, im Mai 2017

Michael Fichtinger

Danksagung

Diese Diplomarbeit möchte ich meinen Eltern Andreas und Johanna widmen. Sie haben mich stets bei meinen Vorhaben unterstützt und mich gelehrt, dass man mit Fleiß und Zielstrebigkeit vieles erreichen kann.

Ganz besonders danken möchte ich in erster Linie meinem Betreuer, Dipl.-Ing. (FH) Kabir Secibovic MSc, für seine kontinuierliche Unterstützung und die zahlreichen Hilfestellungen während meiner Diplomarbeit. Darüber hinaus möchte ich mich bei allen beteiligten Mitarbeitern der Firma TRUMPF für ihre Hilfsbereitschaft bedanken. Speziell hervorheben möchte ich Herrn Dipl.-Ing. Dr. mont. Michael Kerschbaumer für das entgegengebrachte Vertrauen und Herrn Dipl.-Ing. (FH) Stefan Gruber, der mich auf dieses Thema aufmerksam gemacht und mir Mut zugesprochen hat. Weiters möchte ich mich bei Herrn Walter Keplinger und Gerhard Gugler für die Unterstützung bei der praktischen Umsetzung bedanken.

Ein besonderer Dank gilt auch a.o.Univ.Prof. Dr.techn. Burkhard Kittl, der mir die Möglichkeit gab, meine Diplomarbeit am Institut für Fertigungstechnik und Hochleistungslasertechnik zu verfassen und mit Rat und Tat zur Seite stand.

Ebenfalls bedanken möchte ich mich bei Projektass. Dipl.-Ing. Florian Pauker BSc, MSc für die Mitbetreuung und die zahlreichen Anregungen zu diesem Thema.

Sehr bedanken möchte ich mich auch bei Herrn Wolfgang Fuchs BSc (KUKA Roboter CEE GmbH), der stets ein offenes Ohr bei Fragen zur Programmierung des Roboters beziehungsweise zur Umsetzung der Applikation hatte.

Nicht zuletzt gebührt auch meinen Freunden, Vereinskollegen und Studienkollegen ein besonderer Dank. Sie haben in schwierigen Zeiten immer für die nötige Abwechslung in meiner Studienzeit gesorgt.

Abschließend bedanke ich mich bei meiner Freundin Kristin und meiner Schwester Christina, die mich während des Studiums stets motiviert haben und bei der Korrektur der Diplomarbeit sehr hilfreich zur Seite standen.

Kurzfassung

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich im ersten Teil mit den sicherheitstechnischen Anforderungen rund um die Mensch-Roboter-Kollaboration. Der zweite und größere Teil stellt eine Machbarkeitsstudie hinsichtlich der Automatisierung des Biegevorgangs mit einem kraftsensitiven Leichtbauroboter (KUKA iiwa 14) dar. Dazu wurden die Positionierung eines Bauteils am Hinteranschlag und das Biegen mit der Nachgiebigkeitsregelung¹ des LBR iiwa 14, anhand eines Versuchsaufbaus näher untersucht. Darüber hinaus sind auch Versuche hinsichtlich der Erstellung von Applikationen mittels Teach-In beziehungsweise Playback-Verfahren, im Bereich des Biegens durchgeführt worden.

Die Ergebnisse zeigen, dass das Biegen mit der Nachgiebigkeitsregelung des LBR iiwa 14 nur bei kleinen Prozessgeschwindigkeiten zufriedenstellende Resultate liefert. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass der Roboter prinzipiell in der Lage ist ein Bauteil am Hinteranschlag auszurichten. Jedoch aufgrund der unzureichend genauen Messdaten, nicht mit der geforderten Zuverlässigkeit. Die Erstellung von Applikationen mittels Teach-In und Playback-Verfahren eignet sich lediglich für sehr einfache Biegeteile. Bei komplexeren Bauteilen wird diese Art der Programmierung schnell zu aufwendig und unüberschaubar.

Die Untersuchung der sicherheitstechnischen Anforderungen hat ergeben, dass für die Kollaborationsform Kraft- und Leistungsbegrenzung die Manipulation von Blechen nicht zulässig ist. Die übrigen Arten der Kollaboration können grundsätzlich bei der Automatisierung des Biegevorgangs angewendet werden. Die Voraussetzung hierfür ist jedoch die Verwendung eines Greifers, welcher in der Lage ist einen Verlust des Blechbauteils sicher zu verhindern.

¹Das Blechbauteil wird während des Biegens im Greifer festgehalten und die erforderliche Folgebewegung ergibt sich aufgrund der auf den Roboter einwirkenden Kräfte.

Abstract

The first part of this work deals with the safety requirements in the field of human robot collaboration. The second and more extensive part is a feasibility analysis regarding the automation of the bending process with a force sensitive light weight robot (KUKA iiwa 14). Therefor, the positioning of a sheet metal at the backauge and the bending with the impedance control mode² of the LBR iiwa 14, were examined based on an experimental setup. On top of that also the creation of robot applications with the teach-in respectively playback procedure, in the area of bending, was investigated.

The results show, that bending with the impedance control mode of the LBR iiwa 14 only works for small process speeds. Furthermore, it was shown that, basically the robot is able to align a workpiece at the bauckauge. But due to the inaccurate measurement data this isn't a very reliable process. The creation of robot applications with the teach-in and playback procedure is only suitable for simple bending parts. For more elaborated parts this programming method quickly become confusing and complex.

The investigation of the safety requirements has shown that for the collaboration form power and force limitation, the manipulation of sheet metals is not permitted. The other types of collaboration can, in principle be used in the automation of bending. However, the prerequisite therefor is the use of a gripper, which is capable of reliably preventing a loss of the sheet metal.

²The gripper holds the metal sheet part during the bending process and the required motion results from the forces, acting on the robot.

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
1.1. Motivation	1
1.2. Zielsetzung	3
1.3. Aufbau der Arbeit	3
2. Mensch-Roboter Kollaboration	5
2.1. Definitionen	6
2.2. Formen der Kollaboration	9
2.2.1. Sicherheitsbewerteter überwachter Halt	11
2.2.2. Handführung	11
2.2.3. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung	12
2.2.4. Leistungs- und Kraftbegrenzung	15
3. Industrieroboter	21
3.1. Kinematik	22
3.1.1. Kinematischer Aufbau	22
3.1.2. Lage des Körpers im Raum	22
3.1.3. Vorwärtskinematik	25
3.1.4. Inverse Kinematik	27
3.1.5. Jacobimatrix	28
3.2. Programmierverfahren	29
3.2.1. Direkte Programmierung	29
3.2.2. Indirekte Programmierung	30
3.3. DLR Leichtbauroboter III	32
3.3.1. Mechanischer Aufbau	32
3.3.2. Dynamisches Modell	34
3.4. Leichtbauroboter KUKA iiwa	39
3.4.1. Technische Daten	39
3.4.2. Programmierung	40
3.4.3. Sicherheit	43

3.4.4. Spezielle Betriebsmodi	45
3.4.5. Datenaufzeichnung	49
4. Versuchsvorbereitung	51
4.1. Versuchsaufbau	51
4.1.1. Anforderungen	51
4.1.2. Umsetzung	52
4.1.3. Inbetriebnahme	52
4.2. Beschreibung der Blechbewegung beim Biegen	57
4.2.1. Geometrischen Modell	57
4.2.2. Finite Elemente Simulation	61
4.3. Versuchsbeschreibung	63
4.3.1. Proben	63
4.3.2. Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag	65
4.3.3. Biegen mit der Nachgiebigkeitsregelung	66
4.4. Programm für die Versuchsdurchführung	69
4.4.1. Online-Programmierung einer Biegeapplikation	69
4.4.2. Programmbausteine	70
5. Ergebnisse	74
5.1. Güte der Messdaten	74
5.1.1. Statischer Test	74
5.1.2. Dynamischer Test	75
5.2. Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag	77
5.3. Biegen mit der Nachgiebigkeitsregelung	82
5.4. Online-Programmierung einer Biegeapplikation	86
6. Zusammenfassung	89
Literaturverzeichnis	93
Abbildungsverzeichnis	97
Tabellenverzeichnis	101
Abkürzungsverzeichnis	102
Anhang	103
A. Abbildungen	103

1. Einleitung

Die folgende Diplomarbeit wurde im Zuge eines Praktikums bei TRUMPF Maschinen Austria GmbH + Co. KG angefertigt. Das Unternehmen mit Standort in Pasching (Österreich) ist eine hundertprozentige Tochtergesellschaft der TRUMPF GmbH & Co. KG (Ditzingen, Deutschland). Der Konzern beschäftigt 11181 Mitarbeiter und erwirtschaftet einen Jahresumsatz von 2,81 Mrd. €. TRUMPF ist Technologieführer in den Bereichen Werkzeugmaschinen für die Blechbearbeitung und der Lasertechnik. Der Standort Pasching, mit einem Jahresumsatz von 230 Mio. € und 551 Mitarbeitern, stellt das Kompetenzzentrum Biegen in der TRUMPF Gruppe dar.¹ Hier erfolgt die Entwicklung und Produktion angefangen von einer einfachen manuellen Biegemaschine bis hin zur vollautomatisierten Biegezelle. Darüber hinaus bietet TRUMPF eine breite Palette von Biegewerkzeugen an.

1.1. Motivation

Unbestritten stellt die Gewinnmaximierung eines der primären Ziele von Produktionsunternehmen und Unternehmen im Allgemeinen dar. Dies hat zur Folge das Unternehmen Produktionsmaschinen nachfragen, welche ihnen eine möglichst hohe Wertschöpfung ermöglichen. Die maßgebenden Faktoren hierfür stellen Zeit, Qualität und Wirtschaftlichkeit dar. Die Automatisierung von Prozessen ist eine Möglichkeit, um diese Anforderungen zu erfüllen. Bei der Blechbearbeitung, genauer gesagt beim freien Biegen, stellt die Automatisierung aufgrund der geforderten Zykluszeit, Genauigkeit und der Teilevielfalt eine enorme Herausforderung dar. Darüber hinaus gibt es unterschiedliche Einflussgrößen auf das Biegeergebnis, welche beherrscht werden müssen (siehe Abbildung 1.1). TRUMPF hat 2010 bereits eine erste Version einer vollautomatischen Biegezelle (TruBend Cell 7000, siehe Abbildung A.1) auf den Markt gebracht. Um den oben genannten Anforderungen gerecht zu werden, sind zum Teil komplexe und aufwendige Mechanismen im Einsatz. Die Dauer für

¹Quelle: TRUMPF (Geschäftsbericht 2015/2016).

eine Kantung bewegt sich bei dieser Maschine im Bereich von vier bis fünf Sekunden. Um diese Zykluszeit zu erreichen und aus Gründen der Genauigkeit setzt TRUMPF darauf, die Blechplatte während des Biegeprozesses nicht loszulassen. Aus der nicht exakt vorhersehbaren Bewegung der Platine resultieren unerwünschte Zwangskräfte im Roboter, welche vermehrten Verschleiß, oder in ungünstigen Fällen sogar Getriebschäden zur Folge haben.

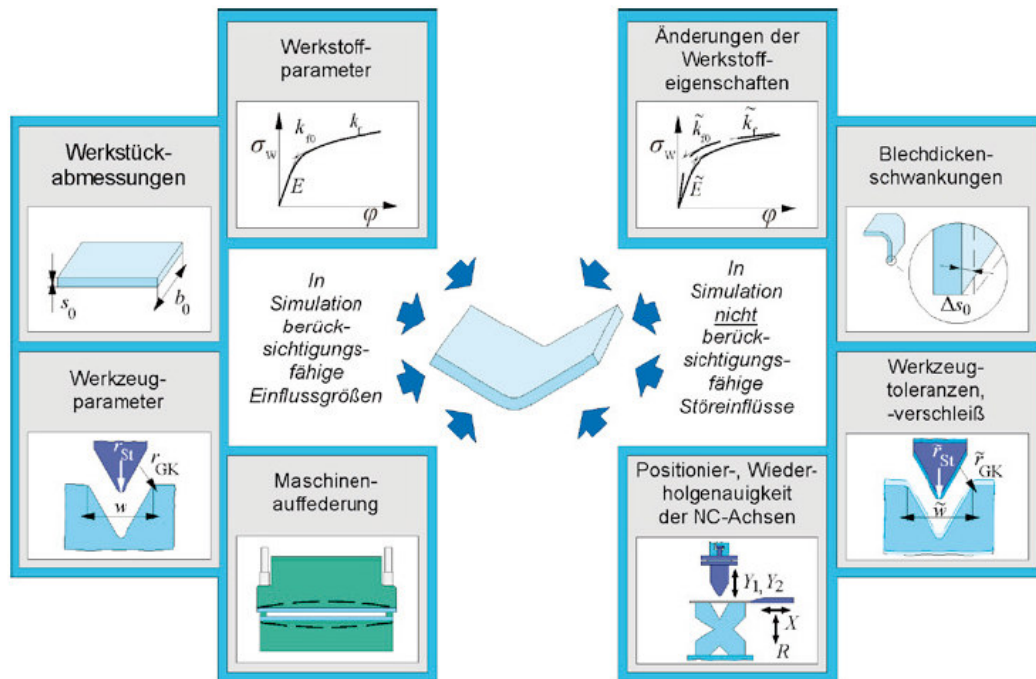


Abbildung 1.1.: Einflussgrößen auf das Biegeergebnis am Beispiel des Freibiegens im Gesenk [21, S. 583]

Aktuell ist das Thema Mensch Roboter Kollaboration (MRK) in der Automatisierungstechnik in aller Munde. Der Robotermarkt bietet viele unterschiedliche Modelle mit unterschiedlichen Eigenschaften und Einsatzmöglichkeiten. Angefangen von einfachen Pick and Place Aufgaben bis hin zu feinfühligem Fügeprozessen. Nun stellt sich TRUMPF die Frage ob ein kraftsensitiver Leichtbauroboter den oben genannten Anforderungen beim Biegen, ohne weitere aufwändige Systeme, gerecht werden kann. Im Internet befinden sich hierzu bereits Videos², welche kollaborierende Roboter beim Biegen von einfachen Blechteilen zeigen. Ein solches System wäre eine gute Ergänzung für die bestehende Produktpalette von TRUMPF. Aus diesen Gründen und dem aktuellen Trend im Bereich kollaborierender Robotik möchte TRUMPF

²<http://www.peterhuberag.ch/index.php/industrielle-automation/robotik/rakurobo> [10.08.2016].

mehr Erfahrungen auf diesem Gebiet sammeln. Speziell beim Biegeprozess erhofft sich TRUMPF Vorteile mit einem kraftsensitiven Roboter. Aber auch die Möglichkeit eines kollaborierenden Betriebs und die Option den Roboter mit dem sogenannten Playback-Verfahren zu programmieren, stößt auf großes Interesse. Diese Themenbereiche werden mithilfe einer Machbarkeitsstudie in Form eines Versuchsaufbaus näher untersucht. Aufgrund der Funktionalität (Nachgiebigkeitsregelung, Gravitationskompensation) und der Verfügbarkeit wird der Leichtbauroboter iiwa 14 von KUKA für die Durchführung der Versuche herangezogen.

1.2. Zielsetzung

Die Ziel dieser Arbeit ist es herauszufinden, ob sich der LBR Kuka iiwa 14 für die Automatisierung des Biegevorgangs eignet. Hierfür werden anhand eines Versuchsaufbaus folgende drei Fragestellungen näher untersucht.

- F1: Ist der Roboter mit der Nachgiebigkeitsregelung in der Lage, Bauteile am Hinteranschlag korrekt auszurichten?
- F2: Ist die Nachgiebigkeitsregelung des Roboters in der Lage, einem Blechbauteil beim Biegevorgang zu folgen ohne es plastisch zu deformieren?
- F3: Eignet sich der Roboter zur Online-Programmierung von Applikationen in Bezug auf den Biegeprozess?

Ein weiteres Ziel stellt die theoretische Aufbereitung der Anforderungen bei der Umsetzung von Anwendungen im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration dar.

1.3. Aufbau der Arbeit

Die Arbeit beginnt mit einer Einführung in das Thema MRK. Speziell werden hier die Formen der Kollaboration mit den erforderlichen Sicherheitsfunktionen behandelt. Im darauffolgenden Kapitel werden die Grundlagen der Robotik angefangen vom kinematischen und mechanischen Aufbau bis hin zur Modellierung und Programmierung erläutert. Zielsetzung dabei ist nicht, einen Überblick über das gesamte Wissensgebiet zu geben, sondern nur die für diese Arbeit unbedingt notwendigen Bereiche anzuschneiden. Des Weiteren beinhaltet dieses Kapitel die Vorstellung des

KUKA LBR iiwa 14. Anschließend wird die Versuchsvorbereitung beschrieben. Dieser Abschnitt beinhaltet eine Beschreibung des Versuchsaufbaus, die Inbetriebnahme des Roboters, sowie die Vorstellung eines geometrischen Modells zur Beschreibung der Blechbewegung während des Biegevorgangs und eine Beschreibung der einzelnen Versuche. In Kapitel 5 werden die Ergebnisse präsentiert und die Forschungsfragen beantwortet. Abschließend folgt eine Zusammenfassung der Arbeit, sowie ein Ausblick über mögliche weitere Vorgehensweisen.

2. Mensch-Roboter Kollaboration

Heutzutage werden in den meisten Fällen die Arbeitsbereiche von Industrierobotern durch trennende Schutzeinrichtungen abgesichert. In Zukunft müssen Roboter neben den klassischen Anwendungsgebieten wie Montage und Teilehandling auch bei der Produktion von Kleinserien assistieren, Transport- und Routineaufgaben übernehmen, sowie den Menschen bei körperlich belastenden Arbeiten unterstützen. Diese neuen Aufgaben in der Produktion erfordern neue Technologien um Anwendungen im Bereich der Mensch-Roboter Kollaboration sicher, nutzerfreundlich und flexibel einsetzbar machen zu können [30].

Der Mehrwert der Mensch-Roboter-Kollaboration besteht darin die Stärken des Roboters, wie Genauigkeit, Bahntreue und Ermüdungsfreiheit, mit den Stärken des Menschen, wie Auge-Hand Koordination und die Fähigkeit zur selbstständigen Problemlösung, in einem Prozess zu nutzen. Das Ziel hierbei ist durch richtige Aufgabenverteilung einen effizienten Gesamtprozess zu gestalten. In Abbildung 2.1 sind qualitativ die Abhängigkeiten der Stückkosten bezüglich dem Produktionsvolumen für verschiedene Automatisierungskonzepte, sowie der manuellen Montage, aufgetragen. Hier ist eine Erweiterung des Anwendbarkeitsbereichs der Automatisierung durch Roboter zu niedrigeren Stückzahlen erkennbar. Dies ergibt sich hauptsächlich aufgrund der flexiblen Einsatzmöglichkeiten und den geringeren Investitionskosten. Die Diskussion der Produktivität von kollaborierenden¹ Robotern zum Beispiel (z.B.) im Bereich der Montageapplikationen ist zu diesem Zeitpunkt noch theoretisch, da praktische Erfahrungen in diesem Feld noch ausstehen [25].

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und die aktuellen Entwicklungen im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration (MRK) aufbereitet. Im Speziellen werden anhand der Normen [1, 2, 7] die Anforderungen einer sicheren Mensch-Roboter-Kollaboration aufgezeigt. Auf eine Auflistung und Vorstellung der aktuellen Robotermodelle wird an dieser Stelle verzichtet und auf [23] verwiesen.

¹Hier ist im speziellen die Kollaborationsart Kraft- und Leistungsbeschränkung gemeint.

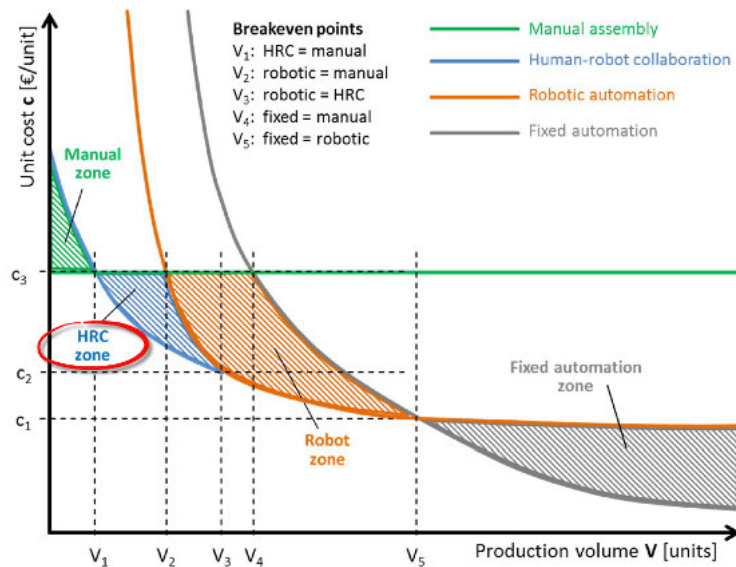


Abbildung 2.1.: Einordnung der Mensch-Roboter Kollaboration in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit [25]

2.1. Definitionen

Kollaborierender Betrieb

Der kollaborierende Betrieb ist nach [1, S. 7] wie folgt definiert:

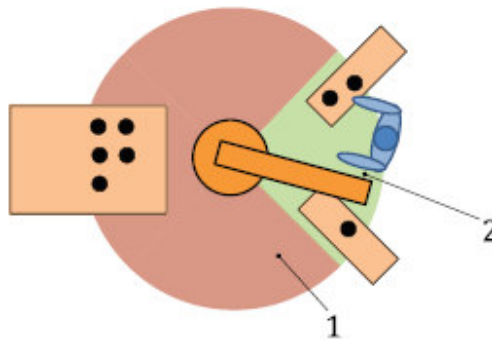
Zustand, in dem hierfür konstruierte Roboter innerhalb eines festgelegten Arbeitsraums direkt mit dem Menschen zusammenarbeiten.

In [7] wird diese Definition dahingehend modifiziert, dass der Mensch und Roboter nicht zwangsweise zusammenarbeiten müssen, sondern vielmehr das Arbeiten in einem gemeinsamen Arbeitsraum ausschlaggebend ist.

Kollaborationsraum

Nach [1, S. 7] ist der Kollaborationsraum (siehe Abbildung 2.2) wie folgt definiert:

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

**Key**

- 1 operating space
- 2 collaborative workspace

Abbildung 2.2.: Beispiel für einen Kollaborationsraum [7]

In [7] wird ergänzend klargestellt, dass in diesem Fall auch das Werkstück Teil des Roboters ist. Hier wird hingegen auch nicht von einem Roboter sondern von einem Robotersystem gesprochen.

Quasi-statischer Kontakt

Contact between an operator and part of a robot system, where the operator body part can be clamped between a moving part of a robot system and another fixed or moving part of the robot cell [7, S. 2].

Beim quasi-statischen Kontakt wird der Mensch zwischen dem Roboter und einem anderen fixen Punkt eingeklemmt.

Transienter Kontakt

Contact between an operator and part of a robot system, where the operator body part is not clamped and can recoil or retract from the moving part of the robot system [7, S. 2].

Beim transienten Kontakt wird der Mensch vom Roboter gestoßen. Er kann aufgrund der Platzverhältnisse zurückweichen und es kommt zu keiner Klemmsituation.

Performance Level (PL)	Durchschnittliche Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde 1/h
a	$\geq 10^{-5}$ bis $< 10^{-4}$
b	$\geq 3 \times 10^{-6}$ bis $< 10^{-5}$
c	$\geq 10^{-6}$ bis $< 3 \times 10^{-6}$
d	$\geq 10^{-7}$ bis $< 10^{-6}$
e	$\geq 10^{-8}$ bis $< 10^{-7}$

ANMERKUNG Neben der durchschnittlichen Wahrscheinlichkeit eines gefährlichen Ausfalls je Stunde, sind weitere Maßnahmen notwendig, um den PL zu erreichen.

Abbildung 2.3.: Performance Level (PL) [4]

Performance Level

Diskreter Level, der die Fähigkeit von sicherheitsbezogenen Teilen einer Steuerung spezifiziert, eine Sicherheitsfunktion unter vorhersehbaren Bedingungen auszuführen [4, S. 11].

Wie in Abbildung 2.3 gezeigt, kann der Performance Level (PL) als Ausfallswahrscheinlichkeit interpretiert werden. Aber wie angemerkt ergibt sich der PL aufgrund gewissen anderen Faktoren wie dem Diagnosedeckungsgrad DC², der Kategorie und der mittleren Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall MTTF³ (siehe Abbildung 2.4).

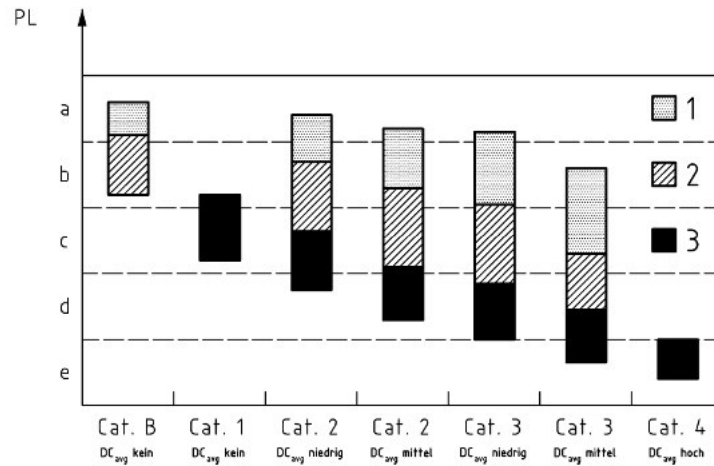
Kategorie

Einstufung der sicherheitsbezogenen Teile einer Steuerung bezüglich ihres Widerstandes gegen Fehler und ihres nachfolgenden Verhaltens bei einem Fehler, das erreicht wird durch die Struktur der Anordnung der Teile, der Fehlererkennung und/oder ihrer Zuverlässigkeit [4, S. 8].

Es gibt fünf unterschiedliche Kategorien (Kat.). Angefangen von Kat. B, welche die am wenigsten sichere Kat. darstellt, bis Kat. 4. Die genauen Anforderungen und die erforderlichen Architekturen für die Erreichung der jeweiligen Kat. sind in [4, S. 40ff] angeführt.

² Maß für die Wirksamkeit der Diagnose, die bestimmt werden kann als Verhältnis der Ausfallrate der bemerkten gefährlichen Ausfälle und Ausfallrate der gesamten gefährlichen Ausfälle [4, S. 12].

³ Erwartungswert der mittleren Zeit bis zum gefahrbringenden Ausfall [4, S. 11].



Legende

PL Performance Level

- 1 MTTF_d jedes Kanals = niedrig
- 2 MTTF_d jedes Kanals = mittel
- 3 MTTF_d jedes Kanals = hoch

Abbildung 2.4.: Beziehung zwischen den Kategorien, DC_{avg} , MTTF_d jedes Kanals und dem PL [4]

2.2. Formen der Kollaboration

Grundsätzlich wird in der Norm [1, 7] zwischen den folgenden vier Formen der Kollaboration unterschieden.

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

In Abbildung 2.5 sind die Formen der Kollaboration, deren Anforderungen an das Robotersystem, sowie die Funktionsweise und mögliche Anwendungen zusammengefasst.

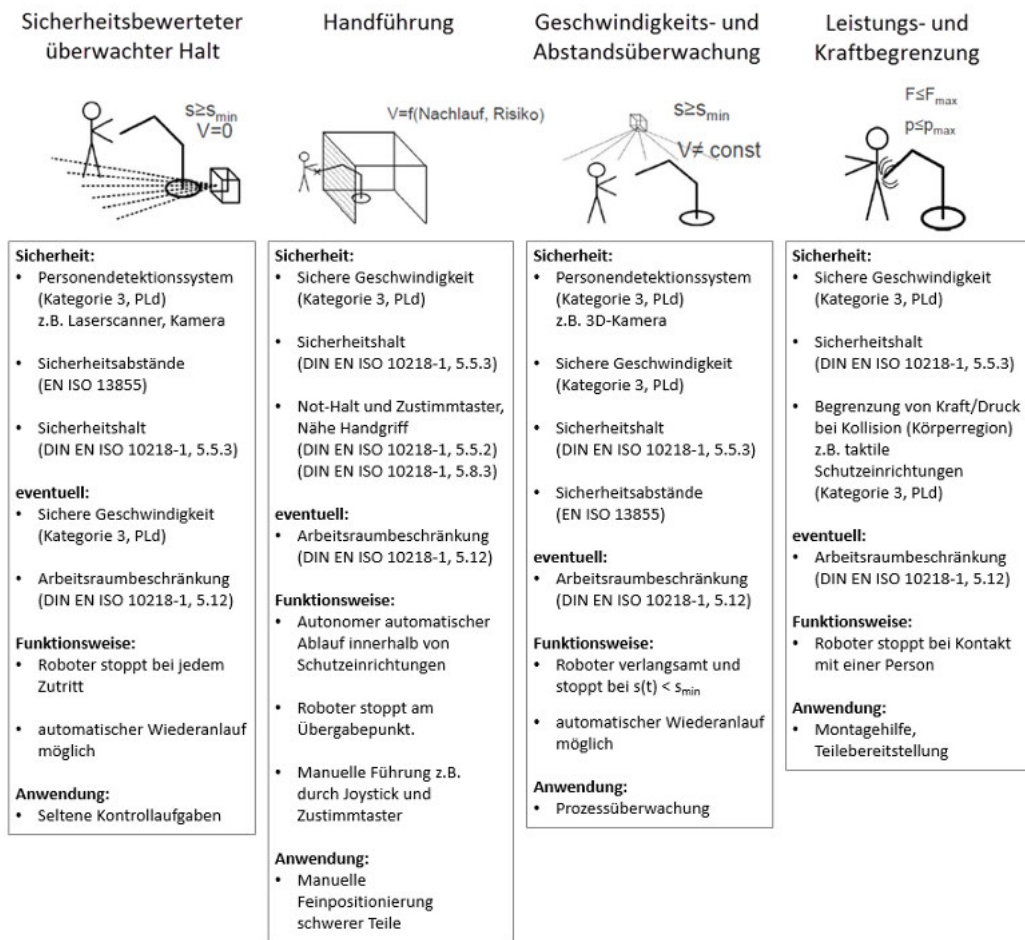


Abbildung 2.5.: Zusammenfassung der vier Formen der Kollaboration (Eigene Darstellung in Anlehnung an [36])

2.2.1. Sicherheitsbewerteter überwachter Halt

Diese Methode basiert auf dem Prinzip, dass der Roboter zum Stillstand gebracht wird, bevor eine Person den Kollaborationsraum betritt. Befindet sich keine Person im Kollaborationsraum, kann der Roboter wie ein konventioneller Industrieroboter betrieben werden. Die Voraussetzung hierfür ist, wie bereits erwähnt, den Roboter rechtzeitig in den Stillstand überführen zu können. Darüber hinaus darf keine Gefährdung durch die zu manipulierenden Teile bestehen (Bauteilverlust). Wenn der Roboter stillsteht und sich in einem Sicherheitshalt befindet, ist der gemeinsame Aufenthalt im Kollaborationsraum zulässig. Sobald die Person den Kollaborationsraum verlassen hat, kann der Roboter den Automatikbetrieb wiederaufnehmen. Dies eignet sich für eine Anlage, die (teilweise) ohne Schutzzaun betrieben werden soll und keine häufige Interaktion mit dem Menschen erfordert (z.B. gelegentliche Überprüfungstätigkeiten).

Es gibt zwei Situationen die einen Sicherheitshalt erfordern. Erstens, wenn sich eine Person und der sich bewegende Roboter im Kollaborationsraum befinden (z.B. Unabsichtliches Betreten) und zweitens, um dem Bediener das gefahrlose Betreten des Kollaborationsraums zu ermöglichen (z.B. Werkstücke zu- oder abführen). Die restlichen Zustände sind wie in Abbildung 2.6 dargestellt unkritisch. Die Größe des Kollaborationsraums muss nach den Bestimmungen von [6] ausgelegt sein. Für die sinnvolle Auslegung ist unter Umständen eine sichere Begrenzung der Geschwindigkeit [1, 5.6.4 S.17] und eine sichere Einschränkung des Arbeitsraums [1, 5.12 S.22] notwendig. Darüber hinaus ist für diesen Betrieb ein Personendetektionssystem mit zumindest einem PL d und Kat. 3 erforderlich. Damit die Anlage nach einem Sicherheitshalt wieder automatisch anlaufen kann, muss das Robotersystem darüber hinaus über einen Sicherheitshalt der Stopp-Kategorie 2 nach [1, 5.3 S.16] verfügen.

2.2.2. Handführung

Bei dieser Art der Kollaboration bewegt der Bediener den Roboter mittels einer Handführeinrichtung. Hierbei kann es sich um einen Joystick oder auch um die Übersetzung einer Krafteinwirkung auf den Roboter in eine dementsprechende Bewegung handeln. Hier muss speziell auf einen sicheren Übergang von der Handführoperation auf andere Operationen geachtet werden. Wie in Abschnitt 2.2.1 erklärt, muss sich auch hier der Roboter in einem Sicherheitshalt befinden, damit der Bediener den Kollaborationsraum betreten und die Handführaufgabe ausführen

Robot motion or stop function		Operator's proximity to collaborative workspace	
		Outside	Inside
Robot's proximity to collaborative workspace	Outside	Continue	Continue
	Inside and moving	Continue	Protective stop
	Inside, at Safety-Rated Monitored Stop	Continue	Continue

Abbildung 2.6.: Wahrheitstabelle für den sicherheitsbewertenden überwachten Halt [7])

kann. Während des Handführens ist ein dreistufiger Zustimmungstaster zu betätigen, andererseits wird ein Not-Halt ausgelöst. Des Weiteren ist dieser Betrieb nur unter Einhaltung einer, durch eine Risikobeurteilung festgelegten, maximalen Geschwindigkeit zulässig. Diese Art der Kollaboration eignet sich z.B. als Teach-in-Verfahren⁴ oder die manuelle Feinpositionierung von schweren Bauteilen.

Die Handführeinrichtung muss sich nahe am Endeffektor befinden und mit einer Zustimmungseinrichtung nach [1, 5.8.3 S.19] und einer Not-Halt Funktion nach [1, 5.5.2 S. 15] ausgestattet sein. Darüber hinaus muss der Roboter in der Lage sein, die dabei auftretenden Geschwindigkeiten sicher zu überwachen.

2.2.3. Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung

Bei der Geschwindigkeits- und Abstandsüberwachung ist der gleichzeitige Aufenthalt des Bedieners und Roboters im Kollaborationsraum, unter der Voraussetzung eines sicheren Mindestabstands S_p , möglich. Dieser Mindestabstand ergibt sich aus der aktuellen Position und Geschwindigkeit des Bedieners und Roboters. Bei Unterschreitung dieser Grenze wird ein Sicherheitshalt ausgelöst. Wenn sich der Bediener im Anschluss vom Roboter entfernt ist ein automatischer Wiederanlauf möglich. Alternativ kann der Sicherheitshalt durch Verringerung der Robotergeschwindigkeit vermieden beziehungsweise verzögert werden, da sich der Mindestsicherheitsabstand somit auch verringert. Diese Betriebsart eignet sich unter anderem für das Prüfen

⁴Siehe Abschnitt 3.2.

und Überwachen von Prozessen (z.B. Schweißvorgang). Basierend auf den Konzepten aus [6] kann der minimale Sicherheitsabstand wie folgt berechnet werden.

$$S_p(t_0) = S_h + S_r + S_s + C + Z_d + Z_r \quad (2.1)$$

mit

- $S_p(t_0)$... erforderlicher Sicherheitsabstand zum Zeitpunkt t_0
- t_0 ... aktueller Zeitpunkt
- S_h ... Anteil des Sicherheitsabstands aufgrund der Bewegung des Bedieners
- S_r ... Anteil des Sicherheitsabstands aufgrund der Reaktionszeit des Robotersystems
- S_s ... Anteil des Sicherheitsabstands aufgrund der Zeit bis zum Stillstand des Roboters
- C ... Eindringabstand⁵
- Z_d ... Toleranz des Detektionssystems bei der Ermittlung der aktuellen Position des Bedieners
- Z_r ... Toleranz des Robotersystems bei der Ermittlung der aktuellen Position des Roboters

Für die weitere Berechnung der einzelnen Bestandteile wird auf [7, S. 12ff] verwiesen. In Abbildung 2.7 ist die Zusammensetzung des Sicherheitsabstands graphisch veranschaulicht. Der Roboter führt eine Tätigkeit aus und bewegt sich hier mit konstanter Geschwindigkeit. Aus der aktuellen Position des Roboters und Bedieners wird der aktuelle Abstand $S(t)$ für jeden Zeitpunkt ermittelt. Zum Zeitpunkt t_0 unterschreitet der aktuelle Abstand $S(t)$ den Sicherheitsabstand $S_p(t_0)$ und ein Sicherheitshalt wird ausgelöst. In dem gesamten Zeitraum bewegt sich der Bediener auf den Roboter zu, was zu einer konstanten Reduzierung von $S(t)$ führt. Bis der Roboter zu Bremsen beginnt, vergeht die Reaktionszeit des Robotersystems T_r . In dieser Zeit bewegt sich der Roboter mit der Ausgangsgeschwindigkeit weiter und der Abstand $S(t)$ verringert sich weiter im selben Ausmaß. Ab dem Zeitpunkt $t_0 + T_r$ beginnt der Roboter mit einer konstanten Verzögerung, welche nach der Zeit T_s zum Stillstand

⁵Der Eindringabstand ist nach [6, S. 7] wie folgt definiert.

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

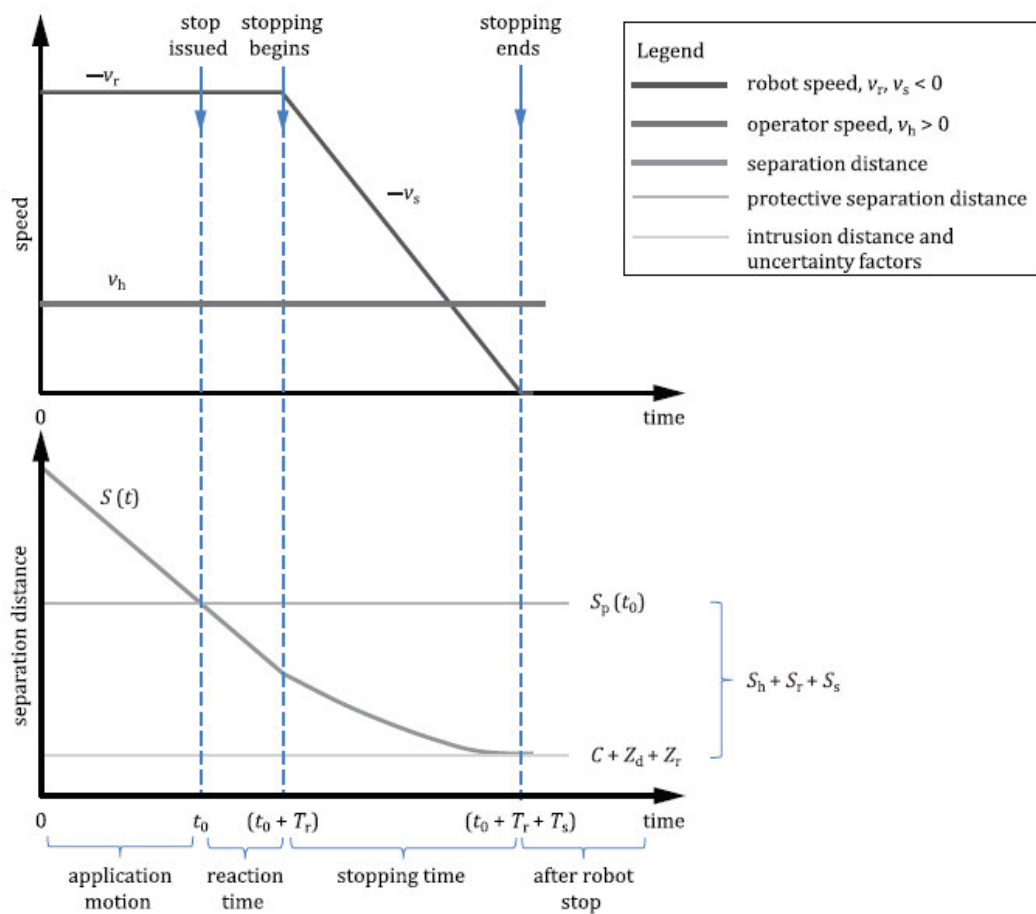


Abbildung 2.7.: Graphische Darstellung der Zusammensetzung des Sicherheitsabstandes [7])

führt. Nachdem der Roboter stillsteht verbleibt der Eindringabstand und ein weiterer Abstand aufgrund der Unsicherheiten bei der Positionsermittlung von Roboter und Bediener.

Für diese Art der Kollaboration ist die Mindestanforderung eine sicher überwachte Geschwindigkeit, ein sicherheitsbewerteter überwachter Halt (siehe 2.2.1) und ein Detektionssystem für die Ermittlung der Position (eventuell auch Geschwindigkeit) des Bedieners und Roboters. Das Unterschreiten des berechneten Sicherheitsabstands soll einen Sicherheitshalt und das Abschalten gefährbringender Werkzeuge zur Folge haben. Die Detektion und Berechnung des minimalen Sicherheitsabstand muss für alle, sich im Kollaborationsraum befindlichen Personen durchgeführt werden und den Anforderungen nach [2, 5.2.2 S. 17] entsprechen. Sobald die maximal mögliche Anzahl

an detektierbaren Personen überschritten wird, muss ebenfalls ein Sicherheitshalt ausgelöst werden.

2.2.4. Leistungs- und Kraftbegrenzung

Bei dieser Form der Kollaboration ist das Auftreten einer Kontaktsituation zwischen Bediener und Roboter (samt Werkzeug und Werkstück), sei es absichtlich oder unabsichtlich, zulässig. Die Sicherheit wird durch eine Risikobeurteilung gewährleistet, welche das Ziel verfolgt, die Auswirkung sämtlicher möglicher Gefährdungen auf ein vertretbares Niveau zu senken.

Ein zentraler Punkt ist die messtechnische Erfassung beziehungsweise Beurteilung kritischer Kontaktsituationen. Hierfür sind in [7] anhand eines Körpermodells, empirisch ermittelte Grenzwerte angegeben. Diese biomechanischen Limits wurden durch Versuche an 100 Probanden mit verschiedenen Körpereigenschaften (Größe, Gewicht,...) ermittelt. Dabei wurde an den verschiedenen, vorher definierten Stellen am Körper langsam eine Kraft aufgebracht. Sobald die Testperson Schmerzen verspürte, wurde der Versuch gestoppt und der Maximalwert der Kraft dokumentiert. Die Werte in der Tabelle stellen die 75%-Perzentile der Messwerte dar. Dies bedeutet 75% der Testpersonen empfinden diesen Grenzwert bereits als schmerzhaft, wobei hingegen 25% der Teilnehmer angaben, keine Schmerzen zu empfinden. Des Weiteren wird zwischen einem quasi-statischen und einem transienten Kontakt unterschieden (siehe Abschnitt 2.1). Die Grenzwerte für den transienten Kontakt sind in allen Fällen doppelt so groß wie die Werte für den quasi-statischen Kontakt. Wie in Abbildung 2.9 ersichtlich, spricht man nur in den ersten halben Sekunde von einem transienten Kontakt. Danach muss sich der gemessene Wert unterhalb des quasi-statischen Limits befinden. Der Faktor zwei für den transienten Kontakt beruht auf bereits zuvor durchgeführten Studien [3, 26, 40, 34]. Abbildung 2.8 zeigt einen Ausschnitt aus der Tabelle. Obwohl für den Kopfbereich (1-3) Werte in der Tabelle angegeben sind, ist eine Kollision in diesem Bereich nicht zulässig und unbedingt zu vermeiden.

Die Geschwindigkeit des Roboters ist einer der maßgebenden Faktoren für die Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte bei einem transienten Kontakt. Dazu wird in [7] eine Methode vorgestellt, wie die maximale Robotergeschwindigkeit für die jeweilige Kontaktsituation bestimmt werden kann. Dieses Modell beschreibt den Kontakt als vollkommen unelastisch. Dies bedeutet, die Umwandlung von kinetischer Energie in innere Energie ist maximal. Die innere Energie wird mit der maximalen

potentiellen Energie gleichgesetzt (siehe 2.2). Die maximale potentielle Energie ergibt sich aus den biomechanischen Grenzwerten und einer effektiven Federkonstante ([7, S. 27]) für den jeweiligen Körperbereich. Mit Hilfe der maximalen potentiellen Energie und der reduzierten Masse kann nun die zulässige Relativgeschwindigkeit zwischen Bediener und dem Robotersystem ermittelt werden (2.5). In Abbildung 2.11 sind die zulässigen Geschwindigkeiten in Abhängigkeit der effektiven Roboter Masse dargestellt. Diesen Werte liegt eine Kontaktfläche von $A = 1\text{cm}^2$ zugrunde.

$$E = \frac{1}{2}\mu v_{rel,max}^2 = \frac{F_{max}^2}{2k} = \frac{A^2 p_{max}^2}{2k} \quad (2.2)$$

mit

- $v_{rel,max}$... maximal zulässige relative Geschwindigkeit zwischen Roboter und der jeweiligen Körperregion des Bedieners
- μ ... reduzierte Masse des Zweikörpersystems (siehe 2.3)
- k ... effektive Federkonstante für eine spezifische Körperregion
- A ... Kontaktfläche zwischen Roboter und der Körperregion
- p_{max} ... maximal zulässiger Druck für eine bestimmte Körperregion (transienter Kontakt)
- F_{max} ... maximal zulässige Kraft für eine bestimmte Körperregion (transienter Kontakt)
- E ... Energieanteil welcher in Form von potentieller Energie auf den Körper übertragen wird

$$\mu = \left(\frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R}\right)^{-1} \quad (2.3)$$

mit

- m_H ... effektive Masse der spezifischen Körperregion des Bedieners (siehe Tabelle A.3 in [7])
- m_R ... effektive Masse des Roboters (siehe 2.4)

Body region	Specific body area		Quasi-static contact		Transient contact	
			Maximum permissible pressure ^a p_s N/cm ²	Maximum permissible force ^b N	Maximum permissible pressure multiplier ^c P_T	Maximum permissible force multiplier ^c F_T
Skull and forehead ^d	1	Middle of forehead	130	130	not applicable	not applicable
	2	Temple	110		not applicable	
Face ^d	3	Masticatory muscle	110	65	not applicable	not applicable
Neck	4	Neck muscle	140	150	2	2
	5	Seventh neck muscle	210		2	
Back and shoulders	6	Shoulder joint	160	210	2	2
	7	Fifth lumbar vertebra	210		2	2
Chest	8	Sternum	120	140	2	2
	9	Pectoral muscle	170		2	

Abbildung 2.8.: Ausschnitt aus der Tabelle Biomechanische Grenzwerte [7]

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L \quad (2.4)$$

mit

m_L ... effektive Last des Roboters (Werkzeug und Werkstück)

M ... Gesamtmasse der sich bewegenden Teile des Roboters

$$v_{rel,max} = \frac{F_{max}}{\sqrt{\mu k}} = \frac{p_{max} A}{\sqrt{\mu k}} \quad (2.5)$$

Bei dieser Kollaborationsart steht die Einhaltung der biomechanischen Grenzwerte an erster Stelle. Dieses Ziel kann entweder mit passiver oder aktiver Sicherheitstechnik erreicht werden. Zu den passiven Sicherheitselementen zählen unter anderem die Erhöhung der Kontaktfläche, die Absorbierung von Energie mittels nachgiebigen Materialien und die Reduktion der bewegten Massen. Zu den aktiven Sicherheitselementen zählen wiederum Arbeitsraumbegrenzungen, sowie die Begrenzung von Kraft und Geschwindigkeit. Die aktiven Sicherheitsfunktion müssen den Anforderungen nach [1, 5.4.2 S.14] genügen.

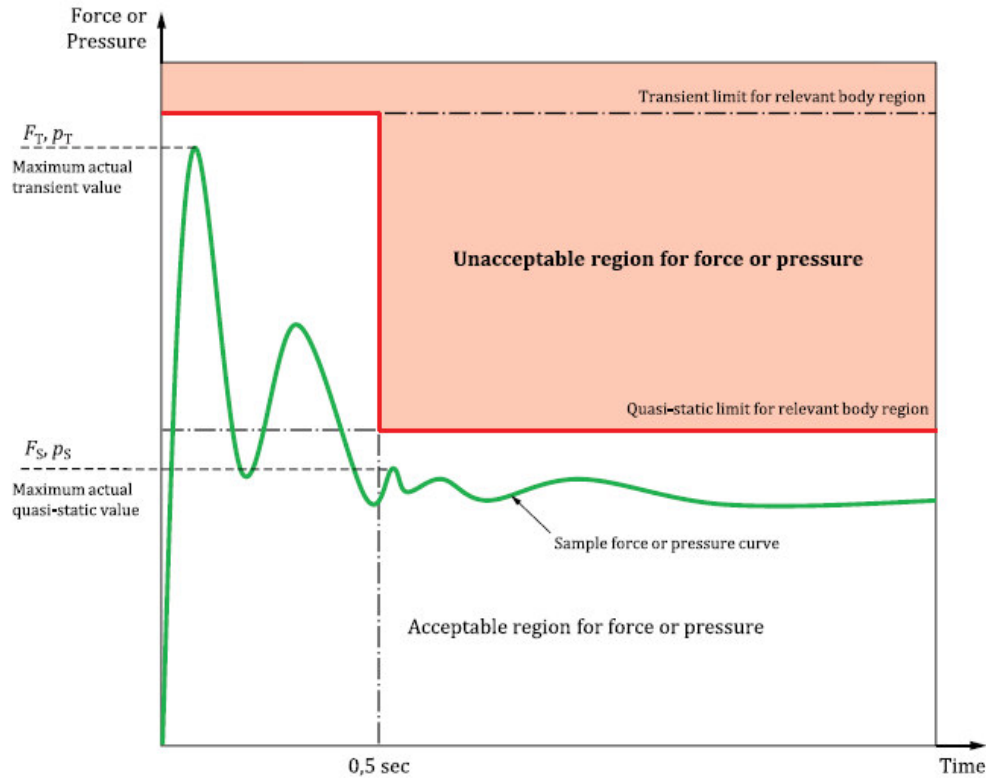


Abbildung 2.9.: Graphische Darstellung der biomechanischen Grenzwerte anhand eines Beispiels [7]

Messgeräte

Bei der Umsetzung der Kollaborationsform Kraft- und Leistungsbegrenzung ist für die Risikobeurteilung, anhand von vorab definierten Kollisionsszenarien, die Einhaltung der Grenzwerte hinsichtlich Kraft und Druck nachzuweisen. Der Nachweis passiert in Form von Kraft- und Druckmessungen. Allerdings werden in [7] keine Messgeräte für die Durchführung der Messungen vorgeschrieben. Im Folgenden werden die derzeit am Markt erhältlichen und von der deutschen Berufsgenossenschaft Holz und Metall BGHM für Baumusterprüfungen verwendeten Messgeräte präsentiert.⁶

Abbildung 2.10 zeigt je zwei Druck- und Kraftmessgeräte für die Kollisionsbeurteilung bei MRK Anwendungen. Die Fuji Druckmessfolie (2.10a) ist eine durchsichtige Folie, welche sich bei der Beaufschlagung mit Druck verfärbt. Die Intensität der Verfärbung spiegelt die Höhe des aufgetragenen Drucks wieder. Die Auswertung passiert mit

⁶Quelle: Volker Bautz BGHM.



Abbildung 2.10.: Druck- und Kraftmessgeräte für die Kollisionsbeurteilung bei MRK Anwendungen (Quelle: GTE Industrieelektronik GmbH)

einem Scanner welcher in Kombination mit einer Software die Farbintensität in Druckwerte umrechnet. Die Folie wird auf Rollen geliefert und kann mit einer Schere in die richtige Größe geschnitten werden. Dabei kann die Folie nur für eine Messung verwendet werden und beschränkt sich auf die Messung des maximal wirkenden Drucks. Ist für den Nachweis der Einhaltung der Grenzwerte, der Druckverlauf über die Zeit notwendig, so muss eine Druckmessfolie von Tekscan für die Messung herangezogen werden. Diese Folie ist wiederverwendbar und basiert im Gegensatz zur Fuji Druckmessfolie auf einer elektronischen Erfassung des Drucks. Für die Messung der Kraft kann das KDMG Kolrobot oder das KMG-500 Kolrobot Messgerät herangezogen werden. Beide Messgeräte bestimmen den Kraftverlauf über die Zeit. Der Unterschied liegt jedoch im Aufbau. Beim KDMG Kolrobot kann im Gegensatz zum KMG-500 Kolrobot die Dämpfung und die Federsteifigkeit verändert werden, um so die unterschiedlichen Körperregionen nachzubilden.

Abschließend ist festzuhalten, dass es noch sehr wenig Erfahrungswerte auf diesem Gebiet gibt und abzuwarten ist, welche Messgeräte sich letztendlich in der Praxis durchsetzen.

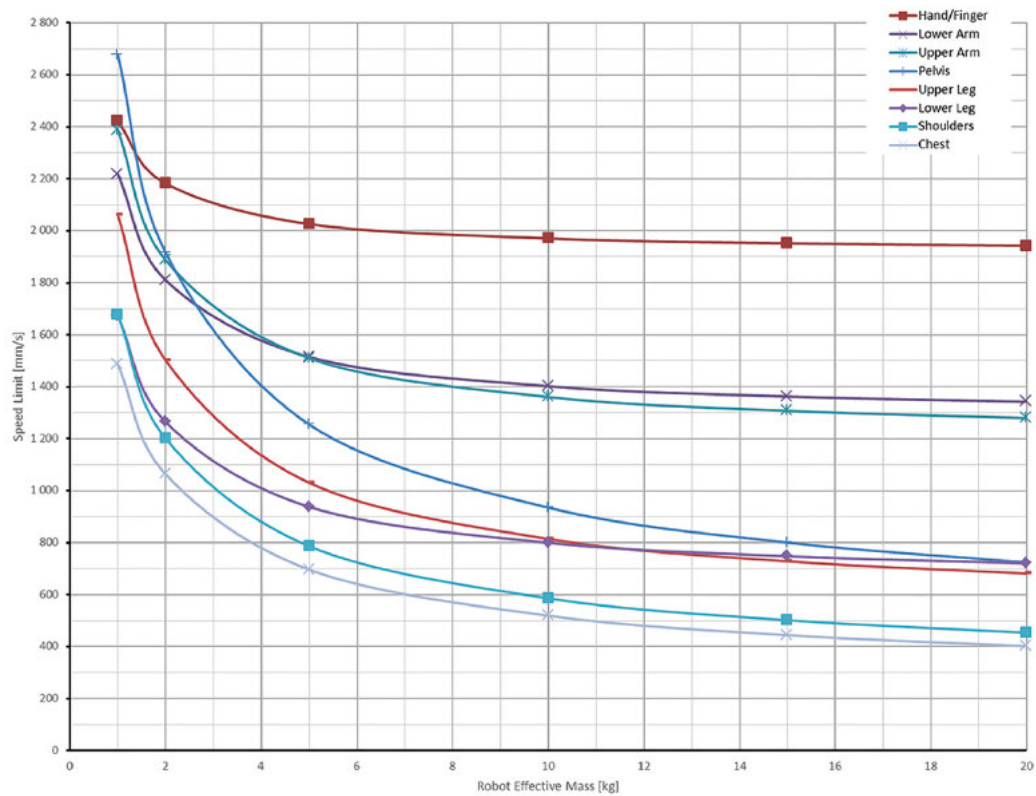


Abbildung 2.11.: Darstellung der zulässigen Geschwindigkeit in Abhängigkeit der effektiven Roboter­masse für verschiedene Körperregionen [7]

3. Industrieroboter

Aufgrund der Verfügbarkeit und der Funktionalität wird der Leichtbauroboter (LBR) KUKA iiwa (intelligent industrial work assistant) für die Versuche herangezogen. In diesem Kapitel werden die Grundlagen der Robotik angefangen vom kinematischen und mechanischen Aufbau bis hin zur Regelung und Programmierung behandelt. Der Inhalt dieses Kapitels bezieht sich teilweise auf den LBR iiwa und stellt somit keine vollständige Behandlung dieser Thematik dar. Aus Geheimhaltungsgründen ist der genaue Aufbau und die Regelung des LBR iiwa nicht bekannt¹. Bekannt ist jedoch, dass dieser Roboter vom Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) entwickelt wurde. Die Entwicklung des ersten LBR vom DLR startete in 1995. 2003 wurde bereits die dritte Generation, der DLR LBR III, vorgestellt [20]. Nachdem der DLR LBR III die Lizenzierungsreife erreicht hatte, wurde er im Jahr 2004 an die KUKA Roboter GmbH lizenziert. Dort wurde der Roboter stetig weiterentwickelt bis 2013 schließlich der LBR iiwa auf den Markt gebracht wurde.² Die Weiterentwicklungen konzentrierten sich dabei hauptsächlich darauf den Herstellungspreis des Roboters zu minimieren.³ Somit besteht der Grund zur Annahme, dass der DLR LBR III und der KUKA LBR iiwa in Bezug auf die entscheidenden Funktionen und Bauteile (Regelung, Sensorik, Antriebe) großteils ident ausgeführt sind. Aus diesem Grund wird bei fehlender Information zum LBR KUKA iiwa auf Veröffentlichungen bezüglich des DLR LBR III zurückgegriffen.

¹Auf Anfrage bei KUKA Roboter CEE GmbH wurde mitgeteilt, dass es sich hier um vertrauliche Informationen handelt, welche in diesem Rahmen nicht zur Verfügung gestellt werden können (Quelle: KUKA, Applikationsingenieur Wolfgang Fuchs).

²<http://www.dlr.de/rmc/rm/de/desktopdefault.aspx/tabid-3803/> [26.04.2017].

³Quelle: KUKA, Applikationsingenieur Wolfgang Fuchs.

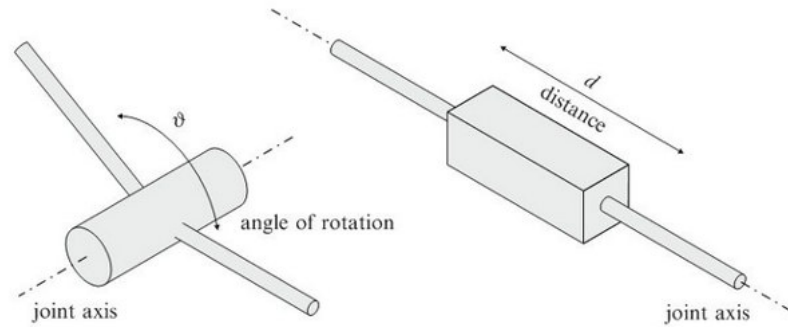


Abbildung 3.1.: Beispiel einer kinematischen Kette anhand eines SCARA Roboters (links) und Vertikalknickarmroboters (rechts) [11]

3.1. Kinematik

3.1.1. Kinematischer Aufbau

Der kinematische Aufbau eines Roboters besteht aus einem festen Sockel, aus Gelenken (Verbindungselemente) und Gliedern (Roboterarme). Die Gelenke stellen die beweglichen Verbindungen zwischen den einzelnen Gliedern dar und können entweder translatorisch oder rotatorisch ausgeführt sein (siehe Abbildung 3.1). Je nach Anzahl und Kombination der Gelenke ergibt sich die Form des Bewegungsraums und die Anzahl der Freiheitsgrade des Endeffektors. Prominente Vertreter sind wie in Abbildung 3.2 dargestellt z.B. der Vertikalknickarmroboter und der SCARA Roboter [11].

3.1.2. Lage des Körpers im Raum

Die Lage des Körper im Raum ist durch Position und Orientierung vollständig definiert. Die Position beschreibt den räumlichen Abstand und die Orientierung, die relative Rotation zweier Koordinatensysteme.

Position

Die Beschreibung der Position erfolgt mit der vektoriellen Größe ${}^1\mathbf{p}^2$. Diese beschreibt den räumlichen Abstand vom Ursprung des inertialfesten Koordinatensystems 1 (K_1) zum Ursprung des körperfesten Koordinatensystems 2 (K_2), ausgedrückt in

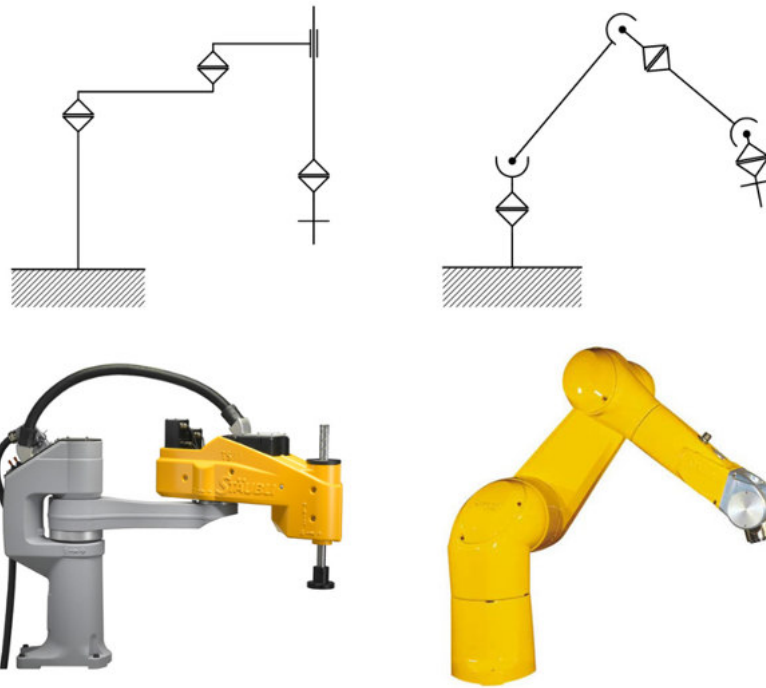


Abbildung 3.2.: Beispiel einer kinematischen Kette anhand eines SCARA Roboters (links) und Vertikalknickarmroboters (rechts) (Bildquelle: Stäubli)

Komponenten von K_1 . Für das in Abbildung 3.3 dargestellte Beispiel ergibt sich der Positionsvektor wie folgt.

$${}^1\mathbf{p}^2 = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad {}^R\mathbf{p}^H = \begin{bmatrix} -3 \\ 10 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Orientierung

Die Beschreibung der Orientierung erfolgt mit der vektoriellen Größe ${}^1\boldsymbol{\varphi}^2$. Diese beschreibt die relative Rotation von K_2 (körperfest) gegenüber K_1 . Für das in Abbildung 3.3 gezeigte Beispiel ergibt sich der Orientierungsvektor wie folgt (Drehreihenfolge x-y-z).

$${}^1\varphi^2 = \begin{bmatrix} \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad {}^R\varphi^H = \begin{bmatrix} -90 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Mathematisch wird die Änderung der Orientierung mit einer Rotationsmatrix \mathbf{R} beschrieben. Sinngemäß werden dabei die Einheitsvektoren von einem Ausgangskordinatensystem (K_1) in ein Zielkoordinatensystem (K_2) transformiert.

$$\mathbf{e}^2 = \mathbf{R}^{21}\mathbf{e}^1, \quad \text{wobei gilt} \quad \mathbf{R}^{-1} = \mathbf{R}^T, \quad (\mathbf{R}^{21})^{-1} = \mathbf{R}^{12} \quad (3.3)$$

Räumliche Drehungen kann man als Hintereinanderschaltung von Elementardrehungen definieren. In 3.4 sind die einzelnen Rotationsmatrizen für die jeweilige positive Drehung des Koordinatensystems um die x,y und z-Achse angegeben.

$$\mathbf{R}_X = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{bmatrix} \quad \mathbf{R}_Y = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{R}_Z = \begin{bmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Wie in Abbildung 3.4 gezeigt, spielt die Drehreihenfolge dabei eine wesentliche Rolle auf die daraus resultierende Orientierung. Die gesamte Rotationsmatrix resultiert aus der Multiplikation der einzelnen Rotationsmatrizen. Im Folgenden wird die Darstellung mithilfe von Kardanwinkeln gezeigt.⁴ Hierbei ist die Reihenfolge der Ausführung der Drehungen x-y-z.

$$\mathbf{e}^2 = \mathbf{R}_Z(\gamma)\mathbf{R}_Y(\beta)\mathbf{R}_X(\alpha)\mathbf{e}^1 = \mathbf{R}^{21}\mathbf{e}^1 \quad (3.5)$$

⁴Hier werden folgende Abkürzungen benutzt: $\sin \alpha = s\alpha$, $\cos \alpha = c\alpha$.

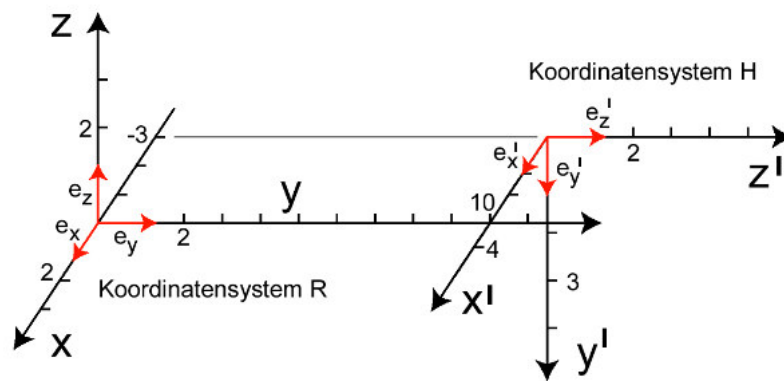


Abbildung 3.3.: Position und Orientierung eines Koordinatensystems H gegenüber des Koordinatensystem R [39]

$$\mathbf{R}^{21} = \begin{bmatrix} c\gamma c\beta & s\gamma c\alpha + c\gamma s\beta s\alpha & s\gamma s\alpha - c\gamma s\beta c\alpha \\ -s\gamma c\beta & c\gamma c\alpha - s\gamma s\beta s\alpha & c\gamma s\alpha + s\gamma s\beta c\alpha \\ s\beta & -c\beta s\alpha & c\beta c\alpha \end{bmatrix} \quad (3.6)$$

Ein Nachteil dieser Darstellungsform ist die auftretende Singularität bei $\beta = \pm\pi/2$. In diesem Fall ist es nicht mehr möglich zwischen den beiden Winkeln α und γ zu unterscheiden, da die beiden Drehachsen zusammenfallen.

Weitere Darstellungsmöglichkeiten wie z.B. die Eulerwinkel, Winkel-Achse Darstellung und Quaternionen sind in [15] ausgeführt.

3.1.3. Vorwärtskinematik

Nachdem der kinematische Aufbau des Roboters definiert ist, besteht der nächste Schritt darin eine Beschreibung der aktuellen Roboterstellung zu definieren. Die sogenannte Vorwärtskinematik bezeichnet die Abbildung zwischen den Gelenkkordinaten \mathbf{q} und den aufgabenbezogenen Koordinaten \mathbf{x} (Position und Orientierung des Endeffektors). Der Roboter besteht dabei aus N Gelenken und der Endeffektor des Roboters verfügt damit, je nach Aufbau, über M Freiheitsgrade ($M \leq 6$).

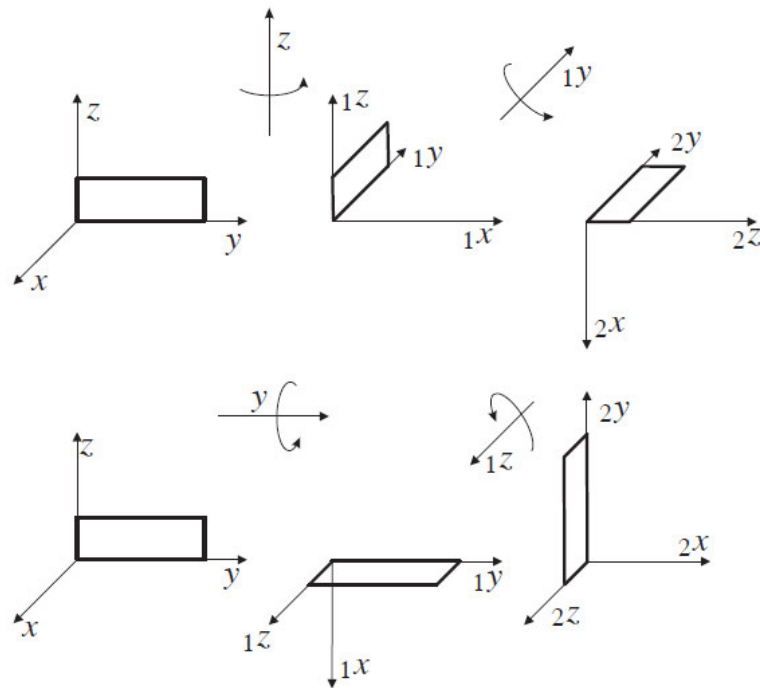


Abbildung 3.4.: Verschiedene Reihenfolge der Elementardrehungen [15]

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}(\mathbf{q}) \quad \text{mit} \quad \mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ q_N \end{bmatrix}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \mathbf{p} \\ \boldsymbol{\varphi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \\ \alpha \\ \beta \\ \gamma \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Allgemein kann die Vorwärtskinematik mit der sogenannten homogenen Koordinatentransformation hergeleitet werden [11, 41]. Die Position des Punktes A im Raum bezüglich K_3 wird durch den Vektor ${}^3\mathbf{p}^A$ beschrieben. K_3 ist ein Koordinatensystem, welches den Abstand ${}^2\mathbf{r}^3$ und die Orientierung \mathbf{R}^{32} gegenüber K_2 aufweist. Die Position von A bezüglich K_2 ergibt sich folgendermaßen.

$${}^2\mathbf{p}^A = (\mathbf{R}^{32})^{-1} {}^3\mathbf{p}^A + {}^2\mathbf{r}^3 = \mathbf{R}^{23} {}^3\mathbf{p}^A + {}^2\mathbf{r}^3 \quad (3.8)$$

Diese Gleichung kann auch in folgender Form geschrieben werden.

$$\begin{bmatrix} {}^2\mathbf{p}^A \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{R}^{23} & | & {}^2\mathbf{r}^3 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} {}^3\mathbf{p}^A \\ 1 \end{bmatrix} = \mathbf{T}^{23} \begin{bmatrix} {}^3\mathbf{p}^A \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.9)$$

Für die Transformationsmatrix gilt in diesem Fall $\mathbf{T}^{-1} \neq \mathbf{T}^T$. Die Inverse dieser Matrix ist wie folgt zu berechnen.

$$(\mathbf{T}^{23})^{-1} = \mathbf{T}^{32} = \begin{bmatrix} (\mathbf{R}^{23})^T & | & -(\mathbf{R}^{23})^T {}^2\mathbf{r}^3 \\ 0 & 0 & 0 & | & 1 \end{bmatrix} \quad (3.10)$$

Zur Beschreibung von offenen kinematischen Ketten, deren Körper durch Gelenke mit lediglich einem Freiheitsgrad verbunden sind, können auch die sogenannten Denavit-Hartenberg Parameter herangezogen werden [13]. Diese Parameter stellen die Minimalbeschreibung der Kinematik von Mehrkörpersystemen dar. Voraussetzung hierfür ist die Anordnung der Koordinatensysteme nach bestimmten Regeln.

3.1.4. Inverse Kinematik

In der Regel sind die aufgabenbezogenen Koordinaten bekannt und die zugehörigen Gelenkkordinaten gesucht. Dafür muss das Gleichungssystem (3.7) nach \mathbf{q} aufgelöst werden.

$$\mathbf{q} = \mathbf{f}^{-1}(\mathbf{x}) \quad (3.11)$$

Im Gegenzug zur Vorwärtskinematik, besitzt die inverse Kinematik abgesehen von einigen trivialen Fällen immer mehrere Lösungen. Diese Lösungen müssen dementsprechend selektiert werden. Hierfür gibt es verschiedene Prinzipien wie z.B. die geometrische, algebraische und numerische Lösung [13, 22]. Ist die Anzahl der Gelenkkordinaten N größer als die Anzahl der aufgabenbezogenen Koordinaten M ($N > M$), dann ist der Roboter kinematisch redundant. In diesem Fall kann der Roboter bewegt werden, ohne dabei die Position des Endeffektors zu verändern. In Abbildung 3.5 ist diese Situation anhand des DLR LBR III gezeigt. Dies bedeutet des weiteren auch, dass der Roboter Positionen mit den unterschiedlichsten

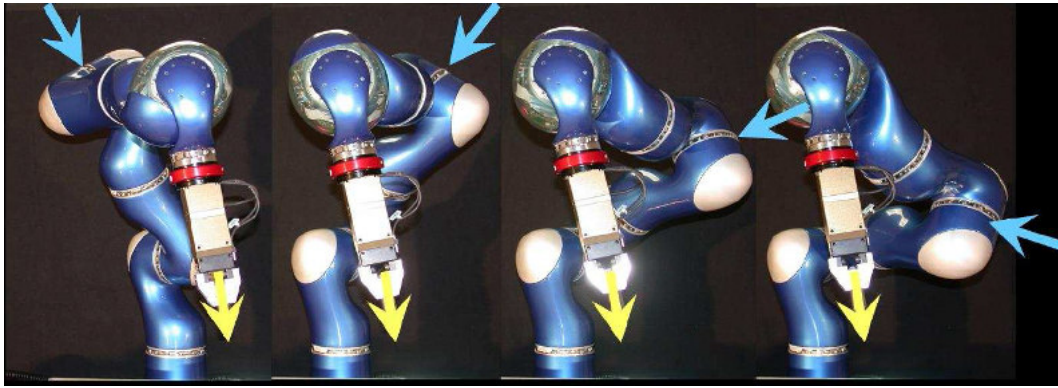


Abbildung 3.5.: Veranschaulichung der kinematischen Redundanz anhand des DLR LBR III [31]

Achskonfigurationen anfahren kann. Dieser zusätzliche Freiheitsgrad kann nun dazu verwendet werden, eine optimale Bahn im Sinne eines zuvor definierten Kriteriums (z.B. Dauer der Bewegung) auszuwählen. Für weitere Informationen diesbezüglich wird auf [31, 15] verwiesen.

3.1.5. Jacobimatrix

Die Jacobi-Matrix stellt den Zusammenhang zwischen den Gelenksgeschwindigkeiten und den kartesischen Geschwindigkeiten her. Sie ergibt sich durch Differenzieren des Zusammenhangs zwischen den Gelenkwinkeln und den auftragsbezogenen Koordinaten $\mathbf{f}(\mathbf{q})$ nach den Gelenkwinkel \mathbf{q} . Die Jacobi-Matrix besteht aus M Zeilen (Anzahl der aufgabenbezogenen Koordinaten) und N Spalten (Anzahl der Gelenke).

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}\dot{\mathbf{q}} \quad \text{mit} \quad \mathbf{J} = \frac{\partial \mathbf{f}(\mathbf{q})}{\partial \mathbf{q}} \quad (3.12)$$

Eine weitere bedeutende Rolle spielt die Jacobi-Matrix bei der Transformation der auf den Endeffektor wirkenden Kräfte in die daraus resultierenden Gelenkmomente.

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (3.13)$$

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \tau_N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{21} & J_{31} & \cdot & \cdot & J_{M1} \\ J_{12} & J_{22} & J_{32} & \cdot & \cdot & J_{M2} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot \\ J_{1N} & J_{2N} & J_{3N} & J_{4N} & J_{5N} & J_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_\alpha \\ M_\beta \\ M_\gamma \end{bmatrix} \quad (3.14)$$

Dieser Zusammenhang lässt sich mithilfe des Prinzips der virtuellen Arbeit herleiten [37, 32].

3.2. Programmierverfahren

Prinzipiell wird bei der Roboterprogrammierung zwischen direkter (online) und indirekter (offline) Programmierung unterschieden (siehe Abbildung 3.6). Bei der Online-Programmierung wird die Erstellung des Programms direkt am oder mit dem Roboter vorgenommen. Hingegen bei der Offline-Programmierung kann die Erstellung des Programms z.B. durch die Arbeitsvorbereitung erfolgen, da nur ein Computer und nicht der Roboter für diesen Prozess benötigt wird.

Grundsätzlich sind die Programmiersprachen von Hersteller zu Hersteller verschieden. Es existiert somit keine einheitliche Programmiersprache, sondern die meisten der Programmiersprachen basieren auf FORTRAN, PASCAL oder BASIC beziehungsweise ähneln diesen.

3.2.1. Direkte Programmierung

Die direkte Programmierung erfolgt entweder am Handbediengerät des Roboters (Teach-In-Verfahren) oder durch das Führen des Roboters per Hand (Playback-Verfahren).

Die Programmierung des Roboters mittels eines Handbediengeräts ist das am häufigsten eingesetzte Programmierverfahren. Hier werden die einzelnen Punkte im Raum entweder in einem kartesischen Koordinatensystem oder achsspezifisch

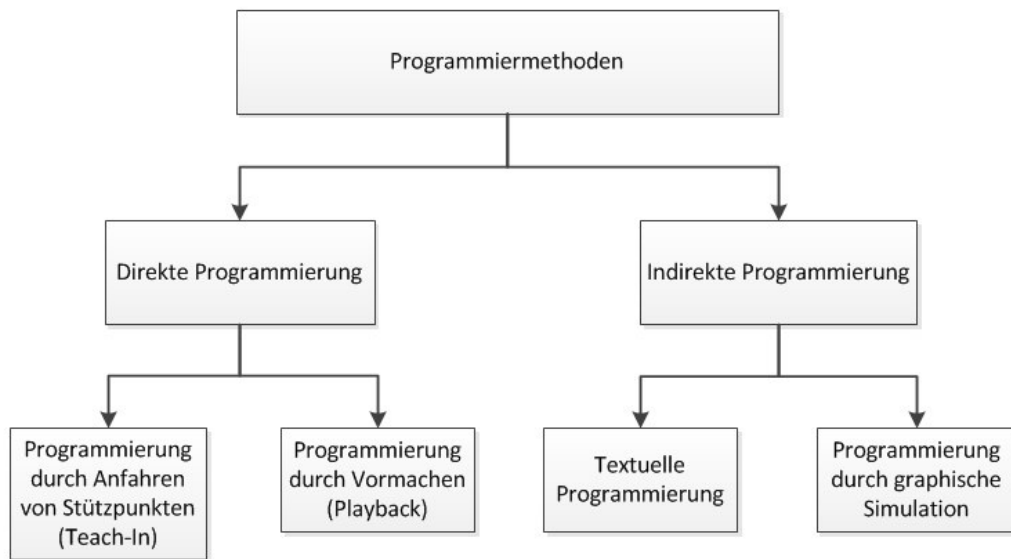


Abbildung 3.6.: Programmiermethoden für Roboter [38]

angefahren. Diese Positionen werden zusammen mit den gewünschten Bewegungsbefehlen (z.B. PTP, LIN)⁵ und anderen Parametern wie z.B. der erforderlichen Geschwindigkeit gespeichert. Zusätzlich zu den Bewegungen können auch Anweisungen wie z.B. die Greiferbetätigung oder auch der Aufruf von Unterprogrammen erfolgen.

Soll der Roboter bestimmte Bahnen abfahren (z.B. Lackierroboter) eignet sich das Playback-Verfahren. Hier führt der Bediener den Roboter entlang der gewünschten Bahn und der Roboter wiederholt später genau diese Bewegungen.

Die Vorteile der Online-Programmierung liegen darin, dass dieses Verfahren einfach verständlich ist und Programme sofort getestet und korrigiert werden können. Die Nachteile hingegen sind die damit verbundenen Stillstandszeiten und die durch Bediener begrenzte erreichbare Genauigkeit [12].

3.2.2. Indirekte Programmierung

Die indirekte Programmierung wird weiters in die textuelle Programmierung und in die Programmierung durch graphische Simulation unterschieden.

⁵Point to Point (PTP)...Bewegung auf dem schnellsten Weg von Punkt zu Punkt.
Linear (LIN)...Bewegung auf der durch die beiden Punkte gebildete Gerade.

Bei der textuellen Programmierung bilden die Angabe von aufeinanderfolgenden Kommandos in Form von Texten das Roboterprogramm. Der Vorteil hierbei ist, dass es zu keinen Stillstandszeiten der Fertigungsanlagen kommt, da die Programmierung auf jedem Computer durchgeführt werden kann. Allerdings können die Programme nur durch qualifizierte Programmierer erstellt werden und die Ermittlung der konkreten Positionen und Orientierungen für die Applikation gestaltet sich aufwendig. Aus diesem Grund sind sogenannte Offline-Programmiersysteme entstanden, welche die graphische-interaktive Simulation und Programmierung in einer dreidimensionalen Darstellung ermöglichen. Solch ein System wird in drei Teilgebiete gegliedert [38]:

- Modellierung von Roboterzellen
Dieser Teil beinhaltet die geometrische Modellierung des Roboters und seiner Umgebung. Neben den geometrischen Informationen enthält das Modell auch technologische und funktionelle Daten.
- Roboterprogrammierung
Die Roboterprogrammierung erfolgt entweder anhand der simplen Eingabe von Positionsdaten oder es wird virtuell ein Teach-In durchgeführt. Es besteht auch die Möglichkeit, dass das Roboterprogramm automatisch nur anhand der Geometriedaten des Werkstücks erstellt wird. Dies hängt von Aufbau des Programmiersystems ab. Das Programm wird dabei entweder in der roboterspezifischen Sprache erstellt oder in einer systemeigenen Sprache, welche durch Postprozessoren in die jeweilige Programmiersprache übersetzt wird.
- Animation des Modells
Dieser Teil beinhaltet die Animation des Programmablaufs, mit der Möglichkeit den Industrieroboter aus verschiedenen Blickwinkeln und unterschiedlichen Entfernungen auf dem Bildschirm zu betrachten.

Einer der Vorteile eines Offline-Programmiersystems ist die Möglichkeit zur Simulation des Programmablaufs, welche Kollisionskontrollen, Taktzeitstudien und die einfache Durchführung anderer Vergleiche ermöglichen. Allerdings ist es oft nicht möglich den simulierten Ablauf einfach auf die reale Anlage zu übertragen. Dies liegt daran, dass Realität und Modell aufgrund von Modellierungsfehlern und Ungenauigkeiten große Differenzen aufweisen können [8]. Anders gesprochen muss der Roboter eine gute Absolutgenauigkeit aufweisen, um diese Abweichungen in einem verträglichen Rahmen zu halten. Eine gute Absolutgenauigkeit wird durch eine Kalibrierung des Roboters erreicht und verursacht Mehrkosten.

Die beiden wichtigsten Programmierverfahren, das Teach-In-Verfahren und die Offline-Programmierung in Form von Programmiersystemen, sind in Abbildung 3.7 gegenübergestellt.

3.3. DLR Leichtbaurobter III

Der DLR LBR III wurde von DLR am Institut für Robotik und Mechatronik entwickelt. Er zeichnet sich besonders durch seine leichte Bauweise, den Aufbau der Gelenke und den innovativen Regelungskonzepten aus.

3.3.1. Mechanischer Aufbau

Der DLR LBR III besteht aus sieben Drehgelenken und kann aufgrund der integrierten Sensorik und seiner runden Formen für die Mensch-Roboter-Kollaboration eingesetzt werden. Die kinematische Redundanz soll die Manipulationsfähigkeit, auch in veränderlichen Arbeitsräumen mit nicht vorhersehbaren Hindernissen sicherstellen. Die Roboterstruktur besteht aus kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen und wurde mithilfe einer FE-Simulation entworfen. Beim LBR iiwa hingegen sind die Strukturelemente aus einer Aluminium-Magnesium Legierung.

In Abbildung 3.8 ist der Aufbau eines Gelenks des DLR LBR III dargestellt. Eine Gelenkeinheit besteht aus⁶

- einem Harmonic Drive Getriebe
- Positionssensoren am Motor und der Abtriebsseite des Getriebes⁷
- einer Elektronikeinheit, bestehend aus Leistungselektronik, digitalen Signalprozessoren (DSPs) für die Gelenk- und Bewegungssteuerung
- einem abtriebsseitigen Drehmomentensensor
- dem Gelenklager (einem Dünnring-Kreuzrollenlager)

⁶http://www.dlr.de/rmc/rm/de/desktopdefault.aspx/tabid-3803/6175_read-8963/ [29.04.2017].

⁷Der LBR iiwa verfügt über keine abtriebsseitige Positionserfassung.

	Teach-In-Verfahren	Off-line-Programmierung mit Simulation
		
Vorteile	<ul style="list-style-type: none"> + bewährtes, verbreitetes Verfahren + einfache Anwendung + Programm sofort ausführbar 	<ul style="list-style-type: none"> + Produktion kann weiterlaufen + Änderungen leicht durchführbar + Kollisionsüberprüfung + Vergleich verschiedener Programmvarianten und Konfigurationen möglich + Entwurf ganzer Roboterzellen möglich + Einbindung in CIM (Computer-integrated manufacturing) möglich
Nachteile	<ul style="list-style-type: none"> - teure Stillstandszeiten der Anlage - Sicherheitsrisiken beim Programmieren und Testen 	<ul style="list-style-type: none"> - oft teures Computersystem nötig - noch große Ungenauigkeiten, zahlreiche Fehlerquellen - Anpassung der Programme an reale Umgebung notwendig
Anforderungen an den Roboter	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Wiederholgenauigkeit 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Wiederholgenauigkeit • Hohe Absolutgenauigkeit

Abbildung 3.7.: Vergleich von Teach-In-Verfahren mit Offline-Programmiersystemen [12](Bildquellen: Blumenbecker, cenit)

Durch den Einsatz von Gelenkmomentsensoren resultiert eine Nachgiebigkeit in den Gelenken, welche bei der Modellierung und Regelung des Systems unbedingt berücksichtigt werden muss.

Für weitere Informationen bezüglich des DLR LBR III und seinem Aufbau wird auf [20, 24] verwiesen.

3.3.2. Dynamisches Modell

Bei konventionellen Industrierobotern werden in der Regel bei der Modellierung alle Komponenten als starre Körper betrachtet. Aufgrund des in den meisten Fällen steifen Strukturaufbaus von Industrierobotern, trifft diese Annahme bei mäßigen Bewegungsgeschwindigkeiten zu. Ein steifer Strukturaufbau erhöht die Gesamtmasse des Roboters und führt zu typischen Verhältnissen zwischen Nutzlast und Eigengewicht von ca. 1:20. Bei Leichtbaurobotern bei denen dieses Verhältnis möglichst klein sein soll und bei Industrierobotern welche schnelle, hochfrequente Bewegungen ausführen sollen, ist diese Annahme nicht mehr zutreffend. Hierzu gibt es in der Literatur zwei übliche Modellerweiterungen:

- Roboter mit elastischen Gelenken
Bei dieser Modellannahme wird die Verbindungsstruktur zwischen den Gelenken als starr angenommen, während die Elastizität konzentriert im Robotergelenk betrachtet wird (siehe Abbildung 3.9). Diese Annahme trifft sehr gut zu, wenn die Nachgiebigkeit hauptsächlich auf die Getriebe oder einer integrierten Momentensensorik zurückzuführen ist.
- Roboter mit elastischen Segmenten
Hier wird die Nachgiebigkeit nicht in den Gelenken, sondern in der Verbindungsstruktur zwischen den Gelenken modelliert. Diese Art der Modellierung ist bei sehr langen und leichten Strukturen notwendig.

Bei dem Leichtbaurobster DLR III ergibt sich aufgrund der Harmonic-Drive Getriebe und der Momentensensorik eine nicht zu vernachlässigende Nachgiebigkeit in den Gelenken. Bei der Auslegung der Struktur hingegen wurde sehr darauf geachtet, diese steif genug zu realisieren. Somit ist die Elastizität der Struktur deutlich geringer als die Nachgiebigkeit in den Gelenken. Aus diesem Grund ist in diesem Fall die Modellannahme des Roboters mit elastischen Gelenken ein sinnvoller Kompromiss zwischen Modellierungsungenauigkeit und Modellkomplexität [9]. Die Herleitung der

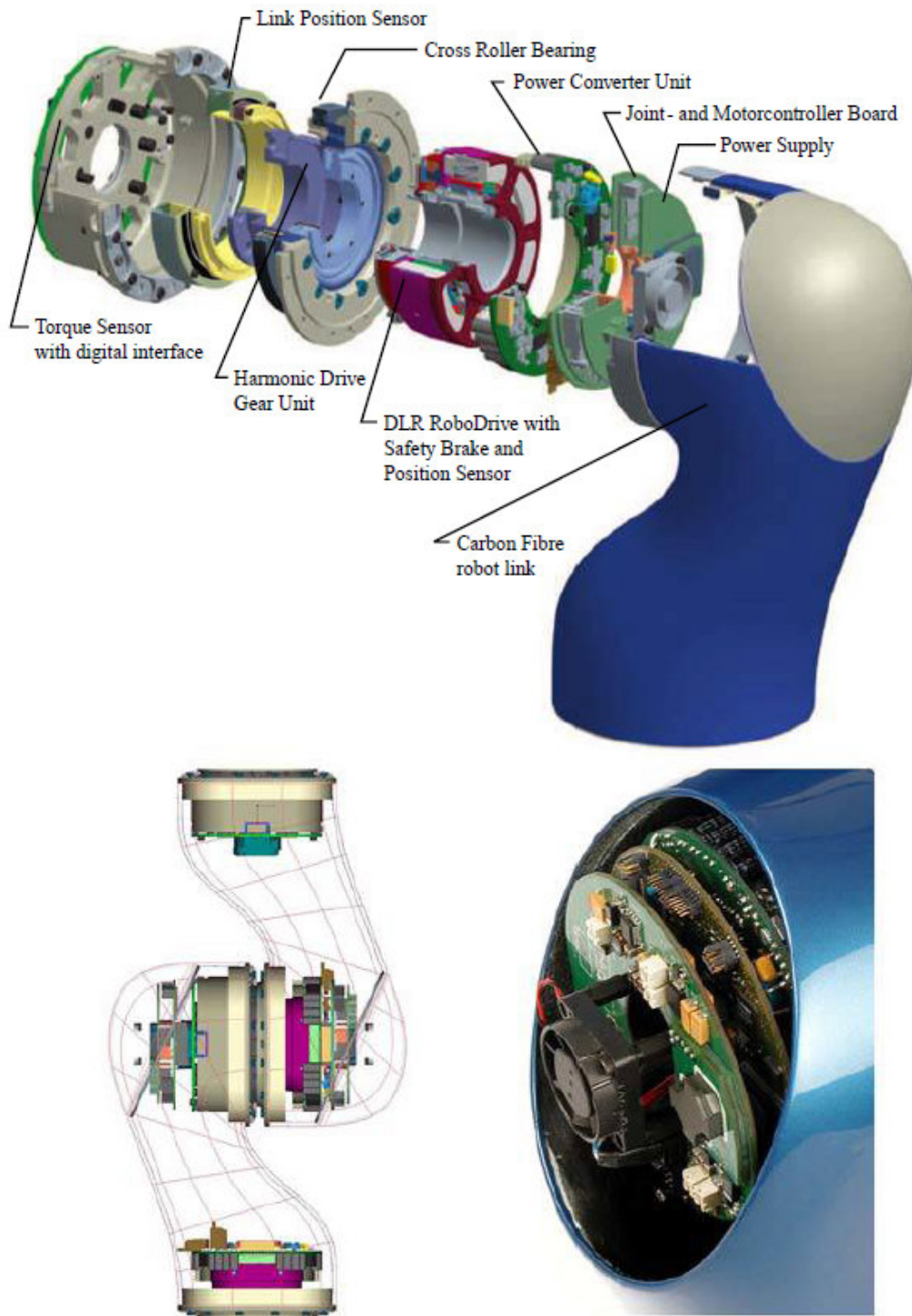


Abbildung 3.8.: Der Aufbau des Gelenks des DLR LBR III [24]

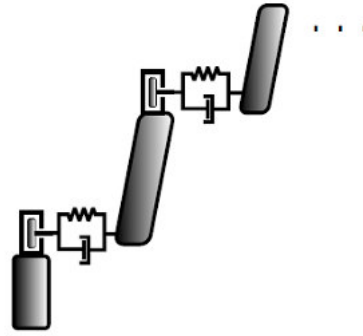


Abbildung 3.9.: Modellierung eines Roboters mit elastischen Gelenken [9]

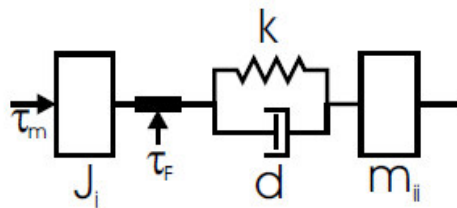


Abbildung 3.10.: Modellierung eines elastischen Robotergelenks als Zweimassenmodell [9]

Dynamik von starren Roboter ist in [41, 13] und für elastische Roboter in [15, 33] weiter ausgeführt.

Für die Berücksichtigung der Gelenknachgiebigkeit werden die Gelenke als Zweimassensystem modelliert (siehe Abbildung 3.10). Daraus folgt, dass ein Roboter mit N Gelenken aus $2N$ Starrkörper besteht. Nämlich aus N Motorträgheiten und N Verbindungsstrukturen. Für die Beschreibung der Bewegung sind somit $2N$ Lagekoordinaten notwendig. Darüber hinaus wurden bei der Modellierung folgende Annahmen getroffen [33]:

- A1: Die kinetische Energie der motorseitigen Masse ist hauptsächlich durch die eigene Drehgeschwindigkeit der Motoren verursacht.
- A2: Die motorseitigen Starrkörper sind rotationssymmetrische Körper mit dem Schwerpunkt auf der Drehachse des Rotors.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} \mathbf{q}_1_{(1 \times N)} \\ \mathbf{q}_2_{(1 \times N)} \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Dabei stellt \mathbf{q}_1 die Motorpositionen und \mathbf{q}_2 die abtriebsseitigen Positionen der starren Struktur dar. Bei den Motorpositionen \mathbf{q}_1 handelt es sich um bereits über die Getriebeübersetzung n umgerechnete Größen.

$$q_{1_i} = \frac{q_{mot_i}}{n} \quad (3.16)$$

$$\tau_{m_i} = \tau_{mot_i} n \quad (3.17)$$

$$J_i = J_{mot_i} n^2 \quad (3.18)$$

q_{mot} , τ_{mot} und J_{mot} bezeichnen die Position des Rotors, das Motormoment und das Massenträgheitsmoment des Rotors.

Ein Weg zur Herleitung der Bewegungsgleichungen des Roboters ist der Lagrange Formalismus.

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = \tau_{M_i} \quad i = 1, 2, \dots, 2N \quad (3.19)$$

$$\text{mit } L(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) = T(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) - U(\mathbf{q}), \quad \tau_M = [\tau_m, \mathbf{0}_{(1 \times N)}]^T \quad (3.20)$$

Hierfür muss die kinetische und potenzielle Energie des Systems bestimmt werden. Die potentielle Energie ergibt sich aus der Energie der Gelenkfedern und der Gravitationskräfte. Mit der Annahme (A2) folgt, dass die Energie der Gravitationskräfte nur von den abtriebsseitigen Positionen \mathbf{q}_2 abhängig ist.

$$U_G(\mathbf{q}) = U_G(\mathbf{q}_2) \quad (3.21)$$

Die potentielle Energie der Gelenkfedern ergibt sich wie folgt.

$$U_F(\mathbf{q}) = \frac{1}{2}(\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2)^T \mathbf{K}(\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2) \quad (3.22)$$

\mathbf{K} stellt hierbei die diagonale Steifigkeitsmatrix dar, welche die jeweiligen Gelenksteifigkeiten als Diagonalelemente aufweist. Somit ist die gesamte potenzielle Energie des Systems

$$U = U_G + U_F = U_G(\mathbf{q}_2) + \frac{1}{2}(\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2)^T \mathbf{K}(\mathbf{q}_1 - \mathbf{q}_2). \quad (3.23)$$

Die kinetische Energie des Systems setzt sich aus den Rotoren der Motoren und der Verbindungsstruktur des Roboters zusammen. Die kinetische Energie eines Rotors ist

$$T_{R_i} = \frac{1}{2} \mathbf{v}_i^T m_i \mathbf{v}_i + \frac{1}{2} \boldsymbol{\omega}_i^T \mathbf{I}_i \boldsymbol{\omega}_i. \quad (3.24)$$

\mathbf{v}_i , m_i , $\boldsymbol{\omega}_i$ und \mathbf{I}_i stellen hierbei die Geschwindigkeit des Massenmittelpunkts des Rotors, die Masse des Rotors, die Winkelgeschwindigkeiten des Rotors um die Trägheitshauptachsen und die Trägheitsmomente dar. Aus Annahme (A2) folgt wiederum, dass die Geschwindigkeit \mathbf{v}_i nur von den abtriebsseitigen Positionen abhängig ist. Aus diesem Grund kann der erste Teil von Gleichung 3.24 in der kinetischen Energie der Verbindungsstruktur mit berücksichtigt werden. Mit Annahme (A1) ergibt sich die gesamte kinetische Energie zu

$$T = \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_1^T \mathbf{J} \dot{\mathbf{q}}_1 + \frac{1}{2} \dot{\mathbf{q}}_2^T \mathbf{M}(\mathbf{q}_2) \dot{\mathbf{q}}_2. \quad (3.25)$$

Die Matrix \mathbf{J} ist eine konstante Matrix, deren Diagonalelemente die Trägheitsmomente der jeweiligen Rotoren um die Rotationsachse enthält. $\mathbf{M}(\mathbf{q}_2)$ repräsentiert für jedes Gelenk die Trägheiten aller darauffolgenden Rotoren und Verbindungsstrukturen. Sie entspricht der Trägheitsmatrix des starren Roboters [29].

Mithilfe des Lagrange Formalismus (3.20) ergeben sich die folgenden Bewegungsgleichungen zur Beschreibung des System:

$$\begin{aligned}\tau_m &= J\ddot{q}_1 + \tau \\ \tau &= M(q_2)\ddot{q}_2 + C(q_2, \dot{q}_2)\dot{q}_2 + g(q_2)\end{aligned}\quad (3.26)$$

$$\begin{aligned}\text{mit } C(q_2, \dot{q}_2) &= \dot{M}(q_2)q_2 - \frac{1}{2}q_2^T \frac{\partial M(q_2)}{\partial q_2} q_2 \\ \tau &= K(q_1 - q_2), \quad \frac{\partial U_G(q_2)}{\partial q} = \begin{bmatrix} 0 \\ g(q_2) \end{bmatrix}\end{aligned}\quad (3.27)$$

Die Dämpfung der Feder (Abbildung 3.10) wird in den meisten Fällen vernachlässigt. Eine Erweiterung des Modells (3.26) zur Berücksichtigung der Reibung und der Federdämpfung wird in [9] vorgestellt.

3.4. Leichtbauroboter KUKA iiwa

In diesem Kapitel werden alle für die Versuchsdurchführung benötigten Informationen bezüglich des Leichtbauroboters aufbereitet. Angefangen von den technischen Daten, der Programmierung bis hin zu den Sicherheitsfunktionen, sowie den speziellen Betriebsmodi und der Inbetriebnahme. Die folgenden Informationen und Abbildungen sind aus der Spezifikation des Roboters [19] und aus der Bedien- und Programmieranleitung für Systemintegratoren [18] entnommen. In Abbildung 3.11 ist eine Übersicht des Robotersystems dargestellt.

3.4.1. Technische Daten

Der LBR KUKA iiwa gehört zu den Knickarmrobotern und besteht aus sieben Achsen. Dieser Aufbau hat eine redundante Kinematik zur Folge und ermöglicht sogenannte Nullraumbewegungen.⁸ Jede Achse verfügt über eine redundant ausgeführte Momentenerfassung mittels Dehnmessstreifen (DMS). Der Roboter wurde speziell für

⁸Bei der Nullraumbewegung werden die Achsen so gedreht, dass die Position und Orientierung des eingestellten Tool Center Points (TCP) während der Bewegung beibehalten werden.



Abbildung 3.11.: Übersicht Robotersystem, (2) Handbediengerät (KUKA Smart-PAD), (3) Roboter KUKA iiwa, (5) Robotersteuerung (KUKA Sunrise Cabinet) [19]

die Kollaboration mit Menschen ausgelegt. Aus diesem Grund weist der Roboter ausschließlich runde Formen auf. Der LBR iiwa ist in zwei Ausführungen erhältlich, welche sich hauptsächlich in der zulässigen Traglast unterscheiden. Zur Auswahl steht eine Variante mit einer zulässigen Traglast von 7 kg oder 14 kg. Für die Durchführung der Versuche wird die Ausführung mit einer maximalen Traglast von 14 kg (LBR iiwa 14) gewählt. Die wichtigsten Grunddaten für diesen Typ sind in Tabelle 3.1 gelistet. Der Grundaufbau des Roboters samt Bezeichnungen der einzelnen Achsen ist in Abbildung 3.12 dargestellt. Ein weiteres wichtiges Merkmal, der Arbeitsraum des LBR iiwa 14, ist in Abbildung 3.13 gezeigt.

3.4.2. Programmierung

KUKA Sunrise Workbench lautet die Software zur Inbetriebnahme und zur Entwicklung von Roboterapplikationen für den LBR iiwa. Die Programmierung dieser Applikationen erfolgt in Java. Die Benutzeroberfläche von Sunrise Workbench ist in 3.14 dargestellt. Auf der linken Seite (1) werden die verschiedenen bereits angelegten Projekte mit den zugehörigen Dateien aufgelistet. In der Mitte (2) befindet sich das Hauptfenster, hier werden geöffnete Dateien angezeigt und bearbeitet. Auf der

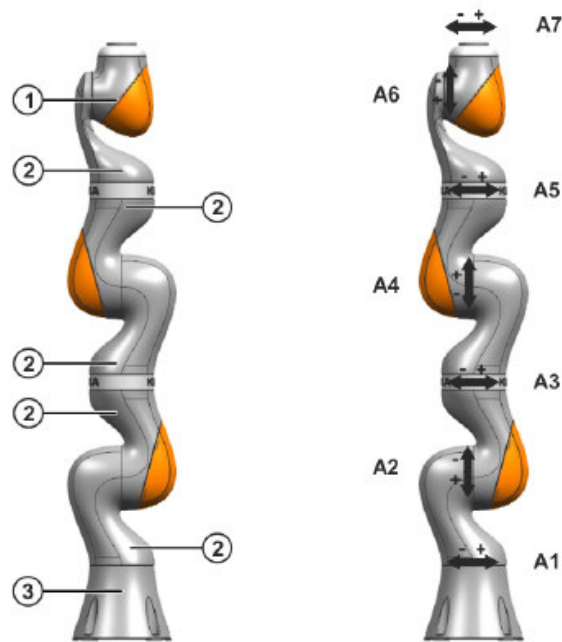


Abbildung 3.12.: Grundaufbau und Roboterachsen, (1) Zentralhand, (2) Gelenkmodul, (3) Grundgestell [19]

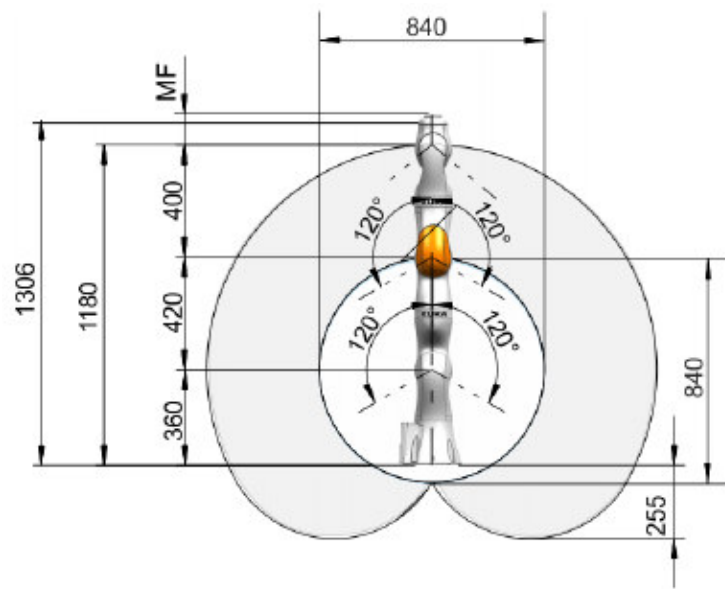


Abbildung 3.13.: LBR iiwa 14 R820 Arbeitsbereich, Seitenansicht [19]

Grunddaten, LBR iiwa 14 R820	
Anzahl Achsen	7
Positionswiederholgenauigkeit (ISO 9283)	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 0,15 \text{ mm}$
Gewicht	29,9 kg
Nenn-Traglast	14 kg
Maximale Reichweite	820 mm
Bewegungsbereich	
A1	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 170^\circ$
A2	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 120^\circ$
A3	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 170^\circ$
A4	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 120^\circ$
A5	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 170^\circ$
A6	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 120^\circ$
A7	$\begin{matrix} + \\ - \end{matrix} 175^\circ$
Geschwindigkeit bei Nenn-Traglast	
A1	$85^\circ/s$
A2	$85^\circ/s$
A3	$100^\circ/s$
A4	$75^\circ/s$
A5	$130^\circ/s$
A6	$135^\circ/s$
A7	$135^\circ/s$

Tabelle 3.1.: Technische Daten, LBR iiwa 14 [19]

rechten Seite oben (4) werden einerseits die Frames⁹, Werkzeuge oder Werkstücke angezeigt die bereits für ein Projekt angelegt sind. Auf der rechten Seite unten (5) befindet sich die Sicht für die Eigenschaften des angewählten Objekts (z.B. die Massendaten eines Werkstücks). Im Fenster unten (3) handelt es sich um eine Art To-Do Liste. Hier werden vom Benutzer angelegte Aufgaben, mit Verweis auf die betreffende Programmzeile, angezeigt. Die gerade beschriebenen Sichten stellen die Voreinstellung dar.

⁹Ein Frame ist ein dreidimensionales Koordinatensystem, das durch seine Position und Orientierung bezüglich eines Referenzsystems beschrieben wird.

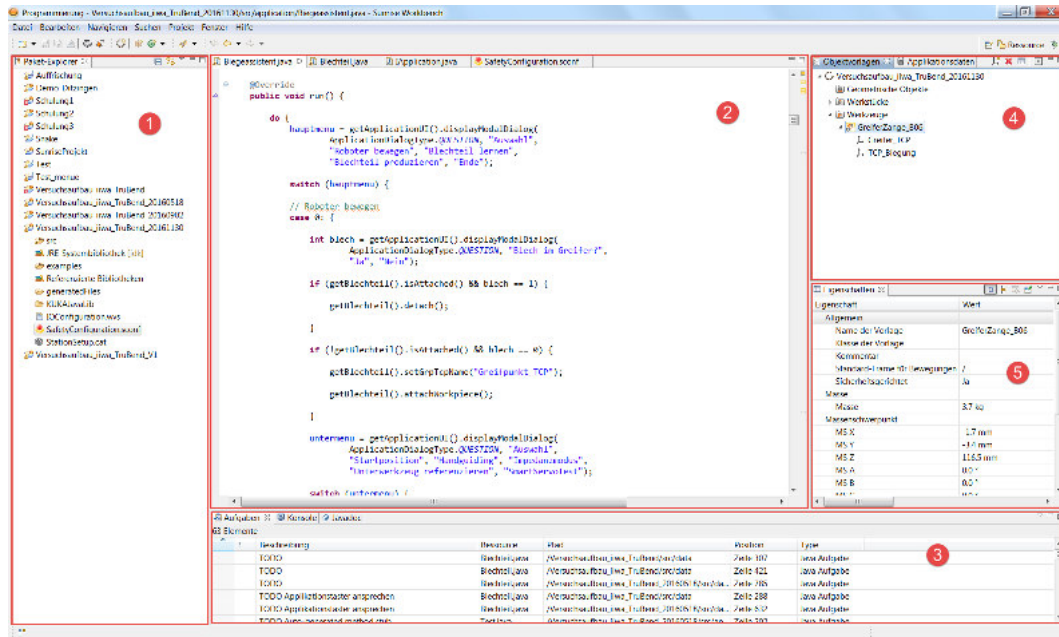


Abbildung 3.14.: Übersicht Sunrise Workbench [18]

3.4.3. Sicherheit

In diesem Kapitel werden die Sicherheitsfunktionen des LBR iiwa und deren Konfiguration mit der Programmiersoftware SunriseWorkbench vorgestellt.

In diesem Zusammenhang sei erwähnt, dass der LBR iiwa im Sinne der Maschinenrichtlinie 2006/42/EG eine unvollständige Maschine darstellt. Dies bedeutet, der Roboter darf nur in Betrieb genommen werden, wenn dieser in eine Anlage integriert ist welche der Maschinenrichtlinie entspricht. Dazu muss der Systemintegrator ein Konformitätsbewertungsverfahren für die gesamte Anlage durchführen, welches die Grundlage für die CE-Kennzeichnung und für das Inverkehrbringen der Maschine in Europa ist. Außerhalb Europas unterliegt die Inbetriebnahme des Industrieroboters anderen landesspezifischen Gesetzen, Vorschriften und Normen.

Sicherheitsfunktionen

Der Industrieroboter LBR iiwa 14 verfügt über spezielle sicherheitsgerichtete Funktionen für die Mensch-Roboter-Kollaboration. Diese Funktionen erfüllen die Sicherheitsanforderungen Performance Level d und Kategorie 3 nach EN ISO 13849-1 [4, 5]. Alle sicherheitsrelevanten Komponenten des Industrieroboters müssen bei

der Inbetriebnahme und alle zwölf Monate auf Funktionsfähigkeit geprüft werden. Folgende sicherheitsgerichtete Funktionen stehen bei der Sicherheitskonfiguration zur Verfügung.

- Achsspezifische Arbeitsraumüberwachung
- Kartesische Arbeitsraumüberwachung
- Kartesische Schutzraumüberwachung
- Geschwindigkeitsüberwachung
- Stillstandsüberwachung
- Achsmomentenüberwachung
- Externe Zustimmungsrückmeldung
- Externer sicherer Betriebszustand
- Kollisionserkennung
- ...¹⁰

Sicherheitskonfiguration

Die Konfiguration der einzelnen Sicherheitsfunktionen ist fixer Bestandteil eines Sunrise-Projekts. Nach dem Übertragen des Projekts auf die Steuerung muss die Sicherheitskonfiguration zuerst aktiviert werden, bevor der Roboter in Betrieb genommen werden kann. Nach jeder Änderung in der Sicherheitskonfiguration muss diese erneut aktiviert werden. Bei jeder Aktivierung wird eine Versionsnummer vergeben, anhand dieser kann schnell festgestellt werden, ob Änderungen in der Sicherheitskonfiguration vorgenommen wurden. Das Sicherheitskonzept in Sunrise bietet 2 Überwachungsmechanismen:

- Permanente sicherheitsgerichtete Überwachung
PSM (Permanent Safety Monitoring)
- Ereignisabhängige sicherheitsgerichtete Überwachung
ESM (Event-driven Safety Monitoring)

¹⁰Für die vollständige Auflistung aller Sicherheitsfunktionen siehe [18, S. 99ff].

Die Sicherheitsfunktionen nach dem PSM-Prinzip sind ständig aktiv und können nur durch eine Änderung der Sicherheitskonfiguration bearbeitet werden. Dieses Prinzip dient zur ständigen Überwachung und realisiert Sicherheitseinstellungen, welche typischerweise unabhängig vom ausgeführten Prozessschritt sind. Das ESM-Prinzip hingegen eignet sich zur Umschaltung von Sicherheitsfunktionen während des Betriebs. Pro ESM-Zustand können bis zu 20 Sicherheitsfunktionen konfiguriert werden. Somit kann situationsabhängig die jeweilig aktuell benötigte Sicherheitseinstellung ausgewählt werden. Dies geschieht durch einen Wechsel in einen anderen ESM-Zustand. In Abbildung 3.15 ist beispielhaft die Konfiguration eines ESM-Zustands dargestellt. In Feld (1) werden die bereits konfigurierten Sicherheitsfunktionen angezeigt und die Reaktion bei Verletzung einer dieser Bedingungen. Feld (2) dient zur Auswahl der Sicherheitsfunktion. In Feld (3) wird angezeigt, in welchen ESM-Zustand diese Funktion noch verwendet wird. In Feld (4) erfolgt die Parametrierung und Feld (5) beschreibt die Sicherheitsfunktion und deren Parameter. Die Auswahl zur Bearbeitung der verschiedenen PSM oder ESM-Zustände erfolgt bei (6). In dem gezeigten Beispiel handelt es sich um eine Geschwindigkeitsüberwachung, welche bei Überschreitung einer maximalen Geschwindigkeit von 250 mm/s als Reaktion einen Stopp der Kategorie 1 (bahntreu) auslöst. KUKA definiert drei verschiedene Reaktionen auf die Verletzung von Sicherheitsfunktionen (Tabelle 3.2).

Stopp-Kategorie 0	Die Antriebe werden sofort abgeschaltet und die Bremsen fallen ein.
Stopp-Kategorie 1	Der Manipulator bremst nicht bahntreu. Der Manipulator wird mit den Antrieben in den Stillstand überführt. Sobald eine Achse stillsteht, wird der Antrieb abgeschaltet und die Bremse fällt ein.
Stopp-Kategorie 1 (bahntreu)	Der Manipulator bremst bahntreu. Im Stillstand werden die Antriebe abgeschaltet und die Bremsen fallen ein.

Tabelle 3.2.: Stopp Reaktionen bei Verletzung einer Sicherheitsfunktion

3.4.4. Spezielle Betriebsmodi

Ein konventioneller Roboter wird in den meisten Fällen positionsgeregelt betrieben, mit dem Ziel die Abweichung zwischen Soll- und Istposition stets gering zu halten. Neben den Positionssensoren zur Ermittlung der aktuellen Achspositionen besitzt der

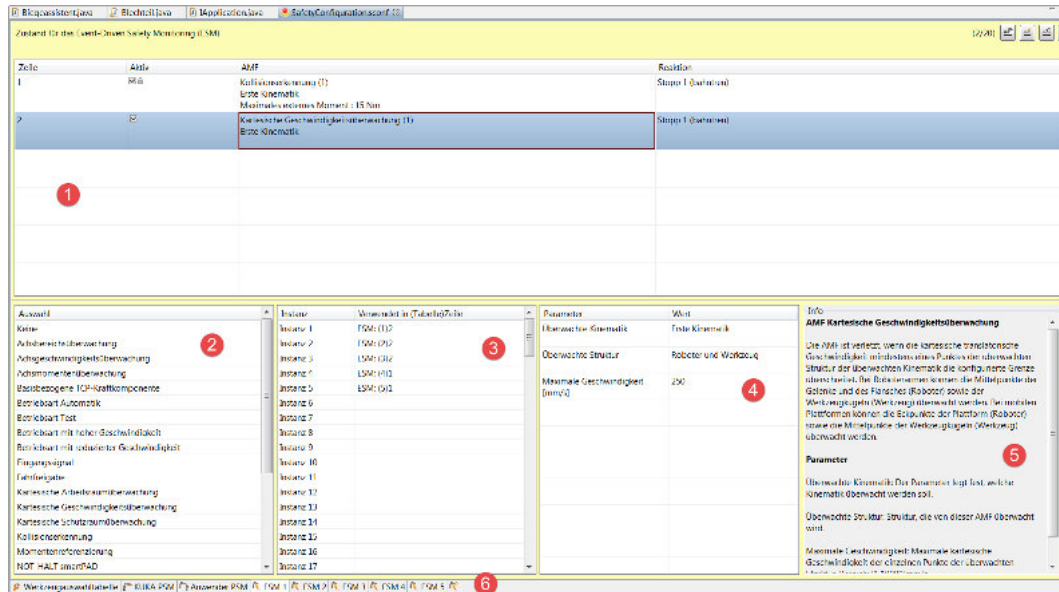


Abbildung 3.15.: Übersicht Sicherheitskonfiguration [18]

LBR iiwa zusätzlich Gelenkmomentsensoren. Die Messung der Momente ermöglicht neben der Positionsregelung auch die Verwendung einer Nachgiebigkeitsregelung (Impedanzregelung). Bei dem zugrundeliegenden Modell handelt es sich um ein Feder-Dämpfer-System mit einstellbaren Parameter für die Steifigkeit und Dämpfung. Auf diese Weise wird ein nachgiebiges Verhalten des Roboters realisiert. Diese Art der Regelung ermöglicht dem Roboter einfache Antastvorgänge durchzuführen und auf Prozesskräfte zu reagieren. Ein weiterer Betriebsmodus stellt die sogenannte Gravitationskompensation dar. Hier kompensiert der Roboter das Gewicht der Last und kann mit geringer äußerer Krafteinwirkung bewegt werden. Diese Betriebsart eignet sich speziell für die Online-Programmierung des Roboters per Hand. Zusammengefasst bietet der LBR iiwa folgende drei Betriebsmodi:

- Positionsregelung
- Gravitationskompensation
- Nachgiebigkeitsregelung

Im Folgenden wird die Gravitationskompensation und die Nachgiebigkeitsregelung in praktischer Hinsicht erläutert. Für weitere Informationen bezüglich Regelungskonzepten für Roboter mit starren Gelenken wird auf [11] verwiesen. Hier werden verschiedene Konzepte für die Positions- und Kraftregelung beschrieben. Die Positions-

und Kraftregelung für Roboter mit elastischen Gelenken wird in [24, 28, 10] behandelt. Eine detaillierte Beschreibung der Regelung des LBR DLR II mitsamt Stabilitätsuntersuchung ist in [9] ausgeführt.

Gravitationskompensation

Bei der Gravitationskompensation (auch Handführmodus genannt) kompensiert der Roboter das Gewicht der Last und lässt sich mittels externer Krafteinwirkung bewegen. Dieser Betriebsmodus ist für das Handführen des Roboters gedacht. Singularitäten oder Achsendlagen stellen den Roboter hierbei vor keine großen Probleme. Voraussetzung für die Verwendung der Gravitationskompensation ist ein Flanschtyp mit einem dreistufigen Zustimmungstaster. Darüber hinaus muss in der Sicherheitskonfiguration ein ESM-Zustand definiert sein, welcher die Zustimmung anhand des Zustimmungstasters prüft. Des Weiteren ist ein ESM-Zustand für eine sichere Geschwindigkeitsbeschränkung erforderlich, da falsch angegebene Lastdaten zu unvorhergesehenen Bewegungen des Roboters führen. Zusätzlich kann die Bewegung einzelner Achsen während des Handführens beliebig eingeschränkt werden.

Nachgiebigkeitsregelung

Die Nachgiebigkeitsregelung basiert auf einem virtuellen Feder-Dämpfer System, welches zwischen der aktuell gemessenen (Istposition) und der kommandierten Position (Sollposition) des Tool Center Points aufgespannt wird. Abbildung 3.16 zeigt ein Beispiel für die Rückstellkraft bei einer Auslenkung des Tool Center Points (Istposition) in zwei Richtungen in einer Ebene. Die Auslenkung passiert aufgrund einer externen Krafteinwirkung. Die Höhe der Rückstellkraft ergibt sich aus den Rückstellkräften in x und y-Richtung. Diese wiederum ergeben sich nach dem Federgesetz aus den Auslenkungen $\Delta x, \Delta y$ und den eingestellten Steifigkeitsparameter c_x, c_y . Ein weiterer wichtiger Parameter stellt das Lehr'sche Dämpfungsmaß dar. Dieses beeinflusst die dynamischen Eigenschaften des Systems. Sobald die externe Kraft nicht mehr auf das System wirkt, wird die Istposition, mit der vom Modell vorgegeben Dynamik, die Sollposition einnehmen. Hierbei handelt es sich um eine kartesische Impedanzregelung. Prinzipiell wird zwischen einer kartesischen und einer achsspezifischen Impedanzregelung unterschieden. Beide Arten erlauben zusätzlich die Beaufschlagung mit Kräften oder Momenten beziehungsweise Kraft- oder Momentenschwingungen. Hierbei ergibt sich die Auslenkung und Dynamik wieder aufgrund

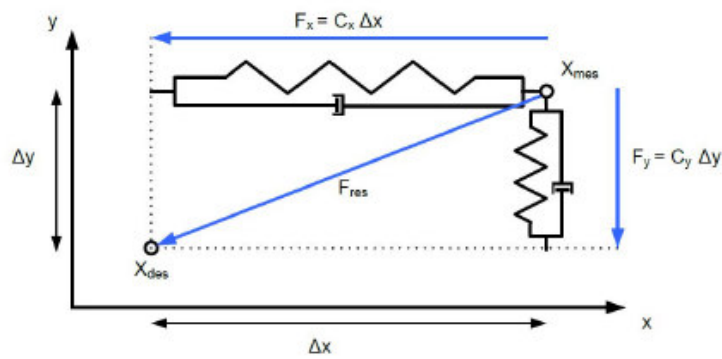


Abbildung 3.16.: Grundprinzip des kartesischen Impedanzreglers [18]

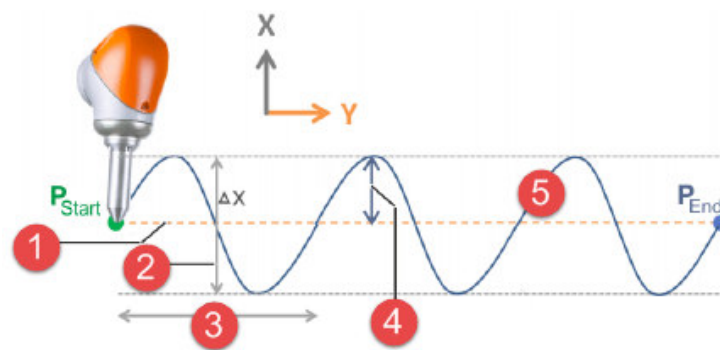


Abbildung 3.17.: Beispiel für eine sinusförmige Kraftaufschaltung, (1) Ursprüngliche Bahn, (2) Auslenkung, (3) Wellenlänge, (4) Amplitude, (5) Tatsächliche Bahn [18]

der eingestellten Parameter. Das Aufschalten von Kräften führt zu einer Auslenkung nach dem Federgesetz, ausgehend von der Sollposition. Dies bedeutet, die Istposition wie in dem Beispiel in Abbildung 3.16 gezeigt, kann auch mit einer Kraftaufschaltung in Höhe der Rückstellkräfte erreicht werden. Dasselbe Prinzip gilt auch für die Aufschaltung von Kraftschwingungen. Jedoch ändert sich nun die Kraft im Zeitverlauf. In Abbildung 3.17 ist eine sinusförmige Kraftaufschaltung in x-Richtung mit einer Relativbewegung in y-Richtung dargestellt. Ohne der Kraftaufschaltung würde der TCP der orangen Bahn (1) folgen. Punkt (5) markiert die tatsächlich gefahrene Bahn. Je nach Kraftaufschaltung ergeben sich weitere Parameter welche den Kraftverlauf charakterisieren (2)-(4).

3.4.5. Datenaufzeichnung

Während der Ausführung einer Applikation können bestimmte Messwerte, angefangen von Positionsdaten bis hin zu den Kräften und Momenten (DMS), aufgezeichnet werden. Hierfür steht bei der Programmierung die Klasse DataRecorder zur Verfügung. Folgende Auflistung beschreibt welche Daten aufgezeichnet werden können [18, S. 403ff].

- interne Achsmomente:
Zeichnet die in jeder Achse, durch die DMS, gemessenen Momente auf (Einheit: Nm).
- externe Achsmomente:
Aufzeichnung der externen Achsmomente (modellbereinigt). Hier werden die Messwerte unter Berücksichtigung der Eigenmasse des Roboters und angefügter Lasten (Greifer, Werkstück) bereinigt (Einheit: Nm).
- kartesische Kräfte:
Aufzeichnung von Kraftkomponenten (x,y,z) in einem definierten, mit dem Roboter verbundenem, Koordinatensystem (Einheit: N). Darüber hinaus wird auch die Varianz der kartesischen Kräfte aufgezeichnet. Diese zusätzliche Unsicherheit der Messwerte entsteht aufgrund der Tatsache, dass diese ausgehend von den DMS in den Gelenken zu dem festgelegten Punkt transformiert werden. Je nach aktueller Achsstellung variieren die Werte für die Varianz.
- kartesische Momente:
Ähnlich wie bei den kartesischen Kräften werden hier die Momente und die zugehörige Varianz in einem definierten Koordinatensystem aufgezeichnet (Einheit: Nm).
- achsspezifische Sollposition/Istposition:
Aufzeichnung der achsspezifischen Sollposition/Istposition (Einheit: Grad).
- achsspezifische Sollposition/Istposition:
Aufzeichnung der achsspezifischen Sollposition/Istposition (Einheit: Grad).
- kartesische Sollposition/Istposition:
Aufzeichnung der kartesischen Sollposition/Istposition (Einheit: mm).

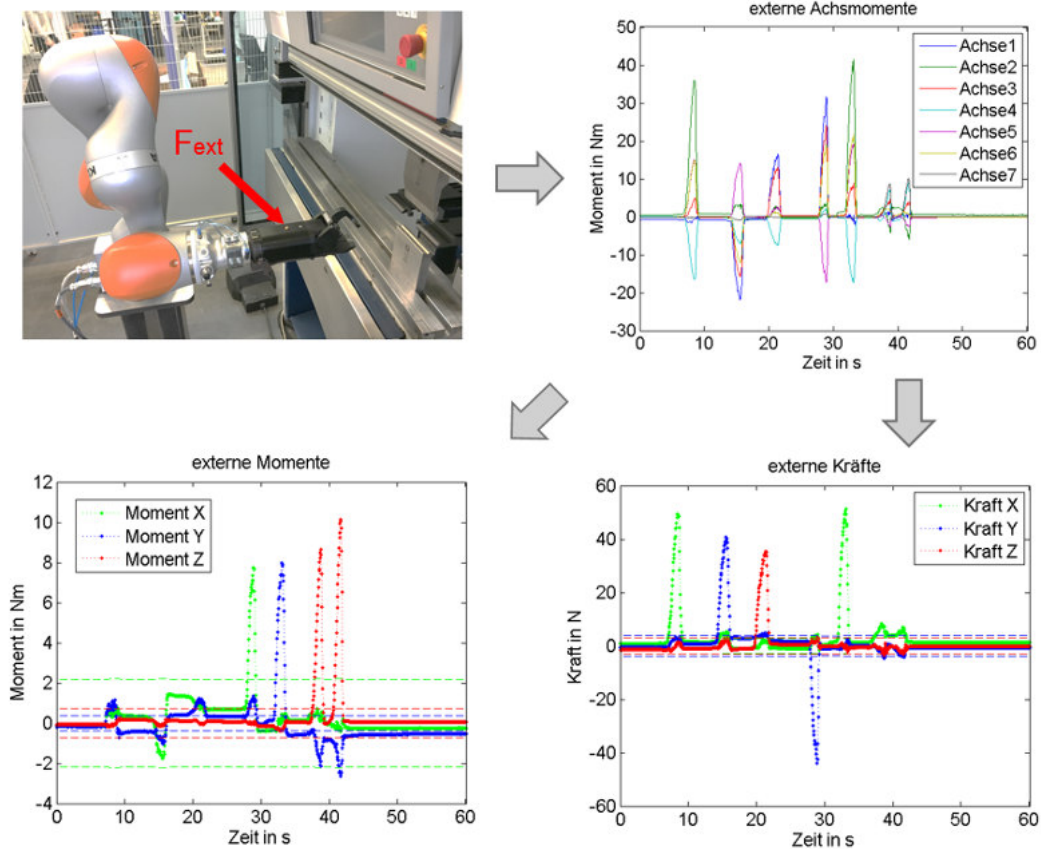


Abbildung 3.18.: Beispiel für die Aufzeichnung externer Belastungen (eigene Darstellung)

In Abbildung 3.18 ist beispielhaft das Prinzip der Ermittlung externer kartesischer Kräfte und Momente dargestellt. Bei der Aufzeichnung der Daten hielt der Roboter seine Position¹¹ (Bild links oben) und wurde dabei in gewissen Zeitabständen per Hand mit externen Belastungen F_{ext} beaufschlagt. Ausgehend von der tatsächlich wirkenden externen Belastung F_{ext} , werden anhand von Dehnmessstreifen die Belastungen in den Gelenken gemessen (interne Achsmomente). Um die externen Achsmomente zu erhalten, werden mit Hilfe eines Modells die vom Roboter, Werkzeug oder Werkstück verursachten Belastungen (Gewichtskräfte, Trägheitskräfte) herausgerechnet. Die externen kartesischen Belastungen ergeben sich letztendlich aus einer Transformation der externen Achsmomente zu dem gewünschten Punkt. Die strichlierten Linien geben den jeweiligen Unsicherheitsbereich an.

¹¹Hierfür wurde die Impedanzregelung verwendet ($c_{kart} = 5000 \frac{N}{m}$, $\delta_{kart} = 0,7$).

4. Versuchsvorbereitung

In diesem Kapitel werden alle für die Versuchsdurchführung benötigten Schritte erläutert. Angefangen bei den Anforderungen, sowie der Beschreibung des Versuchsaufbaus und der Versuche bis hin zur Programmierung und Inbetriebnahme.

4.1. Versuchsaufbau

4.1.1. Anforderungen

Im ersten Schritt werden, basierend auf den Erfahrungen von der Entwicklung der vollautomatisierten Biegezeile TruBend Cell 7000 (siehe Abbildung A.1 und A.2), einige Anforderungen als Anhaltspunkte für die Auslegung des Versuchsaufbaus definiert. Das maximale Gewicht der Platine ist mit 1,5 kg festgelegt und des Weiteren wird die Maximalgröße des Bauteils mit 210 x 300 mm angenommen. Der Roboter soll in der Lage sein, dem Blech bis auf 15° nach oben und bis auf 30° nach unten zu folgen. Ausgehend von der Zielsetzung und den eben genannten Anforderungen wurde die Auslegung des Versuchsaufbaus in Form einer Projektarbeit durchgeführt [14]. Diese Arbeit umfasst die Vorstellung der einzelnen Komponenten des Versuchsaufbaus, eine Erreichbarkeitsanalyse zur Identifikation von Störkonturen und möglichen Biegestellungen, sowie die Bereitstellung von digitalen Ein- und Ausgängen als Vorbereitung für die Umsetzung einer Applikation. Darüber hinaus wird die Absicherung zwischen dem Roboter und der Biegemaschine beschrieben. Diese zielt vorrangig darauf ab, Beschädigungen am Roboter durch die Biegemaschine zu vermeiden. Im Folgenden wird hier daher nicht näher auf die Konstruktion und andere Details eingegangen, sondern lediglich das Resultat vorgestellt.

4.1.2. Umsetzung

In Abbildung 4.1 ist der fertige Versuchsaufbau dargestellt. Der Roboter ist auf einem geschweißten Sockel aufgeschraubt und so vor der Biegemaschine platziert, dass zwei Biegebewegungen möglich sind. Die Biegepositionen sind in Abbildung A.4 gezeigt. In Biegeposition eins steht der Greifer frontal und in Biegeposition zwei seitlich zur Biegemaschine. Als Greifer wurde eine pneumatische Greifeinheit, aus dem Sortiment der vollautomatisierten Biegezeile (TruBend Cell 7000), gewählt. Um diese Greiferzange für die Versuche verwenden zu können, wurde eine dementsprechende Adapterlösung konstruiert (siehe Abbildung 4.2). Die Greifeinheit wird mit einem elektrisch betätigten 5/2-Wegeventil angesteuert. Die Entnahmestation spielt für die Versuche eher eine untergeordnete Rolle. Aus diesem Grund wurde diese nur sporadisch mit Schraubzwingen aufgebaut. Zuerst wurde die Entnahmestation so wie in Abbildung A.5a umgesetzt. Für die Positionierungsversuche ist es aber erforderlich die Bauteile nicht immer gleich aufzunehmen, sondern auch leicht verdreht oder verschoben. Aus diesem Grund wurden später die Bauteile wie in Abbildung A.5b gezeigt, entnommen. Die Ablage der Bauteile geschieht einfach durch das Fallenlassen in eine große Schütte.

Die Biegemaschine und der Roboter sind prinzipiell als zwei getrennte Systeme ausgeführt. Dies bedeutet der Hub der Biegemaschine wird bei den Versuchen nicht automatisch, sondern manuell ausgelöst. Die einzige Kopplung besteht in der Absicherung des Roboters gegenüber der Biegemaschine¹ und der Signale der Biegemaschine beim Erreichen wichtiger Wegpunkte beim Biegevorgang (oberer und unterer Totpunkt, Klemmpunkt).

4.1.3. Inbetriebnahme

Lastdatenermittlung des Werkzeugs

Die Lastdaten können einerseits manuell eingegeben oder mit einer von KUKA bereitgestellten Funktion automatisch ermittelt werden. Bei der automatischen Lastdatenermittlung führt der Roboter mit den Achsen fünf bis sieben, eine Messfahrt durch und berechnet daraus die Lage des Schwerpunkts, die Trägheitsmomente und die Masse des Werkzeugs [18]. Abbildung 4.3 zeigt die Ausführung dieser Funktion

¹Einbindung des Roboters in den Not-Halt Kreis der Biegemaschine und umgekehrt.

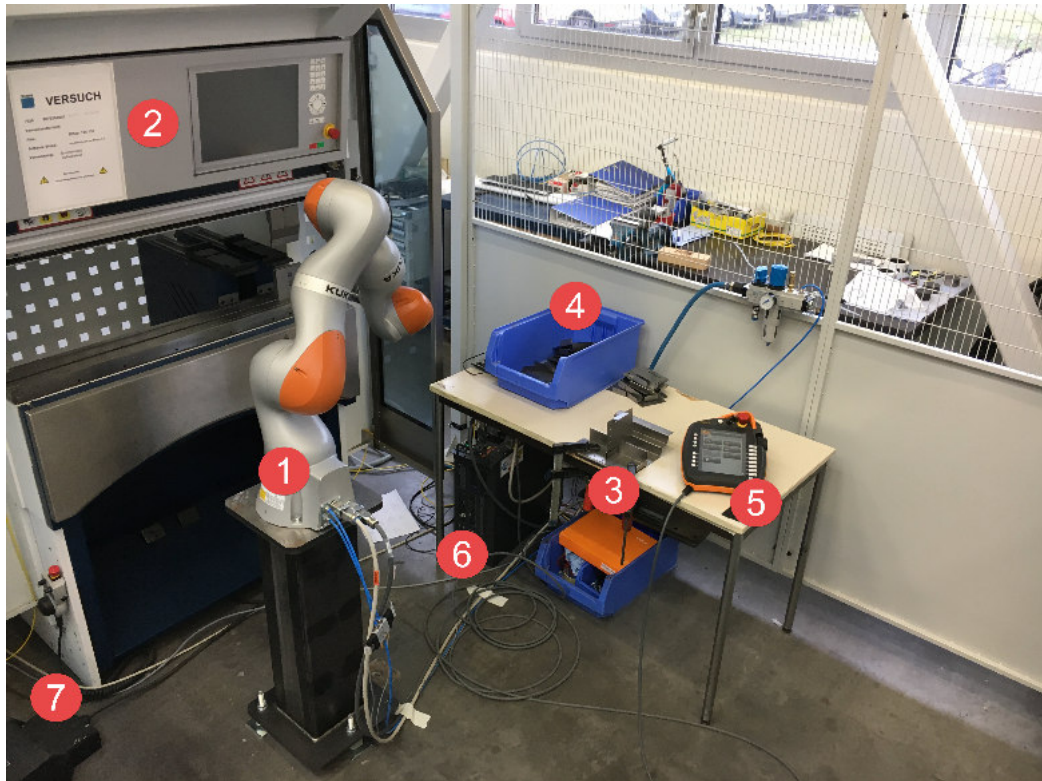


Abbildung 4.1.: Foto vom Versuchsaufbau, (1) KUKA iiwa 14, (2) TruBend7036, (3) Entnahme, (4) Ablagebox, (5) Handbediengerät, (6) Robotersteuerung, (7) Fußtaster Biegemaschine (eigene Darstellung)

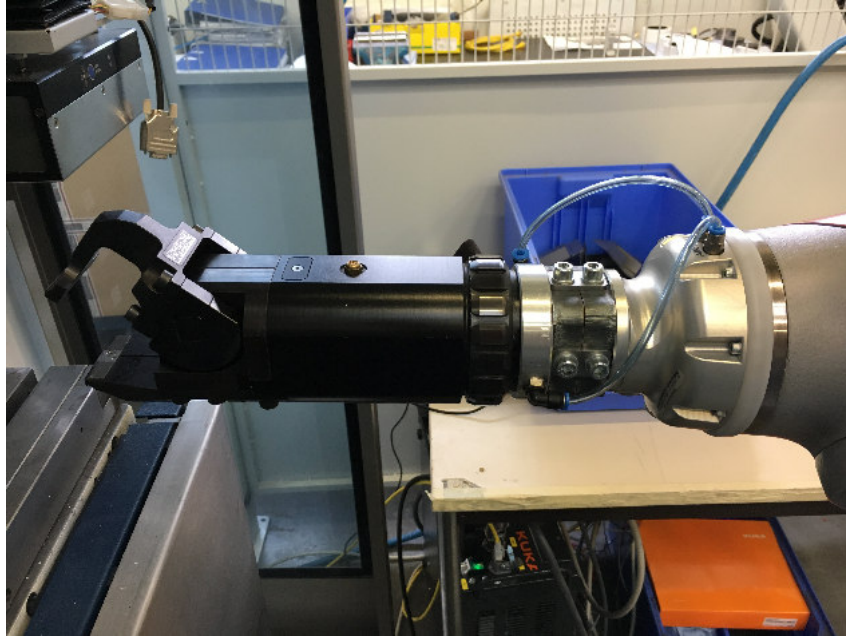


Abbildung 4.2.: Foto von der Greifeinheit (eigene Darstellung)

am Handbediengerät. In Punkt (1) kann das zuvor mittels der Programmiersoftware SunriseWorkbench angelegte Werkzeug für die Lastdatenermittlung ausgewählt werden. Die aktuellen Massedaten für das Werkzeug werden im Feld (2) angezeigt. Punkt (3) informiert über die sich bei der Messfahrt bewegenden Achsen und bei (4) wird die Lastdatenermittlung gestartet. Für eine zuverlässige Ermittlung der Lastdaten müssen folgende Punkte unbedingt beachtet werden:

- Die angebrachte Masse muss mindestens ein Kilogramm betragen. Ansonsten ist die Lastdatenermittlung aufgrund von Messungenauigkeiten nicht zuverlässig.
- Auf den Roboter dürfen keine weiteren externen Kräfte wirken (montierte Zusatzlasten wie z.B. Schlauchpakete führen zu falschen Lastdaten).
- Bevor die Lastdatenermittlung durchgeführt wird, sollte vorab eine geeignete Startposition ermittelt werden. Hierzu versucht man den Roboter so auszurichten, damit die externen Momente (Anzeige am Handbediengerät) bei lastfreien Roboter kleiner als 0.5 Nm sind.
- Während der Messfahrt darf die Bewegung des Roboters nicht durch einen Widerstand behindert werden (Berührung des Roboters, usw.).



Abbildung 4.3.: Übersicht Lastdatenermittlung [18]

Bei der Lastdatenermittlung hängt das Ergebnis stark von den aktuellen Achsstellungen ab. Daher empfiehlt es sich, die automatisch ermittelten Lastdaten mithilfe von CAD²-Daten und einer Waage zu überprüfen.

Werkzeugvermessung

Die Vermessung des Werkzeugs erfolgt mit der sogenannten XYZ-4-Punkt-Methode. Dazu fährt man mit dem gewünschten TCP des zu vermessenden Werkzeugs einen Referenzpunkt aus vier verschiedenen Richtungen an (siehe Abbildung 4.4). Anhand dieser Positionen berechnet die Robotersteuerung die Position des TCP's. Dabei gilt zu beachten, dass die Flanschpositionen bei der Wahl der vier Punkte nicht zu Nahe beieinander liegen. Darüber hinaus sollten auch bereits die korrekten Lastdaten des Werkzeugs hinterlegt sein, denn dies beeinflusst die Genauigkeit bei der Bestimmung der Position des TCP's [18].

In diesem Fall wurde als fixer Referenzpunkt die Spitze eines Gewindebohrers verwendet. Dazu wurde der Gewindebohrer in einem, auf der Biegemaschine fixierten, Magnethalter eingespannt. Als TCP der Greiferzange wird eine spitze Ecke gewählt.

²Computer-Aided Design.

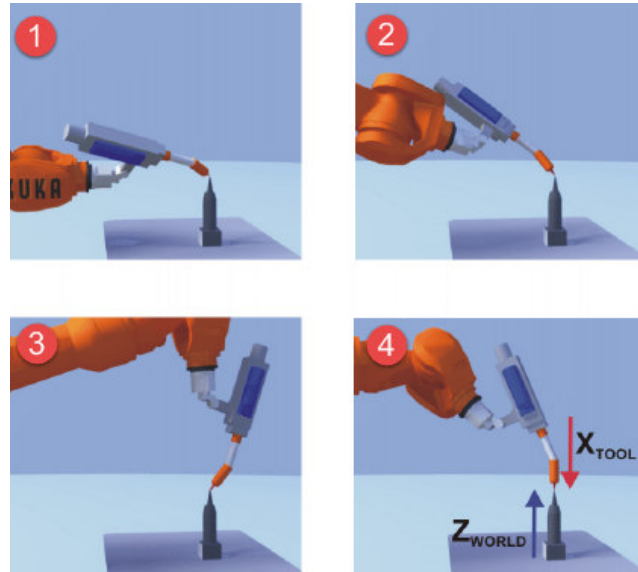


Abbildung 4.4.: TCP Vermessung mit Hilfe der XYZ-4-Punkt-Methode [18]

Die Durchführung der XYZ-4-Punkt-Methode ist in Abbildung A.6 dargestellt. Aufgrund des Aufbaus der Greifereinheit wird angenommen, dass die Orientierung des Flanschkoordinatensystems mit der des Greiferkoordinatensystems übereinstimmt. Ausgehend von diesem Koordinatensystem wurde ein weiteres Koordinatensystem, welches in y-Richtung zur Mitte der Greiferbacke verschoben ist, definiert. Dieses Koordinatensystem wird im Folgenden als Greifer TCP bezeichnet. Die Greifereinheit mit den definierten Koordinatensystemen ist in Abbildung 4.5 gezeigt.

Basisvermessung

Um die weitere Programmierung zu vereinfachen, wird mit der sogenannten 3-Punkt-Methode ein Basiskoordinatensystem an der Unterwerkzeugklemmung der Biegemaschine definiert. Voraussetzung für die Anwendung dieser Methode ist ein am Anbaufansch montiertes und bereits vermessenes Werkzeug. Wie bereits der Name andeutet, müssen zur Ermittlung des Basiskoordinatensystem drei Punkte mit dem TCP des Werkzeugs angefahren werden (siehe Abbildung 4.6). Der erste Punkt (1) definiert den Ursprung des Koordinatensystem. Der zweite Punkt (2) bestimmt die Richtung der positiven x-Achse. Abschließend definiert Punkt (3) die Richtungen der y und z-Achse [18].

Die Durchführung der Basisvermessung an der Unterwerkzeugklemmung der Biege-

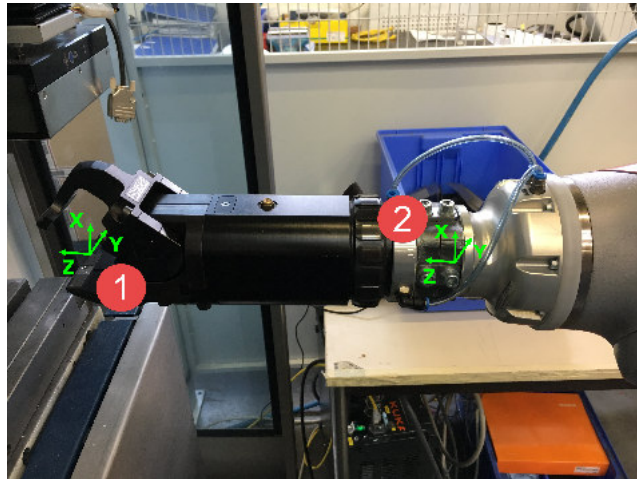


Abbildung 4.5.: Koordinatensysteme an der Greifeinheit, (1) Greifer TCP, (2) Flansch TCP (eigene Darstellung)

maschine ist in Abbildung A.7 dargestellt. Ausgehend von diesem Basiskoordinatensystem wird nun anhand von CAD-Daten ein weiteres Koordinatensystem festgelegt, sodass die y -Achse kollinear mit der Biegelinie ist (siehe Abbildung A.7d).

4.2. Beschreibung der Blechbewegung beim Biegen

In diesem Kapitel wird ein einfaches geometrisches Modell zur Beschreibung der Blechbewegung beim Biegen vorgestellt. Dieses Modell wird für das Testen der Nachgiebigkeitsregelung des Roboters beim Biegevorgang verwendet. Zur Beurteilung des Modells, wird es mit Ergebnissen aus einer Finite Elemente (FE) Simulation gegenübergestellt. Betrachtet wird der Biegevorgang für ein Dünnblech (Dicke = 1 mm) und ein Grobblech (Dicke = 6 mm) aus Baustahl (S235JR).

4.2.1. Geometrisches Modell

Das folgende Modell beschreibt die Bewegung des Bleches beim Biegevorgang in rein geometrischer Hinsicht, ohne Berücksichtigung von Materialparameter. In Abbildung 4.7a ist eine Prinzipskizze des Modells dargestellt. Das Oberwerkzeug wird als einfacher Kreis, das Unterwerkzeug als zwei Auflagepunkte und das Blech selbst als Linie modelliert. Beim Biegen wird die Linie von dem Kreis mit Radius r den Pressenweg y , mit der Pressengeschwindigkeit \dot{y} nach unten gezogen. Dabei schmiegt

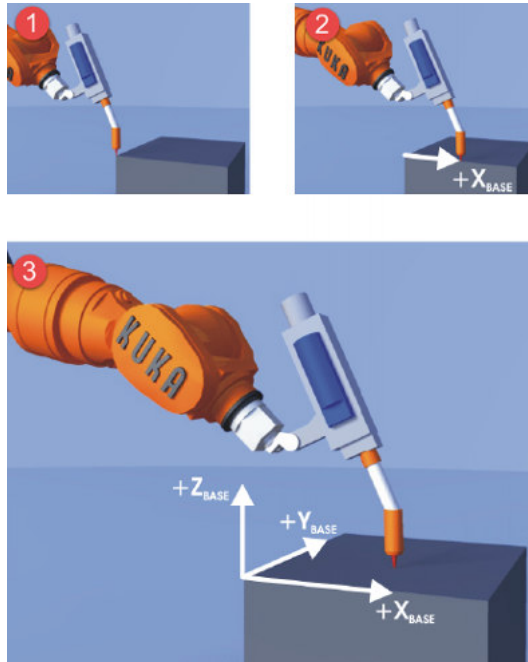


Abbildung 4.6.: 3-Punkt-Methode [18]

sich die Linie an den Kreis an und verläuft stets durch die beiden Auflagepunkte. Der Pressenweg y , die Pressengeschwindigkeit \dot{y} und die Werkzeugabmessungen (halbe Maulweite b , Radius r) sind bekannte Größen. Ebenso ist der Abstand l vom Blechendpunkt B zum Koordinatensystem (Biegelinie) bekannt. Bei den gesuchten Größen handelt es sich um die Position (x, z, h) und die Geschwindigkeit $(\dot{x}, \dot{z}, \dot{h})$ der Punkte B und C, sowie dem Winkel α und der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\alpha}$. Die Skizze mit den beschreibenden Größen ist in Abbildung 4.7b dargestellt.

Der Ausgangspunkt für die Ermittlung der Positionen und Geschwindigkeiten sind die Ortsvektoren \vec{r}_{0A} , \vec{r}_{0B} und \vec{r}_{0C} . Zur Ermittlung der Geschwindigkeiten in Punkt B und C werden die Ableitungen $\dot{\vec{r}}_{0B}$ und $\dot{\vec{r}}_{0C}$ gebildet.

$$\vec{r}_{0A} = \begin{bmatrix} -y + r(1 - \cos \alpha) \\ r \sin \alpha \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -s \sin \alpha \\ b - s \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

$$\vec{r}_{0B} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (l - \alpha r - s) \sin \alpha \\ -b - (l - \alpha r - s) \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.2)$$

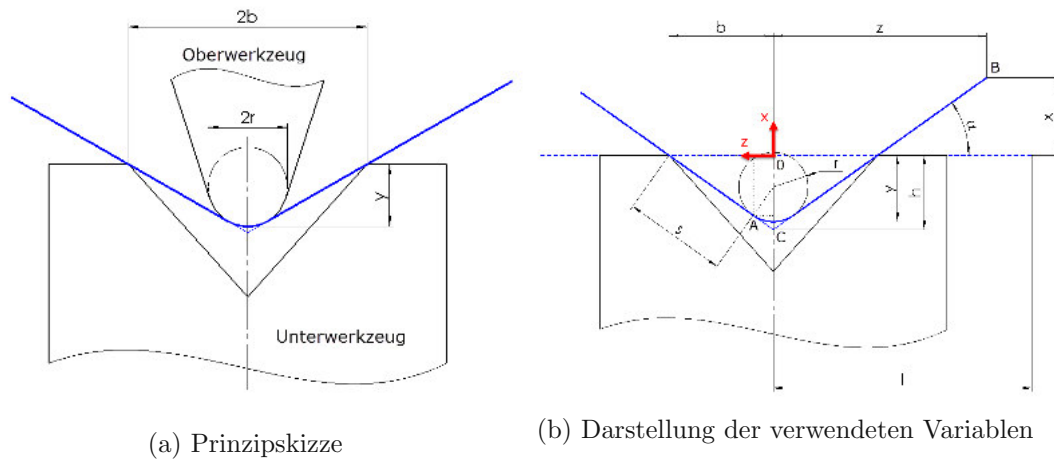


Abbildung 4.7.: Skizzen zur Beschreibung des geometrischen Modells (eigene Darstellung)

$$\dot{\vec{r}}_{0B} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{\alpha}(l - \alpha r - s) \cos \alpha - (\dot{\alpha} r + \dot{s}) \sin \alpha \\ \dot{\alpha}(l - \alpha r - s) \sin \alpha + (\dot{\alpha} r + \dot{s}) \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.3)$$

$$\vec{r}_{0C} = \begin{bmatrix} -h \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b \tan \alpha \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$\dot{\vec{r}}_{0C} = \begin{bmatrix} -\dot{h} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -b\dot{\alpha} \frac{1}{\cos^2 \alpha} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Aus 4.1 erhält man die folgenden zwei Gleichungen.

$$s \cos \alpha = b - r \sin \alpha \quad (4.6)$$

$$s \sin \alpha = y - r(1 - \cos \alpha) \quad (4.7)$$

Umformen dieser Gleichungen auf s und anschließendes Gleichsetzen führt zu (4.8). Werden die obigen Gleichungen quadriert und addiert erhält man (4.9).

$$y \cos \alpha = b \sin \alpha - r(1 - \cos \alpha) \quad (4.8)$$

$$s^2 = (b - r \sin \alpha)^2 + (y - r(1 - \cos \alpha))^2 \quad (4.9)$$

Vereinfachen von (4.9) und die Verwendung von (4.8) führt zu

$$s^2 = b^2 + y(y - 2r). \quad (4.10)$$

Mit (4.6) und (4.7), sowie der Beziehung $\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{1 - \cos \alpha}{\sin \alpha}$ ergibt sich der Winkel α wie folgt.

$$\alpha = 2 \arctan \frac{y}{b + s} \quad (4.11)$$

Nach dem Ableiten von 4.10 und 4.11 sind alle notwendigen Variablen bekannt.

$$\dot{s} = \frac{\dot{y}(y - r)}{s} \quad (4.12)$$

$$\dot{\alpha} = 2 \frac{s\dot{y}(s + b) - y\dot{y}(y - r)}{s((s + b)^2 + y^2)} \quad (4.13)$$

Die Form der Kurve ist mit dem Abstand des Blechendpunkts zur Biegelinie l , dem Radius des Oberwerkzeugs r und der halben Maulweite b eindeutig bestimmt. Der Pressenweg y wird so gewählt, dass sich am Ende der Biegung ein Winkel α von 45° einstellt. Die Geschwindigkeit des Blechendpunkts B hängt, neben den geometrischen Größen natürlich auch von der Pressengeschwindigkeit \dot{y} ab. Die Ergebnisse für die in Tabelle 4.1 angeführten Parameter sind in Abbildung 4.10 dargestellt.

Abbildung 4.10a zeigt die Bahnkurven des geometrischen Modells. Die schwarz punktierten Linien sind Geraden mit einem 45° Winkel, welche vom jeweiligen Auflagepunkt ausgehen. Des Weiteren sind zum Vergleich in magenta Kreisbahnen eingezeichnet, welche den Mittelpunkt im Auflagepunkt des Unterwerkzeugs aufweisen. Die reine Kreisbewegung stellt ein noch einfacheres geometrisches Modell für die

Beschreibung der Blechbewegung dar. Im Fall des 1 mm Bleches stimmt die Kreisbahn relativ gut mit dem geometrischen Modell überein, jedoch beim 6 mm Blech ergeben sich bereits große Abweichungen. Aus diesem Grund eignet sich das Modell der reinen Kreisbewegung höchstens für kleine Blechdicken (kleine Maulweite, kleine Eintauchtiefe).

In Abbildung 4.10b ist die Bahngeschwindigkeit des Blechendpunkts dargestellt. Die Bahngeschwindigkeit nimmt anfangs kurz zu, bevor sie anschließend wieder abnimmt.

d	b	r	r_u	l	\dot{y}
1 mm	3 mm	1 mm	0.6 mm	100 mm	1 mm/s
6 mm	25 mm	4 mm	5 mm	100 mm	10 mm/s

Tabelle 4.1.: Parameter geometrisches Blechmodell (eigene Darstellung)

4.2.2. Finite Elemente Simulation

Im Gegensatz zum geometrischen Modell wird bei der FE-Simulation das Materialverhalten und der Radius am Unterwerkzeug mitberücksichtigt. Beispielhaft sind in Abbildung 4.8 Auszüge aus einer FE-Simulation des Biegevorgangs dargestellt.³ Die oberen zwei Bilder zeigen die Knotenverschiebungen des Blechbauteils für zwei unterschiedliche Biegewinkel.⁴ Die unteren zwei Abbildungen zeigen wiederum die plastischen Verformungen im Blechbauteil. Hier ist die Ausbildung der plastischen und elastischen Zonen sehr gut zu erkennen. Diese Zonen ergeben sich aus der Beanspruchung, welche von der neutralen Faser des Bleches bis hin zur Randfaser zunimmt und dort maximal ist.

Für die FE-Simulation des Biegevorgangs wurden die in Abbildung A.3 dargestellten Werkzeuge verwendet. Zum Vergleich der beiden Modelle wurde der Blechendpunkt (x_s, z_s) der Simulationsergebnisse wie in Abbildung 4.9 ersichtlich und in (4.14), (4.15) gezeigt, auf eine einheitliche Länge l transformiert.

$$\vec{r}_{0B} = \begin{bmatrix} x \\ z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_s + (l - z_{s0}) \sin \alpha) \\ z_s + (l - z_{s0}) \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (4.14)$$

³Die Simulationsergebnisse wurden seitens TRUMPF zur Verfügung gestellt.

⁴Ausgehend vom Startzustand des unverformten Bauteils.

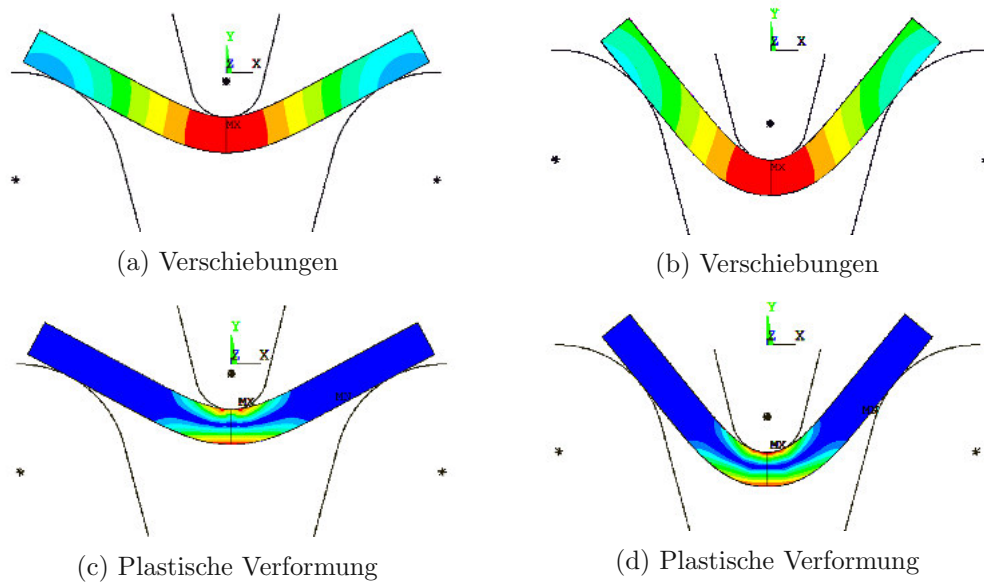


Abbildung 4.8.: Auszüge aus der FE-Simulation des Biegevorgangs (Quelle Trumpf)

$$\dot{\vec{r}}_{0B} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_s + \dot{\alpha}(l - z_{s0}) \cos \alpha \\ \dot{z}_s + \dot{\alpha}(l - z_{s0}) \sin \alpha \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

Die Ergebnisse der Gegenüberstellung zwischen dem geometrischen Modell und der FE-Simulation sind in Abbildung 4.10 dargestellt. Die Bahnkurven der beiden Modelle stimmen im Fall des 1 mm Bleches ziemlich gut überein, jedoch beim 6 mm Blech sind bereits deutliche Unterschiede erkennbar. Im Wesentlichen gibt es dafür mehrere Gründe. Beim geometrischen Modell wird angenommen, dass sich das Blech am Oberwerkzeug anschmiegt. Tatsächlich bildet sich aber bei Berücksichtigung des Materialverhaltens ein größerer Radius aus. Darüber hinaus wird das Blech beim Biegen gedehnt, was im geometrischen Modell ebenfalls unberücksichtigt bleibt. Ein weiterer Grund für die Abweichung ist, dass das geometrische Modell nicht die exakte Geometrie des Unterwerkzeugs berücksichtigt. In Abbildung 4.11 sind die Gründe für die Unterschiede veranschaulicht. Die Grafik zeigt die Endposition eines 6 mm Bleches laut FE-Simulation und die aktuelle Position des geometrischen Modells bei dieser Eintauchtiefe. Hier ist gut zu erkennen, dass der Biegewinkel des geometrischen Modells bei gleicher Eintauchtiefe kleiner ist, sprich das Oberwerkzeug müsste theoretisch noch weiter eintauchen, um den selben Biegewinkel zu erreichen. Daraus resultiert auch die längere Dauer der Biegung beim geometrischen Modell.

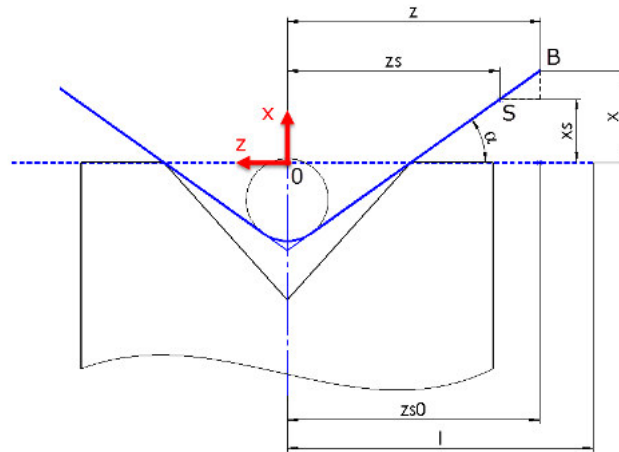


Abbildung 4.9.: Transformation der Positionsdaten aus der FE-Simulation zum Blechendpunkt (eigene Darstellung)

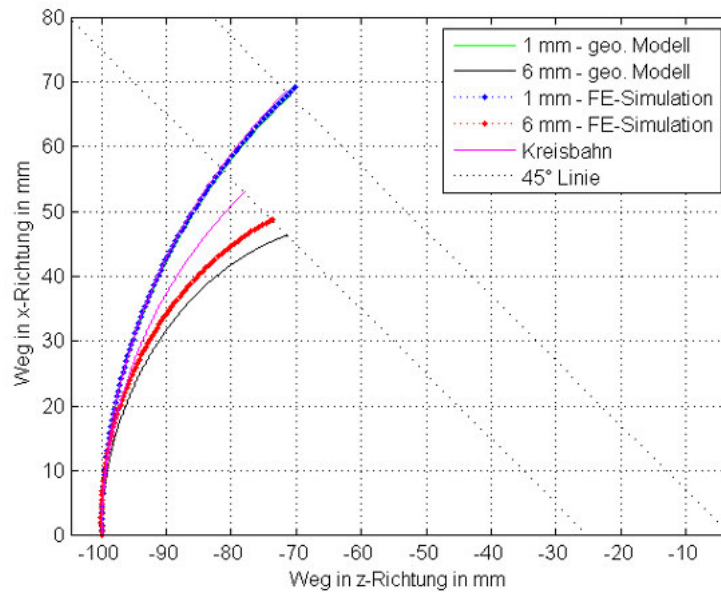
Bei der Bahngeschwindigkeit hingegen gibt es sowohl beim 1 mm als auch beim 6 mm Blech deutliche Abweichungen. Zu Beginn weist das geometrische Modell eine höhere Bahngeschwindigkeit auf. Das ergibt sich aus dem kürzeren Hebel aufgrund der Definition der Maulweite (Auflagepunkte des geometrischen Modells). Mit fortschreitender Dauer nimmt die Bahngeschwindigkeit in der FE-Simulation zu und ist letztendlich ab einem gewissen Zeitpunkt größer als die Bahngeschwindigkeit vom geometrischen Modell. Dies ist auf die unterschiedliche Ausbildung vom Biegeradius, sowie auf die Tatsache, dass sich der Blechauflagepunkt entlang des Radius r_u ändert, zurückzuführen.⁵

4.3. Versuchsbeschreibung

4.3.1. Proben

Bei den Proben handelt es sich um zwei Blechstreifen (150x70 mm) aus Baustahl (S235JR) mit einer Dicke von 1 und 6 mm. Die Blechstärke der Proben wurde speziell für das Testen der Nachgiebigkeitsregelung beim Biegen gewählt, damit die Unterschiede aufgrund der Stabilität der Bauteile ersichtlich werden.

⁵Siehe Video "Stahl_1mm_Slow_Motion".



(a) Gegenüberstellung der Bahnkurven

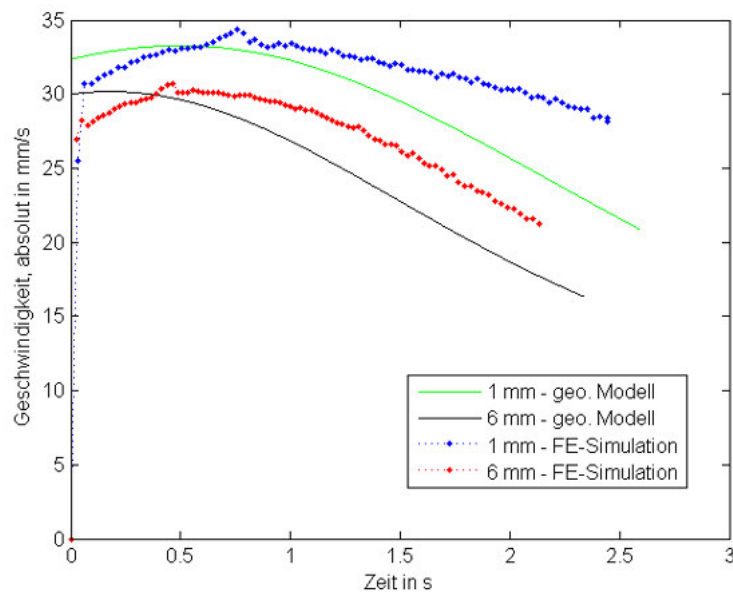
(b) Gegenüberstellung der Bahngeschwindigkeiten (1 mm Blech / Pressgeschwindigkeit $1 \frac{mm}{s}$, 6 mm Blech / Pressgeschwindigkeit $10 \frac{mm}{s}$)

Abbildung 4.10.: Gegenüberstellung des geometrischen Modells mit der Finite Elemente Simulation (1 mm/6 mm Stahlblech) (eigene Darstellung)

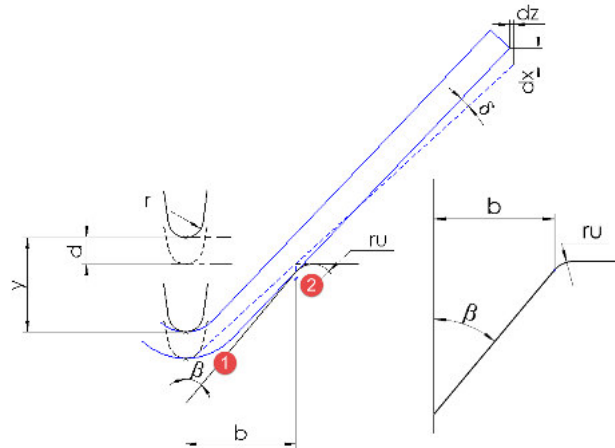


Abbildung 4.11.: Erläuterung der Unterschiede zwischen dem geometrischen Modell und der FE-Simulation, (1) Blech nicht tangential zum Oberwerkzeugradius, (2) das Unterwerkzeug weist einen Radius auf und der Auflagepunkt ändert sich mit der Zeit (eigene Darstellung)

4.3.2. Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag

Für die Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag sollen lediglich die Funktionen des Roboters verwendet werden. Hierzu bietet sich die Nachgiebigkeitsregelung an. Der Grundgedanke ist, den für die Ausrichtung erforderlichen Freiheitsgrad c freizugeben⁶ und die Ausrichtung⁷ mit einer externen Kraft F hervorzurufen (siehe Abbildung 4.13a.⁸). Die externe Kraft kann durch eine Bewegung des Roboters in z -Richtung (Basiskoordinatensystems) gegen den Hinteranschlag eingebracht werden oder es wird eine Kraft an einem, mit dem Roboter verbundenen, Punkt (Blech-TCP, Greifer-TCP) vorgegeben. Dies ist lediglich die Strategie für die Ausrichtung, aber zusätzlich muss zuverlässig festgestellt werden, ob das Bauteil korrekt ausgerichtet ist.

Der Roboter ist in der Lage, die auf ihn einwirkenden Kräfte und Momente zu bestimmen. Diese Werte werden, ausgehend von den DMS in den Gelenken, zu einem zuvor festgelegten Punkt am Roboter beziehungsweise am Werkzeug oder Werkstück transformiert. Es ist nachvollziehbar, dass diese Werte aufgrund von Messungenauigkeiten und der Transformation (Jacobimatrix) mit einer gewissen

⁶Freigeben bedeutet die Reduzierung der Federsteifigkeit des jeweiligen Freiheitsgrads auf ein Minimum.

⁷Drehbewegung um den Kontaktpunkt des Bauteils mit dem Hinteranschlag.

⁸Hier handelt es sich lediglich um eine Andeutung der externen Kraft und nicht um eine korrekte Freischneidung des gesamten Körpers.

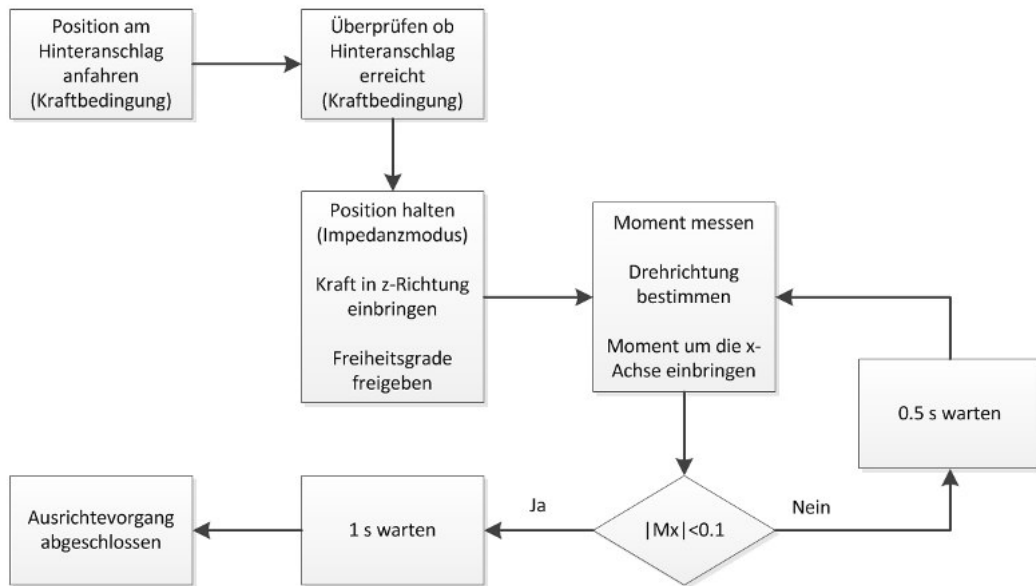


Abbildung 4.12.: Programmierung des Ausrichtevorgangs für die Positionierung des Blechbauteils am Hinteranschlag (eigene Darstellung)

Unsicherheit behaftet sind. Diese sind abhängig von den aktuellen Achsstellungen und werden von der Steuerung in Form einer Varianz angegeben. Wird der Blech-Tool Center Point (TCP) nun wie in Abbildung 4.13a festgelegt, ist die Möglichkeit gegeben, das Moment M_x um die x-Achse für die Ausrichtung zu verwenden. Theoretisch ist das Bauteil ausgerichtet, sobald dieses Moment den Wert null aufweist. In der Programmierung ist der Ablauf der Ausrichtung, wie in Abbildung 4.12 schematisch gezeigt, umgesetzt.

Nach der Ausrichtung wird der Blech-TCP auf Höhe der Biegelinie definiert und wie das Basiskoordinatensystem orientiert. Zusätzlich wird am Punkt des ersten Greifer-TCP's ein zweiter Greifer TCP, welcher ebenfalls dieselbe Orientierung wie das Basiskoordinatensystem aufweist, erstellt (siehe Abbildung 4.13b). Diese Maßnahmen sind für die Durchführung der Biegeversuche notwendig.

4.3.3. Biegen mit der Nachgiebigkeitsregelung

Es gibt verschiedene Ansätze für die Automatisierung des Biegevorgangs. Unterschiede gibt es angefangen von der Verwendung verschiedener Greiferarten (Zangengreifer, Sauggreifer), in der Vorpositionierung des Bauteils (Kamerasystem, mechanische

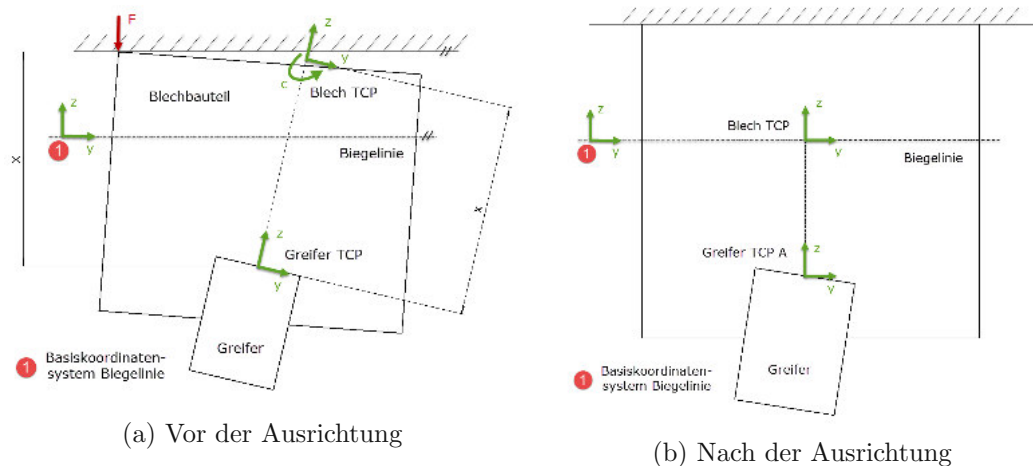


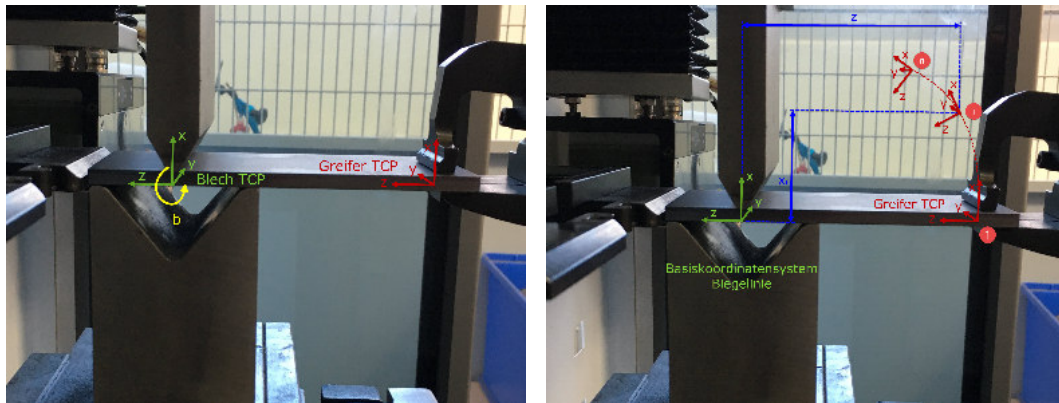
Abbildung 4.13.: Grundprinzip für die Ausrichtung des Blechbauteils am Hinteranschlag

Lösung) bis hin zu Prozessunterschieden wie z.B. der Entscheidung, ob das Bauteil während des Biegens losgelassen wird oder nicht. TRUMPF setzt bei der TruBend Cell 7000 auf einen Zangengreifer, welcher dem Bauteil im geschlossenen Zustand während des Biegens folgt. Dies vermeidet einerseits Positionsfehler, welche beim Loslassen und erneutem Greifen des Bauteils entstehen und ermöglicht eine kürzere Zykluszeit.⁹ Andererseits führt diese Methode aber zu unerwünschten Zwangskräften im Roboter, da die genaue Blechbewegung, aufgrund unkontrollierbarer Einflüsse, nicht exakt vorhersehbar ist. Zu diesen Störeinflüssen zählen z.B. Blechdickenschwankungen, die Positionier- und Wiederholgenauigkeit der NC-Achsen, Werkzeugtoleranzen und -verschleiß und Abweichungen bezüglich der Werkstoffeigenschaften [21].

Dieser Versuch sieht ebenfalls vor, das Blech während des Biegens nicht loszulassen. Jedoch wird hier dem Roboter keine exakte Bahn vorgegeben, sondern mit einer Nachgiebigkeitsregelung versucht, dementsprechend auf die äußeren Belastungen zu reagieren. Das Ziel ist hier eine erste grobe Beurteilung dieser Strategie. Dazu werden die zwei unterschiedlichen Proben, ausgehend von der frontalen Biegeposition, jeweils auf einen Biegewinkel von 90° gebogen. Der Versuchsausgang kann mit der Wahl der Regelungsart (kartesischer oder achsspezifischer Impedanzregler, siehe 3.4.4) und der Steifigkeits- und Dämpfungsparameter für jeden Freiheitsgrad beeinflusst werden.

Für die Versuchsdurchführung sind folgende zwei Ansätze angedacht. Das Prinzip dieser Ansätze ist in Abbildung 4.14 gezeigt.

⁹Quelle: TRUMPF.



(a) Biegen ohne Bahnvorgabe

(b) Biegen mit Bahnvorgabe

Abbildung 4.14.: Skizzen zur Beschreibung des geometrischen Modells (eigene Darstellung)

- Der Roboter verharrt in der Startposition und wartet bis das Blechbauteil eine Kraft auf ihn ausübt, auf die er mit einer Bewegung reagiert
- Es erfolgt die Vorgabe einer Bahn (geometrisches Modell) um die, je nach gewählten Regler-Parameter, Abweichungen möglich sind

Beim Biegen ohne Bahnvorgabe (Abbildung 4.14a) wird der Bewegungsbefehl *positionHold*¹⁰ auf den Blech-TCP angewandt und so der Roboter bereit für den Biegevorgang gemacht. Der Roboter wird hier in Nachgiebigkeitsregelung betrieben. Die Steifigkeits- und Dämpfungsparameter für die Freiheitsgrade x, z und b werden auf ein Minimum reduziert, sodass der Roboter schnell und mit großen Positionsänderungen auf äußere Belastungen reagiert. Dies bedeutet, die Regelung versucht die äußeren Belastungen, die das Blechbauteil auf den Roboter einleitet, mittels dementsprechenden Bewegungen zu minimieren.

Bei dem zweiten Ansatz (Abbildung 4.14b) wird dem Roboter eine Bahn vorgegeben. Die Positionen und Geschwindigkeiten für die Bahnvorgabe stammen von dem geometrischen Modell aus Abschnitt 4.2.1. Die Bahn besteht aus n Stützpunkten und wird mittels einer Spline-Interpolation erstellt. Zusätzlich zu den Positionen werden die Geschwindigkeiten für die einzelnen Bahnabschnitte vorgegeben. Mit diesem Ansatz können einzelne Teile der Bewegung vorgegeben werden. Gerade

¹⁰Mithilfe des Bewegungsbefehls *positionHold()* kann der Roboter über einen einstellbaren Zeitraum hinweg seine kartesische Sollposition halten und dabei in Regelung bleiben. Wird der Roboter zusätzlich in Nachgiebigkeitsregelung betrieben, kann sich dieser durch Einwirkung von äußeren Kräften, abhängig von den eingestellten Regler-Parametern, von der Sollposition entfernen.

bei leicht verformbaren Blechen kann es sein, dass das Bauteil deformiert wird, bevor der Roboter die Belastung wahrnimmt und reagiert. Hier kann die Vorgabe der Bewegung einzelner Freiheitsgrade bessere Ergebnisse liefern. Grundsätzlich können die Reglerparameter wie eine Gewichtung betrachtet werden. Werden die Steifigkeiten der Freiheitsgrade sehr klein gewählt, so versucht die Regelung vorrangig die äußeren Kräfte zu minimieren. Werden hingegen die Steifigkeiten sehr hoch gewählt, nähert sich das Verhalten einer Positionsregelung an. Kurz gesagt kann mit den Reglerparametern die Gewichtung zwischen einer Bewegung folgen und einer äußeren Kraft nachgeben, für jeden Freiheitsgrad individuell eingestellt werden.

4.4. Programm für die Versuchsdurchführung

In diesem Kapitel werden lediglich die wichtigsten Kernpunkte und Prinzipien der Programmierung angeführt. Da diese nicht im Fokus dieser Arbeit liegt, wird an dieser Stelle auf eine detaillierte Erklärung des Programmcodes¹¹ verzichtet. Für weitere Informationen diesbezüglich wird auf [35, 18] verwiesen.

4.4.1. Online-Programmierung einer Biegeapplikation

Das Programm für die Versuchsdurchführung bietet die drei Hauptfunktionen *Applikation erstellen*, *Applikation ausführen* und *Testumgebung* (siehe Abbildung 4.15). Letztere dient als Testumgebung zum Aufruf einzelner Funktionen und Programmabschnitte. Die Funktion *Applikation erstellen* bietet die Möglichkeit eine Roboterapplikation komfortabel mittels Handführen und der Auswahl einzelner Programmroutinen zu erstellen. Mit einer dementsprechenden Programmlogik lassen sich so, schnell und flexibel einfache Abläufe erstellen. Die Interaktion mit dem Bediener findet dabei über eine von KUKA bereitgestellten Dialogfunktion statt (siehe Abbildung A.8).

Für das Erstellen der Applikation stehen unterschiedliche Bausteine wie z.B. *Bahn lernen*, *Blech aufnehmen*, usw. zur Verfügung. Durch sinnvolle Kombination dieser Bausteine wird der Roboter, angefangen von der Bauteilaufnahme bis hin zur Bauteilablage, programmiert um eine oder mehrere Biegungen durchzuführen. Diese Funktionsweise wurde programmiertechnisch folgendermaßen umgesetzt. Nach dem Auswählen eines Bausteins (blaue Ziffern), wird dessen Funktion ausgeführt und

¹¹Der komplette Programmcode ist auf der angehängten DVD zu finden.

anschließend muss erneut ein Baustein ausgewählt werden. Dieser Vorgang wiederholt sich bis der Ablauf mit dem Baustein *Beenden und Speichern* abgeschlossen wird. Das Menü des Programms besteht im Wesentlichen aus do-while und switch-case Anweisungen. Die roten Ziffern markieren die zeitliche Abfolge der Bausteine. Diese spiegeln die Anzahl der Schleifendurchläufe wieder. Aus dieser Vorgehensweise ergibt sich ein Programmablauf wie in Abbildung 4.15 im unteren Bereich dargestellt. Dem ersten Arbeitsschritt ist der dritte Baustein zugeordnet. Im zweiten Arbeitsschritt wird Baustein sieben ausgeführt und das Prinzip setzt sich so fort. Diese Zahlenfolge wird in einer Datei gespeichert und ist Grundlage für die automatische Ausführung.

Im Anschluss an den Teachvorgang besteht die Möglichkeit, diesen Ablauf mittels *Applikation ausführen* eins zu eins wiederzugeben. Hierbei werden die aufgrund des Programmablaufs (zuvor erstellte Zahlenfolge) festgelegten Bausteine ausgeführt (z.B. im dritten Arbeitsschritt wird Baustein eins ausgeführt). Wird ein Baustein in der Funktion *Applikation ausführen* aufgerufen, so werden die zuvor aufgenommenen Punkte mit einer Point-to-Point (PTP)¹² Bewegung angefahren.

4.4.2. Programmbausteine

Bahn lernen

Bei dem Baustein *Bahn lernen* wird der Roboter im Handführmodus betrieben und kann frei innerhalb des Arbeitsraums bewegt werden. Für die Aufzeichnung der Bahn werden Start-, Endpunkt und nach Zurücklegen eines definierten Streckenintervalls weitere Punkte aufgezeichnet. Je mehr Punkte aufgenommen werden, desto ruckartiger bewegt sich der Roboter. Im Gegenzug dazu wird die vorgezeigte Bahn besser abgebildet. Um die Bahn ein bisschen zu glätten und in einer Bewegung durchzufahren, werden die Punkte zusätzlich überschliften. Auf eine gesonderte Aufbereitung der Punkte, hinsichtlich eines schnelleren und ruckfreien Ablaufs, wird verzichtet.

¹²Bei dieser Art der Bewegungssteuerung wird von Punkt zu Punkt gefahren. Der TCP wird dabei auf der schnellsten Bahn vom Start- zum Zielpunkt bewegt. Diese Bahn ist vorab nicht vorhersehbar, aber bei unveränderten Rahmenbedingungen immer gleich [18].

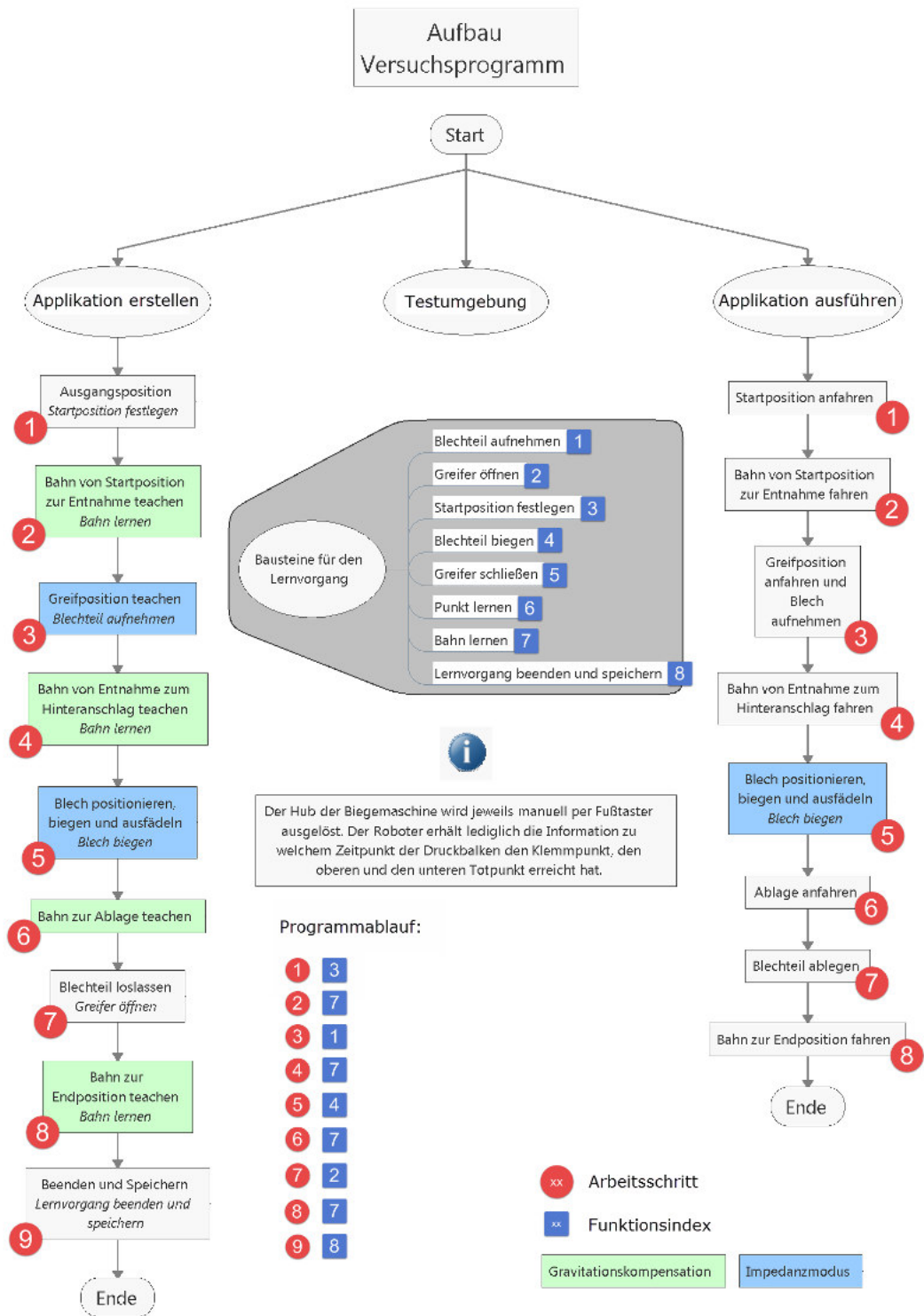


Abbildung 4.15.: Aufbau des Versuchsprogramms (eigene Darstellung)

Punkt lernen

Der Baustein *Punkt lernen* dient zur gefühlvollen Positionierung des Roboters (z.B. Greifpunkt teachen). Hier wird der Roboter im kartesischen Nachgiebigkeitsmodus¹³ betrieben und die Steifigkeit und Dämpfung so eingestellt, damit der Roboter mit geringem Kraftaufwand vom Bediener bewegt werden kann. Je nach Bedarf können einzelne Freiheitsgrade gesperrt werden. Beim Erreichen einer Endlage geht der Roboter in einen Sicherheitshalt und das Programm wird abgebrochen und erfordert einen Neustart. Aus diesem Grund wird bei der Verwendung der Nachgiebigkeitsregelung in der Nähe von Achsendlagen, eine laufende Überwachung der Achspositionen implementiert. Bei Überschreitung eines kritischen Achswerts wird der Roboter gestoppt und in die entgegengesetzte Richtung bewegt. Dies signalisiert dem Bediener das Erreichen der Endlage und vermeidet einen Programmstopp. Ohne Implementierung dieser zusätzlichen Überwachung kann die Nachgiebigkeitsregelung für diese Zwecke nur eingeschränkt verwendet werden.

Blechteil aufnehmen

Bevor der Baustein *Blechteil aufnehmen* ausgewählt wird, muss der Greifer nahe des gewünschten Greifpunkts positioniert sein. Der Baustein beinhaltet die Ausrichtung des Greifers anhand eines zuvor definierten Koordinatensystems (z.B. Vorausrichtung an der Entnahmestation). Nach dem Ausrichten wird der Nachgiebigkeitsmodus aktiviert und der Greifer kann mit der Hand zum gewünschten Greifpunkt bewegt werden. Nach der Betätigung des Applikationstasters am Flansch des Roboters ist der letzte Schritt die Aufnahme des Bauteils durch Schließen des Greifers.

Blechteil biegen

Der Baustein *Blechteil biegen* erfordert eine grobe Vorpositionierung des Bauteils nahe der Biegestation. Der Vorgang beginnt mit einer Ausrichtung des Greifer-TCP's anhand des auf der Biegelinie positionierten Basiskoordinatensystems (siehe Abbildung A.7d). Anschließend werden im Nachgiebigkeitsmodus ein Punkt am Unterwerkzeug und am Hinteranschlag geteacht. Nun muss die Art, wie der Roboter die Biegung durchführen soll, ausgewählt werden. Es stehen die drei folgenden Möglichkeiten zur Auswahl.

¹³Siehe 3.4.4.

- Nachgiebigkeitsregelung ohne weitere Vorgabe einer Bahn
Der Roboter reagiert mit einer Positionsänderung, aufgrund der auf ihm einwirkenden Kräfte
- Nachgiebigkeitsregelung mit Vorgabe einer Bahn
Der Roboter fährt eine vorgegebene Bahn, lässt aber je nach Parametrierung, Positionsänderungen aufgrund der auf ihm einwirkenden Kräfte zu.
- Vorgabe einer Bahn
Der Roboter fährt positionsgeregelt eine vorgegebene Bahn.

An dieser Stelle wartet der Roboter nun auf die Signale der Biegemaschine (Klemmpunkt, unter Totpunkt, oberer Totpunkt). Nach dem Verlassen des Klemmpunkts führt der Roboter die Biegung auf die zuvor ausgewählte Art durch. Nachdem der Druckbalken den oberen Totpunkt erreicht hat, wird das Bauteil ausgefädelt. Hierbei fährt der Roboter ein kleines Stück in die Höhe und von der Biegemaschine weg.

Greifer öffnen und Greifer schließen

Die Bausteine *Greifer öffnen* und *Greifer schließen* sind für das Öffnen und Schließen des Greifers zuständig. Bevor die Steuerung das Wegeventil betätigt, muss der Vorgang zuerst am Handbediengerät bestätigt werden. Die sich veränderten Lastdaten bei der Aufnahme oder Ablage eines Bauteils, werden hier ebenfalls berücksichtigt.

Startposition festlegen

Dieser Baustein dient zum Festlegen der Startposition. Der Roboter befindet sich hierzu im Handführmodus und kann mit der Hand zum gewünschten Punkt bewegt werden.

Lernvorgang beenden und speichern

Nach Abschluss des Teachvorgangs wird dieser Baustein zum Beenden und Speichern verwendet. Der Programmablauf und die Positionsdaten werden in einer xml Datei auf der Steuerung gesichert.

5. Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der zuvor beschriebenen Versuche präsentiert. Die hier vorgestellten Diagramme basieren auf Daten, welche vom Roboter selbst aufgezeichnet wurden (siehe 3.4.5). Darüber hinaus liegen teilweise Videoaufnahmen zu den einzelnen Versuchen vor.¹ Diese dienen zur Veranschaulichung der Versuche und ermöglichen es dem Leser die Ergebnisse leichter nachzuvollziehen und die Messwerte kritisch zu begutachten.

5.1. Güte der Messdaten

Zu Beginn wird anhand zweier Versuche festgestellt wie vertrauenswürdig die Messwerte des Roboters tatsächlich sind. Dazu werden die externen Belastungen zuerst im statischen und im Anschluss im dynamischen Fall begutachtet. Die Ausgangsstellung des Roboters, sowie der Bezugspunkt der Messungen (Greifer-TCP) sind in Abbildung 5.1 dargestellt. Das Ziel hier ist nicht den Roboter dahingehend zu untersuchen, wie genau dieser eine externe Belastung bestimmen kann. Sondern bei diesen Versuchen steht vielmehr die Überprüfung der Plausibilität der vom Roboter ermittelten externen Belastungen im Vordergrund. Darüber hinaus wird gleichzeitig auch festgestellt, ob die Lastdaten des Greifers korrekt angegeben sind.

5.1.1. Statischer Test

Beim statischen Versuch verharrt der Roboter zunächst mittels des Bewegungsbefehls *positionhold* in der Ausgangsposition. Dieser wird auf den Greifer-TCP angewandt und in Impedanzregelung ausgeführt. Hierbei betragen die translatorischen Steifigkeiten $c_{trans} = 5000 \frac{N}{m}$ (entspricht c_x, c_y, c_z) und die rotatorischen Steifigkeiten $c_{rot} = 30 \frac{Nm}{rad}$ (entspricht c_c, c_b, c_a). Für die translatorische und rotatorische Dämpfung werden die voreingestellten Werte $\delta_{trans} = \delta_{rot} = 0.7$ verwendet. Die Einbringung der

¹Die Videos liegen der Arbeit in Form einer DVD bei.

Belastung erfolgt per Hand über die 6 mm Blechprobe², welche im Greifer gespannt ist. Diese erfolgt in der Reihenfolge der Freiheitsgrade des Greifer TCP's (x,y,z,c,b,a) in der jeweiligen positiven Richtung. Daraus ergibt sich, dass bei sauberer Krafteinleitung jeweils nur eine Kraft- oder Momentkomponente einen Ausschlag aufweist. Ausgenommen bei den Momenten M_x und M_y . Hier wird eine Kraft, anstatt eines Kräftepaars zur Einleitung der Belastung verwendet. Die Ergebnisse des statischen Tests sind in Abbildung 5.2 gezeigt. Das linke Diagramm zeigt die Komponenten der externen Kräfte und das rechte Diagramm die Komponenten der externen Momente. Die strichlierten Linien geben den Unsicherheitsbereich der jeweiligen Komponente an. In dieser Stellung ergeben sich bei den Kräften ähnliche Unsicherheiten in einer Größenordnung von ungefähr ± 4 N. Bei den Momenten hingegen ist auffällig, dass die Unsicherheitsbereiche unterschiedliche Größenordnungen aufweisen. Die Unsicherheit der x Komponente ist mit ungefähr $\pm 2,2$ Nm am größten.

Das Kraft-Weg Diagramm ist in Abbildung 5.3 für die translatorischen Komponenten gezeigt. Die schwarze Linie stellt die theoretische Federkennlinie mit $c = 5000 \frac{N}{m}$ dar. Grundsätzlich stimmt die Steigung der gemessenen Werte mit der gewünschten Steigung gut überein. Das "Hystereseverhalten" wird durch die Dämpfung des Systems verursacht und entspricht der vorgegebenen Dämpfung [27].

Im statischen Fall sind die Werte plausibel. Einzig bei den Komponenten der Kräfte und Momente ist auffällig, dass diese teilweise nach der Entlastung einen anderen Wert als vor der Belastung aufweisen. Speziell ist dies z.B. bei M_x , M_y , F_x und F_y zwischen $10 < t < 20$ s erkennbar. Diese Sprünge passieren allesamt im Unsicherheitsbereich, außer bei M_y . Hier befindet sich der Wert auch nach Beendigung des Tests ($t > 45$ s) außerhalb dieses Bereichs. Die Masse des Greifers ist richtig definiert, da keine der Kraftkomponenten einen größeren Offset aufweist.

5.1.2. Dynamischer Test

Beim dynamischen Test wird eine Bewegung, wie sie bei den Biegeversuchen vorkommt durchgeführt. Im Unterschied zum statischen Fall müssen nun die Messwerte anhand des Robotermodells auch um dynamische Anteile bereinigt werden. Dieser Versuch wurde zweimal durchgeführt. Zu Beginn mit montiertem Greifer. Die Messergebnisse der externen Belastungen sind in Abbildung 5.4a und 5.4c gezeigt. Hier zeigt sich, dass beinahe jede Komponente einmal den Unsicherheitsbereich verlässt und somit eine

²Die Masse der Blechprobe ist in den Lastdaten berücksichtigt.

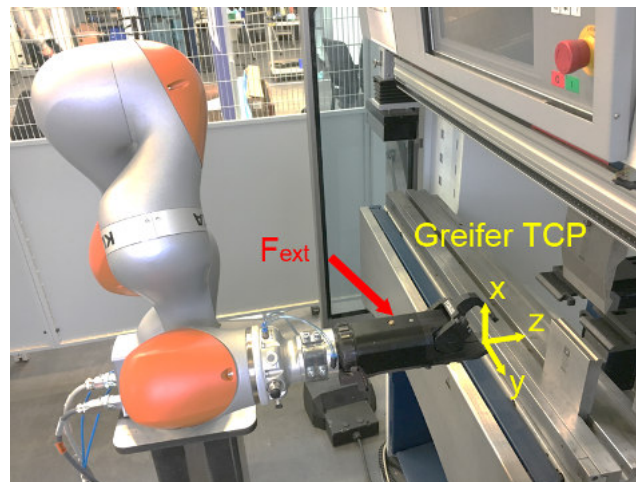


Abbildung 5.1.: Roboter Ausgangsstellung für der Durchführung des statischen und dynamischen Tests (eigene Darstellung)

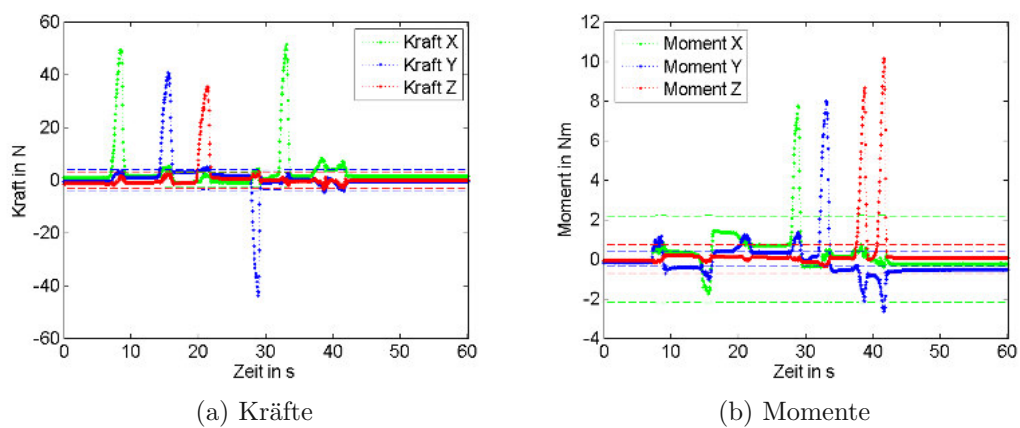


Abbildung 5.2.: Messergebnisse der externen Belastungen im Ruhezustand (Ausgangsstellung Biegeposition 1, siehe Abbildung 5.1) (eigene Darstellung)

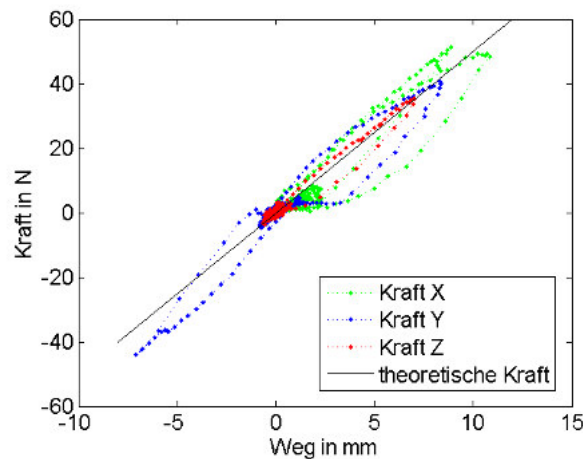


Abbildung 5.3.: Kraft-Weg Diagramm der translatorischen Komponenten

externe Belastung anzeigt, die in Wirklichkeit nicht vorhanden ist. Speziell fällt dieses Verhalten bei M_y auf. Um eine falsche Angabe der Lastdaten (Trägheitsmomente des Greifers) auszuschließen, wurde der Test auch ohne Greifer durchgeführt. Die Ergebnisse hierzu sind in 5.4b und 5.4d dargestellt. Der zweite Test brachte keine Besserung.³

5.2. Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag

Um ein Gefühl für die Sensitivität des Roboters zu bekommen und einen möglichen Einfluss des Hinteranschlages auf die Messungen auszuschließen, werden die ersten Versuche an einem fixen Anschlag durchgeführt. Das Ziel hierbei ist festzustellen, ob der Roboter die Ausrichtung des Bauteils gegenüber dem festen Anschlag korrekt bestimmen kann und wie hoch dabei die aufzubringende Kraft gegen den Anschlag sein muss. Die Versuche werden sowohl mit der 6mm, als auch mit der 1mm Blechprobe durchgeführt.

Der fixe Anschlag ist hier in Form eines Bleches, welches vor dem Unterwerkzeug platziert ist, realisiert (siehe 5.6). Die externen Belastungen sind in Abbildung 5.6a gezeigt und beziehen sich auf den Blech-TCP (gelbes KOS). Bei diesem Versuch fährt der Roboter positionsgeregelt in z-Richtung des Basiskoordinatensystems der

³Aufgrund dieser Auffälligkeiten im dynamischen Test wurde eine Anfrage bei KUKA Roboter CEE GmbH (Österreich) gestellt, ob diesbezüglich Erfahrungswerte vorliegen. Leider konnte die Anfrage nicht vor Beendigung des Praktikums beantwortet werden.

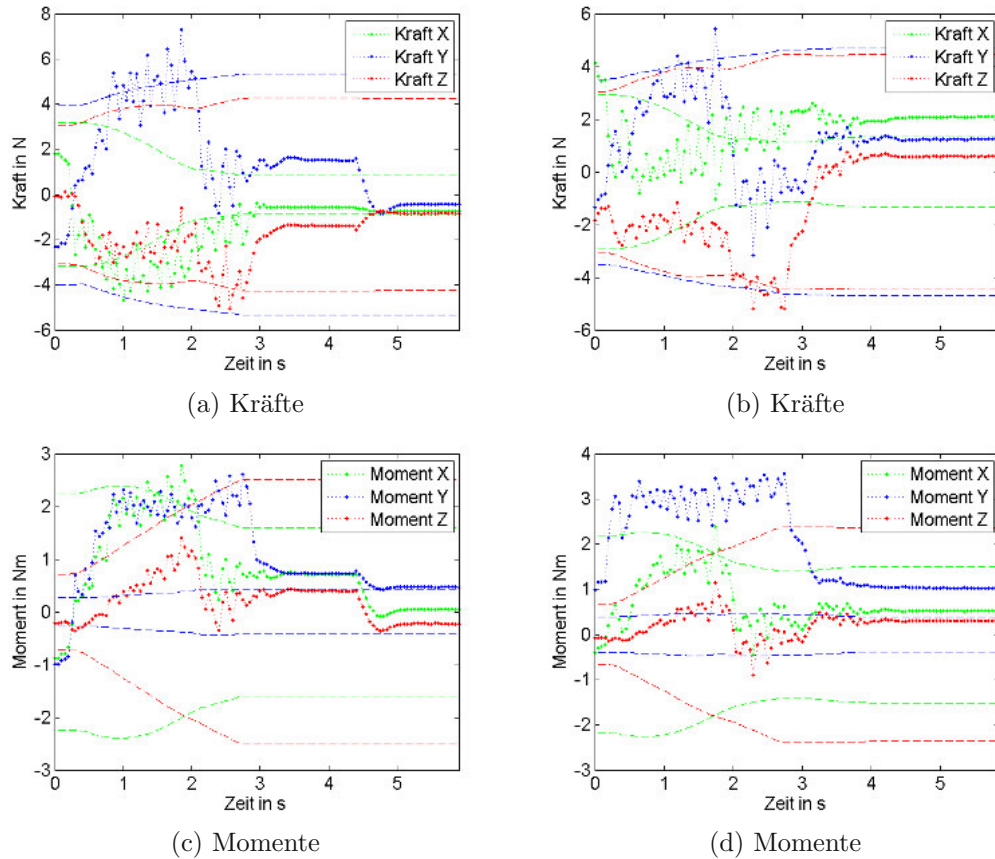


Abbildung 5.4.: Messergebnisse der externen Belastungen im bewegten Zustand (Bahnkurve nach geometrischen Modell). (a) und (c) stellen die Ergebnisse mit Greifer und (b) und (d) die Ergebnisse des Roboters ohne zusätzliche Lasten dar. (Ausgangsstellung Biegeposition 1, siehe Abbildung 5.1), (eigene Darstellung)

Biegelinie (siehe A.7d) gegen den Anschlag. Die Soll- und Istposition ist ausgehend vom Startpunkt in Abbildung 5.6c dargestellt. Bevor das Bauteil den Anschlag berührt sind die externen Belastungen auf den Roboter null. Nach etwa zwei Sekunden trifft das Blech auf den Anschlag und die Kraft beginnt zu steigen, bis die erste Kraftschwelle erreicht ist. Diese dient später zum Antasten an den Hinteranschlag, bevor der eigentliche Ausrichtevorgang beginnt. Die Geschwindigkeit wird dabei so gewählt, dass die Kraft nicht zu rapide ansteigt. Gleichzeitig mit der Kraft nimmt auch das Moment um die x-Achse M_x zu. Die Kraft F_z weist ein negatives Vorzeichen auf, weil die Reaktionskraft entgegen der z-Achse des Blech TCP's gerichtet ist. Das Moment hingegen weist ein positives Vorzeichen auf. Im Bild links ist zu sehen, dass das Bauteil mit der linken Seite den Anschlag berührt. Dies bedeutet, hier wirkt die Reaktionskraft und somit ergibt sich am Blech TCP betrachtet ein positives Moment. Nach dem Antasten wird nach einer kurzen Pause die Bewegung bis zum Erreichen der zweiten Kraftschwelle (ungefähr 100 N) fortgesetzt. Hierbei liegt die Sollposition aufgrund des Widerstands vor der Istposition. Da der Roboter sich in Positionsregelung befindet, wird die Kraft solange erhöht bis der Sollwert erreicht ist. Hier bewegt sich aber nicht der Endeffektor, sondern die Gelenke verwinden sich aufgrund der eingebrachten Nachgiebigkeit durch die Momentenmessung. Wie bereits in Abschnitt 5.1 festgestellt, weist das Moment M_x einen großen Unsicherheitsbereich auf (blau strichlierte Linie, Abbildung 5.6a). Dieser wird erst bei einer Anschlagkraft von ungefähr 50 N verlassen. Aus diesem Grund wird bei den folgenden Versuchen eine Anschlagkraft im Bereich von 80 bis 100 N verwendet.

Im nächsten Schritt wird der Versuch wiederholt, jedoch mit dem Unterschied, dass der Roboter in Impedanzregelung anstatt in Positionsregelung betrieben wird. Des weiteren wird die im vorigen Kapitel vorgestellte Methode zur Ausrichtung des Bauteils verwendet. In Abbildung 5.6b sind die externen Belastungen und in Abbildung 5.6d die Soll- und Istposition des Roboters für diesen Versuch dargestellt.⁴ Die Impedanzregelung ist hierbei wie in Tabelle 5.1 angeführt parametrisiert. Prinzipiell zeigt sich hier bis zum Kraftanstieg ein ähnliches Verhalten. Das Moment steigt in diesem Fall in die negative Richtung, da das Bauteil in diesem Versuch zuerst mit der anderen Seite gegen den Hinteranschlag trifft. Gleichzeitig mit dem Kraftanstieg, ergibt sich auch wie zuvor beobachtet eine Veränderung der Istposition, welche aus der Nachgiebigkeit der Gelenke resultiert. Aber im Unterschied zu vorhin ändert sich die Position ein zweites Mal. Dies ist nun die Bewegung für die Ausrichtung des Bauteils. Gleichzeitig fällt in diesem Zeitraum die Kraft entsprechend der eingestellten

⁴Ausgehend vom Startpunkt des Ausrichtevorgangs.

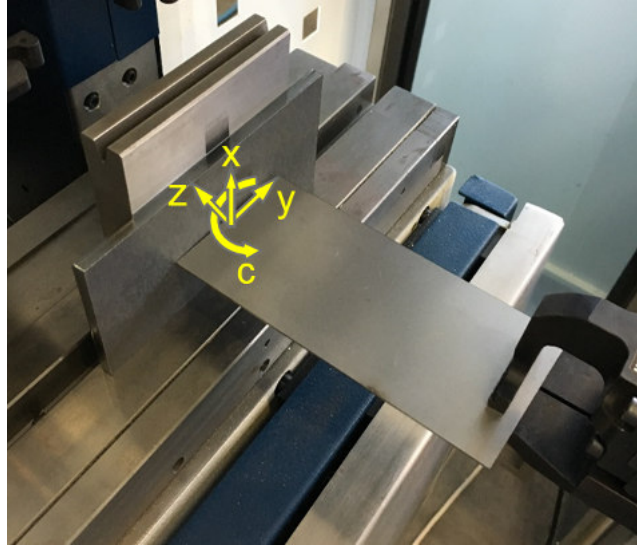


Abbildung 5.5.: Fixe Anschlagsituation (eigene Darstellung)

c_x	δ_x	c_y	δ_y	c_z	δ_z	c_c	δ_c	c_b	δ_b	c_a	δ_a
$5000 \frac{N}{m}$	0.7	$5000 \frac{N}{m}$	0.1	$5000 \frac{N}{m}$	0.1	$0.01 \frac{Nm}{rad}$	0.1	$300 \frac{Nm}{rad}$	0.7	$300 \frac{Nm}{rad}$	0.7

Tabelle 5.1.: Parametrierung der Impedanzregelung für den Versuch der Ausrichtung am fixen Anschlag (eigene Tabelle)

Federsteifigkeit c_z ab. Die Ausschläge des Moments zeigen, dass in diesem Fall ein deutliches Überschwingen auftritt. Das Moment pendelt sich auf den Wert null ein und die Ausrichtung war erfolgreich.

Als nächstes wird der Versuch am Hinteranschlag durchgeführt. Um das Überschwingen zu verhindern werden die jeweiligen Dämpfungsparameter erhöht ($\delta_y = \delta_z = \delta_c = 1$). In Abbildung 5.6e sind wieder die externen Belastungen dargestellt. Um die einzelnen Schritte zu verdeutlichen wird eine kurze Wartezeit nach dem Antasten programmiert. Der kleine Anteil der z-Komponente der bereits relative zu Beginn auftritt und größer wird, ist auf die Reibung am Unterwerkzeug zurückzuführen. Ansonsten ergibt sich, bis auf das fehlende Überschwingen, ein ähnliches Verhalten. Der Start der Ausrichtebewegung ist am deutlichen Abfall des Moments und an der kleinen Änderung in der Anschlagkraft zu erkennen. Für diesen Versuch ist im Anhang ein Video verfügbar⁵, welche die erfolgreiche Ausrichtung der Probe zeigt.

⁵Der Dateiname lautet: "Anschlagen_6mm". Darüber hinaus gibt es auch ein Video des Ausrichtevorgangs mit der 1 mm Blechprobe ("Anschlagen_1mm").

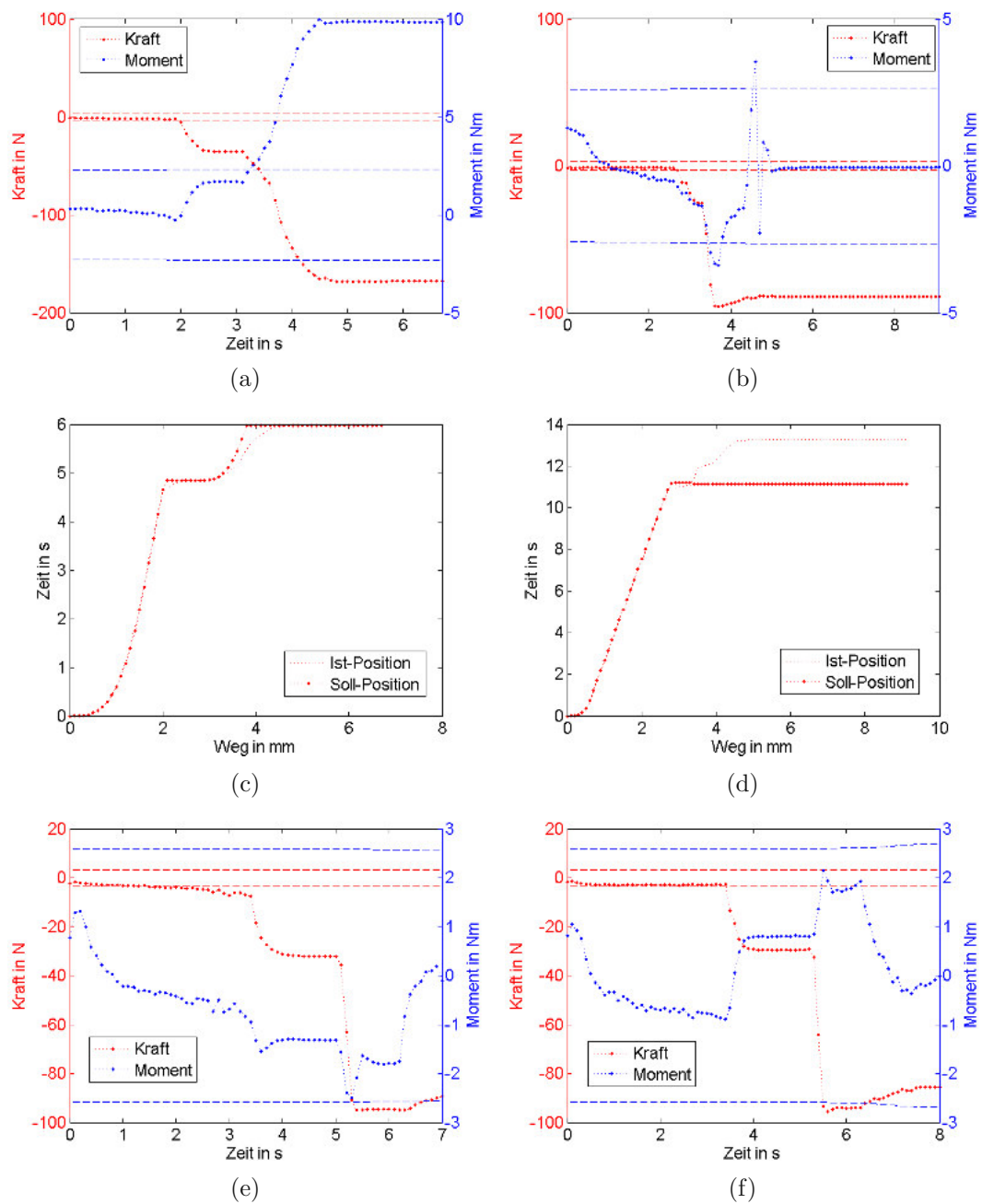


Abbildung 5.6.: Messergebnisse aus den Positionierversuchen, (a) externe Belastung (fixer Anschlag), (b) externe Belastung (fixer Anschlag mit Ausrichtung), (c) Soll- und Istposition des Blech-TCP in z-Richtung (fixer Anschlag), (d) Soll- und Istposition des Blech-TCP in z-Richtung (fixer Anschlag mit Ausrichtung), (e) externe Belastung (Hinteranschlag mit Ausrichtung, erfolgreich), (f) externe Belastung (Hinteranschlag mit Ausrichtung, fehlgeschlagen), (eigene Darstellung)

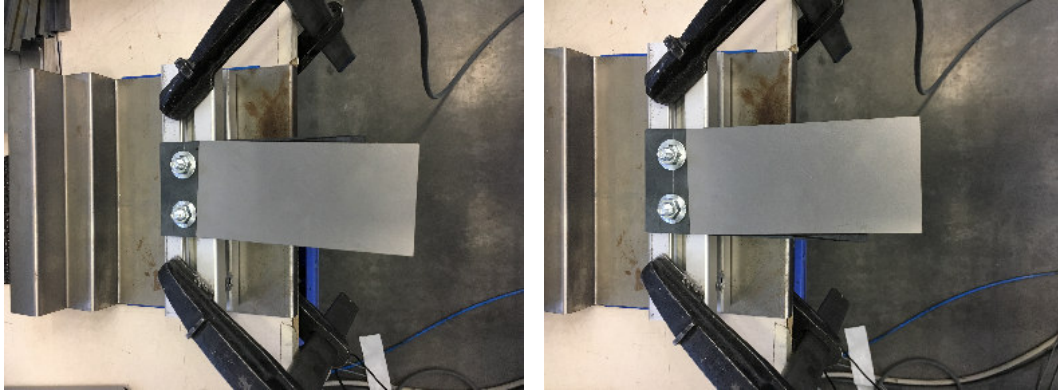


Abbildung 5.7.: Maximale Verdrehung der Bauteile vor der Entnahme (eigene Darstellung)

Das Ausrichten am Hinteranschlag wurde 17 mal durchgeführt und die Daten dazu näher ausgewertet. Dabei wurden die einzelnen Bauteile vor der Entnahme zu einem Drittel positiv und zu einem Drittel negativ verdreht. Die Verdrehungen wurden dabei zufällig in einem Wertebereich von $\pm 2.5^\circ$ durchgeführt (siehe Abbildung 5.7). Bei den restlichen Versuchen lag das Bauteil wie in der ursprünglichen Position zur Entnahme bereit. In vier Fällen war die Ausrichtung nicht erfolgreich. In Abbildung 5.6f sind die externen Belastungen für einen fehlgeschlagenen Versuch gezeigt. Im Vergleich zum erfolgreichen Versuch ist kein Unterschied erkennbar.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Strategie für die Ausrichtung prinzipiell funktioniert, aber der Roboter nicht in der Lage ist zu erkennen, ob das Bauteil korrekt ausgerichtet ist. Aus diesem Grund ist die erste Forschungsfrage (F1) mit nein zu beantworten.

5.3. Biegen mit der Nachgiebigkeitsregelung

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse zu den Biegeversuchen vorgestellt. Zu jedem hier präsentierten Versuch liegt auch ein Video vor. Wie in Kapitel 4.2 gezeigt, ist das geometrische Modell bei kleinen Blechstärken mit der FE-Simulation annähernd ident. Dies bedeutet, dass bei dünnen Blechen die Biegung auch mit einer Bahnvorgabe in Positionsregelung möglich ist und womöglich bessere Ergebnisse liefert. Die Forschungsfrage ist hier aber, ob die Impedanzregelung des LBR iiwa in

der Lage ist dem Blechbauteil während der Biegebewegung zu folgen, ohne es zu beschädigen.

In Abbildung 5.8 sind die Ergebnisse zweier Biegeversuche für die 6mm Blechprobe dargestellt. Für die Versuche wurde eine Pressengeschwindigkeit von $10 \frac{mm}{s}$ eingestellt. Dabei stellen die Diagramme (a), (c) und (e) die Ergebnisse einer Biegung mit kartesischem Impedanzregler dar. Die Parameter für die Regelung sind in Tabelle 5.2 angeführt. (b), (d) und (f) hingegen stellen die Ergebnisse einer Biegung mit achsspezifischem Impedanzregler dar. Die Parameter hierzu sind in Tabelle 5.3 angegeben. Die jeweiligen Ergebnisse bestehen aus den externen Belastungen (Kräfte und Moment) und der absoluten Geschwindigkeit des Greifer-TCP's, welche aus den Positionsdaten ermittelt wurde. Die Messdaten beziehen sich dabei auf die Position des Greifer-TCP's, aber das Koordinatensystem ist wie das Basiskoordinatensystem der Biegelinie (siehe Abbildung A.7d) orientiert.

In Abbildung 5.8a ist der Verlauf der externen Kräfte über die Zeit dargestellt. Der große negative Wert der Kraft F_z zu Beginn kommt dadurch, dass der Roboter noch immer von der Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag verspannt ist. Der positive Ausschlag der Kraft F_x rührt aus der Belastung durch das Blechbauteil. Danach pendeln die Werte um die entspannte Lage und klingen mit der Zeit ab. Dasselbe gilt für das externe Moment (siehe 5.8c). Im zugehörigen Video⁶ ist dieses Verhalten deutlich zu erkennen. Die Biegung ist nach ungefähr zwei Sekunden abgeschlossen. Im Anschluss sind noch weitere Ausschläge erkennbar. Davon treten die Ersten aufgrund des abrupten Abbremsens des Bauteils und der Letzte aufgrund der Rückfederung des Blechbauteils nach dem Entlasten auf. Die Geschwindigkeit des Greifer-TCP's (siehe Abbildung 5.8e) schwankt um die simulierte Geschwindigkeit und stimmt im Mittel gut überein.

Die Ergebnisse des zweiten Biegeversuchs⁷ (siehe Abbildung 5.8b,5.8d und 5.8f) weisen die selben Muster auf, mit dem Unterschied, dass die Schwingungen aufgrund der höheren Dämpfung schneller abklingen. Im Gegenzug ergibt sich zu Beginn ein höherer Wert der Kraft F_x . Aus diesen Aufzeichnungen ist kein Unterschied zwischen der kartesischen und der achsspezifischen Impedanzregelung erkennbar.

In Abbildung 5.9 sind die Ergebnisse zweier Biegeversuche für die 1 mm Blechprobe dargestellt. Für diese beiden Versuche wurde die kartesische Impedanzregelung

⁶“Stahl_6mm_Imp“.

⁷Der Name des zugehörigen Videos lautet: “Stahl_6mm_Imp_Achsen“.

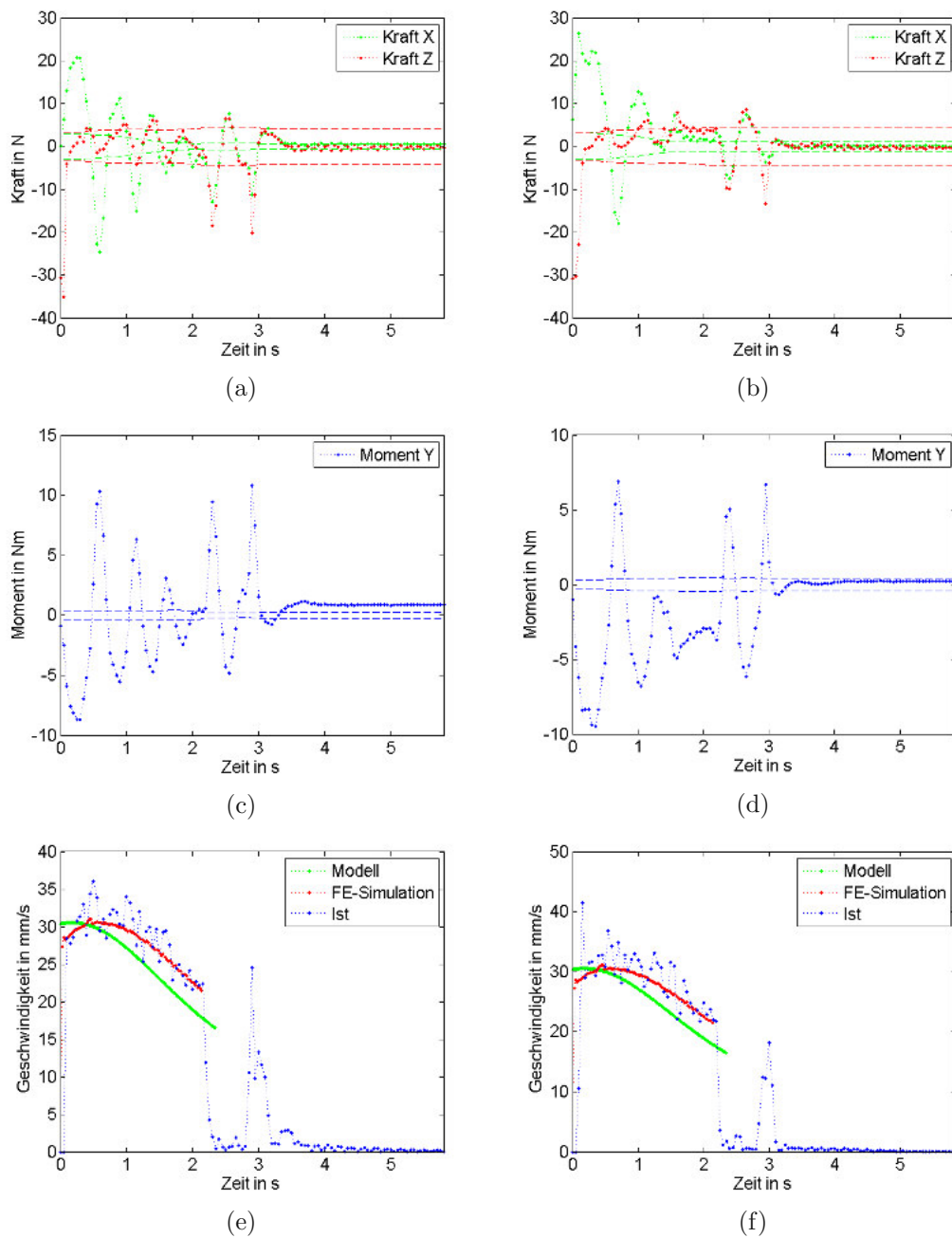


Abbildung 5.8.: Messergebnisse von den Biegeversuchen mit der 6 mm Blechprobe, (a) externe Kraft (kartesischer Impedanzregler), (b) externe Kraft (achsspezifischer Impedanzregler), (c) externes Moment (kartesischer Impedanzregler), (d) externes Moment (achsspezifischer Impedanzregler), (e) absolute Geschwindigkeit des Greifer-TCP's (kartesischer Impedanzregler), (f) absolute Geschwindigkeit des Greifer-TCP's (achsspezifischer Impedanzregler), (eigene Darstellung)

c_x	δ_x	c_y	δ_y	c_z	δ_z	c_c	δ_c	c_b	δ_b	c_a	δ_a
$0.1 \frac{Nm}{m}$	0.1	$0.1 \frac{Nm}{m}$	0.1	$0.1 \frac{Nm}{m}$	0.1	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.1	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.1	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.1

Tabelle 5.2.: Parametrierung der kartesischen Impedanzregelung für die Biegeversuche (eigene Tabelle)

c_1	δ_x	c_2	δ_y	c_3	δ_z	c_4	δ_c	c_5	δ_b	c_6	δ_a	c_7	δ_7
$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.7	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.7	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.7	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.7	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.7	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.7	$0.1 \frac{Nm}{rad}$	0.7

Tabelle 5.3.: Parametrierung der achsspezifischen Impedanzregelung für die Biegeversuche (eigene Tabelle)

verwendet und eine Pressengeschwindigkeit von $1 \frac{mm}{s}$ eingestellt. Die Regelung ist für den ersten Versuch wie in in Tabelle 5.2 angeführt, parametriert.

In Abbildung 5.9a ist der Verlauf der externen Kräfte über die Zeit dargestellt. Hier ist zu Beginn natürlich wieder der negative Wert der Kraft F_z erkennbar. Der positive Ausschlag der Kraft F_x hingegen ist hier unerwarteterweise kaum zu sehen. Aufgrund der Nachgiebigkeit der Blechprobe selbst sind im weiteren Verlauf keine Ausschläge mehr erkennbar. Das Moment (siehe Abbildung 5.9c), steigt im Vergleich zu den Biegeversuchen mit der 6 mm Probe nur sehr langsam an. Dies liegt einfach daran, dass sich die 1 mm Probe verformt und somit nicht stabil genug ist, um die Belastung an den Roboter weiterzugeben. Abbildung 5.9e zeigt auch die daraus resultierende niedrigere Geschwindigkeit des Greifer-TCP's. Des Weiteren wirkt sich hier der Fehler bei der Ermittlung des Moments bei der 1 mm Blechprobe natürlich stärker aus als bei der 6 mm Blechprobe. Der große Ausschlag des Moments zum Schluss passiert beim Entlasten und ist auf den elastischen Anteil der Verformung zurückzuführen. Im Video⁸ ist sehr gut zu erkennen, dass sich die Orientierung des Greifers erst sehr spät zu ändern beginnt.

Beim zweiten Versuch wird eine Bahn mittels des geometrischen Modells vorgegeben. Bis auf $c_b = 300 \frac{Nm}{rad}$ werden die selben Parameter wie beim ersten Versuch verwendet. Dies bewirkt, dass der Roboter die Orientierung um die y-Achse des Greifer-TCP's laut dem Modell durchführt, aber in den übrigen Freiheitsgraden auf externe Belastungen reagiert. Somit wird der Freiheitsgrad mit der fehlerhaften Ermittlung der externen Belastung entschärft. Hier weist der Verlauf der Kraft F_x

⁸“Stahl.1mm.Imp“.

zu Beginn wieder den erwarteten Peak (siehe Abbildung 5.9b) auf. Im zugehörigen Video⁹ ist ersichtlich, dass der Greifer der Bewegung der Blechprobe hinterher hinkt. Das liegt wiederum an der Verformung der Blechprobe und an der Tatsache, dass die Biegung laut geometrischem Modell langsamer abläuft als in der Realität. Aus diesem Grund müsste in Abbildung 5.9d das Moment negativ sein, aber hier ergibt sich ein positiver Wert. Dies ist auf die fehlerhafte Ermittlung der externen Belastung M_y zurückzuführen (siehe Abschnitt 5.1).

Zusammenfassend bestätigen die Ergebnisse, dass die Impedanzregelung des Roboters in der Lage ist, einem Blechbauteil während des Biegevorgangs zu folgen ohne es plastisch zu deformieren. Einer der entscheidenden Parameter beim Biegen mit einem impedanzgeregelten Roboter stellt die Prozessgeschwindigkeit dar. Wenn die Geschwindigkeit sehr klein ist, wird in diesem Fall der Fehler bei der Ermittlung der externen Belastung (speziell beim Moment M_y) geringer und die Regelung hat mehr Zeit dementsprechend auf diese zu reagieren. Somit müsste theoretisch nur die Geschwindigkeit beim Biegen so angepasst werden, dass die Biegung des Bauteils ohne Deformation durchgeführt werden kann. Aus diesen Gründen ist die Forschungsfrage (F2) in theoretischer Hinsicht mit ja, aber in praktischer Hinsicht mit nein zu beantworten.

5.4. Online-Programmierung einer Biegeapplikation

Für die Beantwortung der Forschungsfrage (F3), ob sich die speziellen Betriebsmodi (Gravitationskompensation, Impedanzregelung) des LBR iiwa für die Online-Programmierung einer Applikation im Bereich des Biegens eignen, wurde kein spezieller Versuch durchgeführt. Die nachfolgende Beurteilung basiert auf den gesammelten Erfahrungen aus der mehrmaligen Erstellung solcher Applikationen. Diese beinhaltet die Entnahme, das Positionieren des Bauteils am Hinteranschlag, die Biegung selbst und die Ablage des gebogenen Blechbauteils.¹⁰ Darüber hinaus wurden auf diese Weise auch die Bewegungsabläufe für die einzelnen Versuche erstellt. Hierzu gibt es ein Video¹¹, welches grob den Ablauf zur Erstellung einer Applikation zeigt. Für die Grobpositionierung eignet sich der Handführmodus (Gravitationskompensation) sehr gut. Der Roboter lässt sich schnell und einfach in die gewünschte Stellung bewegen.

⁹“Stahl_Imm_Imp_Orientierung“.

¹⁰Die Programmierung für diesen Ablauf nimmt bei einem Bauteil mit einer Biegung ungefähr 5 min in Anspruch.

¹¹“Biegen_mit_einem_Leichtbaurobter“.

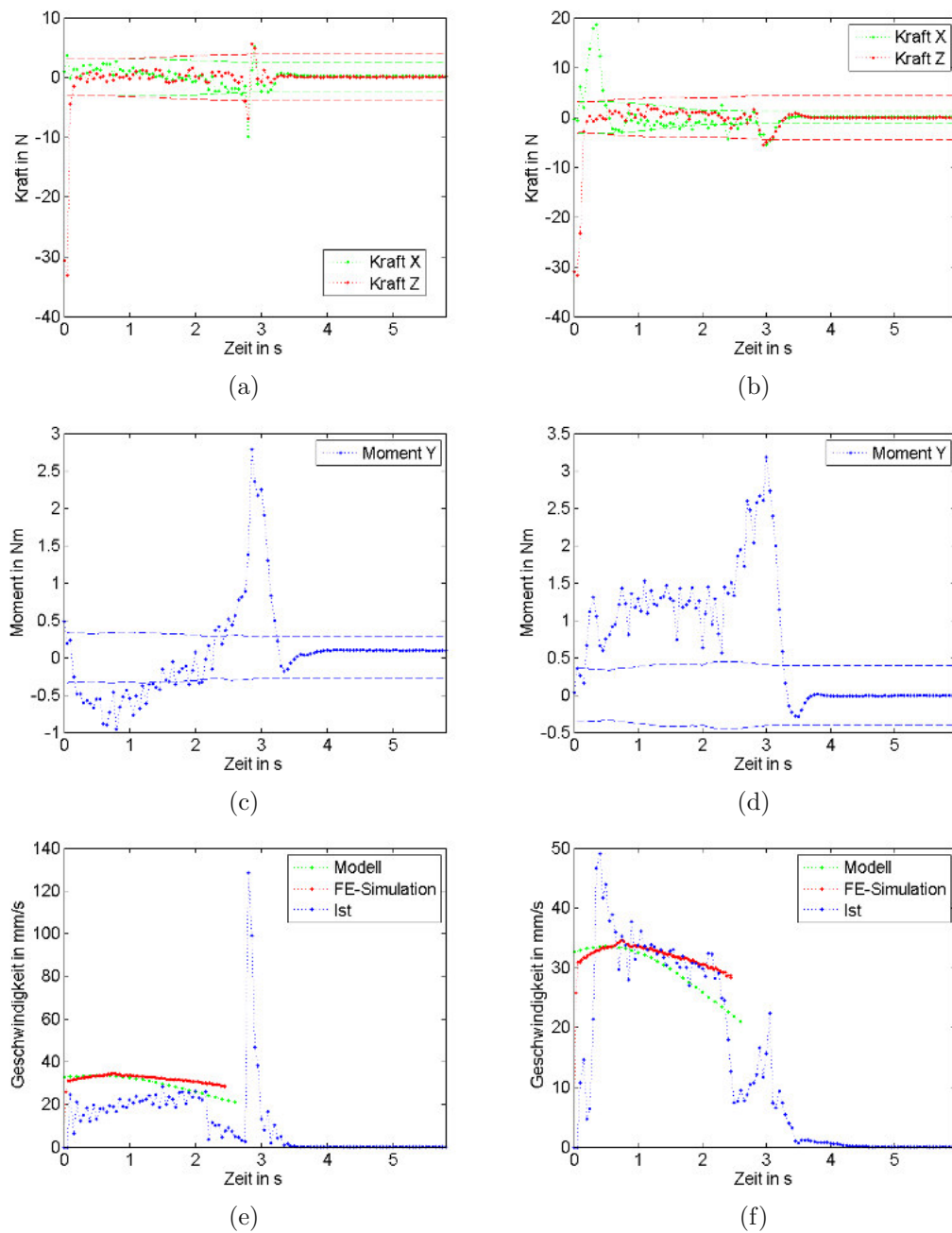


Abbildung 5.9.: Messergebnisse von den Biegeversuchen mit der 1 mm Blechprobe, (a) externe Kraft, (b) externe Kraft (Vorgabe der Orientierung), (c) externes Moment, (d) externes Moment (Vorgabe der Orientierung), (e) absolute Geschwindigkeit des Greifer-TCP's, (f) absolute Geschwindigkeit des Greifer-TCP's (Vorgabe der Orientierung), (eigene Darstellung)

Die Feinpositionierung ist in diesem Modus nicht möglich und deshalb ist hierfür die kartesische Impedanzregelung zu verwenden. Die Regelung kann je nach erforderlicher Aufgabenstellung parametrisiert werden. Es können z.B. einzelne Freiheitsgrade gesperrt werden. Im Video sind teilweise ruckartige Bewegungen des Roboters erkennbar. Der Grund dafür ist, dass die während des Handführens aufgezeichneten Punkte mit einer PTP Bewegung mit Überschleifen angefahren werden. Hier wäre natürlich eine dementsprechende Aufbereitung der Bahn notwendig um bessere Ergebnisse zu erzielen. Des Weiteren ist sicherzustellen, dass der Roboter vor dem Biegen in eine Ausgangsstellung gebracht wird, von der aus die Biegebewegung auch durchgeführt werden kann.

Zusammenfassend kann aus den Erfahrungen geschlossen werden, dass diese Art der Erstellung von Applikation nur für sehr einfache Bauteile, mit einer bis wenigen Biegungen, sinnvoll umsetzbar ist. Bei komplexeren Bauteilen und größeren Stückzahlen stellt vermutlich trotzdem eine Offline-Programmierungsumgebung die bessere Wahl dar. Zudem ist bei komplexeren Bauteilen aus Gründen der Erreichbarkeit eine weitere Linearachse erforderlich, um den Roboter entlang der Biegemaschine bewegen zu können. Diese zusätzliche Achse muss auch erst dementsprechend in das Teach-in Verfahren integriert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass es gar nicht so einfach ist, spontan einen geeigneten Ablauf zu finden. Auf diese Weise wird in den meisten Fällen der Ablauf nicht optimal sein und somit wertvolle Zykluszeit verloren gehen. Da diese Methode nur für sehr einfache Abläufe sinnvoll eingesetzt werden kann, ist die Forschungsfrage (F3) eher mit nein zu beantworten.

6. Zusammenfassung

Resümee

Diese Arbeit zeigt, dass es aufgrund der hohen Sicherheitsanforderungen durchaus aufwendig ist, eine Anwendung im Bereich der Mensch-Roboter-Kollaboration umzusetzen. Im Speziellen trifft das bei der Kollaborationsart Kraft- und Leistungsbegrenzung zu, weil hier für die Risikobeurteilung zusätzliche Messungen für die Kollisionsbewertung erforderlich sind. Erschwerend kommt hinzu, dass es noch wenig praktische Erfahrungen bei der Durchführung von Risikobeurteilungen in diesem Bereich gibt.

Die oft angepriesenen Flexibilität von kollaborierenden Robotern ist sicherlich dadurch zu schmälern, dass für jede Applikation eine Risikobeurteilung vorliegen muss, welche die Tätigkeit, sowie die verwendeten Werkzeuge und Werkstücke spezifiziert.

In Bezug auf die Anwendung der Kollaborationsform Kraft- und Leistungsbegrenzung im Bereich des Biegens, kann ganz klar festgehalten werden, dass dies aus sicherheitstechnischen Gründen nicht erlaubt ist. Aufgrund der spitzen Ecken und scharfen Kanten ergeben sich Kontaktsituationen mit sehr kleinen Flächen und somit können die Grenzwerte für den Druck nicht eingehalten werden.

Objects with sharp, pointed, shearing or cutting edges, such as needles, shears, or knives, and parts which could cause injury shall not be present in the contact area [7, S. 16].

Die anderen Formen der Kollaboration sind grundsätzlich wegen der Vermeidung unvorhergesehener Kontakte zulässig. Beim Handführen stellt das Blechbauteil, aufgrund des erforderlichen Zustimmungstasters und der Begrenzung der Geschwindigkeit kein Problem dar. Ein weiteres Problem bei der Umsetzung einer MRK Anwendung in diesem Bereich, ergibt sich aus der Gefahr das Blechbauteil während der Bewegung zu verlieren. Da in Abwesenheit des Bedieners der Roboter durchaus hohe Geschwindigkeiten erreichen kann, besteht hier ein großes Gefahrenpotenzial.

Wie die Versuche gezeigt haben, ist der LBR iiwa in praktischer Hinsicht nicht für die Automatisierung des Biegeprozesses geeignet. Sowohl beim Biegen, bei der Online-Programmierung als auch bei der Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag sind die Ergebnisse nicht zufriedenstellend. Die Online-Programmierung von Biegeapplikationen ist nur für sehr einfache Bauteile geeignet und bei der Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag ist der Roboter nicht in der Lage eine erfolgreiche Ausrichtung zu erkennen. Das Problem beim Biegen ist einerseits die fehlerbehaftete Ermittlung der externen Belastungen und die unzureichende Dynamik der Regelung. Die erhofften Vorteile, aufgrund der Sensorik sind ausgeblieben. Da auch die Umsetzung der Kollaborationsform Kraft- und Leistungsbegrenzung mit einem Blechbauteil nicht möglich ist, wird die zusätzliche Sensorik für diese Anwendung überflüssig, denn das Handführen kann auch mit konventionellen Robotern realisiert werden. Letztendlich überwiegen bei dieser Anwendung die Kosten dem Nutzen, wodurch dieser Ansatz in der Form nicht weiter verfolgt werden sollte.

Ausblick

Der Ansatz einen kraftsensitiven Roboter für die Automatisierung des Biegevorgangs einzusetzen, wird von TRUMPF vorerst nicht weiter verfolgt. Trotzdem wird im Folgenden kurz beschrieben, wie dieses Thema weiter voran getrieben werden könnte.

Positionierung des Bauteils am Hinteranschlag

Da der Roboter LBR iiwa nicht in der Lage ist die korrekte Ausrichtung eines Bauteils am Hinteranschlag zu erkennen, bedarf es einer weiteren Sensorik. Hier könnte z.B. der Hinteranschlag anhand des ansteigenden Stromes der Antriebe, den Kontakt des Blechteils mit dem Hinteranschlag erkennen. Mit dieser Methode, könnte die Zuverlässigkeit jedenfalls gesteigert werden.

Eine weitere Möglichkeit wäre die Ausrichtung mit einer geometrischen Methode zu realisieren (siehe Abbildung 6.1). (1) zeigt die Ausgangssituation. Dazu tastet sich der Roboter am ersten Hinteranschlagsfinger an (2). Danach fährt dieser Hinteranschlag zurück und der Roboter fährt weiter nach vorne, bis er den zweiten Hinteranschlagsfinger erreicht (3). Mit dem Abstand a der zwei Hinteranschlagsfinger und dem zurückgelegten Weg x kann nun die Schrägstellung ermittelt werden.

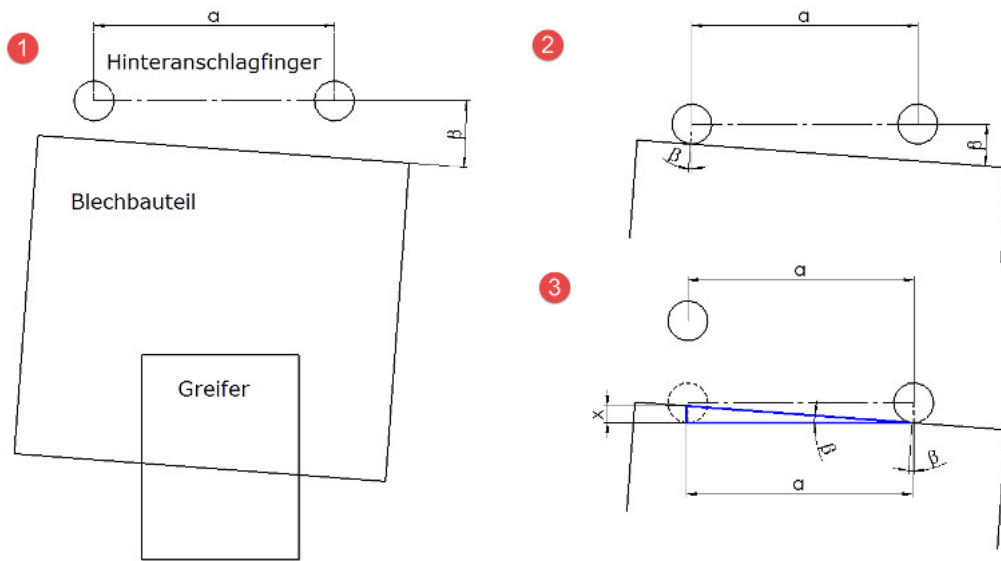


Abbildung 6.1.: Geometrische Bestimmung der Blechschiefstellung für die Ausrichtung am Hinteranschlag

Biegen mit einer Nachgiebigkeitsregelung

Um mit einer Nachgiebigkeitsregelung Biegungen sinnvoll durchführen zu können, müsste die Regelung mitsamt der Erfassung der externen Belastungen optimiert werden. Je korrekter die Ermittlung der externen Belastung (auch bei höheren Geschwindigkeiten) und je dynamischer die Regelung, desto höher kann auch die Prozessgeschwindigkeit gewählt werden. Hierzu könnte eine Zusammenarbeit mit DLR oder KUKA angestrebt werden, um den LBR iiwa hinsichtlich des Biegevorgangs zu optimieren.

Roboterprogrammierung

Um den Ablauf bei der Programmierung des Roboters zu vereinfachen, ist auch eine Kombination aus der Programmierung am Computer und Handführen des Roboters denkbar. ARTIMINDS¹ ist z.B. ein Unternehmen, welche eine solche Lösung anbietet. Hier erfolgt die Programmierung auch mit einem Baukastensystem und darüber hinaus ist eine Visualisierung mit der Möglichkeit zur Simulation des Prozesses integriert.

¹www.artiminds.com.

Automatisierung ohne Schutzzaun

Bezüglich der Umsetzung einer MRK Anwendung an der Biegemaschine sind die Kollaborationsformen *sicherheitsbewerterter überwachter Halt* und *Handführen* möglich. Hierdurch könnte der Schutzzaun durch optische Sicherheitseinrichtungen und der Verwendung eines sicheren Greifers (Bauteilverlust) hinfällig werden. Hierbei wird grundsätzlich der Kontakt zwischen Bediener und Roboter vermieden. Mit einer dementsprechenden Handführeinrichtung, besteht dennoch die Möglichkeit einfache Abläufe mittels Handführen zu teachen. In diesem Fall kann ein konventioneller Industrieroboter verwendet werden. Die Herausforderung besteht dabei in der Auslegung der optischen Sicherheitssysteme hinsichtlich der Größe der Schutzzonen und der Entwicklung eines sicheren Greifers, welcher den Bauteilverlust verhindert. Erste Gespräche mit dem TÜV Rheinland ergaben, dass solch ein Greifer Kat. 3 und PL e oder in Ausnahmefällen aufgrund von dokumentierten Erfahrungswerten Pl d genügen muss. Da der sichere Greifer Voraussetzung ist für alle weiteren Schritte, beginnt TRUMPF mit der Entwicklung eines solchen Systems.

Literaturverzeichnis

- [1] DIN EN ISO 10218-1. *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 1: Roboter (ISO 10218-1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-1:2011*. Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Januar 2012.
- [2] DIN EN ISO 10218-2. *Industrieroboter – Sicherheitsanforderungen – Teil 2: Robotersysteme und Integration (ISO 10218-2:2011); Deutsche Fassung EN ISO 10218-2:2011*. Normenausschuss Maschinenbau (NAM), Juni 2012.
- [3] DIN EN 12453. *Industrial, commercial and garage doors and gates - Safety in use of power operated doors - Requirements; German version EN 12453:2000*. Normenausschuss Bauwesen (NABau), Februar 2001.
- [4] DIN EN ISO 13849-1. *Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 1: Allgemeine Gestaltungsleitsätze (ISO 13849-1:2006); Deutsche Fassung EN ISO 13849-1:2008*. Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG), Dezember 2008.
- [5] DIN EN ISO 13849-2. *Sicherheit von Maschinen – Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen – Teil 2: Validierung (ISO 13849-2:2012); Deutsche Fassung EN ISO 13849-2:2012*. Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG), Februar 2013.
- [6] DIN EN ISO 13855. *Sicherheit von Maschinen – Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen (ISO 13855:2010); Deutsche Fassung EN ISO 13855:2010*. Normenausschuss Sicherheitstechnische Grundsätze (NASG), Oktober 2010.
- [7] ISO/TS 15066. *Robots and robotic devices - Collaborative robots*. Technical Committee ISO/TC 299, Robots and robotic devices, Februar 2016.
- [8] Thomas Alban. *Dynamische Roboterkalibrierung zur Erhöhung der Bahngenauigkeit*. Shaker, 2001.

- [9] Alin Albu-Schäffer. *Regelung von Robotern mit elastischen Gelenken am Beispiel der DLR-Leichtbauarme*. PhD thesis, Technische Universität München, Universitätsbibliothek, 2002.
- [10] Alin Albu-Schäffer, Christian Ott, and Gerd Hirzinger. A unified passivity-based control framework for position, torque and impedance control of flexible joint robots. *The International Journal of Robotics Research*, 26(1):23–39, 2007.
- [11] Tadej Bajd, Jadran Lenarčič, Marko Munih, et al. *Robotics*, volume 43. Springer Science & Business Media, 2010.
- [12] Lukas Beyer. *Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern: insbesondere mit Parallelkinematik*. Shaker, 2005.
- [13] John J Craig. *Introduction to robotics: mechanics and control*, volume 3. Pearson Prentice Hall Upper Saddle River, 2005.
- [14] Michael Fichtinger. *Biegen mit einem Leichtbaurobter, Auslegung eines Versuchsaufbaus für eine Machbarkeitsstudie*. Technische Universität Wien, 2016.
- [15] Hubert Gattringer. *Starr-elastische Robotersysteme: Theorie und Anwendungen*. Springer-Verlag, 2011.
- [16] Wolfgang Gerke. *Technische Assistenzsysteme: vom Industrieroboter zum Roboterassistenten*. Walter de Gruyter GmbH & Co KG, 2014.
- [17] Hans-Jürgen Gevatter and Ulrich Grünhaupt. *Handbuch der Mess-und Automatisierungstechnik in der Produktion*. Springer-Verlag, 2013.
- [18] KUKA Roboter GmbH. *Bedien- und Programmieranleitung für Systemintegratoren*. KUKA Roboter GmbH Sunrise.OS 1.9 SI V1, 2015.
- [19] KUKA Roboter GmbH. *LBR iiwa Spezifikation*. KUKA Roboter GmbH Spez LBR iiwa V6, 2015.
- [20] Gerd Hirzinger, Norbert Sporer, A Albu-Schaffer, M Hahnle, Rainer Krenn, A Pascucci, and Markus Schedl. Dlr’s torque-controlled light weight robot iii-are we reaching the technological limits now? In *Robotics and Automation, 2002. Proceedings. ICRA’02. IEEE International Conference on*, volume 2, pages 1710–1716. IEEE, 2002.
- [21] Hartmut Hoffmann, Reimund Neugebauer, and Günter Spur. *Handbuch Umformen*. Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG, 2012.

- [22] Wisama Khalil and Etienne Dombre. *Modeling, identification and control of robots*. Butterworth-Heinemann, 2004.
- [23] Clemens Leidl. *Entwicklung einer Bewertungsmethode zur Auswahl kollaborierender Roboter für Cyber-Physikalische Montagesysteme*. Technische Universität Wien, 2016.
- [24] Clive Loughlin, A Albu-Schäffer, S Haddadin, Ch Ott, A Stemmer, T Wimböck, and G Hirzinger. The dlr lightweight robot: design and control concepts for robots in human environments. *Industrial Robot: an international journal*, 34(5):376–385, 2007.
- [25] Björn Matthias and Ing Hao Ding. *Die Zukunft der Mensch-Roboter Kollaboration in der industriellen Montage*. ABB AG Forschungszentrum, 2013.
- [26] Detlef Mewes and Fritz Mauser. Safeguarding crushing points by limitation of forces. *International journal of occupational safety and ergonomics*, 9(2):177–191, 2003.
- [27] C Ott, A Albu-Schäffer, A Kugi, S Stramigioli, and G Hirzinger. Ein passivitätsbasierter ansatz zur kartesischen impedanzregelung von robotern mit elastischen gelenken. *VDI-Bericht 1841*, pages 71–79, 2004.
- [28] Christian Ott, Alin Albu-Schäffer, Andreas Kugi, Stefano Stramigioli, and Gerd Hirzinger. Kartesische impedanzregelung von robotern mit elastischen gelenken: Ein passivitätsbasierter ansatz (cartesian impedance control of flexible joint robots: A passivity based approach). *at-Automatisierungstechnik*, 53(8):378–388, 2005.
- [29] Richard P Paul. *Robot manipulators: mathematics, programming, and control: the computer control of robot manipulators*. Richard Paul, 1981.
- [30] Michael Schenk. *Produktion und Logistik mit Zukunft*. Springer, 2015.
- [31] Günter Schreiber. *Steuerung für redundante robotersysteme: Benutzer- und aufgabenorientierte verwendung der redundanz*. 2004.
- [32] Bruno Siciliano and Luigi Villani. *Robot Force Control*. Springer Science & Business Media, 1999.
- [33] Mark W Spong. Modeling and control of elastic joint robots. *Journal of dynamic systems, measurement, and control*, 109(4):310–319, 1987.

- [34] Kazutsugu Suita, Yoji Yamada, Niuo Tsuchida, Koji Imai, Hiroyasu Ikeda, and Noboru Sugimoto. A failure-to-safety “kyozon” system with simple contact detection and stop capabilities for safe human-autonomous robot coexistence. In *Robotics and Automation, 1995. Proceedings., 1995 IEEE International Conference on*, volume 3, pages 3089–3096. IEEE, 1995.
- [35] Christian Ullenboom. *Java ist auch eine Insel*. Galileo Press, 2004.
- [36] Mathias Umbreit. *Industry 4.0 Using the Example of Human-Robot-Collaboration*. TÜV Rheinland, Mai 2016.
- [37] Alexander Winkler. Ein beitrage zur kraftbasierten mensch-roboter-interaktion. 2006.
- [38] Dieter Wloka. *Robotersimulation*. Springer-Verlag, 1991.
- [39] Klaus Wüst. *Grundlagen der Robotik*. Vorlesungsunterlagen THM, 2004.
- [40] Yoji Yamada, K Suita, H Ikeda, N Sugimoto, H Miura, and H Nakamura. Evaluation of pain tolerance based on a biomechanical method for human-robot coexistence. *Transactions of the Japan Society of Mechanical Engineers*, pages 2814–1819, 1997.
- [41] Tsuneo Yoshikawa. *Foundations of robotics: analysis and control*. MIT press, 1990.

Abbildungsverzeichnis

1.1. Einflussgrößen auf das Biegeergebnis am Beispiel des Freibiegens im Gesenk [21, S. 583]	2
2.1. Einordnung der Mensch-Roboter Kollaboration in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit [25]	6
2.2. Beispiel für einen Kollaborationsraum [7]	7
2.3. Performance Level (PL) [4]	8
2.4. Beziehung zwischen den Kategorien, DC_{avg} , $MTTF_d$ jedes Kanals und dem PL [4]	9
2.5. Zusammenfassung der vier Formen der Kollaboration (Eigene Darstellung in Anlehnung an [36])	10
2.6. Wahrheitstabelle für den sicherheitsbewertenden überwachten Halt [7])	12
2.7. Graphische Darstellung der Zusammensetzung des Sicherheitsabstandes [7])	14
2.8. Ausschnitt aus der Tabelle Biomechanische Grenzwerte [7]	17
2.9. Graphische Darstellung der biomechanischen Grenzwerte anhand eines Beispiels [7]	18
2.10. Druck- und Kraftmessgeräte für die Kollisionsbeurteilung bei MRK Anwendungen (Quelle: GTE Industrieelektronik GmbH)	19
2.11. Darstellung der zulässigen Geschwindigkeit in Abhängigkeit der effektiven Roboter­masse für verschiedene Körperregionen [7]	20
3.1. Beispiel einer kinematischen Kette anhand eines SCARA Roboters (links) und Vertikalknickarmroboters (rechts) [11]	22
3.2. Beispiel einer kinematischen Kette anhand eines SCARA Roboters (links) und Vertikalknickarmroboters (rechts) (Bildquelle: Stäubli)	23
3.3. Position und Orientierung eines Koordinatensystems H gegenüber des Koordinatensystem R [39]	25
3.4. Verschiedene Reihenfolge der Elementardrehungen [15]	26

3.5. Veranschaulichung der kinematischen Redundanz anhand des DLR LBR III [31]	28
3.6. Programmiermethoden für Roboter [38]	30
3.7. Vergleich von Teach-In-Verfahren mit Offline-Programmiersystemen [12](Bildquellen: Blumenbecker, cenit)	33
3.8. Der Aufbau des Gelenks des DLR LBR III [24]	35
3.9. Modellierung eines Roboters mit elastischen Gelenken [9]	36
3.10. Modellierung eines elastischen Robotergelenks als Zweimassenmodell [9] 36	
3.11. Übersicht Robotersystem, (2) Handbediengerät (KUKA SmartPAD), (3) Roboter KUKA iiwa, (5) Robotersteuerung (KUKA Sunrise Cabinet) [19]	40
3.12. Grundaufbau und Roboterachsen, (1) Zentralhand, (2) Gelenkmodul, (3) Grundgestell [19]	41
3.13. LBR iiwa 14 R820 Arbeitsbereich, Seitenansicht [19]	41
3.14. Übersicht Sunrise Workbench [18]	43
3.15. Übersicht Sicherheitskonfiguration [18]	46
3.16. Grundprinzip des kartesischen Impedanzreglers [18]	48
3.17. Beispiel für eine sinusförmige Kraftaufschaltung, (1) Ursprüngliche Bahn, (2) Auslenkung, (3) Wellenlänge, (4) Amplitude, (5) Tatsächliche Bahn [18]	48
3.18. Beispiel für die Aufzeichnung externer Belastungen (eigene Darstellung)	50
4.1. Foto vom Versuchsaufbau, (1) KUKA iiwa 14, (2) TruBend7036, (3) Entnahme, (4) Ablagebox, (5) Handbediengerät, (6) Robotersteuerung, (7) Fußtaster Biegemaschine (eigene Darstellung)	53
4.2. Foto von der Greifeinheit (eigene Darstellung)	54
4.3. Übersicht Lastdatenermittlung [18]	55
4.4. TCP Vermessung mit Hilfe der XYZ-4-Punkt-Methode [18]	56
4.5. Koordinatensysteme an der Greifeinheit, (1) Greifer TCP, (2) Flansch TCP (eigene Darstellung)	57
4.6. 3-Punkt-Methode [18]	58
4.7. Skizzen zur Beschreibung des geometrischen Modells (eigene Darstellung)	59
4.8. Auszüge aus der FE-Simulation des Biegevorgangs (Quelle Trumpf)	62
4.9. Transformation der Positionsdaten aus der FE-Simulation zum Blechendpunkt (eigene Darstellung)	63
4.10. Gegenüberstellung des geometrischen Modells mit der Finite Elemente Simulation (1 mm/6 mm Stahlblech) (eigene Darstellung)	64

4.11. Erläuterung der Unterschiede zwischen dem geometrischen Modell und der FE-Simulation, (1) Blech nicht tangential zum Oberwerkzeugradius, (2) das Unterwerkzeug weist einen Radius auf und der Auflagepunkt ändert sich mit der Zeit (eigene Darstellung)	65
4.12. Programmierung des Ausrichtevorgangs für die Positionierung des Blechbauteils am Hinteranschlag (eigene Darstellung)	66
4.13. Grundprinzip für die Ausrichtung des Blechbauteils am Hinteranschlag	67
4.14. Skizzen zur Beschreibung des geometrischen Modells (eigene Darstellung)	68
4.15. Aufbau des Versuchsprogramms (eigene Darstellung)	71
5.1. Roboteranfangsstellung für der Durchführung des statischen und dynamischen Tests (eigene Darstellung)	76
5.2. Messergebnisse der externen Belastungen im Ruhezustand (Ausgangsstellung Biegeposition 1, siehe Abbildung 5.1) (eigene Darstellung) .	76
5.3. Kraft-Weg Diagramm der translatorischen Komponenten	77
5.4. Messergebnisse der externen Belastungen im bewegten Zustand (Bahnkurve nach geometrischen Modell).(a) und (c) stellen die Ergebnisse mit Greifer und (b) und (d) die Ergebnisse des Roboters ohne zusätzliche Lasten dar. (Ausgangsstellung Biegeposition 1, siehe Abbildung 5.1), (eigene Darstellung)	78
5.5. Fixe Anschlagsituation (eigene Darstellung)	80
5.6. Messergebnisse aus den Positioniersuchen, (a) externe Belastung (fixer Anschlag), (b) externe Belastung (fixer Anschlag mit Ausrichtung), (c) Soll- und Istposition des Blech-TCP in z-Richtung (fixer Anschlag), (d) Soll- und Istposition des Blech-TCP in z-Richtung (fixer Anschlag mit Ausrichtung), (e) externe Belastung (Hinteranschlag mit Ausrichtung, erfolgreich), (f) externe Belastung (Hinteranschlag mit Ausrichtung, fehlgeschlagen), (eigene Darstellung)	81
5.7. Maximale Verdrehung der Bauteile vor der Entnahme (eigene Darstellung)	82
5.8. Messergebnisse von den Biegeversuchen mit der 6 mm Blechprobe, (a) externe Kraft (kartesischer Impedanzregler), (b) externe Kraft (achsspezifischer Impedanzregler), (c) externes Moment (kartesischer Impedanzregler), (d) externes Moment (achsspezifischer Impedanzregler), (e) absolute Geschwindigkeit des Greifer-TCP's (kartesischer Impedanzregler), (f) absolute Geschwindigkeit des Greifer-TCP's (achsspezifischer Impedanzregler), (eigene Darstellung)	84

5.9. Messergebnisse von den Biegeversuchen mit der 1 mm Blechprobe, (a) externe Kraft, (b) externe Kraft (Vorgabe der Orientierung), (c) externes Moment, (d) externes Moment (Vorgabe der Orientierung), (e) absolute Geschwindigkeit des Greifer-TCP's, (f) absolute Ge- schwindigkeit des Greifer-TCP's (Vorgabe der Orientierung), (eigene Darstellung)	87
6.1. Geometrische Bestimmung der Blechschiefstellung für die Ausrichtung am Hinteranschlag	91
A.1. TruBend Cell 7000 (Quelle: TRUMPF)	103
A.2. TruBend Cell 7000 - Innenansicht (Quelle: TRUMPF)	104
A.3. Zur Simulation und für die Biegeversuche verwendete Ober- und Unterwerkzeuge (Quelle: TRUMPF)	104
A.4. Darstellung der frontalen und seitlichen Biegeposition (eigene Darstel- lung)	105
A.5. Darstellung der Entnahmesituation (eigene Darstellung)	105
A.6. XYZ-4-Punkt-Methode zur Bestimmung der Position des Tool Center Points der Greiferzange (eigene Darstellung)	106
A.7. Vermessen eines Basiskoordinatensystem mit der 3-Punkt-Methode (eigene Darstellung)	107
A.8. Ausschnitt aus dem Menü zur Erstellung einer Applikation (eigene Darstellung)	108

Tabellenverzeichnis

3.1. Technische Daten, LBR iiwa 14 [19]	42
3.2. Stopp Reaktionen bei Verletzung einer Sicherheitsfunktion	45
4.1. Parameter geometrisches Blechmodell (eigene Darstellung)	61
5.1. Parametrierung der Impedanzregelung für den Versuch der Ausrichtung am fixen Anschlag (eigene Tabelle)	80
5.2. Parametrierung der kartesischen Impedanzregelung für die Biegeversuche (eigene Tabelle)	85
5.3. Parametrierung der achsspezifischen Impedanzregelung für die Biegeversuche (eigene Tabelle)	85

Abkürzungsverzeichnis

BGHM	Berufsgenossenschaft Holz und Metall
ca.	circa
CAD	Computer-Aided Design
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
DMS	Dehnmessstreifen
ESM	Event-driven Safety Monitoring
FE	Finite Elemente
iiwa	intelligent industrial work assistant
KOS	Koordinatensystem
LBR	Leichtbauroboter
LIN	Linear
MRK	Mensch Roboter Kollaboration
NC	Numerical Control
Kat.	Kategorie
PL	Performance Level
PSM	Permanent Safety Monitoring
PTP	Point to Point
TCP	Tool Center Point
usw.	und so weiter
z.B.	zum Beispiel

Anhang

A. Abbildungen

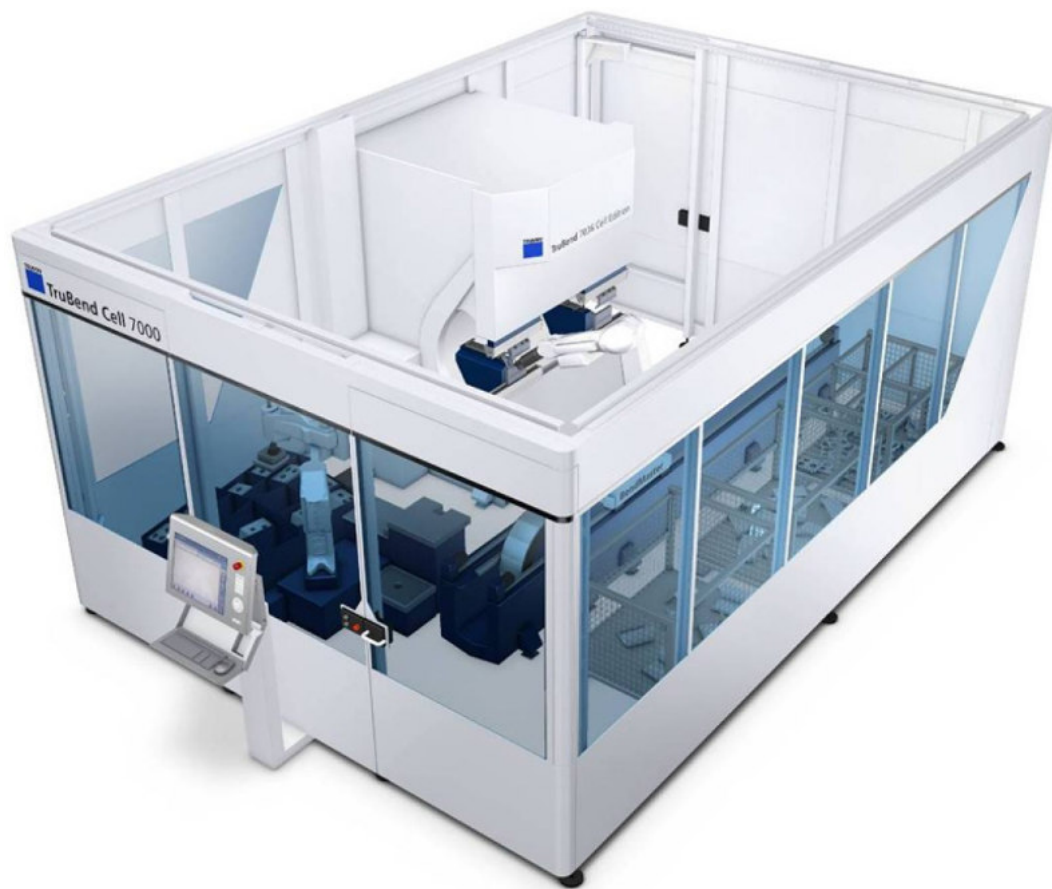


Abbildung A.1.: TruBend Cell 7000 (Quelle: TRUMPF)

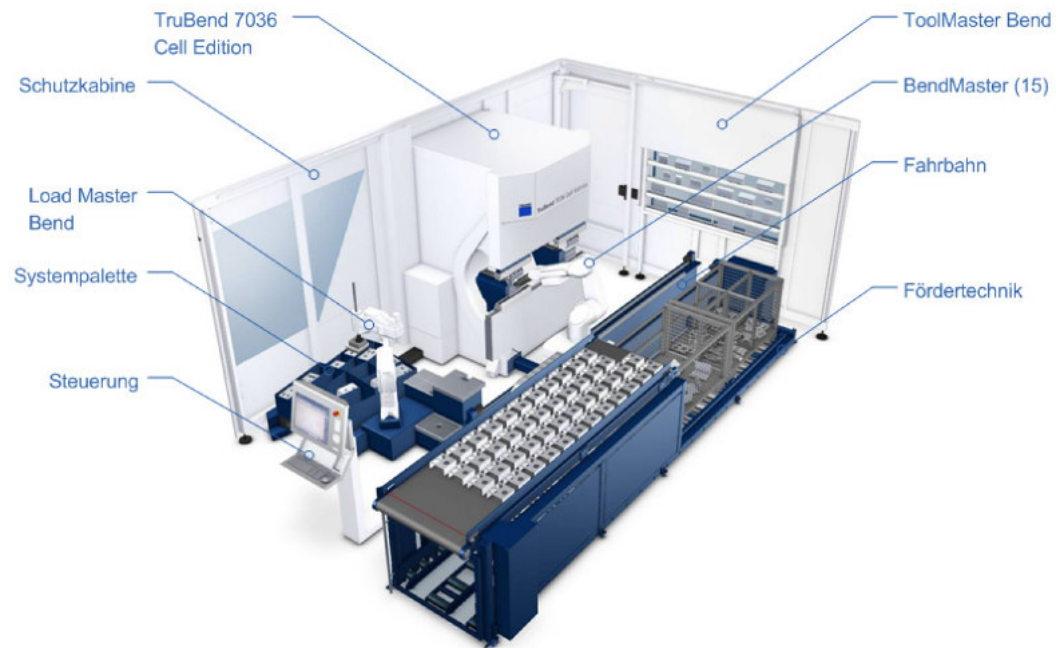


Abbildung A.2.: TruBend Cell 7000 - Innenansicht (Quelle: TRUMPF)

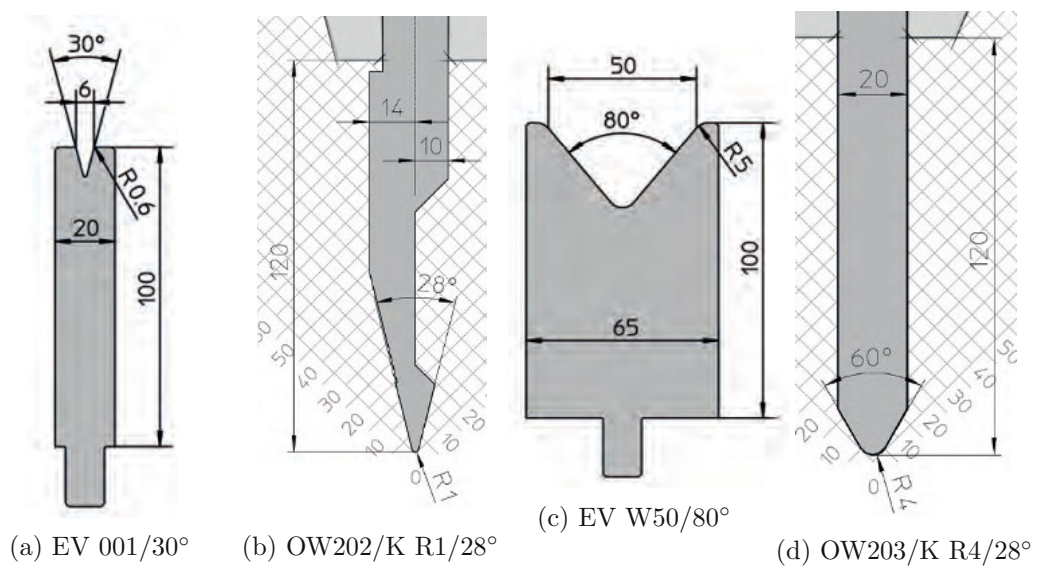


Abbildung A.3.: Zur Simulation und für die Biegeversuche verwendete Ober- und Unterwerkzeuge (Quelle: TRUMPF)



(a) Biegeposition eins (frontal)

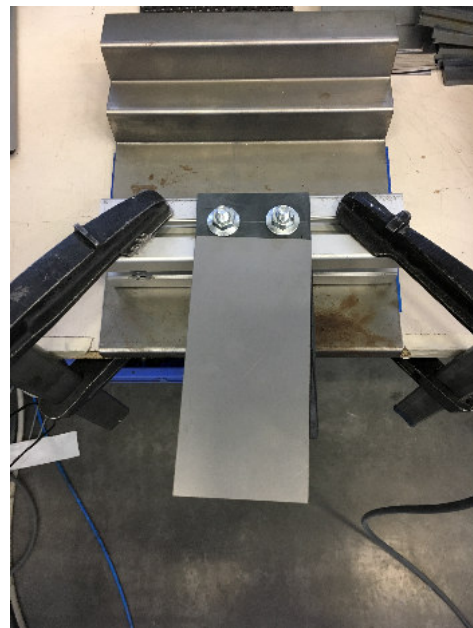


(b) Biegeposition zwei (seitlich)

Abbildung A.4.: Darstellung der frontalen und seitlichen Biegeposition (eigene Darstellung)



(a) stehend



(b) liegend

Abbildung A.5.: Darstellung der Entnahmesituation (eigene Darstellung)



(a) Messpunkt 1



(b) Messpunkt 2

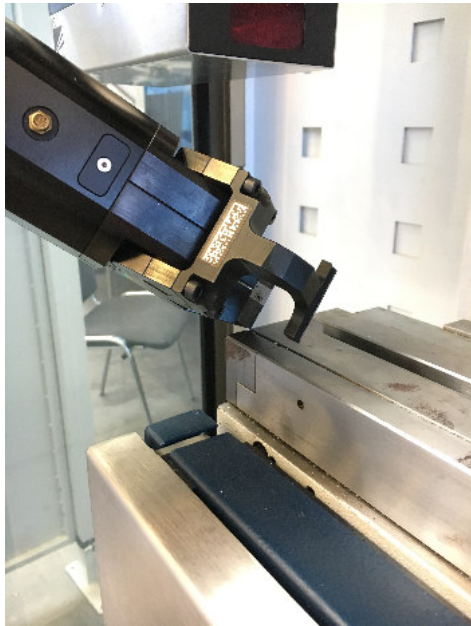


(c) Messpunkt 3



(d) Messpunkt 4

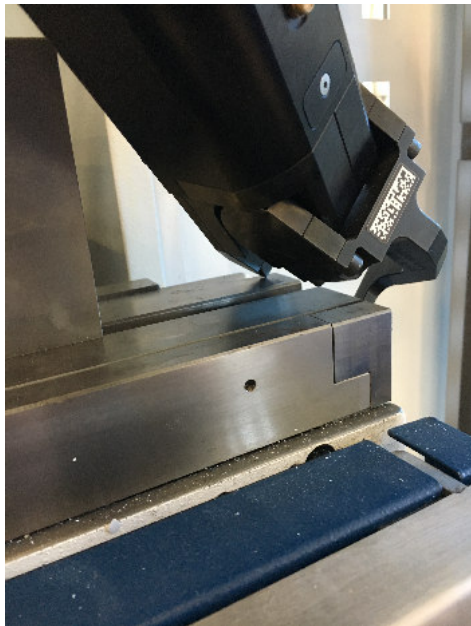
Abbildung A.6.: XYZ-4-Punkt-Methode zur Bestimmung der Position des Tool Center Points der Greiferzange (eigene Darstellung)



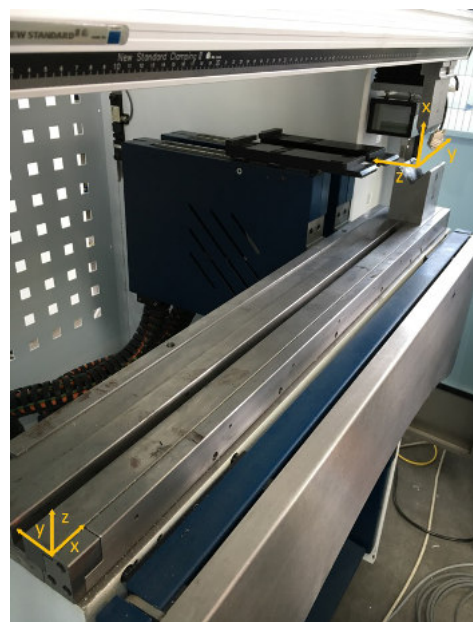
(a) Messpunkt 1



(b) Messpunkt 2



(c) Messpunkt 3



(d) Basiskoordinatensysteme

Abbildung A.7.: Vermessen eines Basiskoordinatensystem mit der 3-Punkt-Methode (eigene Darstellung)

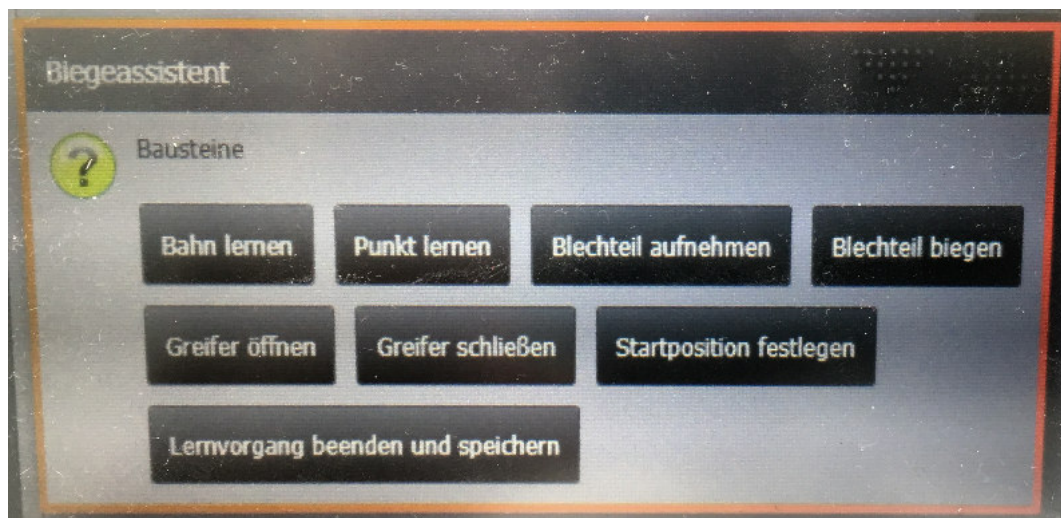


Abbildung A.8.: Ausschnitt aus dem Menü zur Erstellung einer Applikation (eigene Darstellung)