



OSTBAYERISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE
AMBERG-WEIDEN

Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik

Studiengang Applied Research in Engineering Sciences

**Konzeption und Aufbau einer Prozesskette
für robotergestützten Wire-Arc 3D-Druck
mit messtechnischer Erfassung der
Ist-Geometrie und intermittierender
spanende Bearbeitung**

Design and construction of a process chain for robot-assisted wire-arc additive manufacturing with metrological acquisition of the actual geometry and intermittent machining

Matthias Pohl



OSTBAYERISCHE TECHNISCHE HOCHSCHULE AMBERG-WEIDEN

Fakultät Elektrotechnik, Medien und Informatik

Studiengang Applied Research in Engineering Sciences

Masterthesis

von

Matthias **Pohl**

Konzeption und Aufbau einer Prozesskette für robotergestützten Wire-Arc 3D-Druck mit messtechnischer Erfassung der Ist-Geometrie und intermittierender spanende Bearbeitung

Design and construction of a process chain for robot-assisted wire-arc additive
manufacturing with metrological acquisition of the actual geometry and intermittent
machining

Bearbeitungszeitraum: von 10. Oktober 2019
bis 9. März 2020

1. Prüfer: Prof. Dr. W. Blöchl
2. Prüfer: Prof. Dr. M. Wenk

Bestätigung gemäß § 12 APO

Name und Vorname
der Studentin/des Studenten: **Pohl, Matthias**

Studiengang: **Applied Research in Engineering Sciences**

Ich bestätige, dass ich die Masterarbeit mit dem Titel:

**Konzeption und Aufbau einer Prozesskette für robotergestützten Wire-Arc
3D-Druck mit messtechnischer Erfassung der Ist-Geometrie und
intermittierender spanende Bearbeitung**

selbständig verfasst, noch nicht anderweitig für Prüfungszwecke vorgelegt, keine anderen
als die angegebenen Quellen oder Hilfsmittel benutzt sowie wörtliche und sinngemäße
Zitate als solche gekennzeichnet habe.

Datum: 09.03.2020

Unterschrift:

Masterarbeit Zusammenfassung

Studentin/Student (Name, Vorname):	Pohl, Matthias
Studiengang:	Applied Research in Engineering Sciences
Aufgabensteller, Professor:	Prof. Dr. W. Blöchl
Durchgeführt in (Firma/Behörde/Hochschule):	Ostbayerische Technische Hochschule Amberg-Weiden
Ausgabedatum: 10. Oktober 2019	Abgabedatum: 9. März 2020

Titel:

**Konzeption und Aufbau einer Prozesskette für robotergestützten Wire-Arc
3D-Druck mit messtechnischer Erfassung der Ist-Geometrie und
intermittierender spanende Bearbeitung**

Zusammenfassung:

Im nachfolgenden Dokument wird die Konzeption einer Prozesskette zur additiven Fertigung von Bauteilen aus Metall durch das Auftragsschweißen, die messtechnische Erfassung des Bauteils und spanenden Bearbeitung beleuchtet. Weiterhin wird die Inbetriebnahme des verwendeten Roboters KUKA KR15/2 mit der dazugehörigen Steuerung KR C2 und einer Schweißanlage beschrieben.

In the following document, the conception of a process chain for the additive production of metal components by build-up welding, the metrological recording of the component and machining is examined. It also describes the commissioning of the KUKA KR15/2 robot used with the associated KR C2 controller and a welding system.

Schlüsselwörter: WAAM, Additive manufacture, additive layer manufacture, wire additive manufacture, positional welding, robotics, toolchain

Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	VIII
1 Ausgangssituation	1
2 Grundlagen	4
2.1 Roboterkinematik	5
2.2 Koordinatentransformationen	5
2.3 Singularitäten	6
3 Simulation	8
3.1 Marktübersicht Simulationssoftware	9
3.2 CL-Data	12
3.3 KUKA Robot Language (KRL)	15
3.4 Schweißpaket ARC10	17
3.5 CAD-Modelle	19
4 SprutCAM	21
4.1 Aufbau	21
4.2 Bearbeitungsstrategien	22
4.3 Bahnmodifikation	24
4.4 Roboterkonfiguration	25
5 Postprozessor SprutCAM	35
5.1 Wechsel des Schweißbefehls	37
5.2 Programmaufteilung	41
6 Inbetriebnahme	47
6.1 Aufbau Robotersteuerung KR C2 (KUKA Robot Control)	47
6.2 Erstmalige Inbetriebnahme	50
6.3 Datenübertragung	52
7 Sicherheitskonzept	54
7.1 Layoutplanung	54
7.2 Roboterumhausung	56
7.3 Belüftungssystem	57
8 Nullpunktspannsystem	59
8.1 Version Nutentisch	60

8.2	Version Gewindeplatte	62
9	Tests	63
9.1	Grundlagenversuche	63
9.2	Würfel	66
10	Messtechnische Erfassung	69
10.1	Laserlinienscanner	70
10.2	Software	71
11	Fazit	72
	Literaturverzeichnis	73
	Abbildungsverzeichnis	74
	Tabellenverzeichnis	77
	Listings	78

Leseprobe

Symbolverzeichnis

α	Verwindungswinkel in Grad
a	Armelementlänge in Meter
d	Gelenkabstand in Meter
θ	Gelenkwinkel in Grad

Leseprobe

1 Ausgangssituation

Das Labor für Werkzeugmaschinen B84 an der Ostbayerischen Technischen Hochschule Amberg-Weiden (OTH-AW) beschäftigt sich in der Lehre und Forschung mit vier Grundlegenden Themen.

- Subtraktive Fertigung (Fräsen, Drehen)
- Additive Fertigung (3D-Druck)
- Messtechnik (Koordinatenmesstechnik)
- Digitale Produktion (Maschinensimulation)

Zum Zeitpunkt der Arbeit besteht der Bereich "Additive Fertigung" aus dem 3D-Druck von Kunststoffen mittels verschiedener Verfahren (FDM, UV-LCD, Polyjet). Hierfür stehen dem Labor mehrere 3D-Drucker zur Verfügung. Um Bauteile aus metallischen Werkstoffen zu erzeugen, muss im Moment noch auf die Kooperation mit Partnerfirmen zurückgegriffen werden, da noch kein Verfahren für diese Art von Fertigung intern zur Verfügung steht. Maschinen für pulverbasierten Metalldruck (SLM-Verfahren) sind einerseits teuer in der Anschaffung¹, andererseits ist der Umgang mit den Druckmaterialien nicht trivial. So sind im Verhältnis zu Kunststoffpulvern oder flüssigen Material (Harze) einige Sicherheitsvorkehrungen zu treffen. Bestimmte Pulver können ein explosionsgefährliches Staub-Luft-Gemisch bilden und müssen deswegen unter besonderen Umständen gelagert werden [15]. Der Aufwand und das damit verbundene Risiko führte dazu, den Metallbereich mit anderen Verfahren abzudecken. Hierbei ist die lichtbogenbasierte additive Fertigung eine interessante Alternative. Bei diesem Verfahren wird mittels einer Stromquelle (Schweißtransformator) ein Lichtbogen erzeugt, der Metalle aufschmilzt. Durch die Zufuhr eines Metalldrahtes kann Material aufgetragen werden (Additive Fertigung). Als Hilfswerkstoffe werden dabei ein Schutzgas und Metalldraht benötigt. Diese sind gut zu handhaben und in der Beschaffung und Wartung verhältnismäßig günstig. Weiterhin ist im Labor für Verbindungstechnik B42 an der OTH Amberg-Weiden ein Industrieroboter mit angeschlossener Schweißanlage verfügbar. Dementsprechend musste keine Neubeschaffung getätigt werden. Das Gesamtsystem wurde seit mehreren Jahren nicht mehr benutzt. Aus diesem Grund musste eine Wiederinbetriebnahme erfolgen. Auch ist bei dem bestehenden System keine umschließende Sicherheitsvorrichtung (Schutzumhausung) installiert. Um den Sicherheitsstandards gerecht zu werden wurde ein Sicherheitskonzept ausgearbeitet. Bei additiven Fertigungsverfahren werden Bauteile durch das Auftragen von Material in mehreren Schichten erzeugt. Vor allem bei großen, komplexen Bauteilen müssen somit

¹Günstigstes SLM-System 54.900€ netto [17]

viele Verfahrensbewegungen durchgeführt werden. Um effizient Programme für die Werkzeugmaschinen zu erzeugen kann die computergestützte Programmerzeugung verwendet werden (CAM (Computer-Aided-Manufacturing)). Zusätzlich besteht die Möglichkeit, mit den CAM-Programmen die verwendeten Maschinen und den Prozess zu simulieren. Dies hat den Vorteil, dass potenzielle Kollisionen erkannt und verhindert werden können. Weiterhin kann die Maschine offline programmiert werden. Es kommt also nicht zu Stillstandszeiten und es kann parallel gearbeitet werden. Mit der computergestützten Programmierung und Maschinensimulation findet die Schnittstelle zur digitalen Produktion statt. Bei additiven Verfahren ist die Oberfläche und Maßhaltigkeit oft nicht ausreichend. Aus diesem Grund kann bei bestimmten Merkmalen nicht auf die subtraktive Fertigung verzichtet werden. So ist es aktuelle Praxis, Bauteile mit Gewinde- oder Passbohrungen additiv mit einem kleineren Kernloch zu fertigen und die Funktionsgeometrie mit einer CNC-Bearbeitungsmaschine nachträglich hinzuzufügen. Für eine exakte Positionierung muss aber die Position des Bauteils in der Maschine bekannt sein. In der Regel kann diese durch ein Messgerät in der Maschine (Messtaster) erfasst werden. Dies ist bei Referenzflächen, wie zum Beispiel Ebenen oder Bohrungen gut möglich. Besteht das Bauteil aber aus komplexen Freiformflächen, ist eine exakte Positionsbestimmung nicht mehr möglich. Auch kann es vorkommen, dass durch den generativen Prozess das Bauteil mit zu wenig Aufmaß produziert wurde (Schwindung). Kommt es nun zur subtraktiven Bearbeitung, kann es zu unbearbeiteten Fehlstellen kommen. Eine Abhilfe kann hier die Messtechnik schaffen. Mit einem 3D-Laser-Messsystem können Geometrien in ihrer Gesamtheit erfasst werden. Dabei lässt sich ein dreidimensionales Oberflächenmodell der Istgeometrie erzeugen. Wird nun das gemessene Bauteil digital mit der Sollgeometrie verglichen, kann schon vor der Bearbeitung geprüft werden, ob das Bauteil zu groß, zu klein oder im passenden Bereich ist. Weiterhin besteht die Möglichkeit die Position des Bauteils bezogen auf eine Referenzgeometrie zu erfassen (zum Beispiel Ecke eines Spannmittels). Diese kann in der Maschine schnell und unproblematisch eingemessen werden. Werden nun all diese Prozesse miteinander kombiniert, besteht die Möglichkeit, Bauteile additiv aus Metall zu erzeugen, die zusätzlich noch passgenaue Funktionsflächen und -Geometrien besitzen. Um diesen Prozess wirtschaftlich und prozessicher zu gestalten, sollen die additive, subtraktive Fertigung und die Messtechnik miteinander verknüpft werden. Dies geschieht mit einem einheitlichen Spannsystem, das bei allen Systemen vorhanden ist. Hierbei wird ein Nullpunktspannsystem verwendet. Der Vorteil dieses Systems ist, dass die Spannmittel von einem Prozess zu dem anderen transportiert werden können, ohne dass dabei die Positionsreferenz verloren geht. Dies bedeutet, dass nach oder zwischen der additiven Fertigung die Istgeometrie nur noch messtechnisch erfasst werden muss. Mit einem CAD-CAM-System kann einerseits die Istgeometrie mit der Sollgeometrie verglichen und andererseits das NC-Programm für die spanende Bearbeitungsmaschine erstellt werden. Da das Bauteil durch das Nullpunktspannsystem immer auf einer bekannten Position ist, muss hier kein weiteres Messen in der Maschine erfolgen. Die Programmerstellung bezieht sich auf die Referenzposition des Nullpunktspannsystems. Diese Prozesskette soll in dieser Arbeit aufgebaut und kritisch betrachtet werden.

Da das Verfahren des robotergestützten Auftragschweißens komplett neu aufgebaut werden muss, liegt der Fokus der Arbeit auf diesen Bereich. Die messtechnische Erfassung, NC-Programmerzeugung und die spanende Bearbeitung sind bekannte, etablierte Verfahren im Labor für Werkzeugmaschinen. Hier werden nur die Abläufe und verwendeten Komponenten beschrieben.

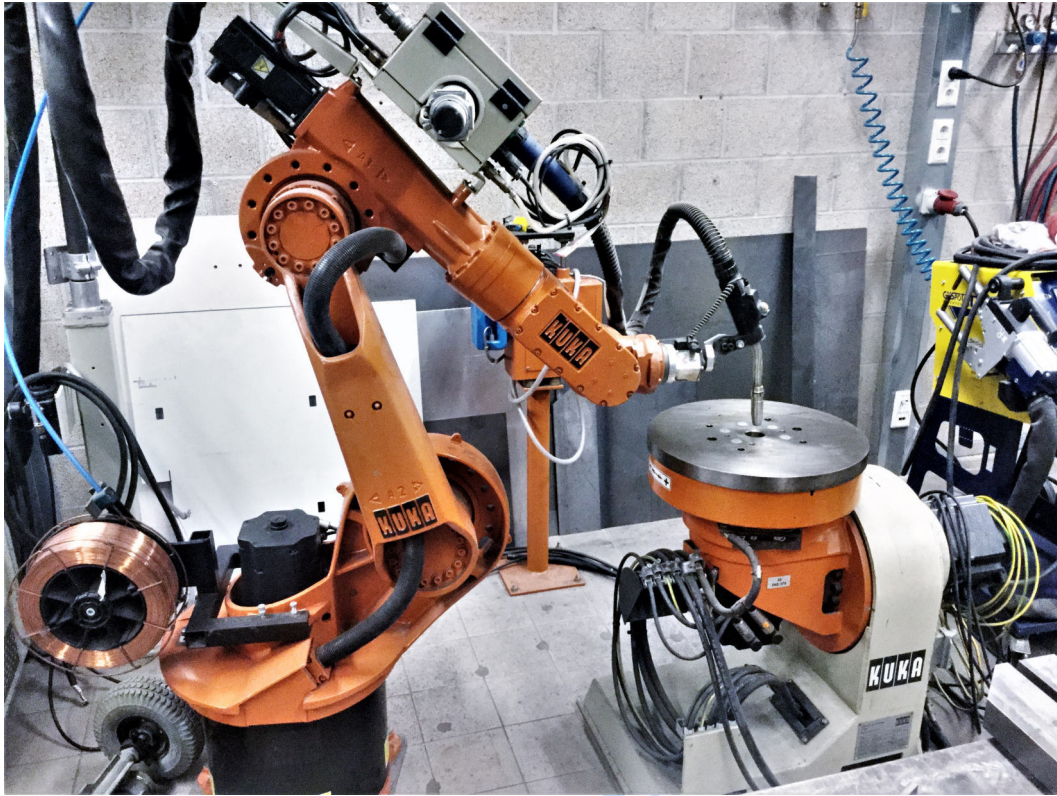


Abbildung 1: KUKA KR15/2 mit DKP400

2 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die Grundlagen von Roboter manipulatoren beschrieben. Da der Begriff "Roboter" ist ein weit geführter Oberbegriff für teilweise stark unterschiedliche Maschinen ist, sollen kurz verschiedene Grundlegende Arten von Kinematiken aufgezeigt werden. Selbst die Definition des Verein Deutscher Ingenieure (VDI) sieht dabei auch keine genaue Spezifikation über Bauart, Art der Bewegung oder Einsatz eines Roboters vor.

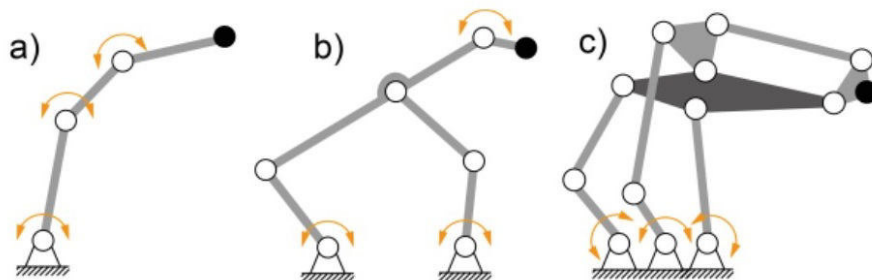
"Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d. h. ohne mechanischen bzw. menschlichen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen" [21]



Abbildung 2: Beispiel Arten Industrieroboter [2]

2.1 Roboterkinematik

Der Aufbau einer Roboterkinematik kann prinzipiell auf zwei Arten erfolgen, entweder parallel oder seriell. Bei der Parallelkinematik sind die einzelnen Verfahrachsen miteinander verbunden. Bei einem sogenannten Delta-Roboter sind alle drei Bewegungsachsen mit Stäben mit dem Endeffektor verbunden. Bei der seriellen Kinematik sind alle Achsen nacheinander aufgebaut. Hierbei können alle Bewegungsachsen linear sein (Hexapod, Portalroboter), ein Teil drehbar und ein Teil linear (SCARA-Roboter) und alle Achsen drehbar (Knickarmroboter). Dabei bestimmt oft die Anzahl der Bewegungsachsen die Höhe der Freiheitsgrade f . Ein seriell aufgebauter Portalroboter mit drei translatorischen Achsen (TTT-Kinematik) kann dreidimensional im Raum verfahren, jedoch keine Winkelorientierung vornehmen ($f = 3$). Ein Universalroboter mit sechs rotatorischen Achsen hat dementsprechend den Freiheitsgrad $f = 6$. Hierbei kann jeder Punkt im Bewegungsraum angefahren werden und zusätzlich die Winkelorientierung in allen drei Ebenen definiert werden. Der in der Arbeit verwendete Roboter KUKA KR15/2 ist durch so eine Kinematik definiert.



a) serielle Kinematik, b) hybride Kinematik, c) parallele Kinematik

Abbildung 3: Vergleich Kinematiken [12]

2.2 Koordinatentransformationen

In den meisten Fällen werden lineare Bewegungen des Endeffektors im kartesischen System durchgeführt. Um bei einem sechs-achsigen seriellen Knickarmroboter die Position des Endeffektors auf Basis der Achswerte im kartesischen Raum zu erhalten muss eine sogenannte Vorwärtstransformation durchgeführt werden. Hierbei wird auch von einer direkten Kinematik oder Vorwärtskinematik gesprochen. Bei der Vorwärtstransformation wird das Versatzkoordinatensystem vom Basiskoordinatensystem anhand der Achsparameter verschoben und verdreht. Dies wird für jede Achse durchgeführt. Sind alle Achsen berechnet, ist die Position des Endeffektors basierend auf dem Basiskoordinatensystem bekannt. Die Art der Koordinatenverschiebung ist durch die Denavit-Hartenberg-Transformation (DH-Transformation) definiert. Anhand der Denavit-Hartenberg-Parameter kann eine einheitliche Berechnung aller seriellen Kinematiken erfolgen. Dabei ist der

Drehwinkel θ der Achswinkel des Roboters. Die weiteren Parameter d , a und α sind Konstanten, die aus der Roboterkinematik hervorgehen.

- Drehwinkel θ
- Gelenkabstand d
- Armelementlänge a
- Verwindung α
- Gelenk j

Um die Koordinatentransformation von einem Gelenk zu dem anderen basierend auf die Achsrotation θ zu berechnen müssen die Werte in die Matrix aus Gleichung 2.1 eingesetzt und berechnet werden. Dies wird nun für jede Bewegungsachse wiederholt. Dabei wird zusätzlich das Ergebnis der vorherigen Achse mit der Matrix multipliziert. So erhält man die Position des Endeffektors auf Basis der Drehwinkel θ .

$${}^{j-1}A_j = \begin{pmatrix} \cos \theta_j & -\sin \theta_j \cos \alpha_j & \sin \theta_j \sin \alpha_j & a_j \cos \theta_j \\ \sin \theta_j & \cos \theta_j \cos \alpha_j & -\cos \theta_j \sin \alpha_j & a_j \sin \theta_j \\ 0 & \sin \alpha_j & \cos \alpha_j & d_j \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Durch die Inversion der Matrix kann eine Rückwärtstransformation erfolgen. Dabei können die benötigten Drehwinkel θ für einen definierten Punkt im kartesischen Koordinatensystem ermittelt werden. Das Softwarepaket LinuxCNC arbeitet zum Beispiel mit der Rückwärtstransformation, um Roboter manipulatore mittels G-Code zu verfahren [14](siehe Kapitel 3.1)

Tabelle 2: DH-Parameter KUKA KR15/2 [24]

Gelenk j	θ_j	α_j in Grad	a_j in Meter	d_j in Meter
1	θ_1	90	0,3	0,675
2	θ_2	0	0,650	0
3	θ_3	90	0,155	0
4	θ_4	-90	0	0,600
5	θ_5	90	0	0
6	θ_6	0	0	0,140

2.3 Singularitäten

Bei seriellen Kinematiken kann es vorkommen, dass für eine Endeffektorposition mehrere Lösungen möglich sind. Dies ist dadurch begründet, dass die Verschiebung des Koordinatensystems vom Basispunkt des Roboters bis hin zur Istposition durch eine Koordinatentransformation mit einer Transformationsmatrix beschrieben wird (Vergleich Kapitel

2.2). Dabei kann eine Matrix keine, eine, mehrere oder unendlich viele Lösungen haben. Ist keine Lösung vorhanden, ist der Punkt nicht erreichbar, er liegt außerhalb des erreichbaren Arbeitsraumes. Bei einer Lösung ist der Punkt erreichbar und die Achsstellung des Roboters genau definiert. Kommt es zu mehreren Lösungen, kann der Punkt mit unterschiedlichen Achsstellungskombinationen erreicht werden (siehe Abbildung 4). Meist sind hier in der Roboterkonfiguration oder dem Simulationsprogramm Voreinstellungen eingespeichert, die der Steuerung ein automatisches Auswählen einer Achsstellungskombination ermöglichen. Dies bedeutet nicht, dass die automatische Kombination auch die beste ist. Hier kann ein Eingreifen des Anwenders vonnöten sein (siehe Kapitel 4.3). Von einer Singularität spricht man, wenn unendlich viele Lösungen bestehen. Solche Fälle treten auf, wenn zwei Drehachsen aufeinander liegen. Dementsprechend kann die Endposition mit unendlich vielen Achsstellungen erreicht werden (siehe Abbildung 4). Auch hier bestehen Möglichkeiten diese Bereiche automatisiert zu überfahren. Trotzdem gilt es, wenn möglich Singularitäten zu vermeiden, da im Verfahrensbetrieb die Sollgeschwindigkeit der einzelnen Achsen ruckartig sehr hoch werden kann. Dies führt entweder zu einer Fehlermeldung, da die Beschleunigungen nicht realisiert werden können, oder es kommt zu einer ungenauen Bahn, da die Synchronisation der Achsen nicht mehr gewährleistet werden kann.

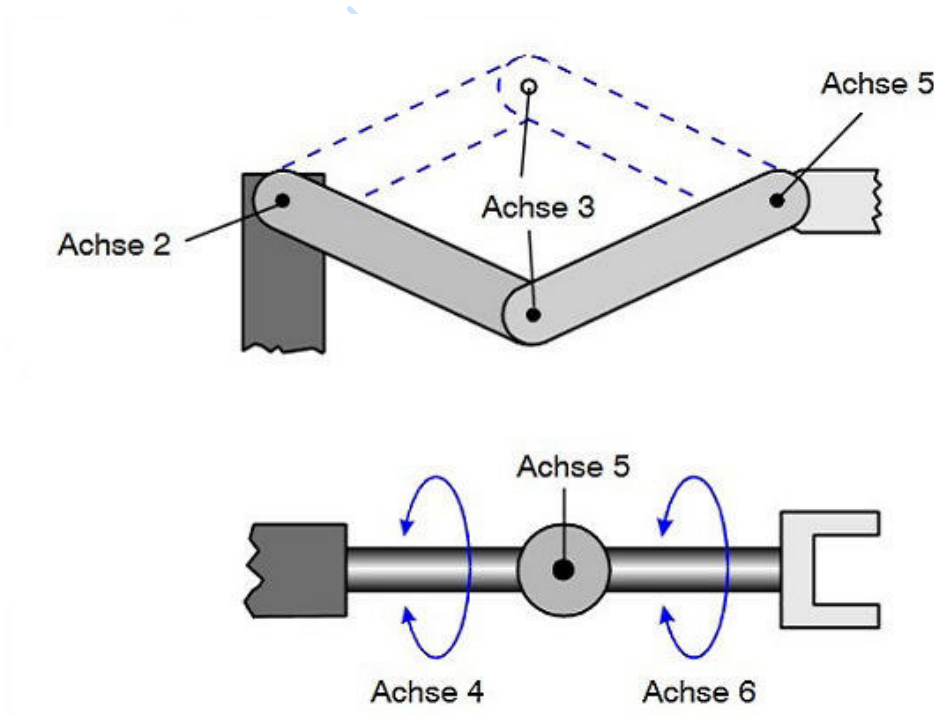


Abbildung 4: Multiple Lösungen Achsstellung [5]