



Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Institut für Informatik
Autonome Intelligente Systeme

Zur Kinematik und Steuerung eines 6-Achs-Roboters mit Viergelenksketten

Masterarbeit

Referent : Prof. Dr. Wolfram Burgard

Betreuer : Felix Burget M.Sc.

Vorgelegt am : 25. November 2017

Vorgelegt von : Tim Schmiedl

Matrikelnummer: 3945200

Zum Klausenhorn 2B, 78465 Dingelsdorf

tim.schmiedl@neptun.uni-freiburg.de

Abstract

Deutsch

English

Inhaltsverzeichnis

Abstract	I
Inhaltsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Knickarm-Roboter	1
1.1.1 Gelenke, Tool-Center-Point, Freiheitsgrade	1
1.1.2 Serielle vs Parallel Kinematik	1
1.1.3 Arbeitsbereich	1
1.1.4 Positionierung & Bahnplanung	1
1.2 Robotermodell "HORST"	2
1.3 Ziel der Arbeit	3
1.3.1 Beschreibung des kinematischen Modells	3
1.3.2 Steuerung des Roboters	4
1.3.3 Analyse und Optimierung der Kinematik	4
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Verwandte Arbeiten	5
3 Grundlagen	7
3.1 Roboterpositionierung	7
3.1.1 Koordinatensysteme & Orientierung	7
3.1.2 Denavit-Hartenberg Parameter	9
3.1.3 Vorwärtstransformation	10
3.1.4 Rückwärtstransformation	10
3.1.5 Roboterkonfigurationen	14
3.2 Roboterbewegung	14
3.2.1 Bewegungsprofil & Interpolation	15

3.2.2	PTP-Bahn	16
3.2.3	CP-Bahnsteuerung	17
3.3	Parallel-Roboter und Viergelenksketten	17
4	Viergelenksroboter "Horst"	19
4.1	Versionshistorie	19
4.2	Viergelenksketten	20
4.2.1	1. Viergelenkskette (Achse 2)	20
4.2.2	2. Viergelenkskette (Achse 3)	20
4.2.3	Dynamische Übersetzung	22
4.3	Kinematische Parameter	24
4.3.1	Denavit-Hartenberg Parameter	24
4.3.2	Arbeitsraum	24
4.4	Antrieb & Sensorik	24
4.5	Systemarchitektur	24
5	Ansatz und Methodik	27
5.1	Kinematische Analyse	28
5.1.1	Punkt/Stabmodell	28
5.1.2	Analytische Inverse Kinematik	29
5.1.3	Drehmomente	31
5.1.4	Hebelkräfte	33
5.1.5	Beschleunigungen & Trägheitsmomente	34
5.1.6	Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark	35
5.2	Steuerung des Roboters	36
5.2.1	Abrollen der Achsen	36
5.2.2	Regelung und Vorsteuerung	38
5.3	Optimierung der Kinematik	39
5.3.1	Scoreing-Funktionen	41
6	Experimente	43
6.1	Kinematische Analyse	44
6.1.1	Drehmomente	44
6.1.2	Hebelkräfte	44

6.1.3	Workspace	45
6.1.4	Beweglichkeit / Reachability	46
6.2	Steuerung des Roboters	47
6.2.1	Regelung	47
6.2.2	Vorsteuerung	47
6.2.3	Achs-kompensation	47
6.2.4	Bewegungsprofile	47
6.3	Optimierung der Kinematik	48
7	Fazit	49
 Anhang		50
Anhang A Erster Anhang		1
Abbildungsverzeichnis		i
Literaturverzeichnis		iii
Eidesstattliche Erklärung		v

1 Einleitung

1.1 Knickarm-Roboter

Anwendungsgebiete IRB 140

1.1.1 Gelenke, Tool-Center-Point, Freiheitsgrade

Mechanischer Aufbau

Anzahl Achsen (Freiheitsgrade) Ganzer Roboter

Freiheitsgrade (Degrees of Freedom, DOF) Ein im Raum frei beweglicher Körper hat 6 Freiheitsgrade: ($f= 6$) 3 Freiheitsgrade für die Position im Raum (Ort) (x,y,z). 3 Freiheitsgrade für die Orientierung (Φ_x, Φ_y, Φ_z).

1.1.2 Serielle vs Parallel Kinematik

Seriell

Delta Roboter

Hexapod

Palletier Roboter

1.1.3 Arbeitsbereich

- Beweglichkeit / Arbeitsraum

1.1.4 Positionierung & Bahnplanung

Steuerung einzelner Achsen

Joint- vs Cartesian

Joint vs CP-Bahnen

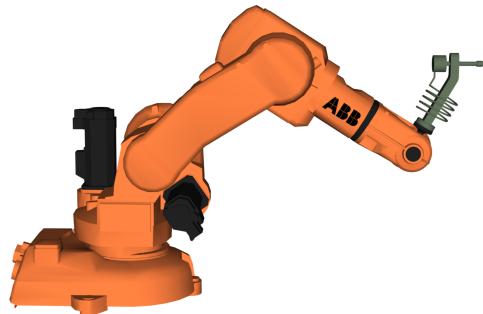


Abbildung 1: IRB 140

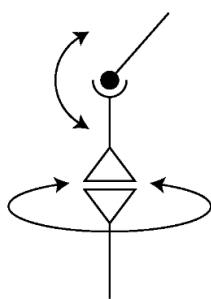


Abbildung 2: Gelenk

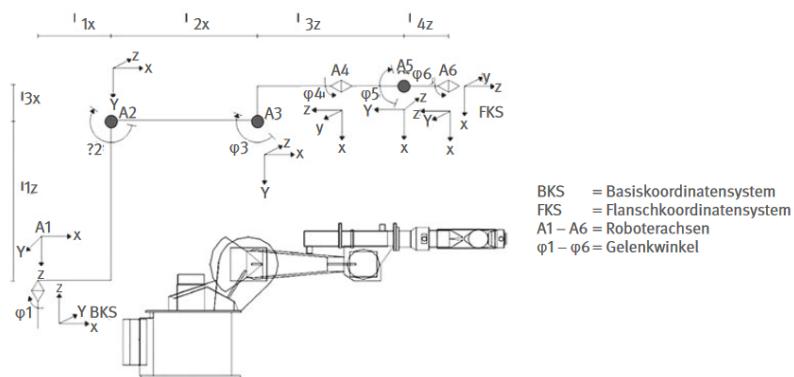


Abbildung 3: 6-Axis-Roboter Schema

1.2 Robotmodell "HORST"

Fruitcore

Viergelenkskette

Leichtbau

dynamische Übersetzung, Kräfte

Parallel, Gamma2 / Gamma3



Abbildung 4: Robotermodell Horst (Model 3)

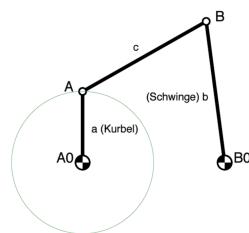


Abbildung 5: Viergelenkskette

Motor im Sockel

Riemen & Abrollen

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist die Kinematik des Viergelenkroboters "Horst" zu analysieren und eine Steuerung für den Roboter zu entwickeln. Dabei ist die Zielsetzung in drei Bereiche unterteilt:

1.3.1 Beschreibung des kinematischen Modells

Zu Beginn wird die Kinematik des Roboters ausführlich beschrieben. Dabei wird insbesondere auf die Antriebe der Hauptachsen 2 und 3 genauer beleuchtet. Es wird eine Berechnungsart für die direkte Kinematik vorgestellt, die sich durch die Verwendung der Viergelenksketten von typischen 6-Achs-Robotern unterscheidet. Die entstehenden dynamischen Übersetzungen und Abhängigkeiten der verschiedenen Achsen wird

genau beschrieben.

1.3.2 Steuerung des Roboters

Die zweite Zielsetzung der Arbeit betrifft die Steuerung des Roboters. Hierbei werden die Erkenntnisse des kinematischen Modells berücksichtigt und an einem echten Roboter getestet. In den zugehörigen Kapiteln wird insbesondere die Besonderheiten des Roboter "Horst" wie das Abrollen der Achsen, das Verwenden von Riemen zur Kraftübertragung und der Einsatz von Schrittmotoren erwähnt. In Experimenten wurden diverse Techniken zur Steuerung und Regelung an einem realen Roboter getestet, dabei wurde insbesondere auf die Präzision und Stabilität geachtet.

1.3.3 Analyse und Optimierung der Kinematik

Die dritte Zielsetzung der Arbeit beschäftigt sich mit der genauen Analyse und Optimierung der Kinematik. Dabei ist der Hauptaugenmerk auf die Faktoren Kräfte und Beweglichkeit sowie die Größe des Arbeitsbereiches gesetzt. In den entsprechenden Kapiteln werden verschiedene Berechnungen zu Drehmomenten, Hebelkräften sowie Trägheitsmomenten vorgestellt. Für die Darstellung des Arbeitsraumes sowie der Beweglichkeit werden diverse grafische Darstellungen bemüht um eine Vergleichbarkeit mit anderen Robotern sowie den optimierten Varianten der Kinematik zu schaffen.

1.4 Aufbau der Arbeit

Title

Title

Title

2 Verwandte Arbeiten

Bereiche:

- Robotik allgemein
- Viergelenksette
- Inverse Kinematik
- Beweglichkeit / Reachability

Bücher:

- Industrieroboter - Methoden zur Steuerung und Regelung
-
-
-

Paper:

-
-
-
-

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden die (mathematischen) Grundlagen zur Beschreibung eines Knickarmroboters, sowie der Steuerung und Bahnplanung in verschiedenen Bezugssystemen erklärt.

Insbesondere werden folgende Themen erläutert:

- Eindeutige Beschreibung der Stellung eines 6-Achsroboters
- Transformation von Gelenkswinkel zu kartesischen Koordinaten und umgekehrt
- Bewegungen und Bahnen die ein Knickarmroboter ausführen kann
- Viergelenksketten und die Verwendung dieser bei Robotern

3.1 Roboterpositionierung

Für die Beschreibung der Stellung eines Knickarmroboters sind

3.1.1 Koordinatensysteme & Orientierung

Zur Beschreibung der Lage des Endeffektors, Gelenken und Armteilen werden kartesische Koordinatensysteme verwendet. Drei senkrecht aufeinander stehende Achsen (X, Y, Z) lassen Positionen im Raum beschreiben.

Im Normalfall werden rechtshändige Koordinatensysteme gewählt: Wenn mit der rechten Hand der Daumen als X-Achse und der Zeigefinger als Y-Achse gewählt wird, so zeigt der Mittelfinger in Richtung der positiven Z-Achse

ORIENTIERUNG

Die Lage eines Teiles wird neben der Position noch durch die Orientierung beschrieben. Diese kann durch 3 verschiedenen Rotationen dargestellt werden und bildet zusammen mit den 3 Werten der X-Y-Z-Koordinaten die 6 Freiheitsgrade der Lagebeschreibung in einem dreidimesionalen Raum.

Während die Position eines Teiles im Raum in einem kartesischen Koordinatensystem einfach und sehr anschaulich beschrieben werden kann ist die Orientierung eines Teiles etwas schwieriger darzustellen.

Die drei gebräuchlichsten Darstellung einer Orientierung im Raum sind Rotationmatrizen, Euler-Winkel oder Quaternionen.

ROTATIONSMATRIX

Die Rotationsmatrix oder Drehmatrix beschreibt die Drehung im euklidischen Raum. Dabei werden üblicherweise die Drehungen um die kartesischen Koordinatenachsen verwendet.

Für die Drehung um die X-Achse gilt folgende Matrix:

$$R_x(\alpha) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & -\sin \alpha \\ 0 & \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Für die Drehung um die Y-Achse gilt folgende Matrix:

$$R_y(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & 0 & \sin \alpha \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \alpha & 0 & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

Für die Drehung um die Z-Achse gilt folgende Matrix:

$$R_z(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha & 0 \\ \sin \alpha & \cos \alpha & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

EULERSCHE WINKEL

Die eulerschen Winkel sind ein Satz dreier unabhängiger Parameter, mit denen die Orientierung (Drehlage) eines festen Körpers im dreidimensionalen Raum beschrieben werden kann. [1]

Dabei werden die Drehungen jeweils auf den Achsen der entstehenden Koordinatensystemen angewendet. Es existieren 12 verschiedene Kombinationen diese Drehungen auszuführen. Dabei werden die Kombinationen die durch aufeinanderfolgende Rotationen um drei verschiedene Achsen entstehen Kardanwinkel genannt. Kombinationen bei denen die erste und dritte Achse die gleiche Achse ist werden als (klassische) Euler-Winkel bezeichnet.

Die klassischen Eulerwinkel sind in folgenden Drehkombinationen möglich: z-x'-z'', x-y'-x'', y-z'-y'', z-y'-z'', x-z'-x'', y-x'-y''

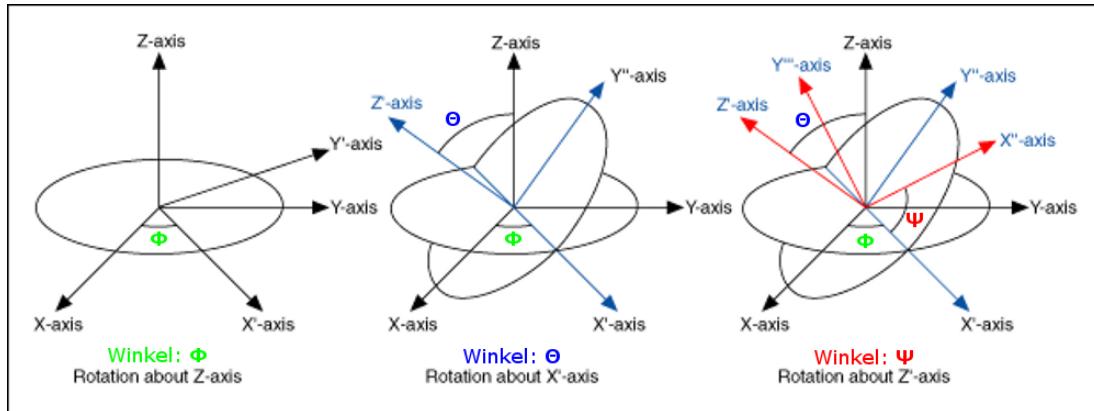


Abbildung 6: Eulerwinkel (Z-X'-Z'')

3.1.2 Denavit-Hartenberg Parameter

Für die Beschreibung von Robotern mit offenen kinematischen Ketten hat sich die Denavit-Hartenberg-Konvention durchgesetzt.

Jedes Gelenk wird mit einem Koordinatensystem versehen, das mit Translationen und Rotationen des Koordinatensystems des vorherigen Gelenkes entsteht. Im Allgemeinen Fall müssten 6 Parameter für die Lagebeschreibung eines Gelenkes gemacht werden (3 translatorische und 3 Angaben zur Rotation). Die Denavit-Hartenberg-Konvention ermöglicht es relative Stellung zweier Gelenke mit nur vier Parameter zu beschreiben.

FESTLEGUNG DES BASISKOORDINATENSYSTEM K₁

- Das Basiskoordinatensystem ist rechtshändig und wird im Zentrum der ruhenden Basis (Sockel) des Roboters gesetzt.
- Die Z₁-Achse zeigt entlang der ersten Gelenkachse, d.h. eine Rotation um Gelenk 1 entspricht einer Rotation um die Z₁-Achse

FESTLEGUNG DER DARAUFFOLGENDEN KOORDINATENSYSTEME K_{2...6}

- Der Ursprung von K_i liegt auf der Gelenkachse i
- Die Z_i-Achse zeigt entlang der Gelenkachse, d.h. eine Rotation um Gelenk i entspricht einer Rotation um die Z_i-Achse
- Die gemeinsame Normale zwischen der vorherigen Z_{i-1}-Achse und Z_i definiert alle Denavit-Hartenberg-Parameter
- Die Länge der Normalen wird mit dem Parameter **a** bezeichnet
- Die X_i-Achse zeigt entlang der gemeinsamen Normalen
- Der Abstand von X_{i-1}-Achse zur Normalen wird als Parameter **d** bezeichnet
- Der Winkel θ ist die Rotation um die Z_{i-1}-Achse der die X-Achsen der beiden Koordinatensysteme aufeinander ausrichtet

- Der Winkel α ist die Rotation um die neue X_i -Achse der die Z-Achsen der beiden Koordinatensysteme aufeinander ausrichtet

FLANSCH VS. TOOL TCP

Da im Normalfall an der letzten Achse des Roboters ein Endeffektor angebracht ist verschiebt sich der Tool-Center-Point TCP. Dabei kann der Positions-Offset zwischen Achse 6 und dem nun neuen TCP mittels kartesischer Koordinaten relativ zum Koordinatensystem von Achse 6 angegeben werden.

Die mögliche Rotation des TCP des Endeffektors kann wiederum mittels Rotationsmatrizen oder Eulerwinkel angegeben werden.

3.1.3 Vorwärtstransformation

Die Hauptaufgabe von Robotern sind die Manipulierung von Objekten im Raum. Diese sind im Raum platziert und werden mit kartesischen Koordinaten beschrieben. Die Steuerung des Roboters erfolgt jedoch durch Motoren die Rotationen der Gelenke bewirken.

Um die Umrechnung von Gelenkwinkel zu kartesischen Koordinaten (und umgekehrt) zu ermöglichen bedarf es einer Methodik, die direkte Kinematik (für die Umrechnung von Achswinkel zu kartesischen Koordinaten) und die inverse Kinematik (für die Umrechnung von kartesischen Koordinaten zu Achswinkel).

Die Vorwärtstransformation (direkte Kinematik) ist eine eindeutige Abbildung von Gelenkkoordinaten auf kartesische Koordinaten. [2]

Sind alle Achswinkel bekannt und der Roboter ist anhand der Denavit-Hartenberg-Konvention beschrieben, so kann der TCP durch die Multiplikation der Denavit-Hartenberg-Matrizen berechnet werden.

$$T_w(q) = T(q_1) * T(q_2) * T(q_3) * T(q_4) * T(q_5) * T(q_6) \quad (3.1)$$

3.1.4 Rückwärtstransformation

Die Rückwärtstransformation oder inverse Kinematik ist das logische Gegenstück zur direkten Kinematik. Sie ermöglicht die Bestimmung der Gelenkwinkel anhand einer Pose des Endeffektors. [1]

Im Gegensatz zur direkten Kinematik bereitet die inverse Kinematik deutlich größere Schwierigkeiten. Zu einer bestimmten Pose des Endeffektors gibt es im Allgemeinen mehrere gültige Gelenkwinkel-Konfigurationen. Zusätzlich kann es in bestimmten Stellen zu Singularitäten kommen.

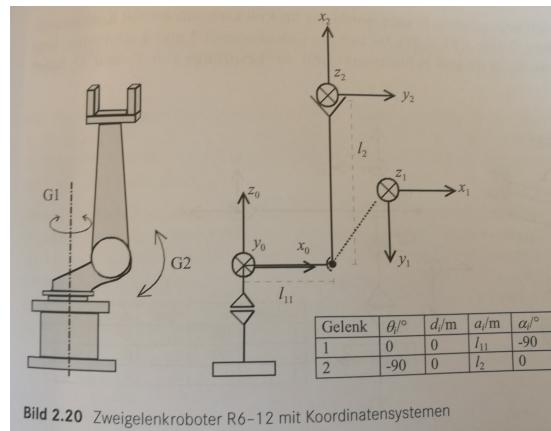


Bild 2.20 Zweigelenkroboter R6-12 mit Koordinatensystemen

Abbildung 7

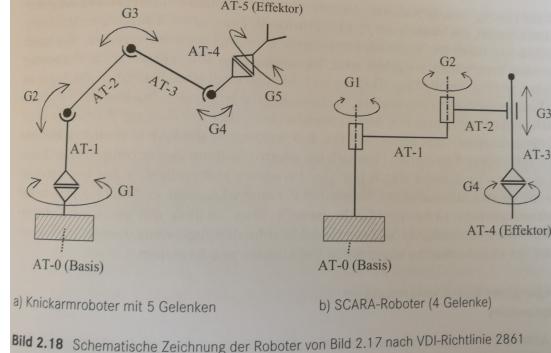


Bild 2.18 Schematische Zeichnung der Roboter von Bild 2.17 nach VDI-Richtlinie 2861

Abbildung 8

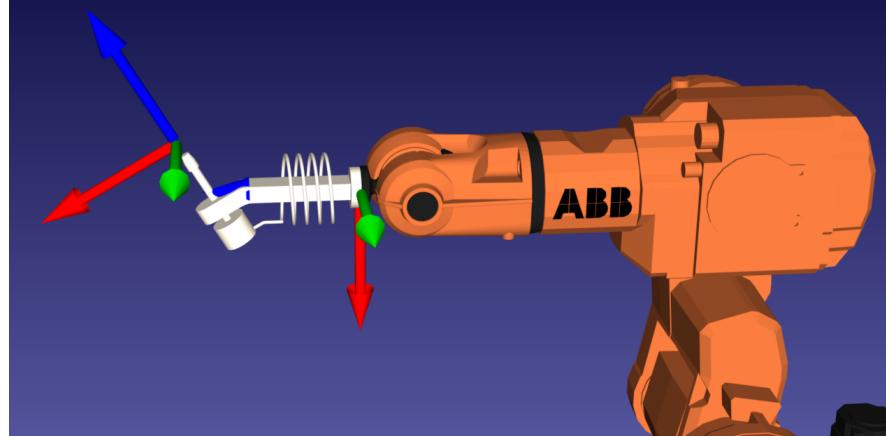


Abbildung 9: Verschiebung des TCP durch Endeffektor



Abbildung 10: Schematische Darstellung der direkten Kinematik



Abbildung 11: Schematische Darstellung der inversen Kinematik

MEHRDEUTIGKEITEN

Abbildung 12 zeigt ein einfaches Beispiel einer Mehrdeutigkeit bei einem Roboter mit zwei Gelenken. Die kartesischen Koordinaten entsprechen beiden Lösungen für die Gelenkwinkel.[2] Diese verschiedenen Lösungen werden auch Konfigurationen genannt. Dabei kann es auch passieren, dass eine Lösung mathematisch zwar korrekt sind, aufgrund von mechanischen Limitierungen nicht möglich sind. Beispielsweise wenn der Roboter "in sich selbst reinfahren" würde. Die wichtigsten Konfigurationen eines 6-Achs-Roboters werden wenig später in dem Kapitel noch genauer vorgestellt.

SINGULARITÄT

Eine weitere Problematik der Inversen Kinematik sind singuläre Stellungen. Diese treten immer dann auf, wenn zwei Rotationsachsen colinear sind, also in die gleiche Richtung zeigen.

In einer solchen Stellung hat die Rotation um die erste Drehachse (Achse 4 in Abbildung 13) den gleichen Effekt wie die Rotation der nachfolgenden Drehachse (Achse 6 in Abbildung 13). Es gibt unendlich viele Lösungen die alle zur gleichen Stellung des Effektors führen. Somit ist in dieser Stellung ein Freiheitsgrad verloren gegangen.

In einem gewöhnlichen 6-Achs-Roboter gibt es verschiedene Möglichkeiten die zu einer Singularität führen können. Dabei sind immer die Drehachsen betroffen, dies sind zumeist Achse 1, 4 und 6.

Demensprechend gibt es Singularitäten sobald:

- Achse 4 und Achse 6 colinear sind (**4-6 Singularität**)
- Achse 1 und Achse 6 colinear sind (**1-6 Singularität**)
- Achse 1 und Achse 4 colinear sind (**1-4 Singularität**)
- Achse 1 und Achse 4 und Achse 6 colinear sind (**1-4-6 Singularität**)

BERECHNUNGSFORMEN

Zur Lösung der inversen Kinematik gibt es kein allgemein anwendbares Verfahren.

Grundsätzlich gibt es zwei Ansätze:

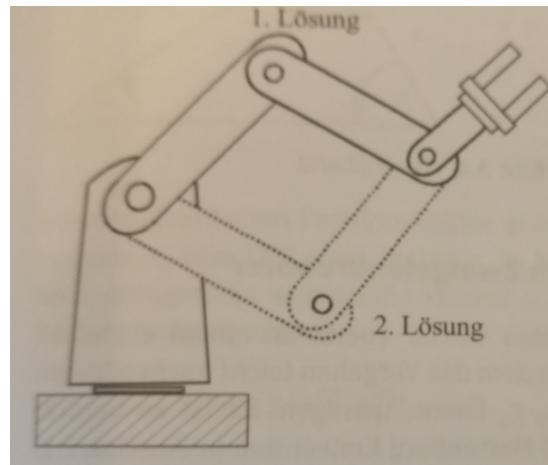


Abbildung 12: Mehrdeutigkeit bei Zwei-Achs-Roboter

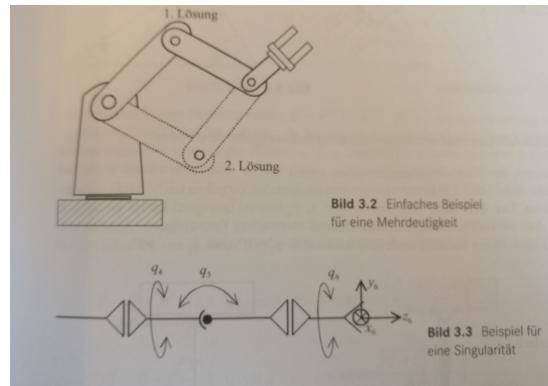


Abbildung 13: Mehrdeutigkeit und Singularität

- **Algebraische Methoden:** Durch sukzessive Invertierung der Denavit-Hartenberg-Transformationsmatrizen und damit Lösung des folgenden Gleichungssystems können nach und nach die einzelnen Gelenkwinkelvektorkomponenten berechnet werden.[1]
- **Geometrische Methoden:** Aufgrund des Wissens über die Geometrie des Roboters wird versucht, zum Beispiel mit Hilfe von Kosinussatz oder Sinussatz den Gelenkwinkelvektor q zu berechnen.[1] Dabei werden die Lösungen aller Konfigurationen gefunden.
- **Numerische Methoden:** Sind Näherungsverfahren die iterativ versuchen eine Lösung für den Gelenkwinkelvektor q zu finden. Hierbei kann es problematisch sein ein geeigneten Startwert zu finden.

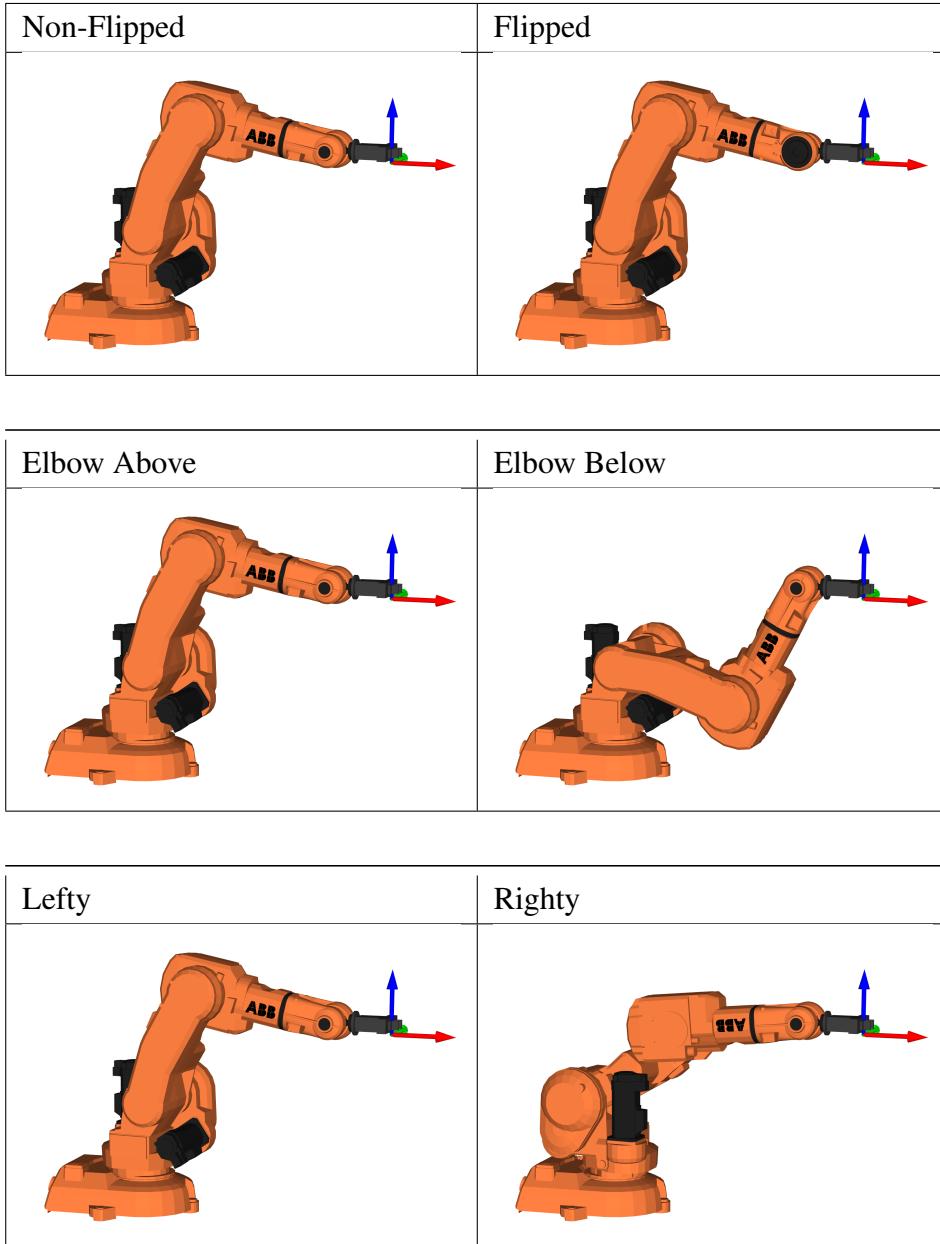
Geometrisch anhand 2-Axis-Roboter

6-Axis-Roboter und Zentralhand

Jacobi-Matrix

$$J_f(a) := \left(\frac{\partial f_i}{\partial x_j}(a) \right)_{i=1,\dots,m; j=1,\dots,n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1}(a) & \frac{\partial f_1}{\partial x_2}(a) & \dots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n}(a) \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_m}{\partial x_1}(a) & \frac{\partial f_m}{\partial x_2}(a) & \dots & \frac{\partial f_m}{\partial x_n}(a) \end{pmatrix} \quad (3.2)$$

3.1.5 Roboterkonfigurationen



3.2 Roboterbewegung

Die Kinematik befasst sich nur statisch mit der Beschreibung und Berechnung von Armstellungen. Die Bahnsteuerung befasst sich mit den Bewegungsabläufen, mit dem ein Roboter in eine vordefinierte Stellung erreicht.[3]

Die einfachste Art den Roboter von einer Stellung A zu einer Stellung B zu fahren ist die Punktsteuerung auch PTP-Bahn (Point-To-Point). Dabei wird die Stellung des Roboters am Zielpunktes B (per inversen Kinematik) berechnet und jede Achse des Roboters fährt zu der berechneten Achsposition der Zielstellung. Da diese Bewegung in den Koordinaten der Roboterachsen geschieht, ist die Bahn des TCP sowie dessen Orientierung während der Bewegung nicht vorsehbar.

Für viele Anwendungen ist jedoch eine vorhersehbare - z.B. lineare - Bahn des TCP notwendig. Dabei findet die Bahnplaunung nun in den kartesischen Koordinaten statt. Diese Art der Bewegung wird CP-Bahn (Continous Path) oder kartesische Bahnsteuerung genannt.

3.2.1 Bewegungsprofil & Interpolation

Um ausgehend von einem Startwert eine Zielposition zu erreichen ist ein Bewegungsprofil notwendig. Da die Zielstellung der Gelenke nicht sprungartig geändert werden sollte - dies würde starke Drehmomentsänderung benötigen und zu Schwinungen und starker mechanischer Belastung führen - werden zeitabhängige Zwischenwerte für jedes Gelenk berechnet. Dabei werden die maximalen Beschleunigungen und Höchstgeschwindigkeiten für jedes Gelenk berücksichtigt.

Die einfachste Möglichkeit eine Interpolation zwischen Start- und Zielwert zu berechnen ist die Verwendung eines **Linearen** oder **Rampenprofil**. In Abbildung 16 ist zu erkennen, dass die Beschleunigung im ersten Abschnitt konstant (und maximal) ist. Die Geschwindigkeit steigt dementsprechend konstant an bis eine vordefinierte Maximalgeschwindigkeit erreicht ist. Um am Ende der Bewegung zum Stillstand zu kommen im letzten Teil der Bewegung eine negative Beschleunigung berechnet und die Geschwindigkeit auf Null zu bringen.

Da bei einem Rampenprofil die Beschleunigung am sprungartig von Null auf Maximum und zurück gesetzt wird, ist die Funktion an diesen Stellen nicht mehr differenzierbar. Die Änderung und damit die Ableitung der Beschleunigung - der Ruck - ist unendlich. Dies führt stärkeren Belastungen der Mechanik sowie zu Anregungen von Eigenschwinungen des Roboters. Die Verwendung eines Sinoidenprofils behebt dieses Problem, indem die Beschleunigung nicht sprungartig sondern "weich" bis zum Maximalwert gesteigert wird und dann wieder auf Null fällt.

$$\ddot{s}(t) = \sin^2\left(\pi \frac{t}{t_B}\right) \quad \text{für } 0 \leq t \leq t_B$$

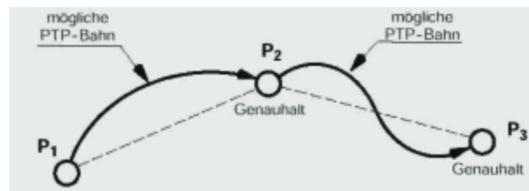


Abbildung 14

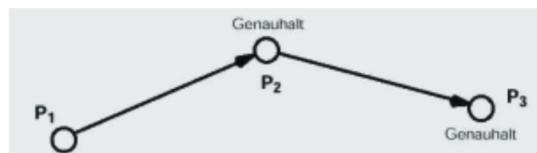


Abbildung 15

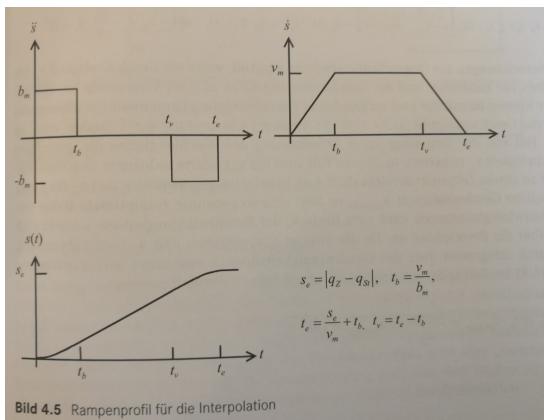


Abbildung 16: Lineares bzw. Rampenprofil

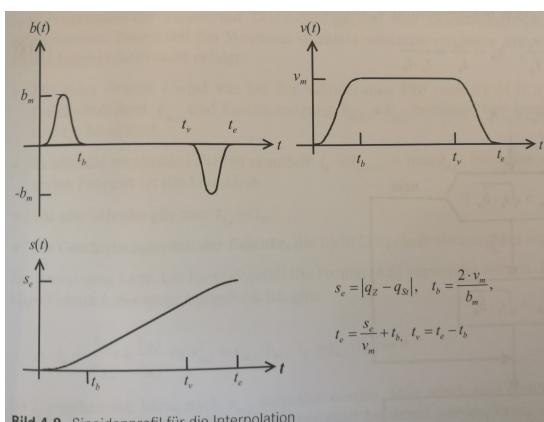


Abbildung 17: Sinoidenprofil

3.2.2 PTP-Bahn

Für die PTP-Bahn muss zunächst die Zielstellung vorgegeben werden. Dies kann entweder explizit mit der Vorgabe der Achstellungen am Zielpunkt geschehen oder wird durch Berechnung der Inversen Kinematik der Zielpose vorgegeben. Nun sind sowohl Start- und Zielstellung im Joint-System vorhanden. Um die Zielstellung zu erreichen

gibt es nun mehrere Möglichkeiten. Bei der **asynchronen PTP** verfährt jede Achse vollständig unabhängig von den anderen Achsen zur jeweiligen Zielposition. Dabei kommen die Achsen im Allgemeinen nicht zur gleichen Zeit an.

Abbildung 18 zeigt, das Achsen die weniger Weg zurücklegen (z.B. Achse 1) früher am Ziel zum Stillstand kommt.

SYNCHRON UND VOLLSYNCHRONE PTP

Um das Problem der unterschiedlichen Ankunftszeiten der Achsen und damit eine intuitivere und flüssiger erscheinende Bewegung zu ermöglichen wird die eine syncrone PTP-Bahn berechnet.

Für die Bahnberechnung wird eine **Leitachse** bestimmt, welche die größte Fahrtzeit aufweist um die Zielstellung zu erreichen. Die anderen Achsbewegungen werden nun so angepasst, dass sie alle zur gleichen Zeit die Zielstellung erreichen.

Dies kann auf zwei Arten geschehen: Wird für

3.2.3 CP-Bahnsteuerung

- Vorberechnung durch inverse Kinematik
- Linear / Zirkular
- Singularität
- in andere Konfiguartion starten

3.3 Parallel-Roboter und Viergelenksketten

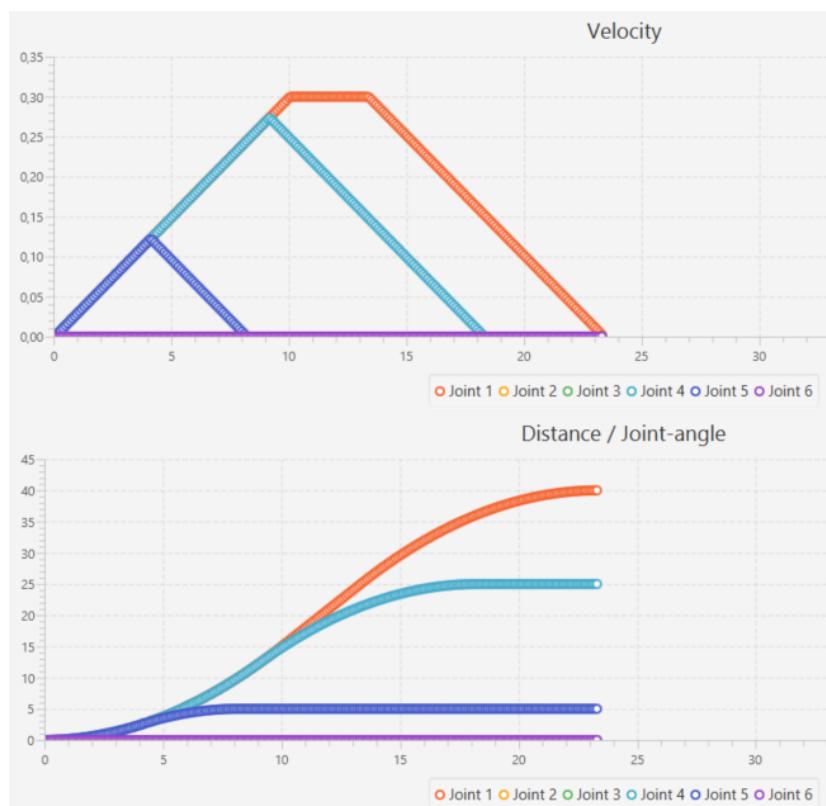


Abbildung 18: Asynchrone PTP: Achsen erreichen die Zielposition in verschiedenen Zeiten

4 Viergelenksroboter "Horst"

Gegenstand der Arbeit ist die Kinematik des Viergelenks-Roboter "Horst" der Firma **fruitcore GmbH**.

Die Besonderheit des Roboters gegenüber anderen Industrierobotern sind die Verwendung von Viergelenksketten für den Antrieb der Hauptachsen 2 und 3. Durch die Ableitung von statischen Kräften auf den festen Sockel sowie durch dynamische Übersetzungsverhältnisse von Hauptachsen zu Antriebsachsen kann der Roboter mit geringeren Antrieben bei gleicher Traglast betrieben werden. Diese spezielle Kinematik wurde europa- und weltweit als Patent angemeldet.[?]

Durch die Verlagerung der Motoren in den Sockel wird die bewegte Masse der vorderen Armteile deutlich reduziert. Diese Gewichtseinsparungen ermöglichen es die Armteile des Roboters in Leichtbauweise mit kostengünstig herzustellen. Die Verwendung von einfachen Schrittmotoren für die Antriebe der Achsen reduziert die Gesamtkosten des Roboters weiterhin.

Somit ist der Roboter mit einem ungefährten Gesamtpreis von 10-15.000 € deutlich preisgünstiger als vergleichbare Industrieroboter.

4.1 Versionshistorie

Die ersten Roboter mit den patentierten Viergelenksketten wurden Anfang 2016 gebaut und getestet. Seit diesem Datum wurden in Iterationsschritten beständig neue Prototypen aufgebaut und evaluiert.

Tabelle 1 zeigt die Prototypen 1 - 5, wobei in dieser Arbeit hauptsächlich vom aktuellsten Prototyp (Prototyp 5) sowie dem darauffolgendem Prototyp gesprochen wird.

Sofern es im folgenden Text nicht bezeichnet ist, wird immer von Prototyp 5 (bezeichnet als P5) gesprochen.

Während der Bearbeitungszeit der Abschlussarbeit wurde die Planung für den neuen Prototyp (P6) aktiv verfolgt, dabei wurden auch viele Erkenntnisse dieser Thesis miteinbezogen. Dies wird in den späteren Kapiteln noch genauer beschrieben.



Abbildung 19: Modell 3

4.2 Viergelenksketten

Die Besonderheit des Roboters sind die Verwendung von zwei ineinander laufende Viergelenksketten für den Antrieb der Achse 2 und 3.

Um die Kinematik besser beschreiben zu können wir mit Abbildung 20 ein Struktur- bzw. Strichmodell des Roboters eingeführt.

4.2.1 1. Viergelenkskette (Achse 2)

Die erste Viergelenkskette treibt wie in Abbildung 21 zu sehen die Hauptachse 2 an.

Dabei sind Punkt P1 und P3 fest, diese Punkte sind die Ausgangspunkte der beweglichen Hebel H_{2-4} und H_{3-5} . Hebel H_{4-5} schließt die Kette. Der Punkt P6 ist fest mit dem Armteil 2 verbunden und ist somit der Kraftübertragungspunkt des Hebels H_{5-6} , welcher mit der Viergelenkskette verbunden ist.

4.2.2 2. Viergelenkskette (Achse 3)

Die zweite Viergelenkskette treibt wie in Abbildung 22 zu sehen die Hauptachse 3 an.

Dabei ist besonders bemerkenswert, dass sich der Antrieb in P1 befindet und somit auf der Hauptachse 2 liegt. Dies ist nur durch eine Hohlwelle möglich, welche die Drehachse 2 von der Antriebsachse 3 entkoppelt. Die festen Punkte dieser Viergelenkskette sind P1 und P8, wobei P8 nur relativ zur Achse 2 fest ist. Rotiert die

Tabelle 1: Versionshistorie der Prototypen des Roboter "Horst"

Prototype 1	Prototype 2	Prototype 3
prototyp 4	prototyp 5	

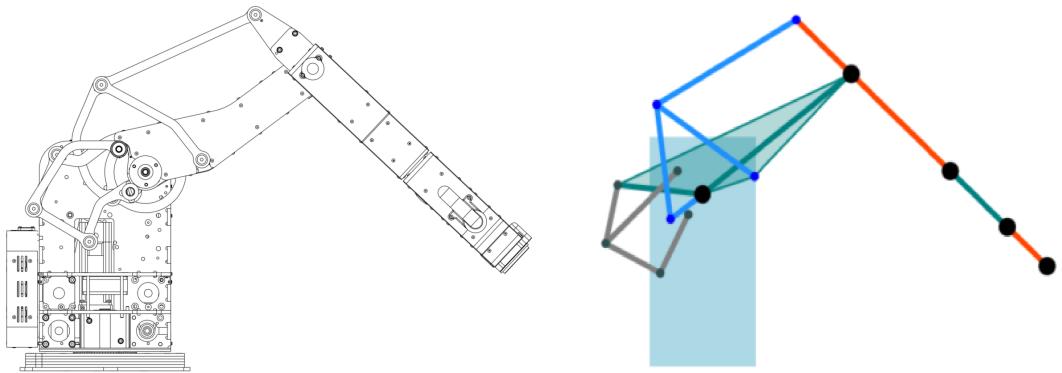


Abbildung 20: Konstruktionszeichnung neben Strichmodell von Prototyp 5

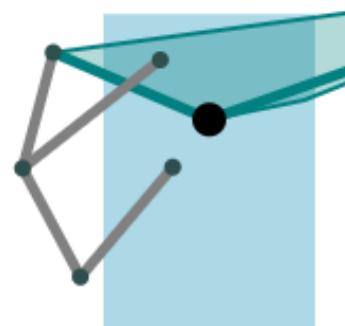


Abbildung 21: Viergelenkskette der Achse 2

Hauptachse A2, so wird sich auch der Punkt P8 mitrotieren. Diese Abhängigkeit wird in den kommenden Kapiteln noch näher beschrieben. Die Punkte P7 und P9 komplettieren die Viergelenkskette. Der Kraftübertragungspunkt ist P10, welcher fest mit Armteil 3 verbunden ist und mit Punkt P9 an der Viergelenkskette anschließt.

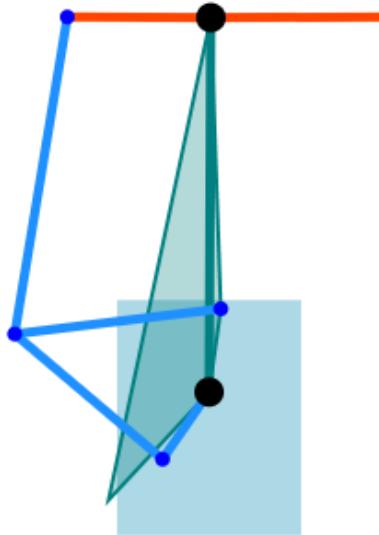


Abbildung 22: Viergelenkskette der Achse 3

4.2.3 Dynamische Übersetzung

Die beiden Viergelenksketten der Hauptachsen stellen ein Koppelgetriebe dar. Dabei ist die Übersetzung nicht gleichmäßig, sondern ergibt sich aus der Stellung der Hebeln. Die in den faltenden Abschnitten erklärten Übersetzungen beziehen sich auf Achs- zu Antriebswellen (eine Übersetzung von 1:2 bedeutet, der Antriebstrang dreht doppelt so schnell wie die dazugehörige Achse).

ÜBERSETZUNG ACHSE2

Das Koppelgetriebe durch die Viergelenkskette von Achse 2 variiert im Übersetzungswert zwischen 1:1.08 und 1:2.71.

Abbildung 23a zeigt diese dynamische Übersetzung grafisch bezogen auf die Stellungen im Arbeitsbereich dar. Wie dort zu sehen ist, sind die Übersetzungen insbesondere in der ausgestreckten Stellung des Roboters hoch. Dies ist gewünscht, da in der ausgestreckten Lage das Drehmoment um die Achse am höchsten ist.

ÜBERSETZUNG ACHSE3

Das Koppelgetriebe durch die Viergelenkskette von Achse 3 variiert im Übersetzungswert zwischen 1:1.23 und 1:1.98. Abbildung 23b zeigt diese Übersetzung im Arbeitsbereich an.

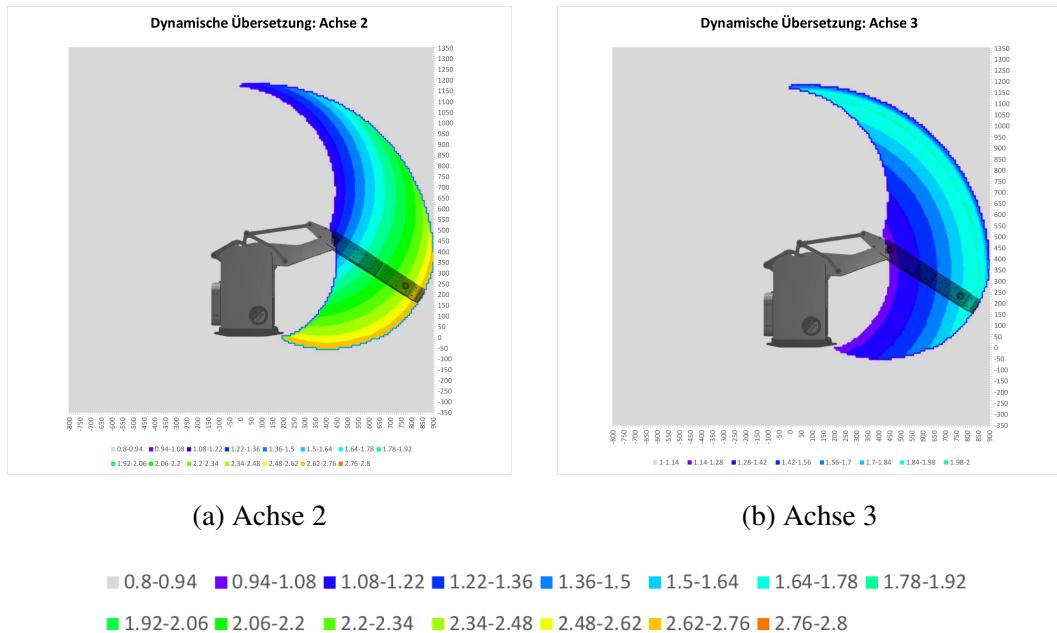


Abbildung 23: Dynamische Übersetzung der Achsen 2 und 3

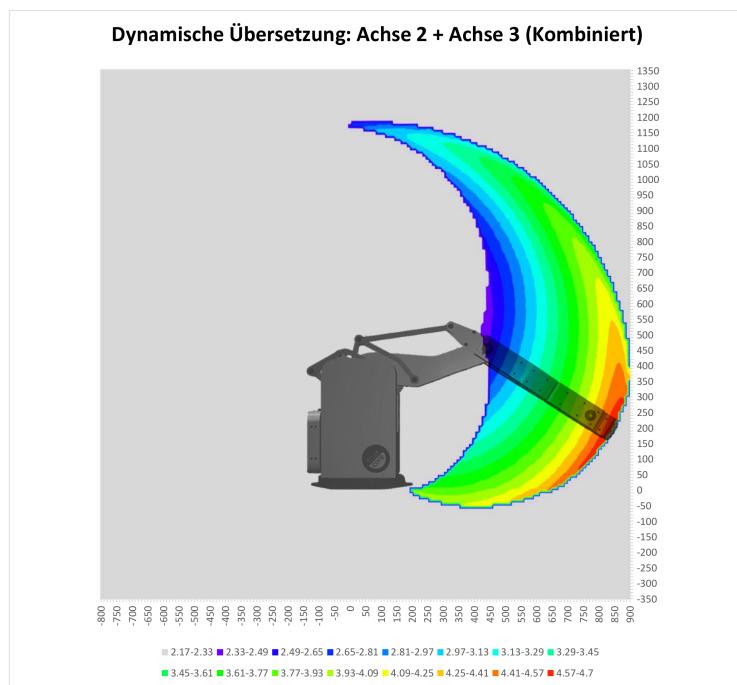


Abbildung 24: Summe der Übersetzung von Achse 2 und Achse 3

ÜBERSETZUNG KOMBINIERT

Übersetzung ist dort groß, wo hohe Drehmomente notwendig sind. Sprich bei ausgestreckter Lage, weit vom Ursprung weg.

4.3 Kinematische Parameter

4.3.1 Denavit-Hartenberg Parameter

Gelenk	d	θ	a	α
Base	0	0	0	0
Joint 1	0	0	0	0
Joint 2	0	0	0	0
Joint 3	0	0	0	0
Joint 4	0	0	0	0
Joint 5	0	0	0	0
Joint 6	0	0	0	0

4.3.2 Arbeitsraum

4.4 Antrieb & Sensorik

MOTOREN

KRAFTÜBERTRAGUNG

ACHSENCODER

4.5 Systemarchitektur

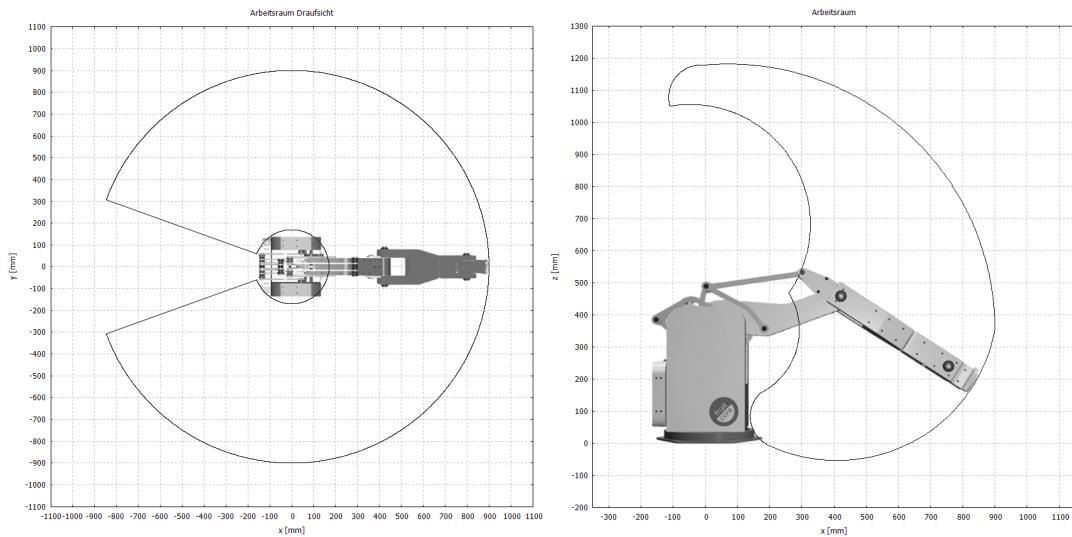


Abbildung 25

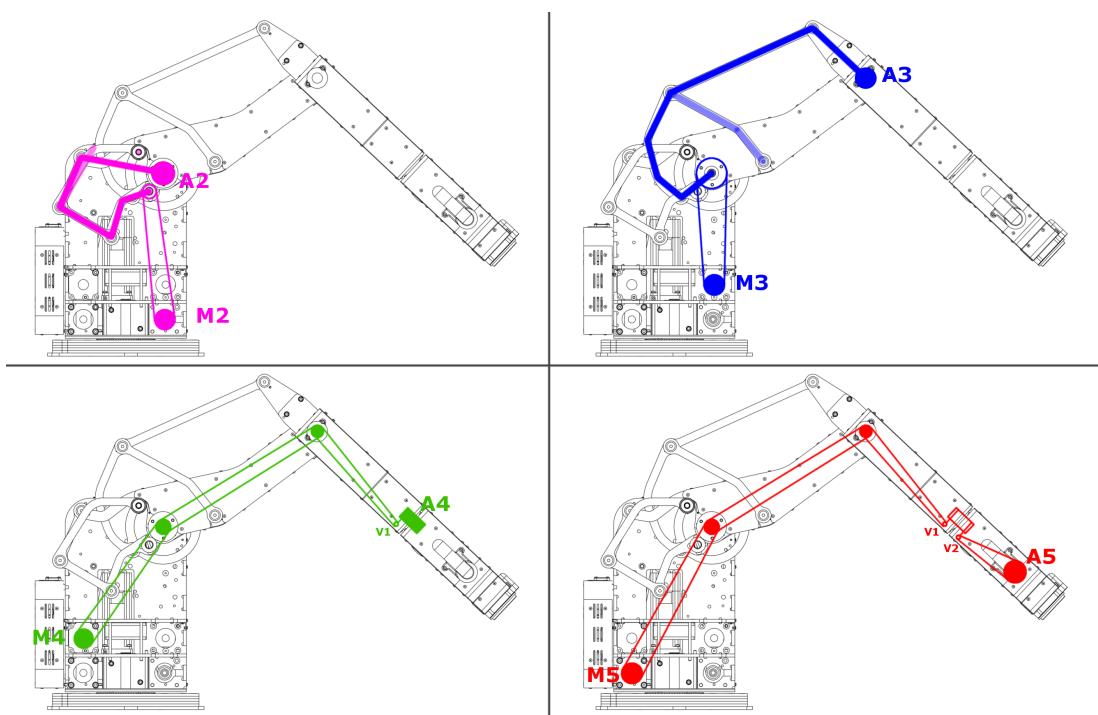


Abbildung 26: Schema der Antriebsübertragung

5 Ansatz und Methodik

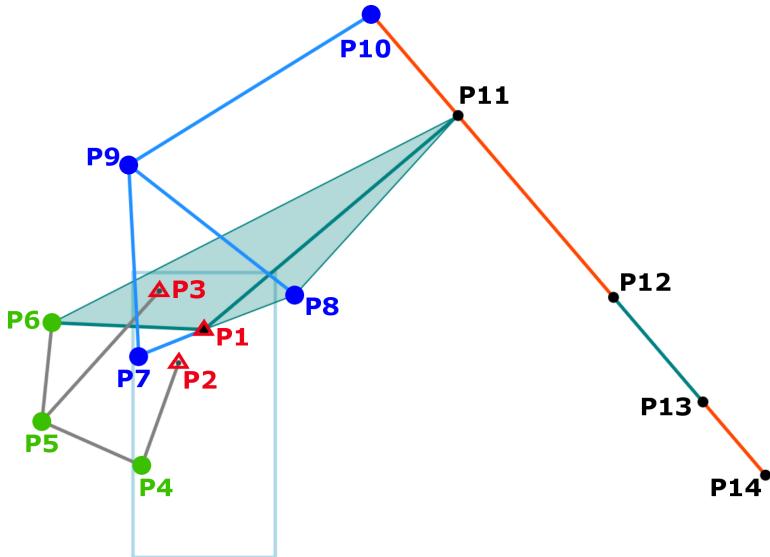


Abbildung 27: Punktmodell

5.1 Kinematische Analyse

5.1.1 Punkt/Stabmodell

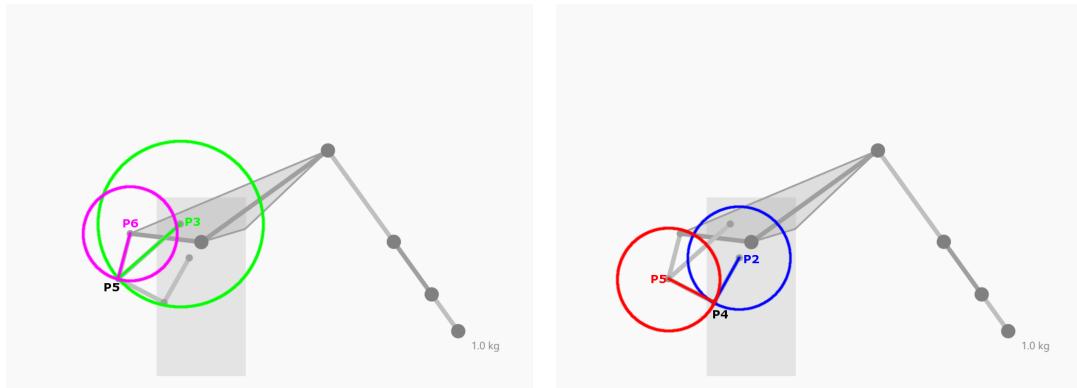
Achse 2

Für die Berechnung des Achswinkels θ_2 bzw. des Motorwinkel m_2 sind die vier Punkte der ersten Viergelenkskette von Bedeutung:

- **P1:** Fixpunkt des Sockels und Drehachse (Achswinkel θ_2)
- **P2:** Fixpunkt des Sockels und Antriebsachse des Motor 2, sowie Rotationspunkt des *Hebel*₂₋₄
- **P3:** Fixpunkt des Sockels und Rotationspunkt von *Hebel*₃₋₅
- **P4:** Viergelenkpunkt und Verbindungsstelle von *Hebel*₂₋₄ und *Hebel*₄₋₅
- **P5:** Viergelenkpunkt und Verbindungsstelle von *Hebel*₃₋₅ und *Hebel*₄₋₅
- **P6:** Kraftübertragungspunkt der Viergelenkskette auf Achse 2

Achse 3

- **P1:** Fixpunkt des Sockels und Antriebsachse des Motor 3
- **P11:** Rotationspunkt von Achse 3 (Achswinkel θ_2)
- **P8:** Fixpunkt im Armteil 2 (und somit fix relativ zu Achse 2)
- **P7:**
- **P9:**
- **P10:**



(a) Punkt 5

(b) Punkt 5

Abbildung 28: Punkte P4/P5

ACHSE 4 & ACHSE 5**BERECHNUNG DER PUNKTE IN MATLAB**

Listing 5.1: Circle intersect in Matlab

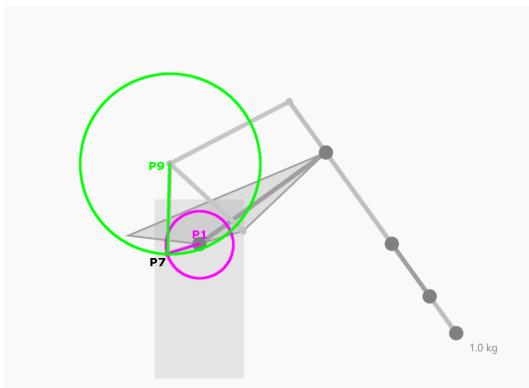
```

1 % calculates the intersection point of the two given circles, returns the
2 % point on the left side (if parameter is true) of the Vector P1 -> P2
3 function [X, Y] = circleIntersect(x1, y1, r1, x2, y2, r2, onleftSide)
4
5 [INT_X, INT_Y] = circcirc(x1, y1, r1, x2, y2, r2);
6
7 P1 = [INT_X(1), INT_Y(1)];
8 P2 = [INT_X(2), INT_Y(2)];
9
10 sign = (x2 - x1) * (P1(2) - y1) - (y2 - y1) * (P1(1) - x1);
11
12 if (sign)
13   if (onleftSide)
14     X = P1(1);
15     Y = P1(2);
16   else
17     X = P2(1);
18     Y = P2(2);
19   end
20 end
21
22 end

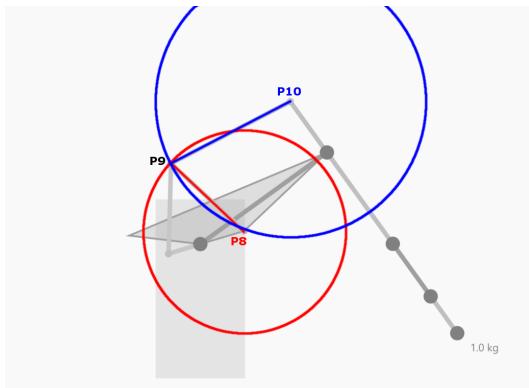
```

DYNAMISCHE ÜBERSETZUNGSFUNKTIONEN G2 UND G3**5.1.2 Analytische Inverse Kinematik**

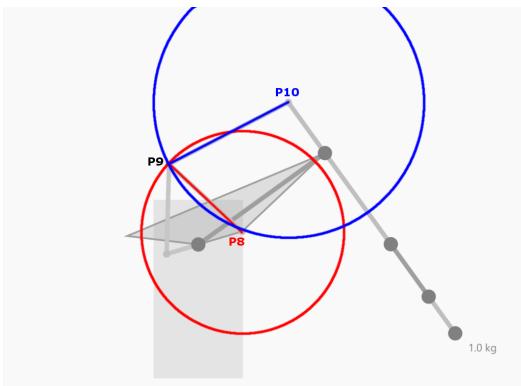
- Ikfast
- Begrenzte Konfiguration (Elbow always above)



(a) Punkt 7



(b) Punkt 9



(c) Punkt 9

Abbildung 29: Punkte P7/P8/P9

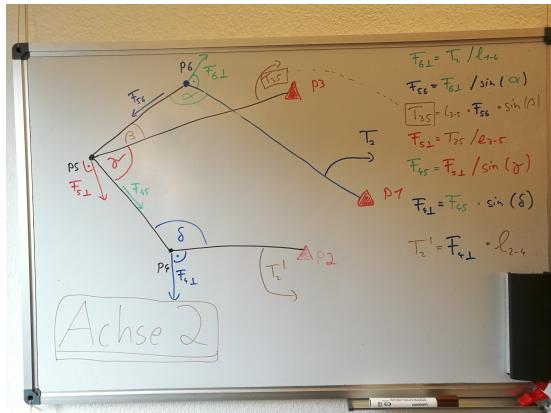


Abbildung 30: Torque 2

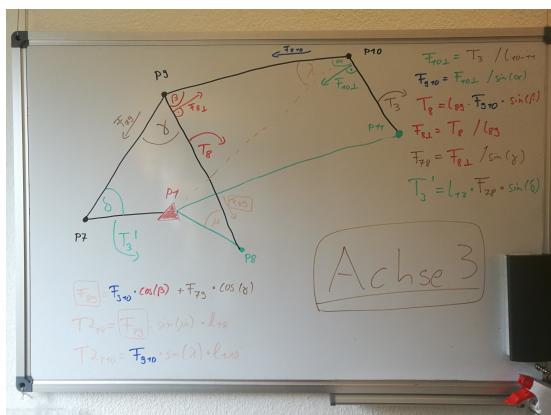


Abbildung 31: Torque 2

5.1.3 Drehmomente

ACHSE 2 / VIERGELENKSKETTE 1

Lore ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam

$$t_2(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 2} \quad (5.1)$$

Gleichung 5.9: Equation m2

ACHSE 3 / VIERGELENKSKETTE 2

Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam nonumy eirmod tempor invidunt ut labore et dolore magna aliquyam erat, sed diam voluptua. At vero eos et accusam et justo duo dolores et ea rebum. Stet clita kasd gubergren, no sea takimata sanctus est Lorem ipsum dolor sit amet. Lorem ipsum dolor sit amet, consetetur sadipscing elitr, sed diam

$$t_3(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 3} \quad (5.2)$$

Gleichung 5.10: Equation m3

ENTLASTUNG A2 DURCH A3

5.1.4 Hebelkräfte

5.1.5 Beschleunigungen & Trägheitsmomente

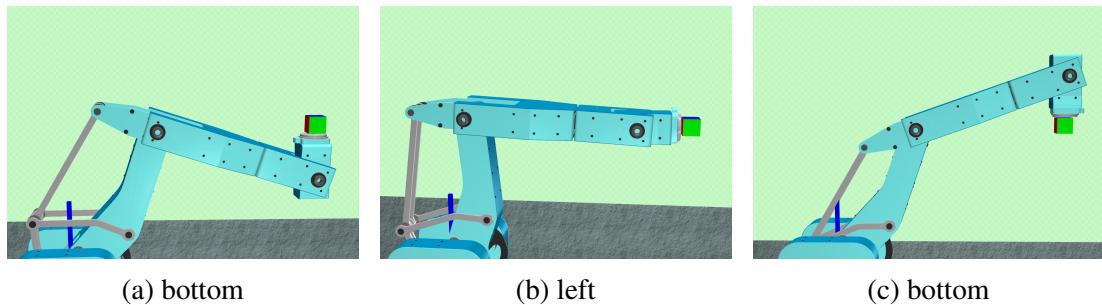


Abbildung 32: Box

5.1.6 Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark

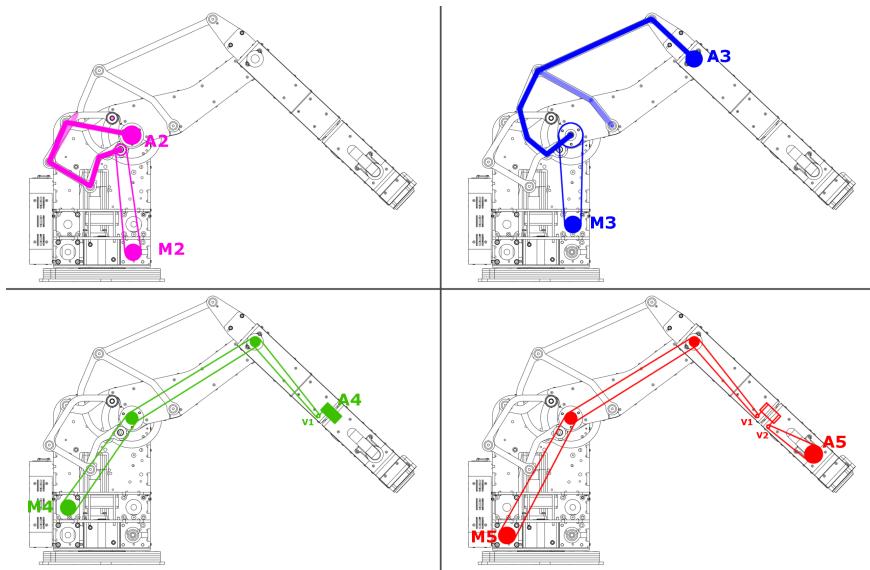


Abbildung 33: Abrollen der Achsen

5.2 Steuerung des Roboters

5.2.1 Abrollen der Achsen

$$m_1(\theta_1) = \theta_1 * GEAR_1 \quad (5.3)$$

Gleichung 5.3: Steuerung des Motor 1

Gleichung 5.3 zeigt die Steuerung $m1$ des Motors 1 die alleine von der Achsstellung θ_1 der dazugehörigen Achse 1 sowie des Übersetzungsverhältnis $GEAR_1$ abhängig ist.

$$m_2(\theta_2) = g2(\theta_2) * GEAR_2 \quad (5.4)$$

Gleichung 5.4: Steuerung des Motor 2

Die Steuerung der Antriebseinheit 2 ist ebenfalls nur von der zugehörigen Achsstellung und Übersetzungsverhältnis abhängig. Jedoch ist die Beziehung zwischen Achs- und Motorwinkel durch die Funktion $g2()$ ausgedrückt, welche das dynamische Übersetzungsverhältnis der 1. Viergelenkskette beschreibt.

$$m_3(\theta_2, \theta_3) = (g3(\theta_3) + \theta_2) * GEAR_3 \quad (5.5)$$

Gleichung 5.5: Steuerung des Motor 3

Die Stellung des Motor 3 ist von zwei Achsstellungen abhängig; Achswinkel θ_2 und Achswinkel θ_3 . Dabei ist die Beziehung zwischen Achse und Motor 3 wiederum durch eine nichtlineare Funktion $g3()$ ausgedrückt, welche das dynamische Übersetzungsverhältnis der 2. Viergelenkskette beschreibt. Da die sich die Antriebswelle auf der Hauptachse 2 befindet muss der Motor 3 sich ebenfalls um jeden Winkel θ_2 drehen um den Achswinkel θ_3 konstant zu halten.

$$m_4(\theta_2, \theta_3, \theta_4) = (\theta_4 + \theta_3 + \theta_2) * GEAR_4 \quad (5.6)$$

Gleichung 5.6: Steuerung des Motor 4

Gleichung 5.6 zeigt die Abhängigkeit der Stellung des Motors 4 von den Achswinkel θ_4 und θ_3 und θ_2 . Dies ist durch Lage des Motors im Sockel und der deswegen benötigen Riemenvorführung und Abrollen über die Achse 2 und Achse 3 notwendig. Somit Rollen die Riemen die zur Steuerung der 4. Achse zuständig sind über die vorherigen Achsen ab und müssen dementsprechend die Achswinkeländerungen dieser Achsen kompensieren.

$$m_5(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) = (\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2) * GEAR_5 \quad (5.7)$$

Gleichung 5.7: Steuerung des Motor 5

Auch Motor 5 befindet sich im Sockel. Analog zur vorherigen Motorgleichung muss auch Motor 5 die Achswinkeländerungen der Achse 2, Achse 3 und zusätzlich Achse 4 kompensieren. Somit ist wie in Gleichung 5.7 zu sehen die Motorstellung von vier Achswinkeln $\theta_4, \theta_3, \theta_2$ (wegen des Abrollens der Riemen) sowie θ_5 für die eigentliche Achsstellung abhängig.

$$m_6(\theta_6) = \theta_6 * GEAR_6 \quad (5.8)$$

Gleichung 5.8: Steuerung des Motor 6

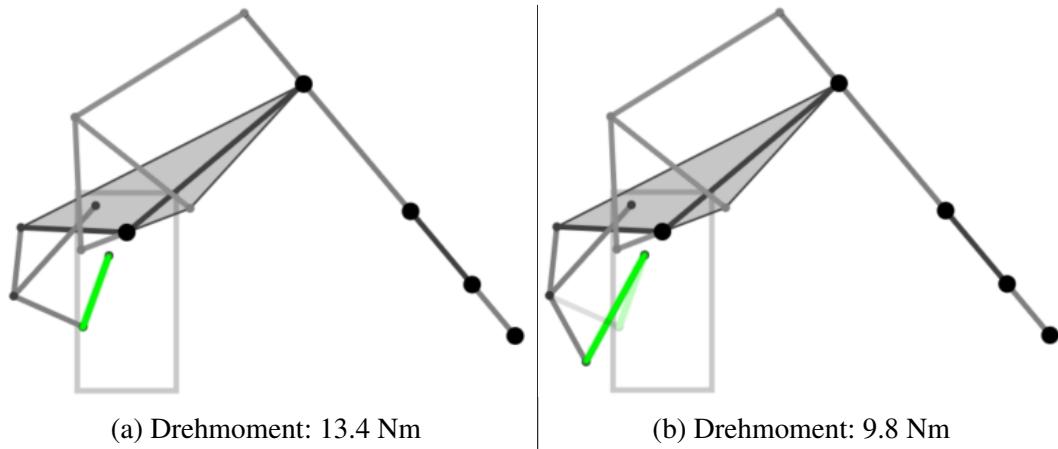
Da die Achse 6 direkt von Motor 6 angetrieben wird ist die Motorstellung auch nur von Achstellung θ_6 sowie der zugehörigen Übersetzung abhängig.

VORSTEUERUNG**5.2.2 Regelung und Vorsteuerung****REGELUNG**

- Encoder

VORSTEUERUNG

- Gamma2/3 Faktor

Abbildung 34: Verschiedene Hebellängen (*Hebel₂₋₄*)

5.3 Optimierung der Kinematik

Die Viergelenksketten des Roboters sind durch verschiedene Parameter, namentlich die Fixpunkte der Kurbel und Schwinge sowie der Hebellängen, bestimmt. Diese Parameter wurden anhand von Simulationen und FEM-Analysen mithilfe eines CAD-Programmes gewählt.

Dabei wurde darauf geachtet, dass in allen erreichbaren Konfigurationen des Roboters ($\theta_{2min} - \theta_{2max}$ und $\theta_{3min} - \theta_{3max}$) das maximal benötigte Drehmoment an den Antriebsachsen möglichst gering ausfällt. Dies wird so gewählt damit die Antriebsleistung des Motors möglich gleichmäßig im Arbeitsbereich verteilt ist und wenig hohe Spitzen enthält.

$$t_2(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 2} \quad (5.9)$$

Gleichung 5.9: Statischer Drehmoment an Antriebsachse 2

$$t_3(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 3} \quad (5.10)$$

Gleichung 5.10: Statischer Drehmoment an Antriebsachse 3

Gleichung (5.9) und Gleichung (5.9) beschreiben die Funktion, welche die benötigten Drehmomente der Antriebsachsen im Bezug auf die vorgegebenen Achswinkel ausdrückt.

Die Länge der Hebel und die Lage der Fixpunkte unterliegen einigen Beschränkungen (hauptsächlich Konstruktive Einschränkungen wie das Überscheiden von Hebeln), können jedoch in einem gewissen Maße frei gewählt werden. Für die bisherige Hebelkinematik wurden diese Parameter wie bereits erwähnt durch CAD-Studien empirisch

festgelegt.

Doch bereits kleine Änderungen in der Länge der Hebel hat große Auswirkung auf die Drehmomente der Motoren. Abbildung 39 zeigt etwa eine Änderung in der Länge des *Hebels₂₋₄* und die dazugehörigen statischen Drehmomente in der Achse 2.

KINEMATISCHES HEBELMODELL

Die Beschreibung des Kinematischen Hebelmodells erfolgt über die Längen der Hebel, sowie die Koordinaten den Fixpunkte. Diese ergeben somit, wie in Tabelle 2 zu sehen ist, die veränderlichen Parameter der Kinematik. Mit neun Hebelen und den X- und Z-Koordinaten der drei Fixpunkte ergibt sich somit eine 15-dimensionale Funktion. Eine eindeutige Beschreibung aller dieser Parameter wird im Folgenden **Hebelkonfiguration** genannt.

Tabelle 2: Dimensionen

Hebellängen	Fixpunkte
Hebel 2-4	P2 (X-Achse)
Hebel 3-5	P2 (Z-Achse)
Hebel 4-5	P3 (X-Achse)
Hebel 5-6	P3 (Z-Achse)
Hebel 8-9	P6 (X-Achse)
Hebel 9-10	P6 (Z-Achse)
Hebel 10-11	
Hebel 1-7	
Hebel 6-8	

5.3.1 Scoreing-Funktionen

HEBELKINMATIK-SCORE

Um die kinematischen Eigenschaften einer bestimmten Hebelkonfiguration beurteilen zu können wird hier eine Scoring-Funktion eingeführt.

$$f : x_{1 \dots n} \mapsto s \quad (5.11)$$

Gleichung 5.11: Hebelkinematik Scoring-Funktion

Gleichung (5.11) zeigt die Scoring Funktion f , welche als Eingabe die n -Dimensionale (in unserem Beispiel 15-Dimensionale) Hebelkonfiguration entgegen nimmt und eine reelle Zahl s als Score ausgibt.

WORKSPACE-SCORE

Wie zuvor schon erwähnt ist ein zentrales Anliegen bei der Auslegung der Hebelkonfiguration die Ermittlung des maximalen Drehmoments in verschiedenen Roboterstellungen. Daher muss die Scoring-Funktion über alle Roboterstellungen iterieren um so die schlechte Stellung bzw. den maximalen Score zu finden. Dabei müssen nur die Achswinkel der betroffenen Achsen 2 und 3 berücksichtigt werden.

$$s_{maxtorque} = \max_{\theta_{2min} \leq \theta_2 \leq \theta_{2max}} \max_{\theta_{3min} \leq \theta_3 \leq \theta_{3max}} \{ t_2(\theta_2, \theta_3), t_3(\theta_2, \theta_3) \} \quad (5.12)$$

Gleichung 5.12: Scoring-Funktion des maximalen Drehmoments

Gleichung (5.12) zeigt etwa die Scoring-Funktion die für die Ermittlung des maximalen Drehmoments zuständig ist. Hiasdf Listing 5.3 zeigt die Scoring-Funktion außerdem noch in Java-Pseudocode. In Abbildung ?? ist die Scoring-Funktion visualisiert. Dabei ist zu sehen, das jede Roboterstellung getestet wird und das Maximum als Score und Ausgabe der Funktion gewählt wird.

Listing 5.2: Scoring Funktion in Java Pseudocode

```

1  double maxscore;
2
3  for (double j3 = min_j3; j3 <= max_j3; j3 += STEPSIZE) {
4      for (double j2 = min_j2; j2 <= max_j2; j2 += STEPSIZE) {
5
6          double configScore = score(j2, j3);
7          maxscore = Math.max(configScore, maxscore);
8
9      }
10 }
```

PARTIELLE ABLEITUNGEN

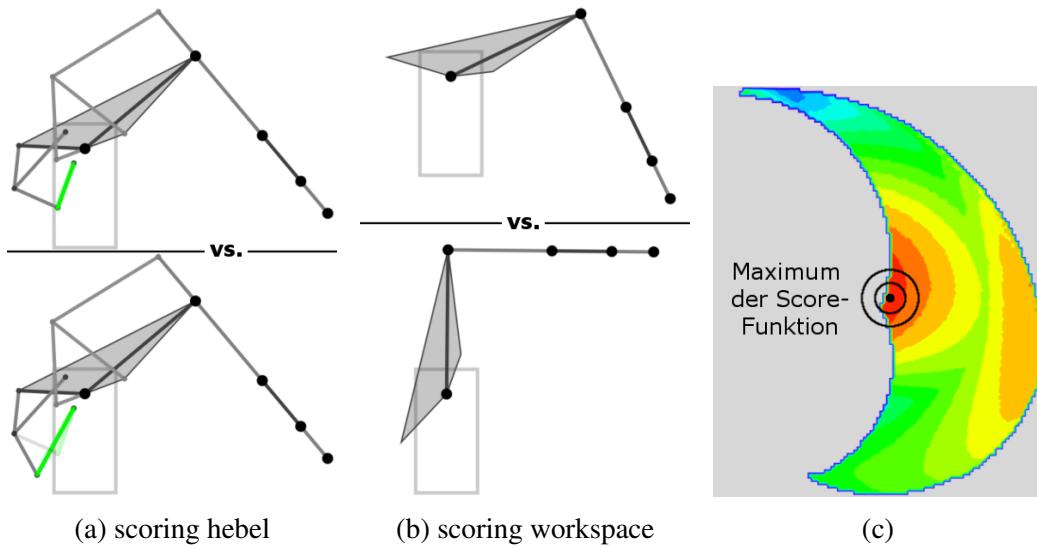


Abbildung 35: Scoring Funktions

Listing 5.3: Gradient in Java Pseudocode

```
1 // compute the score of the baseline kinematics
2 Kinematic baseKinematic;
3 double basescore = score(baseKinematic);
4
5 // loop over all parameter in the parameter set to build the gradient
6 Gradient gradient;
7 for (String parameter : Gradient.PARAMETER_SET) {
8
9     // get a new kinematics with just one parameter changed by dx
10    Kinematic deltaKinematic = getKinematicDelta(parameter, dx);
11    // compute the score of the new (delta) kinematics
12    double deltaScore = score(deltaKinematic);
13
14    // compute the partial derivative simply by difference quotient
15    double partialDerivative = (deltaScore - basescore) / dx;
16
17    // add the partialDerivative to the gradient
18    gradient.set(parameter, partialDerivative);
19 }
20
21 // normalize the gradient
22 gradient = gradient.normalize();
```

$$\text{grad}(f) = \nabla f = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5.13)$$

Gleichung 5.13: Definition Gradient

6 Experimente

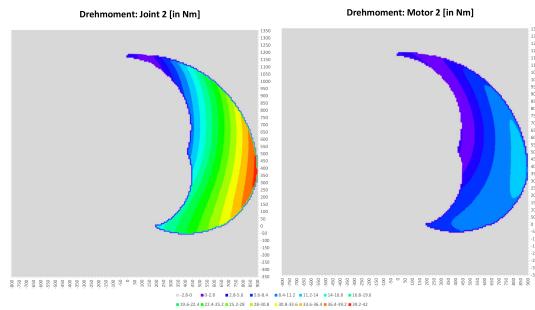


Abbildung 36: Vergleich Drehmoment Achse 2 zu Motor 2

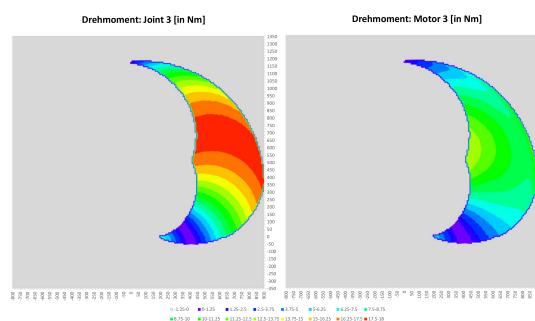


Abbildung 37: Vergleich Drehmoment Achse 3 zu Motor 3

6.1 Kinematische Analyse

6.1.1 Drehmomente

Achse 2

- Maximal wenn Achse 3 ausgestreckt ist.
- Maximal weit weg von Drehpunkt a2

Achse 3

- Maximal wenn Achse 90 deg relativ zu globalen Koordinatensystem

6.1.2 Hebelkräfte

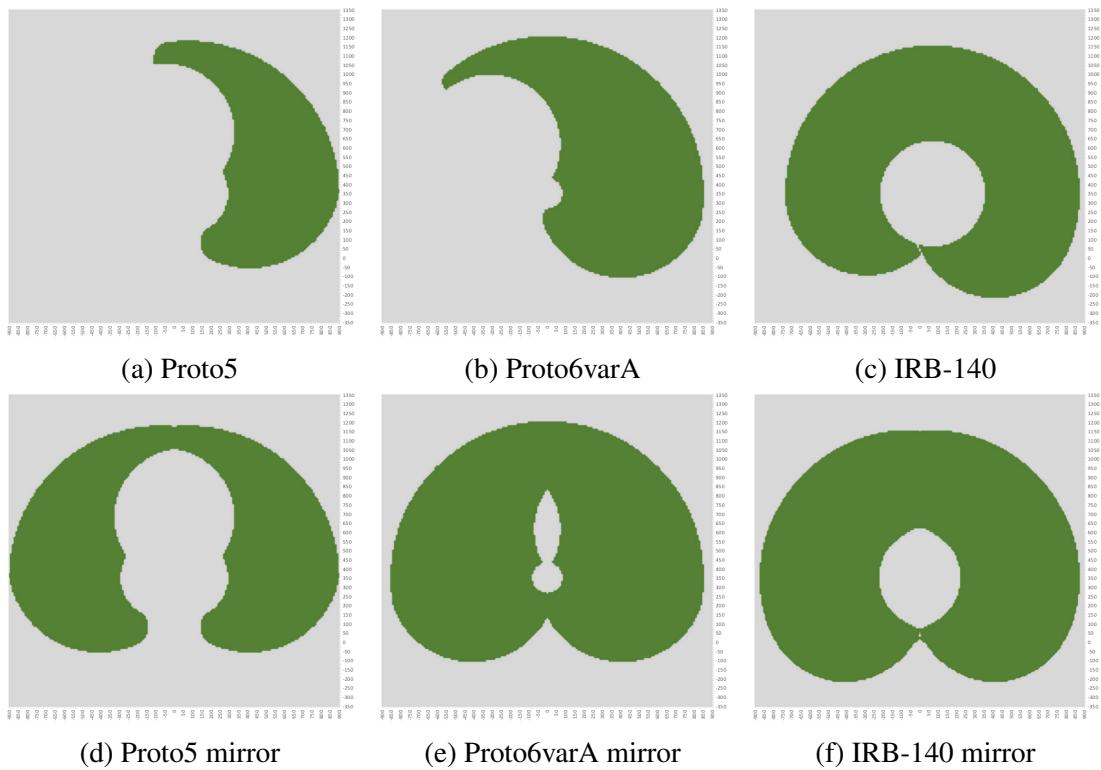


Abbildung 38: Workspace

6.1.3 Workspace

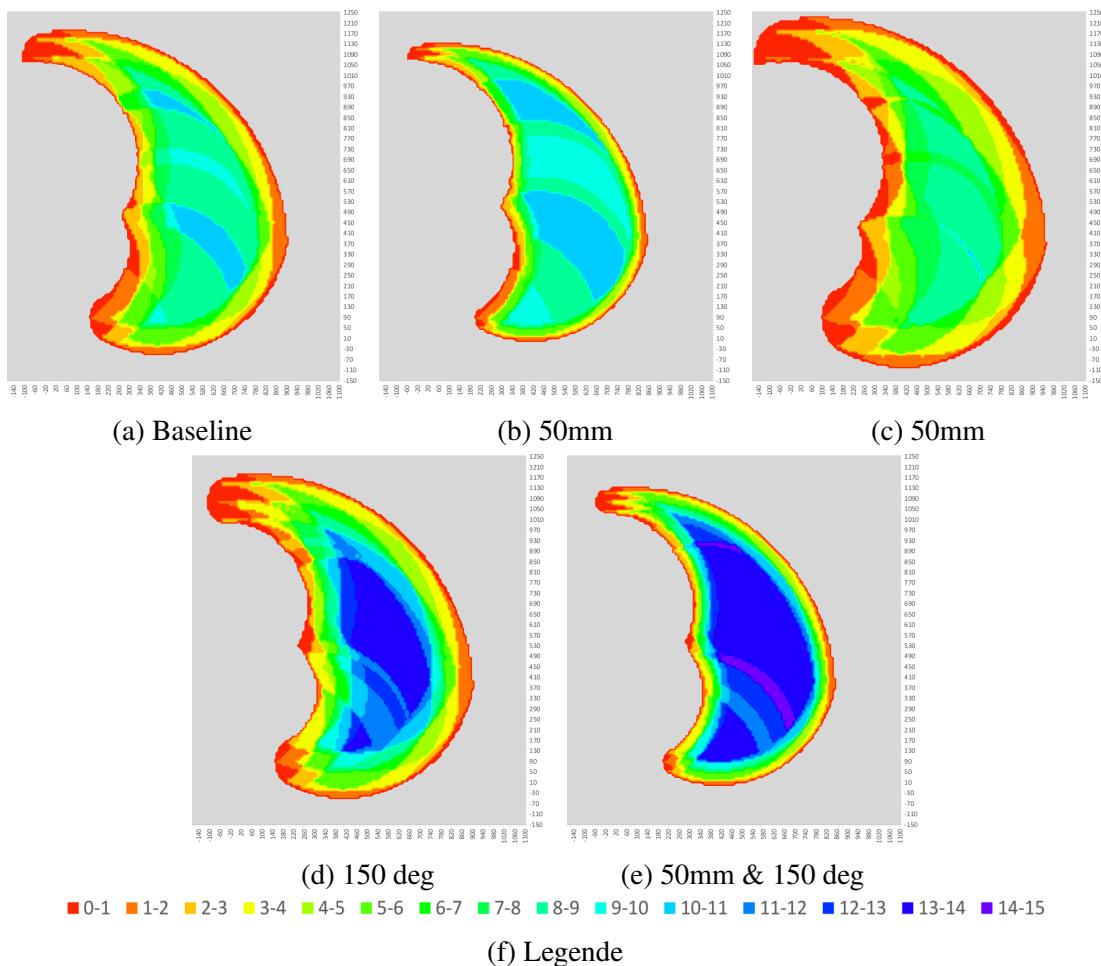


Abbildung 39: Verschiedene Hebellängen ($Hebel_{2-4}$)

6.1.4 Beweglichkeit / Reachability

6.2 Steuerung des Roboters

MIT / OHNE GAMMA-FAKTOR

D.h. wie würde sich der Roboter bewegen, wenn die Kinematik "nicht richtig" wäre.
Zusätzlich auch das Abrollen von Achse 4 und 5 problematisch.

6.2.1 Regelung

- Encoder
- Einfacher P-Regler
- Input: Position
- Output: Velocity

6.2.2 Vorsteuerung

- Berechnung Position/Velocity/Accel
- Sollwert-Interpolation (Microcontroller)
- Getriebe-Faktor

MIT / OHNE VORSTEUERUNG

EINZELNE ACHSEN

6.2.3 Achs-kompensation

- Gamma 2 / 3
- Abrollen 3-4-5

6.2.4 Bewegungsprofile

- Vollsynchrong vs Asynchron, synchron
- Ramp vs Sinoid

VERSCHIEDENE BEWEGUNGSPROFILE

LINEARE BEWEGUNG

TRAGLAST

6.3 Optimierung der Kinematik

7 Fazit

Anhang A Erster Anhang

Section

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: IRB 140	2
Abbildung 2: Gelenk	2
Abbildung 3: 6-Axis-Roboter Schema	2
Abbildung 4: Robotermodell Horst (Model 3)	3
Abbildung 5: Viergelenkskette	3
Abbildung 6: Eulerwinkel (Z-X'-Z'')	9
Abbildung 7:	11
Abbildung 8:	11
Abbildung 9: Verschiebung des TCP durch Endeffektor	11
Abbildung 10: Schematische Darstellung der direkten Kinematik	11
Abbildung 11: Schematische Darstellung der inversen Kinematik	12
Abbildung 12: Mehrdeutigkeit bei Zwei-Achs-Roboter	13
Abbildung 13: Mehrdeutigkeit und Singularität	13
Abbildung 14:	16
Abbildung 15:	16
Abbildung 16: Lineares bzw. Rampenprofil	16
Abbildung 17: Sinoidenprofil	16
Abbildung 18: Asynchrone PTP: Achsen erreichen die Zielposition in verschiedenen Zeiten	18
Abbildung 19: Modell 3	20
Abbildung 20: Konstruktionszeichnung neben Strichmodell von Prototyp 5 . .	21
Abbildung 21: Viergelenkskette der Achse 2	21
Abbildung 22: Viergelenkskette der Achse 3	22
Abbildung 23: Dynamische Übersetzung der Achsen 2 und 3	23
Abbildung 24: Summe der Übersetzung von Achse 2 und Achse 3	23

Abbildung 25:	25
Abbildung 26: Schema der Antriebsübertragung	25
Abbildung 27: Punktmodell	28
Abbildung 28: Punkte P4/P5	29
Abbildung 29: Punkte P7/P8/P9	30
Abbildung 30: Torque 2	31
Abbildung 31: Torque 2	31
Abbildung 32: Box	35
Abbildung 33: Abrollen der Achsen	36
Abbildung 34: Verschiedene Hebellängen (<i>Hebel₂₋₄</i>)	39
Abbildung 35: Scoring Funktions	42
Abbildung 36: Vergleich Drehmoment Achse 2 zu Motor 2	44
Abbildung 37: Vergleich Drehmoment Achse 3 zu Motor 3	44
Abbildung 38: Workspace	45
Abbildung 39: Verschiedene Hebellängen (<i>Hebel₂₋₄</i>)	46

Literaturverzeichnis

- [1] Wikipedia, “Platzhalter Wikipedia.” <https://de.wikipedia.org>, 2017.
- [2] W. Weber, *Industrieroboter - Methoden der Steuerung und Regelung*. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
- [3] Klaus Wüst, “Grundalgen der Robotik,” 2014.

Eidesstattliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorstehende Arbeit selbständig verfasst und hierzu keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe. Alle Stellen der Arbeit die wörtlich oder sinngemäß aus fremden Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung vorgelegt oder an anderer Stelle veröffentlicht.

Ich bin mir bewusst, dass eine falsche Erklärung rechtliche Folgen haben kann.

Dingeldorf, den 25. November 2017, Tim Schmiedl