



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 : 30. 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	20
4.2	Viergelenksketten	21
4.2.1	1. Viergelenkskette (Achse 2)	21
4.2.2	2. Viergelenkskette (Achse 3)	21
4.2.3	Dynamische Übersetzung	23
4.3	Kinematische Parameter	25
4.3.1	Denavit-Hartenberg Parameter	25
4.3.2	Arbeitsraum	26
4.4	Antrieb & Sensorik	27
4.5	Systemarchitektur	27
5	Ansatz und Methodik	29
5.1	Kinematische Analyse	30
5.1.1	Punkt-Stabmodell	30
5.1.2	Gamma-Funktionen	33
5.1.3	Analytische Inverse Kinematik	35
5.1.4	Drehmomente	36
5.1.5	Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark	38
5.2	Steuerung des Roboters	39
5.2.1	Abrollen der Achsen	39
5.2.2	Regelung und Vorsteuerung	41
5.3	Optimierung der Kinematik	43
5.3.1	Scoring-Funktionen	45
6	Experimente	47
6.1	Kinematische Analyse	48
6.1.1	Drehmomente	48
6.1.2	Workspace	50
6.1.3	Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark	51

6.2 Steuerung des Roboters	53
6.2.1 Einfluss Gamma-Faktor	54
6.2.2 Steuerung & Regelung	55
6.2.3 Bewegungsprofile	56
6.3 Optimierung der Kinematik	57
7 Fazit	59
 Anhang	 60
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

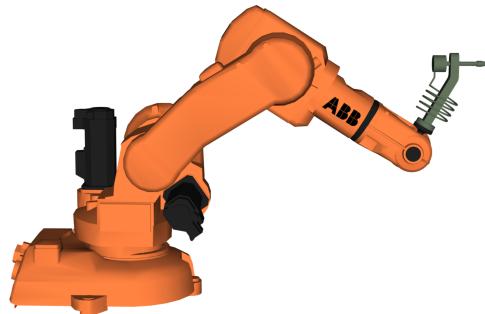


Abbildung 1: IRB 140

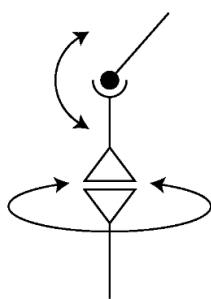


Abbildung 2: Gelenk

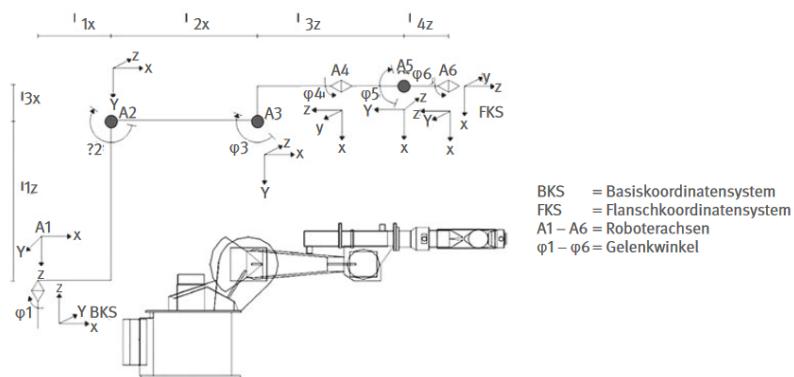


Abbildung 3: 6-Axis-Roboter Schema

1.2 Robotmodell "HORST"

Fruitcore

Viergelenkskette

Leichtbau

dynamische Übersetzung, Kräfte

Parallel, Gamma2 / Gamma3



Abbildung 4: Robotermodell Horst (Model 3)

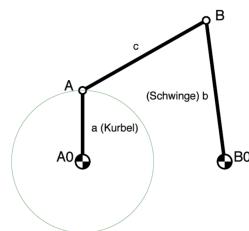


Abbildung 5: Viergelenkskette

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:

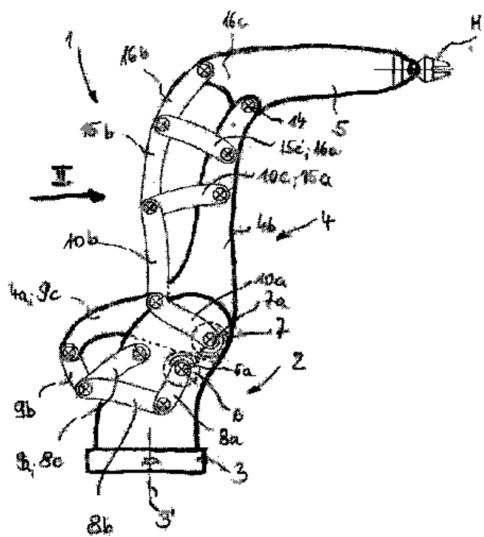
- Industrieroboter - Methoden zur Steuerung und Regelung
-
-

Patent:

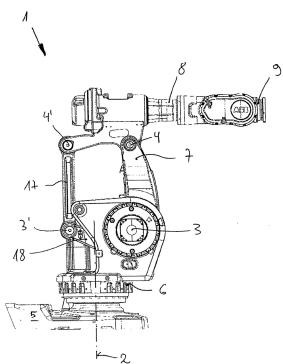
- [1]
- [2]
- [3]
- [4]
- [5]
-

Paper:

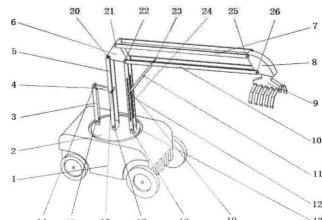
- [6]
-
-
-



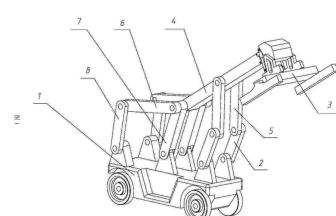
(a) Ohne Gamma2-Faktor



(b) Patent Ehrenleitner



(c) Patent Chinese May



(d) Patent Chinese November

Abbildung 6: Steuerung mit und ohne Gamma-Faktoren

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. [7]

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''

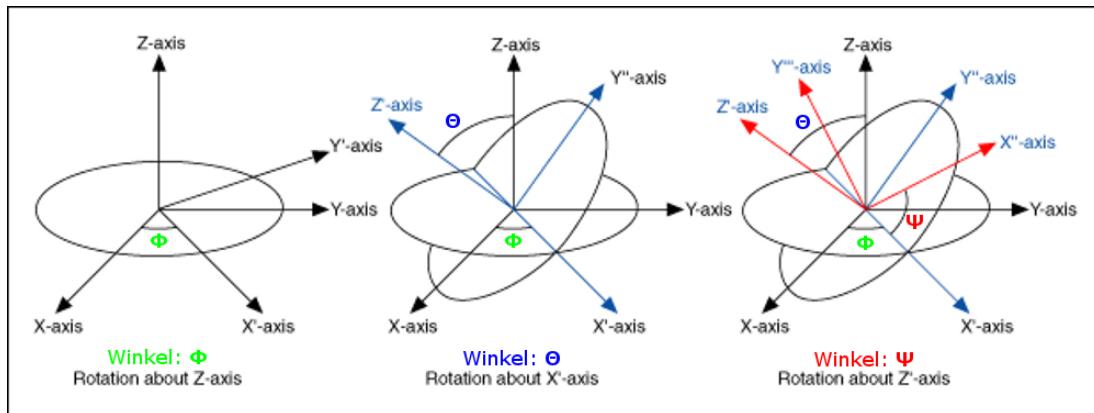


Abbildung 7: Eulerwinkel (Z-X'-Z'')

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. [8]

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. [7]

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.

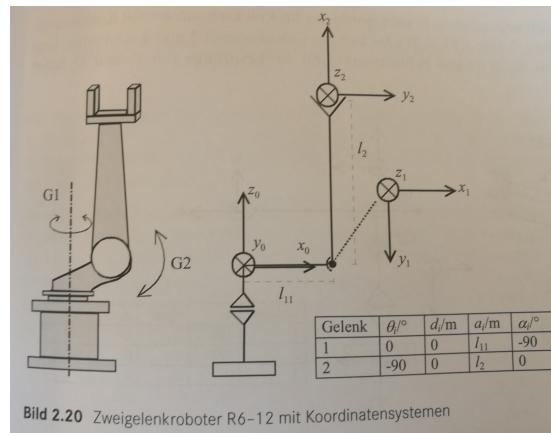


Abbildung 8

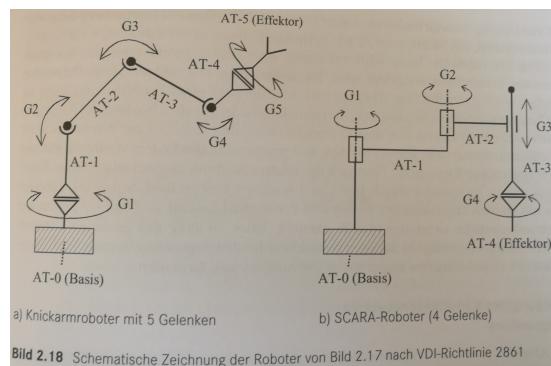


Abbildung 9

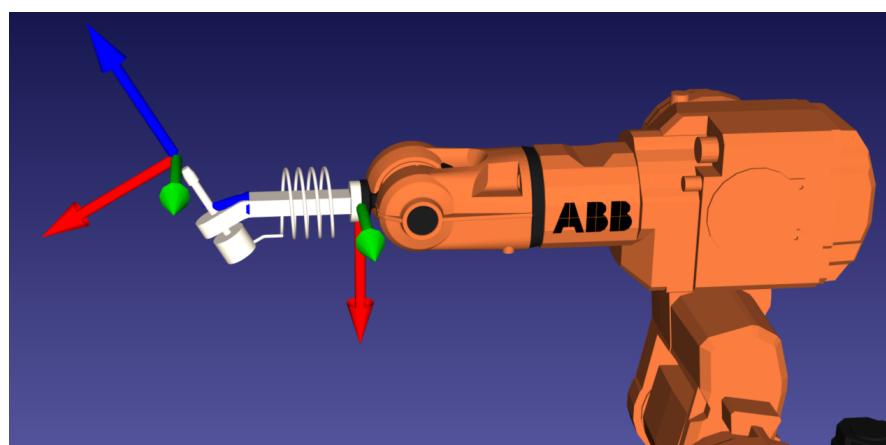


Abbildung 10: Verschiebung des TCP durch Endeffektor



Abbildung 11: Schematische Darstellung der direkten Kinematik



Abbildung 12: Schematische Darstellung der inversen Kinematik

MEHRDEUTIGKEITEN

Abbildung 13 zeigt ein einfaches Beispiel einer Mehrdeutigkeit bei einem Roboter mit zwei Gelenken. Die kartesischen Koordinaten entsprechen beiden Lösungen für die Gelenkwinkel.[8] 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 14) den gleichen Effekt wie die Rotation der nachfolgenden Drehachse (Achse 6 in Abbildung 14). 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:

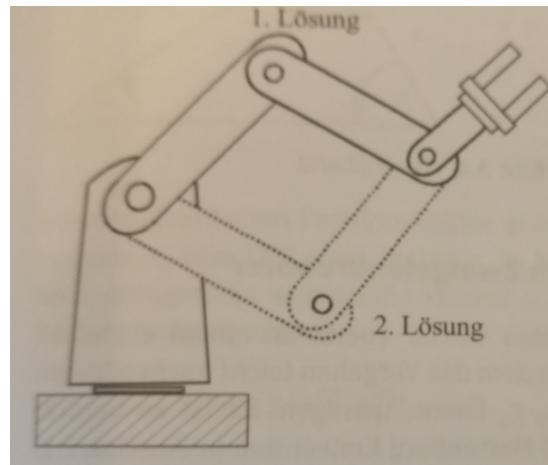


Abbildung 13: Mehrdeutigkeit bei Zwei-Achs-Roboter

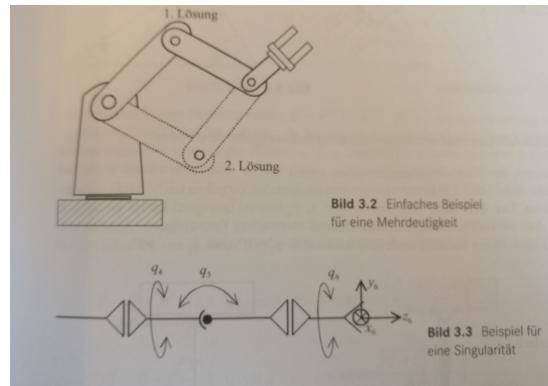


Abbildung 14: Mehrdeutigkeit und Singularität

- **Algebraische Methoden:** Durch sukzessive Invertierung der Denavit-Hartenberg-Transformationsmatrizen und damit Lösung des folgenden Gleichungssystems können nach und nach die einzelnen Gelenkwinkelvektorkomponenten berechnet werden.[7]
- **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.[7] 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.

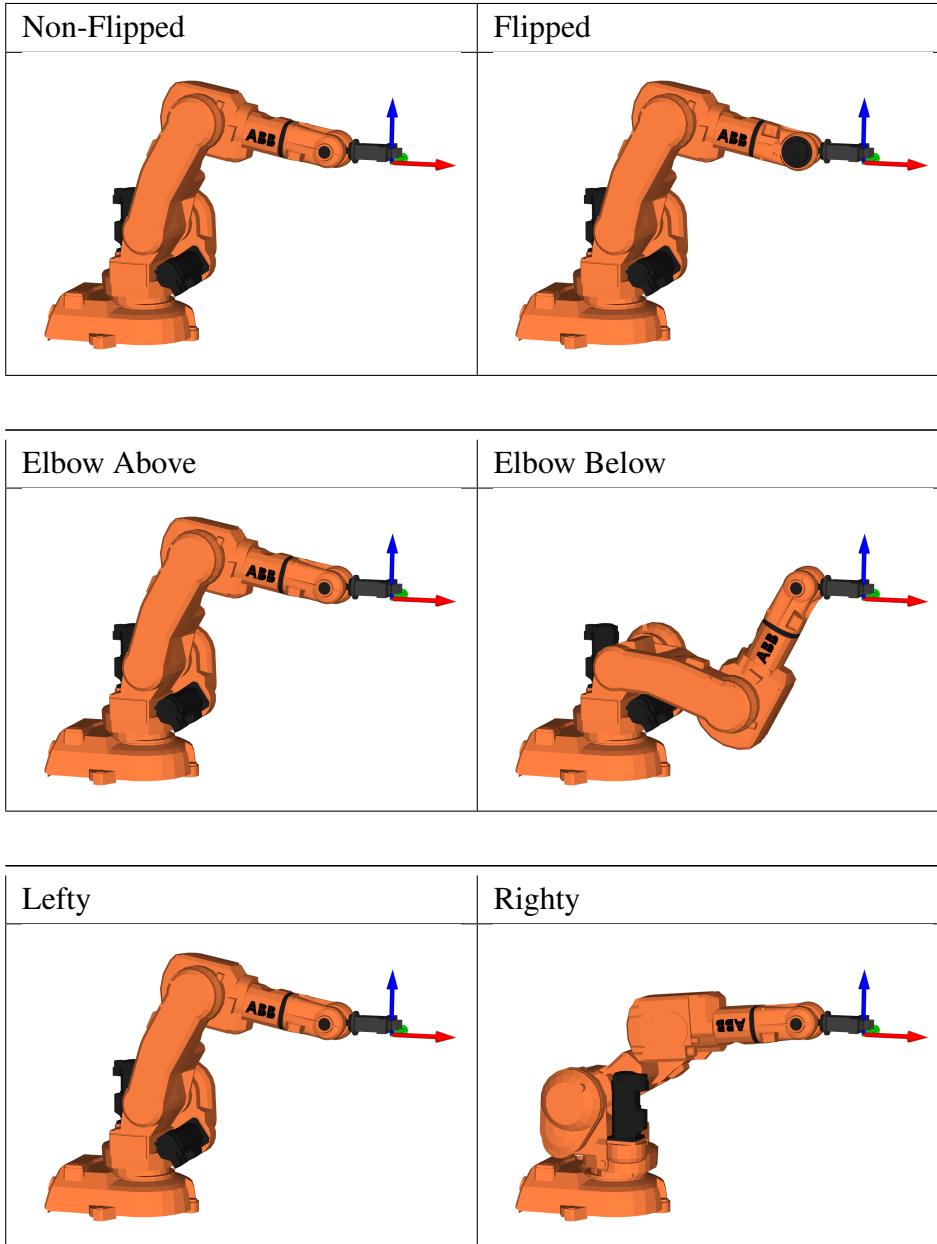
Geometrisch anhand 2-Axis-Roboter

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.[9]

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 17 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.

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

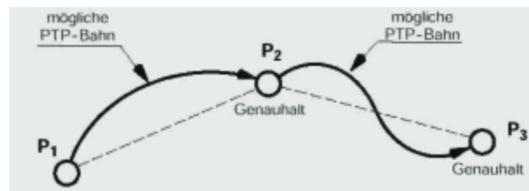


Abbildung 15

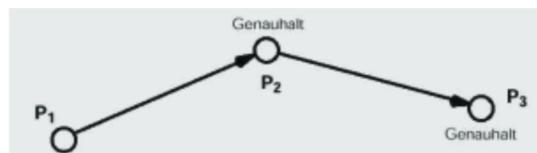


Abbildung 16

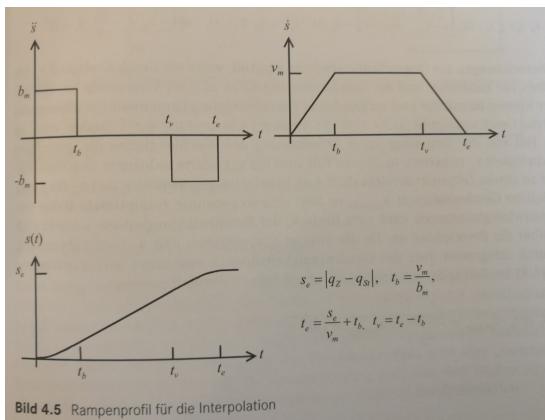


Abbildung 17: Lineares bzw. Rampenprofil

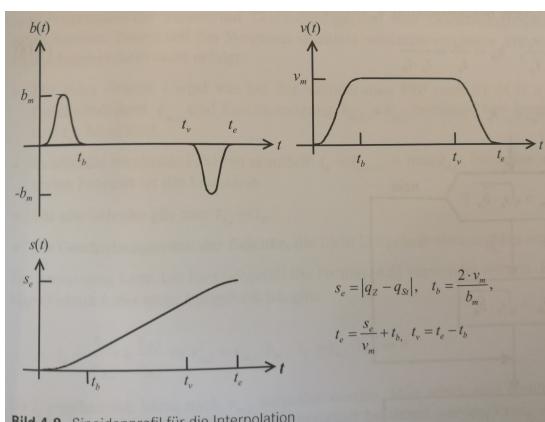


Abbildung 18: Sinoidenprofil

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 19 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

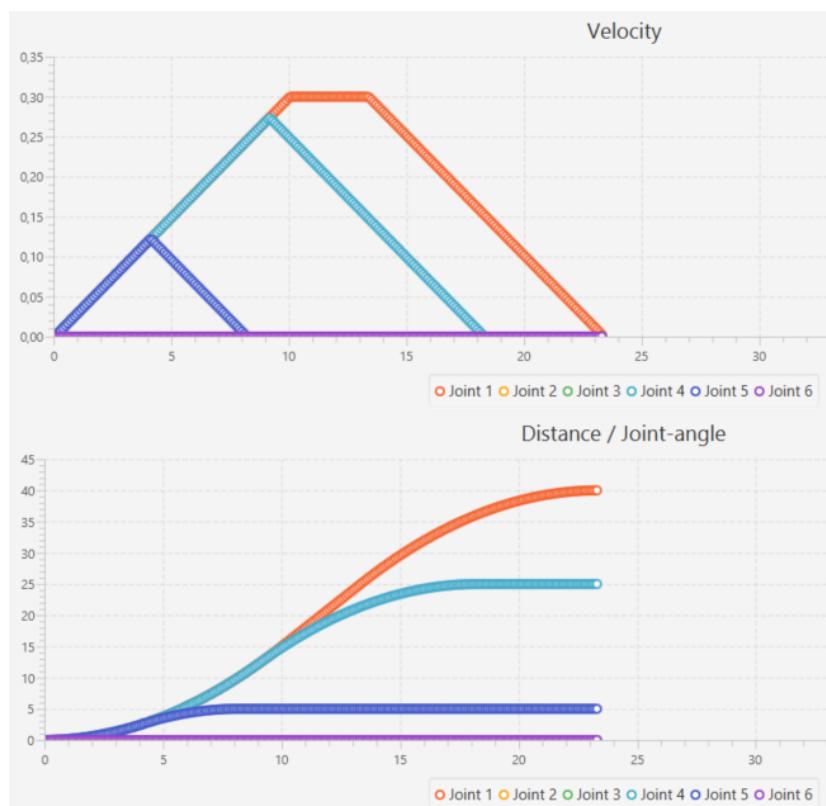


Abbildung 19: Asynchrone PTP: Achsen erreichen die Zielposition in verschiedenen Zeiten

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 ungefähren Gesamtpreis von 10-15.000 € deutlich preisgünstiger als vergleichbare Industrieroboter.



Abbildung 20: Modell 3

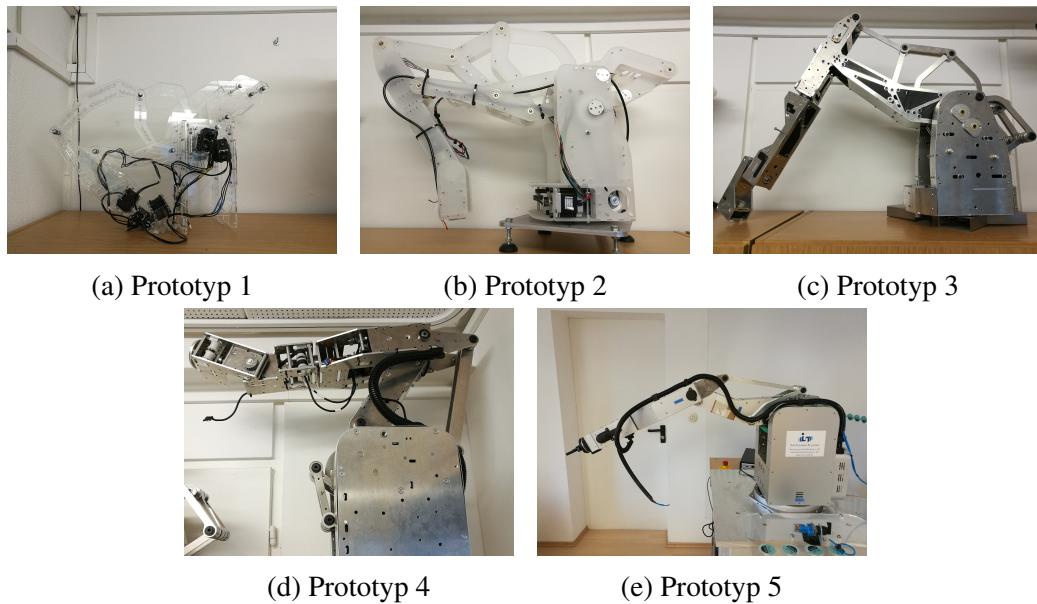


Abbildung 21: Versionshistorie der Prototypen des Roboter "HORST"

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.

Abbildung 21 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.

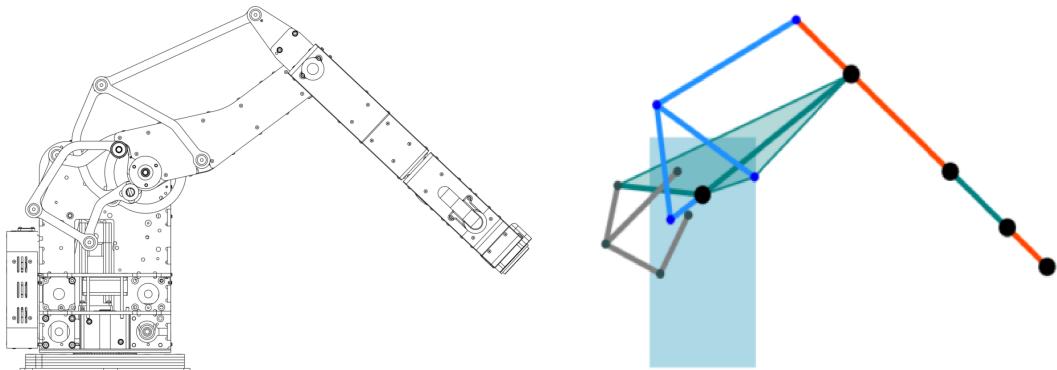


Abbildung 22: Konstruktionszeichnung neben Strichmodell von Prototyp 5

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 22 ein Struktur- bzw. Strichmodell des Roboters eingeführt.

4.2.1 1. Viergelenkskette (Achse 2)

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

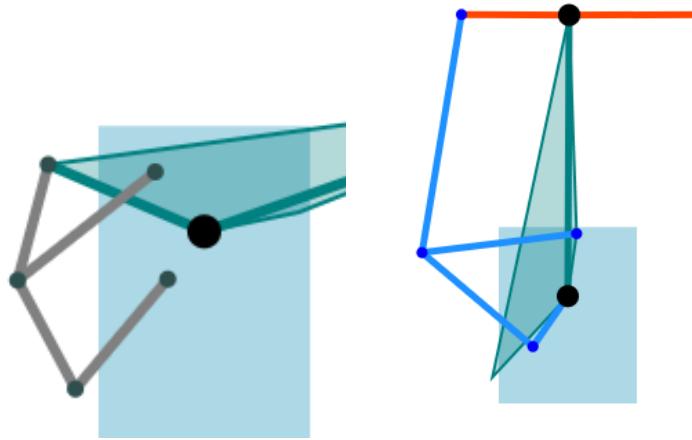
Dabei sind Punkt P1 und P3 fest, diese Punkte sind die Ausgangspunkte der beweglichen Hebel H_{2-4} und H_{3-5} . Hebel H_{4-5} schließt die Kette. Der Punkt P6 ist fest mit dem Armteil 2 verbunden und ist somit der Kraftübertragungspunkt des Hebels H_{5-6} , welcher mit der Viergelenkskette verbunden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

4.2.2 2. Viergelenkskette (Achse 3)

Die zweite Viergelenkskette treibt wie in Abbildung ?? 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 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 kompletieren die Viergelenkskette. Der Kraftübertragungspunkt ist P10, welcher fest mit Armteil 3 verbunden ist und mit Punkt P9 an der Viergelenkskette anschließt.



(a) Viergelenkskette der Achse 2 (b) Viergelenkskette der Achse 3

Abbildung 23: Detailschaubilder der zwei Viergelenksketten

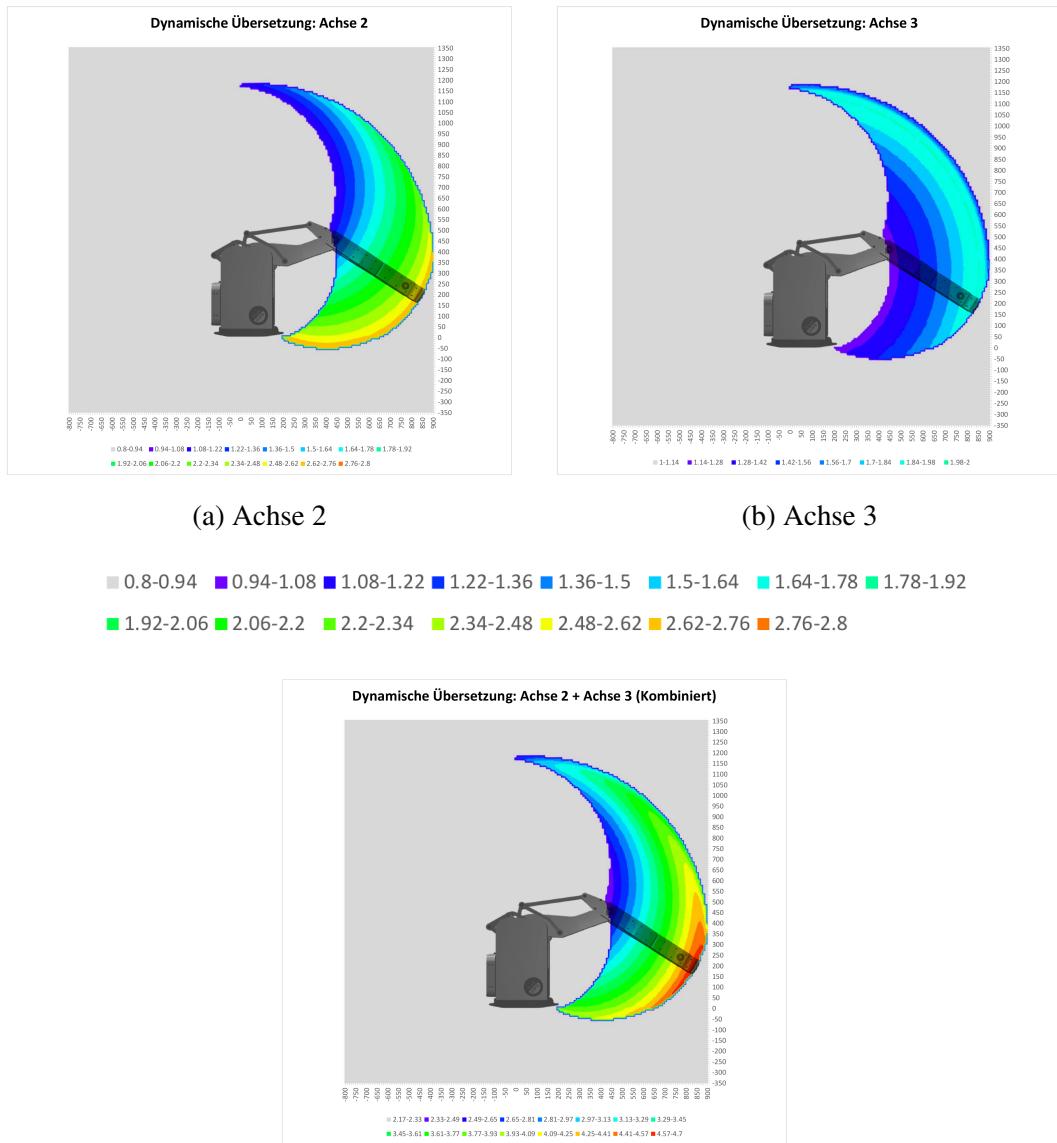


Abbildung 24: Dynamische Übersetzung der Achsen 2 und 3

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 24a 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 Übersetzungsverhältnis zwischen $1:1.23$ und $1:1.98$. Abbildung 24b zeigt diese Übersetzung im Arbeitsbereich an.

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

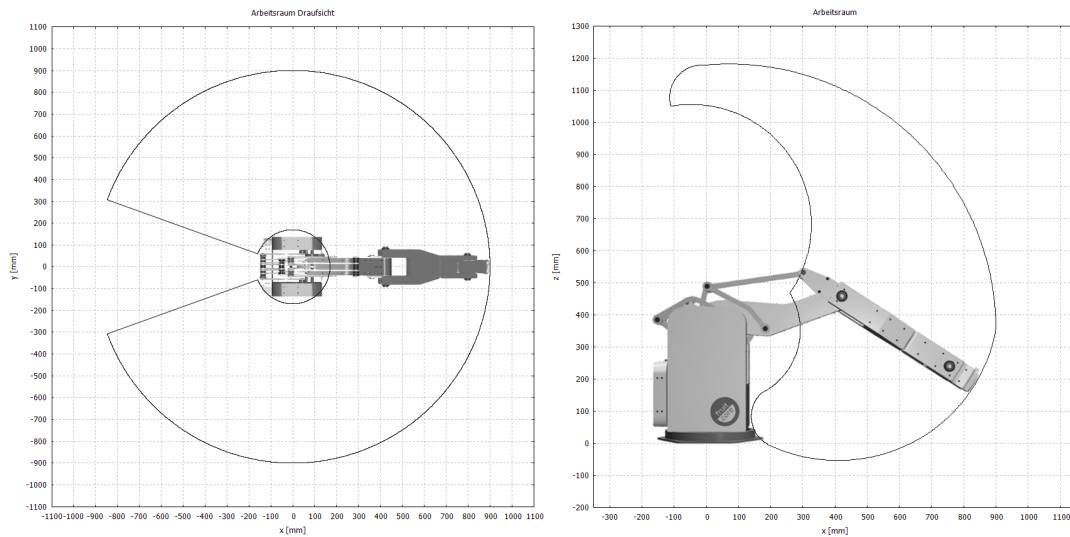


Abbildung 25

4.3.2 Arbeitsraum

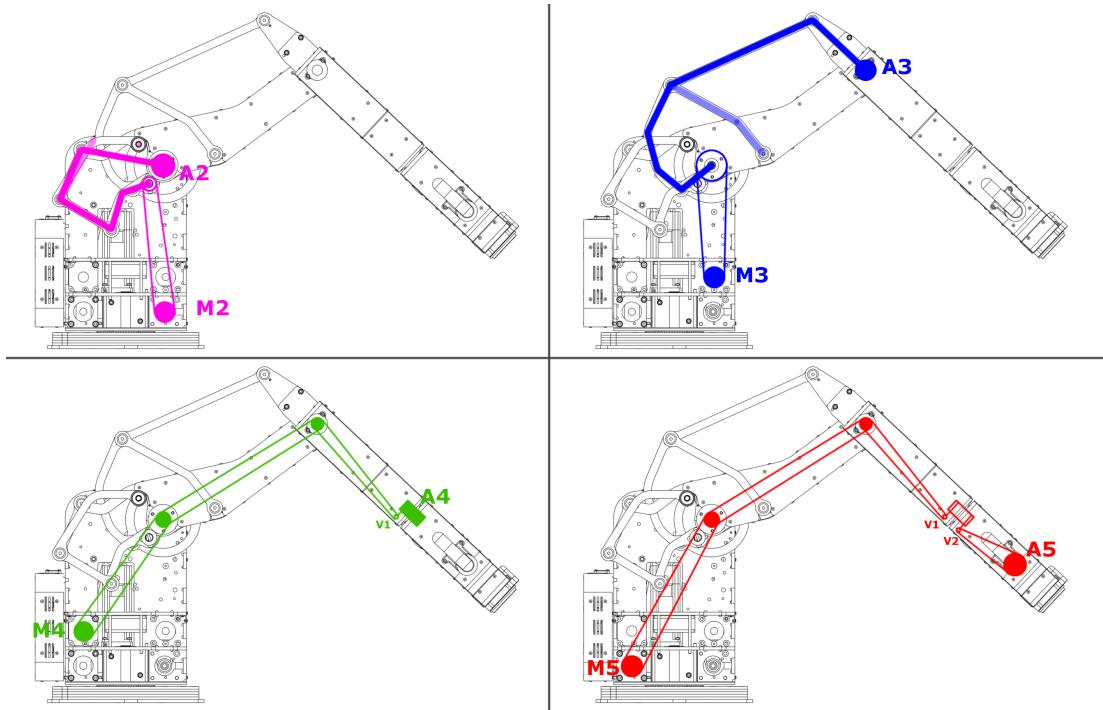


Abbildung 26: Schema der Antriebsübertragung

4.4 Antrieb & Sensorik

MOTOREN

KRAFTÜBERTRAGUNG

ACHSENCODER

4.5 Systemarchitektur

5 Ansatz und Methodik

In diesem Kapitel werden die verwendeten Ansätze und Methoden dieser Arbeit ausführlich vorgestellt. Dabei werden die Vorbereitungen, Berechnungen und Benchmarks vorgestellt, die Experimente und insbesondere Auswertung der Messungen wird im nachfolgenden Kapitel behandelt.

Die Struktur des Kapitels ist der Zielsetzung der Arbeit angeglichen:

- Der erste Teil befasst sich mit der **Beschreibung des Kinematischen Modells**. Es wird eine Berechnungsmethode für die direkte Kinematik vorgestellt. Anschließend wird auf die Besonderheiten der Viergelenks-Kinematik ausführlich eingegangen, dies umfasst Kräfte und Drehmomentsberechnungen genauso wie Workspace und Beweglichkeitsstudien, für die ein eigener Kinematik-Benchmark eingeführt wird.
- Der zweite Teil befasst sich mit der **Steuerung** des realen Roboters. Hierbei wird wiederum auf die Besonderheiten durch die Viergelenksketten und die dynamische Übersetzung, sowie das Abrollen der Riemen und die damit notwendige Achskompensation. Ebenfalls wird auf die Möglichkeit der Regelung mit zusätzlicher Vorsteuerung eingegangen.
- Der dritte Teil befasst sich mit der **Optimierung der Kinematik**. Dabei wird zunächst eine Scoring-Funktion zur Bewertung einer Viergelenkskinematik vorgestellt. Mithilfe dieses Bewertungsverfahren wird ein Optimierungsverfahren beschrieben, das mithilfe von Vorgegener Constrains und Scoring-Funktion ermöglicht neue Kinematiken zu generieren und optimieren.

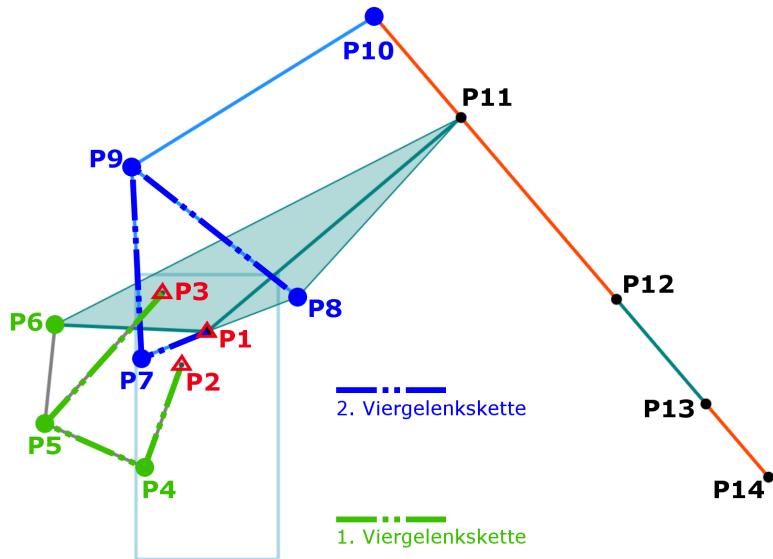


Abbildung 27: Punkt-Stabmodell

5.1 Kinematische Analyse

5.1.1 Punkt-Stabmodell

Für die Beschreibung des kinematischen Modelles wird hier ein Punkt-Stabmodell eingeführt. In Abbildung 27 ist das Modell schematisch dargestellt.

Es werden 14 signifikante Punkte definiert, wobei drei Fixpunkte im Sockel, fünf Drehpunkte der Roboterachsen sowie weitere Punkte für die Beschreibung der Viergelenksketten verwendet werden. Diese werden durch die Schnittpunkte der entsprechenden Hebel berechnet, dies wird in einzelnen Schaubildern in Abbildung ?? visualisiert.

FIXPUNKTE

Die Punkte P1, P2 und P3 sind Fixpunkte, d.h. fest mit dem Sockel verbunden.

- P1 definiert den Drehpunkt der Roboterachse 2 (θ_2)
- P2 ist der Drehpunkt der Antriebsachse 2
- P3 ergänzt die erste Viergelenkskette um den weiteren Fixpunkt

VIERGELENKSKETTE DER ACHSE 2

Die erste Viergelenkskette (grün gestrichelte Linie in Abbildung 27) besteht aus den drei Hebelen $Hebel_{2-4}$, $Hebel_{4-5}$ und $Hebel_{3-5}$.

Angeschlossen an den Viergelenkpunkt P5 ist der Kraftübertragungshebel $Hebel_{5-6}$, dieser verbindet die Viergelenkskette mit der Roboterachse 2. Über diese Verbindung wird das Drehmoment der Antriebseinheit ($Hebel_{2-4}$) auf die Hauptachse 2 übertragen.

Punkt	Art	Hebel	Besonderheit
P2	Fixpunkt Sockel	$Hebel_{2-4}$	Antriebstrang, Winkel γ_2
P4	beweglich	$Hebel_{2-4}, Hebel_{4-5}$	
P5	beweglich	$Hebel_{4-5}, Hebel_{3-5}$	
P3	Fixpunkt Sockel	$Hebel_{3-5}$	leitet Kräfte in Sockel
P6	Fixpunkt Armteil 2	$Hebel_{5-6}$	Kraftübertragungspunkt der Viergelenkskette auf Achse 2

Der Drehwinkel der Antriebsachse wird als γ_2 bezeichnet. Der Drehwinkel der Roboterachse wird wie bei Arm-Robotern üblich mit θ_2 bezeichnet.

VIERGELENKS KETTE DER ACHSE 3

Die zweite Viergelenkskette (blau gestrichelte Linie in Abbildung 27) besteht aus den drei Hebeln $Hebel_{1-7}$, $Hebel_{7-9}$ und $Hebel_{8-9}$.

Angeschlossen an den Viergelenkpunkt P9 ist der Kraftübertragungshebel $Hebel_{9-10}$, dieser verbindet die Viergelenkskette mit der Roboterachse 3. Über diese Verbindung wird das Drehmoment der Antriebseinheit ($Hebel_{1-7}$) auf die Hauptachse 3 übertragen.

Punkt	Art	Hebel	Besonderheit
P1	Fixpunkt Sockel	$Hebel_{1-7}$	Antriebstrang, Winkel γ_3
P7	beweglich	$Hebel_{1-7}, Hebel_{7-9}$	
P9	beweglich	$Hebel_{7-9}, Hebel_{8-9}$	
P8	Fixpunkt Armteil 2	$Hebel_{8-9}$	Fixpunkt der Viergelenkskette
P10	Fixpunkt Armteil 3	$Hebel_{5-6}$	Kraftübertragungspunkt der Viergelenkskette auf Achse 3

Die zweite Viergelenkskette besitzt zwei erwähnenswerte Besonderheiten. Der Antriebstrang wird über den Punkt P1 angetrieben. Dies ist zugleich der die Rotationsachse. Diese doppelte Rotationsbewegung ist konstruktiv mit dem Einsatz von Hohlwellen gelöst.

Ebenfalls von Bedeutung ist die Lage des zweiten Fixpunktes P8 dieser Viergelenkskette. Dieser ist fest mit dem Armteil 2 verbunden, d.h. der Punkt rotiert ebenso wie der gesamte Armteil um die Roboterachse 2 in P1. Dies führt dazu, dass bei Änderung des Drehwinkels θ_2 auch die eigentlich unbeteiligte Antriebseinheit 3 um diesen Winkel mitrotieren muss. Dies ist in Kapitel 5.2 genauer beschrieben.

Der Drehwinkel der Antriebsachse wird als γ_3 bezeichnet. Der Drehwinkel der Roboterachse wird wie bei Arm-Robotern üblich mit θ_3 bezeichnet.

terachse wird wie bei Arm-Robotern üblich mit θ_3 bezeichnet.

SERIELLE ACHSEN

Die Hauptachse 1 sowie die Handgelenke 4, 5 und 6 sind analog zu einer seriellen Kinematik direkt angetrieben. Für die Steuerung der Achsen ist somit nur das Übersetzungverhältnis von Motor zur Antriebsachse entscheidend.

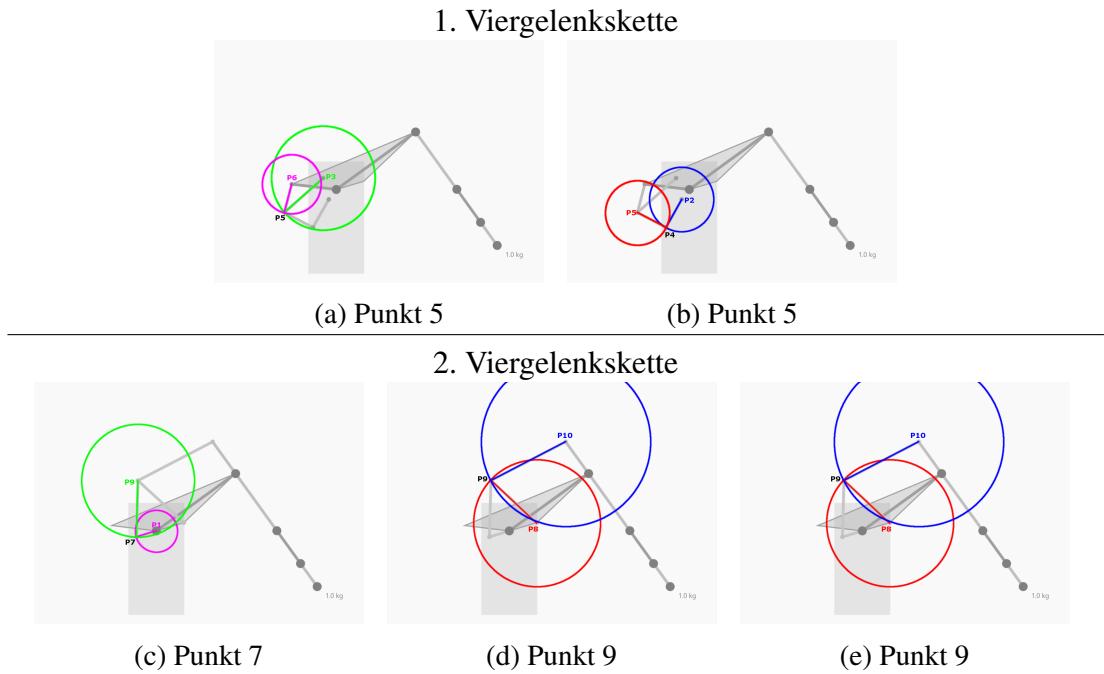


Abbildung 28: Berechnung der variablen Punkte

5.1.2 Gamma-Funktionen

Durch die Verwendung der Viergelenksketten zur Kraftübertragung bilden Antriebs-einheitsdrehwinkel und Achswinkel im Gegensatz zu einem Direktantrieb keine konstante Funktion.

Stattdessen wird der Drehwinkel der Antriebseinheit über zwei Hebel in der Viergelenkskette sowie einem zusätzlichen Kraftübertragungshebel auf die jeweilige Achse geleitet. Dadurch ergibt sich ein nichtlineares Verhältnis zwischen Antriebswinkel $\gamma_{2,3}$ und Roboterachse $\theta_{2,3}$

FUNKTION G2 UND G3

Die Funktion G2 bzw. G3 bildet den Achswinkel auf den Antriebswinkel ab.

$$G2 : \theta_2 \mapsto \gamma_2 \quad (5.1)$$

Gleichung 5.1: Funktion G2

$$G3 : \theta_3 \mapsto \gamma_3 \quad (5.2)$$

Gleichung 5.2: Funktion G3

Die Berechnung dieser Funktionen wird im folgenden vereinfacht als Matlab-Code vorgestellt. Im Zuge dieser Arbeit wurde die Funktionen für die Verwendung in der Steuerung des Roboters sowohl in Java als auch C implementiert. Aufgrund der leichteren

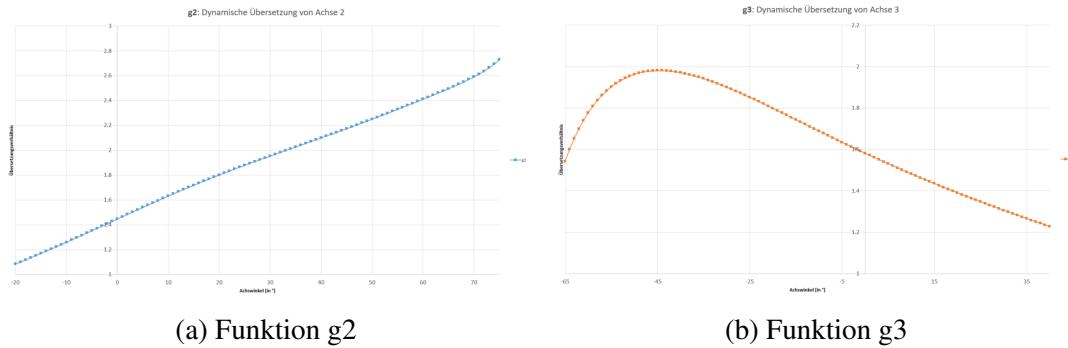


Abbildung 29: Funktionsgraph von g_2 und g_3 in Abhangigkeit der Achswinkel

Lesbarkeit wird hier die Matlab-Implentierung aufgeführt.

Listing 5.1: Gamma2 Funktion in Matlab

```

1 function gamma = g2(theta)
2 constants; % import the constants
3 % we have to negate theta and add the Angle of P6
4 theta = deg2rad(-theta + ANGLE_36);
5
6 L_1_6 = norm([X6 Y6]-[X1 Y1]);
7
8 % calculate Point 6
9 x6 = -sin(theta) * L_1_6 + X1;
10 y6 = cos(theta) * L_1_6 + Y1;
11
12 % Point 5 is on the intersection of P3-5 and P5-6
13 [x5 y5] = circleIntersect(X3, Y3, L_3_5, x6, y6, L_5_6, true);
14
15 % Point 4 is on the intersection of P4-5 and P2-4
16 [x4 y4] = circleIntersect(X2, Y2, L_2_4, x5, y5, L_4_5, true);
17
18 gamma = -atan2(y4 - Y2, x4 - X2);
19 gamma = rad2deg(gamma);
20 end

```

Listing 5.2: Gamma3 Funktion in Matlab

```

1 function gamma = g3( theta )
2 constants;% import the constants
3
4 theta = deg2rad(theta);
5
6 %calculate P10
7 X10 = -cos(theta) * L_10_11 + X11;
8 Y10 = sin(theta) * L_10_11 + Y11;
9
10 %calculate P9 (Intersect of P8 and P10)
11 [X9, Y9] = circleIntersect(X8, Y8, L_8_9, X10, Y10, L_9_10, true);
12
13 %calculate P9 (Intersect of P1 and P9)
14 [X7, Y7] = circleIntersect(X1, Y1, L_1_7, X9, Y9, L_7_9, true);
15
16 gamma = atan2(X7 - X1, Y1 - Y7);
17 gamma = rad2deg(gamma);
18 end

```

ABLEITUNGSFUNKTION G2 UND G3

Von noch größerer Bedeutung sind jedoch die Ableitungsfunktionen g2 und g3. Einfach ausgedrückt drücken diese Funktionen aus welche Drehwinkeländerung der Antriebseinheit notwendig ist um ein bestimmten Änderung des Drehwinkels der Roboterachse zu verursachen. Die Funktionen g2 und g3 entsprechen somit dem Übersetzungsverhältnis zwischen Antrieb und Achse. Dies ist von zentraler Bedeutung für die Steuerung dieser Achsen. Auch die resultierenden Drehmomente der sind stark von diesen Funktionen abhängig. (Hohes Übersetzungsverhältnis bedeutet geringe Drehmomente an der Antriebsachse)

$$g2 : \Delta\theta_2 \mapsto \Delta\gamma_2 \quad (5.3)$$

Gleichung 5.3: Ableitungsfunktionen g2

$$g3 : \Delta\theta_3 \mapsto \Delta\gamma_3 \quad (5.4)$$

Gleichung 5.4: Ableitungsfunktionen g3

In Abbildung ?? sind die Funktionsgraphen dargestellt. Die Funktion g2 hat über einen weiten Bereich eine relativ konstante Steigung. Am Ende des Definitionsbereiches wird die Steigung deutlich größer. An diesem Punkt sind die *Hebel*₂₋₄ und *Hebel*₄₋₅ annähernd parallel, dies führt dazu eine Winkeländerung von γ_2 den Punkt P5 kaum beeinflusst, wordurch sich auch der *Kraftübertragungshebel*₅₋₆ kaum bewegt, was dazu führt, dass kaum eine Winkeländerung θ_2 an der Roboterachse auftritt. Die Funktion g3 hat in der Nähe des Definitionsbereich ein Maximum und fällt dann bis zur anderen Grenze des Definitionsbereiches annähernd linear ab.

5.1.3 Analytische Inverse Kinematik

- Ikfast
- Begrenzte Konfiguration (Elbow always above)

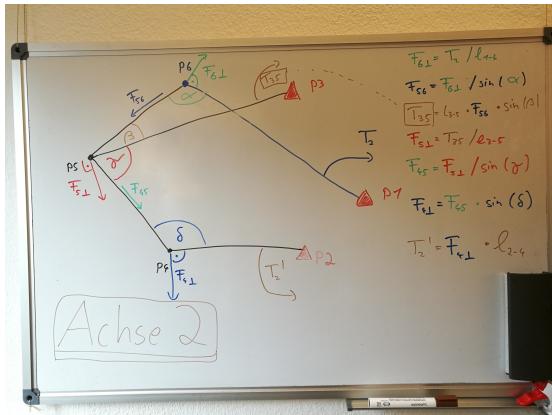


Abbildung 30: Torque 2

5.1.4 Drehmomente

Für die Auslegung der Antriebseinheiten sind die Drehmomente der Achsen entscheidend. Vor allem der maximale Drehmoment einer Achse und damit die maximale Belastung des Motors ist für die Auswahl eines geeigneten Motors entscheidend.

Die Drehmomentberechnung eines seriellen Roboters ist trivial. Mithilfe einfacher Hebelgesetze kann der Drehmoment berechnet werden:

$$T_2 = F_g * \sin(\theta_2) * L_{\text{Armteil2}} \quad (5.5)$$

Durch die Verwendung der Viergelenksketten muss eine Unterscheidung zwischen Drehmoment an den Hauptachsen und den Antriebsachsen gemacht werden. Die Übertragung der Kraft der Antriebseinheit geschieht über die Hebel der Viergelenkskette.

ACHSE 2 / ERSTE VIERGELENKSKETTE

Abbildung 30 zeigt wirkenden Kräfte und Drehmomente der ersten Viergelenkskette, wobei T_2 das Drehmoment der Roboterachse 2 darstellt und \widehat{T}_2 das Drehmoment an der Antriebseinheit. Die Einheiten L_{1-6} , L_{3-5} und L_{2-4} stehen für die Längen der entsprechenden Hebel.

In den folgenden Kapiteln wird zur Berechnung die Drehmoments-Funktion $t2$ verwendet. Diese entspricht den Berechnungen aus Abbildung 30 und Abbildung 31.

$$t2(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 2} \quad (5.6)$$

Gleichung 5.6: Drehmoment der Achse 2

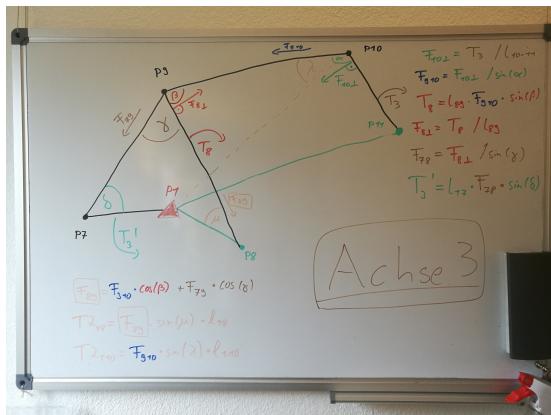


Abbildung 31: Torque 2

ACHSE 3 / ZWEITE VIERGELENKSKETTE

Abbildung 31 zeigt wirkende Kräfte und Drehmomente der zweiten Viergelenkskette, wobei T_3 das Drehmoment der Roboterachse 3 darstellt und \widehat{T}_3 das Drehmoment an der Antriebseinheit. Die Einheiten L_{10-11} , L_{8-9} und L_{1-7} entsprechen wiederum die Längen der entsprechenden Hebel.

In den folgenden Kapiteln wird zur Berechnung die Drehmoments-Funktion $t3$ verwendet. Diese entspricht den Berechnungen aus Abbildung 31.

$$t3(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 3} \quad (5.7)$$

Gleichung 5.18: Drehmoment der Achse 3

ENTLASTUNG DER ACHSE 2

Eine Besonderheit in der Drehmomentsberechnung ergibt sich aus der Lage der zweiten Viergelenkskette. Durch die Kraftübertragung auf den Hebel 10 – 11 wird ein zusätzlicher Drehmoment auf die Roboterachse 2 ausgeübt.

Analog dazu führt der Druck/Zug auf Hebel 8 – 9 zu einem weiteren, entgegengesetztem Drehmoment auf Roboterachse 2.

In Abbildung 43 sind diese zwei zusätzlichen Drehmomente mitsamt Berechnung dargestellt.

In den meisten Stellungen des Roboters wirken sich die zusätzlichen eingeführten Drehmomente günstig auf die Achse 2 aus. Zusammen mit der dynamischen Übersetzung ist diese Entlastung der Achse für die vorteilhafte Kinematik des Roboters "HORST" verantwortlich.

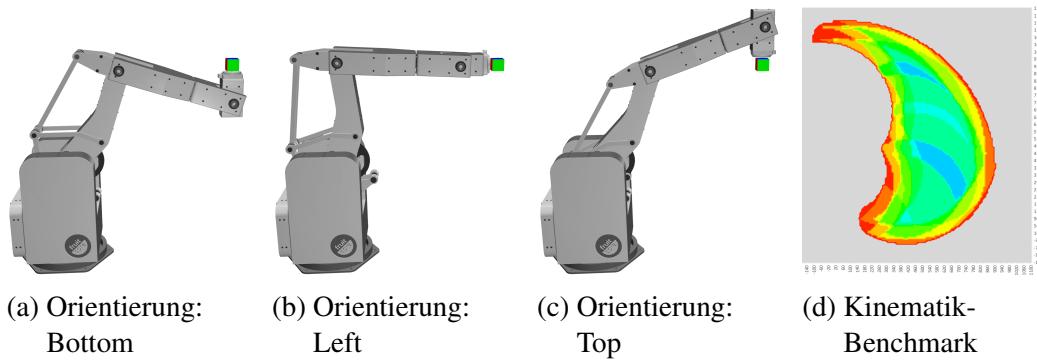


Abbildung 32: Visualisierung des Kinematik-B

5.1.5 Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark

Für eine einfache Vergleichbarkeit zwischen verschiedener Kinematiken sowie ähnlich großer Knickachsroboter bezüglich des Workspace und insbesondere der Beweglichkeit des Roboters in seinem Arbeitsbereich wurde ein einfacher Benchmark entwickelt. Bei der Angabe des Arbeitsbereich eines Roboters durch Herstellerspezifikationen muss bedacht werden, dass neben der reinen Größe (Querschnittsfläche) insbesondere auch die Beweglichkeit und somit die erreichbaren Orientierungen des Endeffektors von Bedeutung sind. Die Querschnittsfläche des Arbeitsraumes kann einfach durch verlängerte Handachsen erweitert werden, dies ist jedoch mit einem Verlust an Beweglichkeit innerhalb des Bereiches verbunden.

Eine einfache Metrik die Beweglichkeit eines Roboters zu bestimmen ist somit die möglich anfahrbaren Orientierungen in allen Positionen des Arbeitsbereiches mithilfe der inversen Kinematik zu bestimmen.

In diesem Kapitel wird ein einfaches und intuitives Verfahren vorgestellt um diese Idee umzusetzen:

In jeden Punkt des Arbeitsraums wird ein virtueller Würfel platziert (siehe dazu drei mögliche Orientierung in Abbildung 32 a-c) mit einer Seitenlänge von 0. Mithilfe der inversen Kinematik wird nun versucht jede der sechs Seiten sowie jede der acht Ecken anzufahren. Die Summe der möglichen Orientierungen wird für jeden Punkt gespeichert. Dabei reicht das Spektrum von 0, wenn keine der Orientierungen angefahren werden kann, bis zu 14 (6 Seiten + 8 Ecken) wenn alle Orientierungen erfolgreich erreicht werden können.

Das Ergebnis des Benchmarks kann anhand eines Schaubilds der möglichen Orientierungen im Arbeitsbereich dargestellt werden wie in Abbildung 32d zu sehen, oder einfach in der Angabe der durchschnittlichen erreichbaren Orientierung im gesamten Bereich ausgedrückt werden. Diese beträgt im dargestellten Fall von Abbildung 32d (Prototyp 5) 5,73 (von maximal 14).

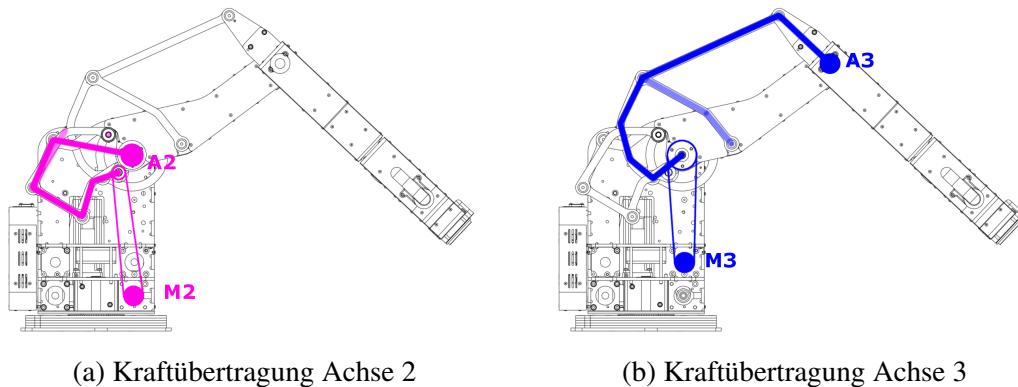


Abbildung 33: Kraftübertragung über Viergelenksketten

5.2 Steuerung des Roboters

5.2.1 Abrollen der Achsen

$$m_1(\theta_1) = \theta_1 * GEAR_1 \quad (5.8)$$

Gleichung 5.8: Steuerung des Motor 1

Gleichung 5.8 zeigt die Steuerung m_1 des Motors 1 die alleine von der Achsstellung θ_1 der dazugehörigen Achse 1 sowie des Übersetzungsverhältnis $GEAR_1$ abhängig ist.

$$m_2(\theta_2) = g2(\theta_2) * GEAR_2 \quad (5.9)$$

Gleichung 5.9: 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.

$$m_3(\theta_2, \theta_3) = (g3(\theta_3) + \theta_2) * GEAR_3 \quad (5.10)$$

Gleichung 5.10: 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.

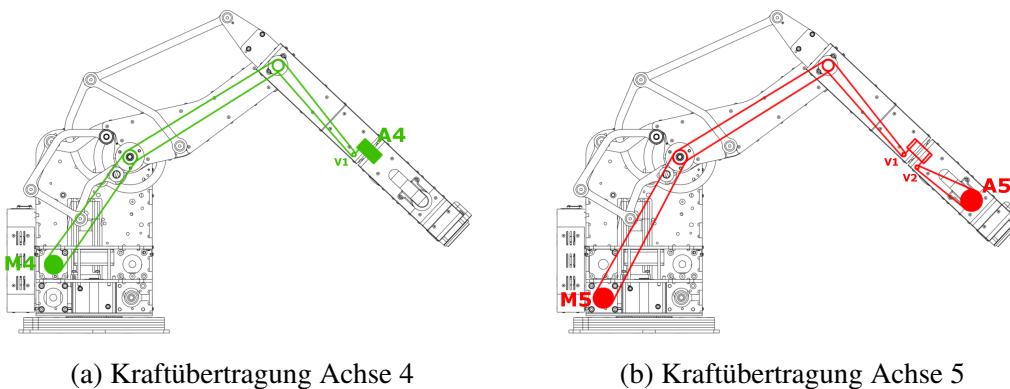


Abbildung 34: Kraftübertragung und Achsabrollen

$$m_4(\theta_2, \theta_3, \theta_4) = (\theta_4 + \theta_3 + \theta_2) * GEAR_4 \quad (5.11)$$

Gleichung 5.11: Steuerung des Motor 4

Gleichung 5.11 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.

$$m_5(\theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5) = (\theta_5 + \theta_4 + \theta_3 + \theta_2) * GEAR_5 \quad (5.12)$$

Gleichung 5.12: 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 5.12 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.

$$m_6(\theta_6) = \theta_6 * GEAR_6 \quad (5.13)$$

Gleichung 5.13: 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.

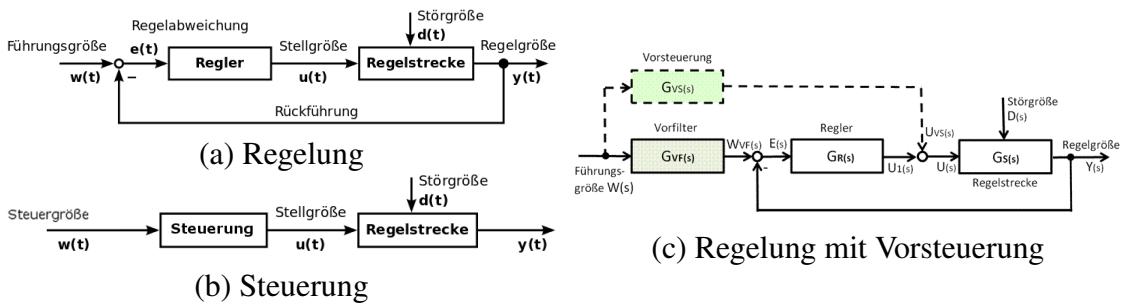


Abbildung 35: Regelung und Steuerung

5.2.2 Regelung und Vorsteuerung

Für die Steuerung von bewegten Systemen gibt es grundsätzlich zwei Ansätze: Open-Loop, im Deutschen häufig als Steuerung bezeichnet sowie Closed-Loop, im Deutschen als Regelung bezeichnet.

In einer **Open-Loop Steuerung** wird die Steuergröße direkt auf ein Stellglied (z.B. ein Elektromotor) gegeben, welches am Ende der Steuerkette in einer Ausgangsgröße resultiert. Im Gegensatz zur einer Regelung wirkt die Ausgangsgröße nicht zurück auf die Eingangsgröße aus. D.h. Einflüsse von eventuell auftretenden Störgrößen können nicht ausgeglichen werden, es liegt ein offener Wirkungsweg vor. Das Schema einer Open-Loop Steuerung ist in Abbildung ?? b dargestellt.

In einer **Closed-Loop Regelung** hingegen wird die Ausgangsgröße zurückgeführt und bildet mit der Führungsgröße eine Regelabweichung, welche durch den Regler an das Stellglied übergeben wird. Somit ist ein geschlossener Wirkungsablauf, der Regelkreis, vorhanden. Dieser ermöglicht das Reagieren auf unvorhersehbare Störgrößen und evtl. vorhandene Modellabweichungen. In Abbildung ?? b ist der Standard-Regelkreis schematisch dargestellt. Zur Messung der Ausgangsgröße muss ein entsprechendes Messglied vorhanden sein. Bei Knickarm-Robotern werden dazu gewöhnlich Achsenencoder (optische Drehwinkelsensoren) verwendet. Diese sind auch an jeder Achse des Roboters "HORST" verbaut.

Ein signifikanter Nachteil eines reinen Regelungssystems ist jedoch, dass für eine Änderung der Stellgrößen erst ein Fehler durch eine Abweichung von Soll zu Ist-Wert auftreten muss. Selbst vorhersehbare Änderungen des Sollwertes (beispielweise durch ein Sollwertverlauf einer Bahnplanung) können erst nach Auftreten einer Messabweichung in die Bewegung einfließen. Ein Erhöhen des Regelungsfaktor führt zu einer schnelleren Reaktion auf Regelabweichung, kann aber Schwingungen und damit zur Gefährdung der Stabilität des Systems führen.

Eine **Vorsteuerung** (Feed-Forward) ermöglicht diese Berücksichtigung des aufgrund eines Sollwertverlaufs zu erwartenden Stellgrößen-Bedarfs. Da dies eine Steuerung ist, wird das Führungsverhalten verbessert ohne die Stabilität des Systems zu gefährden. In Abbildung ?? c ist ein Regelsystem mitsamt Vorsteuerung dargestellt.

Für die Steuerung des Roboters HORST wurde eine Regelung mit zusätzlicher Vorsteuerung entwickelt. Dabei sind die Glieder wie folgt beschrieben:

Symbol	Bezeichnung	Einheit
$W(s)$	Führungsgröße	Achswinkel
$E(s)$	Regelabweichung	Achswinkel (Differenz)
$U_{R(s)}$	Übertragungsfunktion (Regelung)	Motorgeschwindigkeit
$U_{VS(s)}$	Übertragungsfunktion (Vorsteuerung)	Motorgeschwindigkeit
$Y(s)$	Regelgröße	Achswinkel (Encoder Ist-Wert)

REGELUNG

Die Regelung der seriellen Achsen 1, 4, 5, 6 folgenden dabei folgender Regelungsgleichung:

$$U(s_i) = K_{pi} * E(s_i) * GEAR_i \quad (5.14)$$

Gleichung 5.14: Übertragungsfunktion der seriellen Achsen

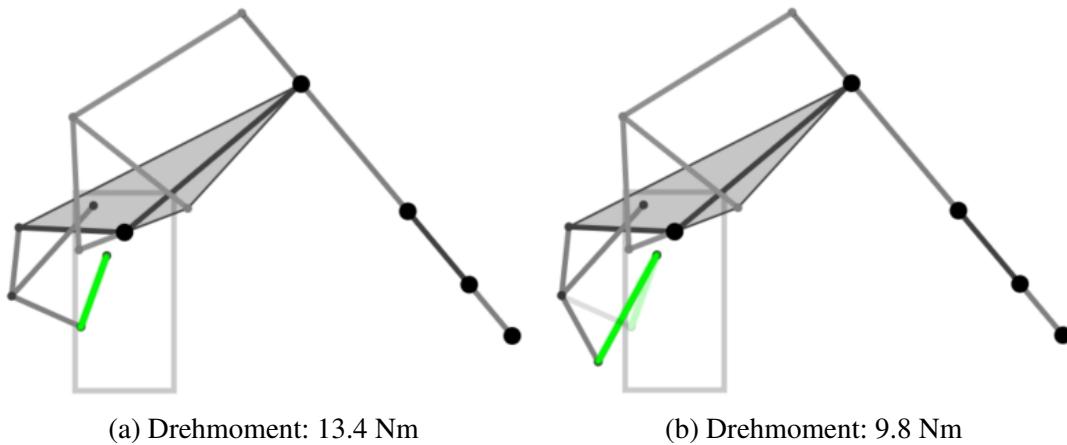
$$U(s_2) = K_{p2} * E(s_2) * GEAR_2 * g2(Y(s_2)) \quad (5.15)$$

Gleichung 5.15: Übertragungsfunktion Achse 2 mit Gamma2-Faktor

$$U(s_3) = K_{p3} * E(s_3) * GEAR_3 * g3(Y(s_3)) \quad (5.16)$$

Gleichung 5.16: Übertragungsfunktion Achse 3 mit Gamma3-Faktor

VORSTEUERUNG

Abbildung 36: Verschiedene Hebellängen (*Hebel*₂₋₄)

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.

$$t_2(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 2} \quad (5.17)$$

Gleichung 5.17: Statischer Drehmoment an Antriebsachse 2

$$t_3(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 3} \quad (5.18)$$

Gleichung 5.18: Statischer Drehmoment an Antriebsachse 3

Gleichung (5.17) und Gleichung (5.17) 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 37 zeigt etwa eine Änderung in der Länge des $Hebels_{2-4}$ 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 1 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 1: 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.

$$f : x_{1 \dots n} \mapsto s \quad (5.19)$$

Gleichung 5.19: Hebelkinematik Scoring-Funktion

Gleichung (5.19) 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.

$$s_{maxtorque} = \max_{\theta_{2min} \leq \theta_2 \leq \theta_{2max}} \max_{\theta_{3min} \leq \theta_3 \leq \theta_{3max}} \{ t_2(\theta_2, \theta_3), t_3(\theta_2, \theta_3) \} \quad (5.20)$$

Gleichung 5.20: Scoring-Funktion des maximalen Drehmoments

Gleichung (5.20) zeigt etwa die Scoring-Funktion die für die Ermittlung des maximalen Drehmoments zuständig ist. Hiasdf Listing 5.4 zeigt die Scoring-Funktion außerdem noch in Java-Pseudocode. In Abbildung ?? ist die Scoring-Funktion visualisiert. Dabei ist zu sehen, dass jede Roboterstellung getestet wird und das Maximum als Score und Ausgabe der Funktion gewählt wird.

Listing 5.3: 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

Listing 5.4: Gradient in Java Pseudocode

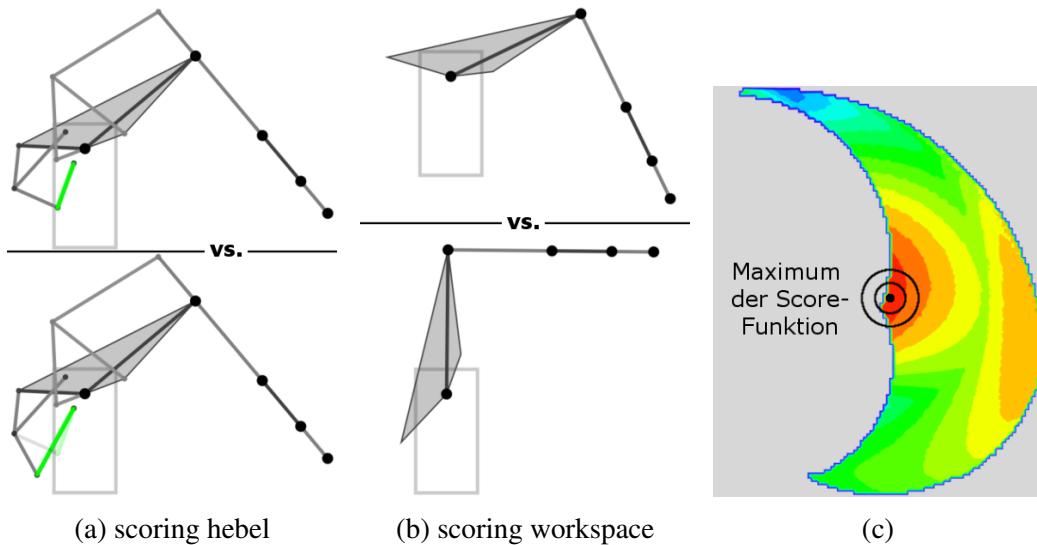


Abbildung 37: Scoring Funktions

```

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();

```

$$\text{grad}(f) = \nabla f = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5.21)$$

Gleichung 5.21: Definition Gradient

6 Experimente

In diesem Kapitel werden die im vorherigen Kapitel vorgestellten Methoden experimentell getestet. Dies umfasst sowohl Messungen an realen Robotern als auch Berechnungen und Simulationen mit selbst erstellten Programmen.

Die Struktur des Kapitels ist analog zum Vorkapitel und der Zielsetzung in drei Teile unterteilt:

- Der erste Teil befasst sich um die Analyse des **Kinematischen Modells**. Es werden diverse Schaubilder eingeführt, welche die Drehmomente der verschiedenen Achsen im gesamten Workspace darstellen. Die Größe und das Aussehen des Arbeitsraums abhängig von verschiedenen Kinematischen Kenngrößen wie Achsabständen und Achsbegrenzungen werden dargestellt ebenso wie die Beweglichkeit des Roboters anhand des im Vorkapitel vorgestellten Kinematik-Benchmarks.
- Im zweiten Teil wird die **Steuerung** an einem realen Roboter getestet. Dabei werden zunächst die kinematischen Besonderheiten durch die Viergelenkketten in verschiedenen Messungen getestet. Besonderen Wert wurde auf möglichst Praxisnahe und reale Bedingungen gesetzt, dies wird anhand einer Messreihe mit linearen Bewegungen vorgestellt. Abschließend wird der Effekt unterschiedlicher Bewegungsprofile experimentell nachgestellt.
- Der dritte Teil befasst sich mit den Ergebnissen der **Kinematik-Optimierung** aus den Gradienten-Abstiegsverfahren. Es werden verschiedene generierte Kinematiken vorgestellt und auf besondere Constraints und Scoring-Funktionen eingegangen.

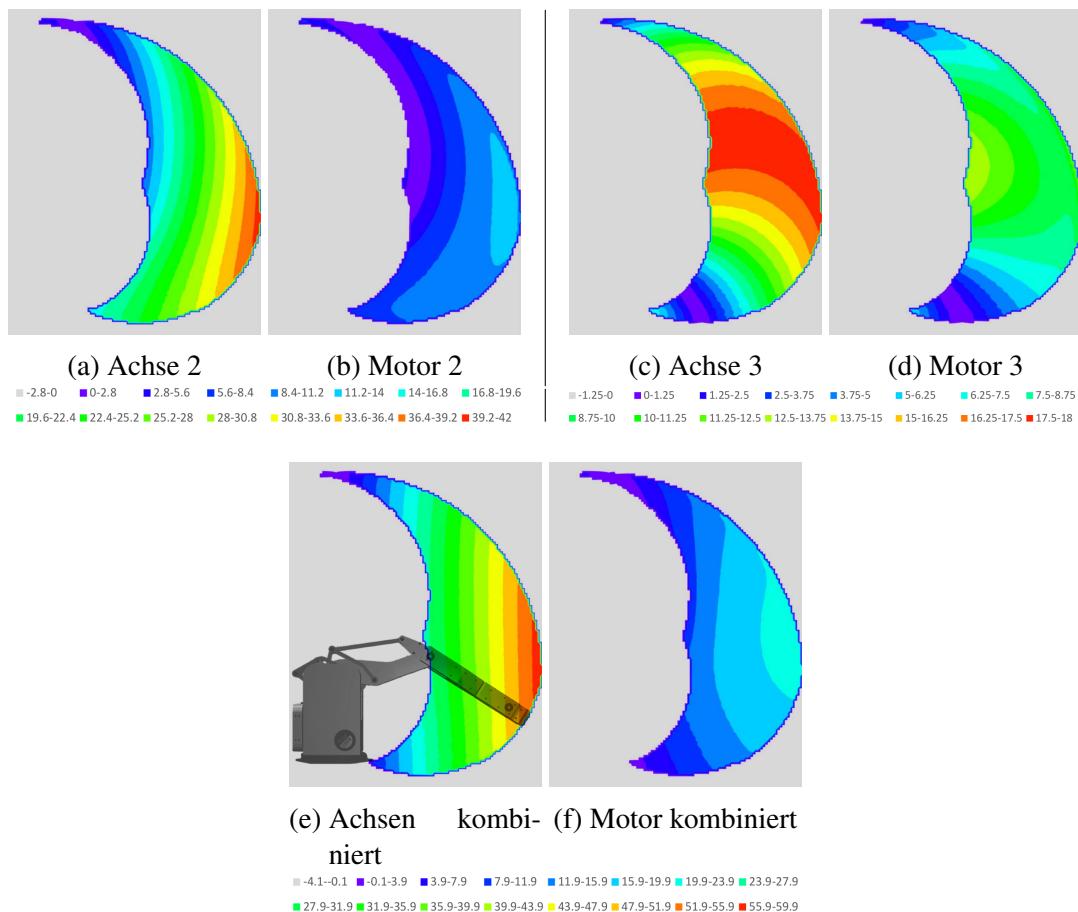


Abbildung 38: Achs-Drehmoment neben Motor-Drehmoment

6.1 Kinematische Analyse

6.1.1 Drehmomente

Eine Zusammenfassung der Drehmomentsstudien sind in Abbildung 38 zu sehen. Hierbei sind jeweils die Drehmomente der Roboterachse der entsprechenden Antriebsachse gegenübergestellt. Die Einheit farbigen Tiefenachse sind Nm (Newton-Meter), die SI-Einheit für die Messung des Drehmoments. Alle Schaubilder wurden bei einer Traglast von 1,5 kg am Flansch generiert.

Achse/Motor 2

Abbildung 38 (b) wurde anhand der folgende Gleichung erstellt:

$$t2(\theta_2, \theta_3) \quad \min \leq \theta_2 \leq \max; \min \leq \theta_3 \leq \max \quad (6.1)$$

Gleichung 6.3: Drehmoment Motor 2

In (a) ist das Drehmoment der Achse 2 dargestellt, demgegenüber zeigt (b) den

Drehmoment am Motor 2. Wie deutlich zu erkennen ist, deckt (a) ein deutlich breiteres Spektrum ab und führt in der ausgestreckten Lage (θ_2_{max} , θ_3_{max}) zu einem maximalen Drehmoment von 40,3 Nm.

(b) zeigt das deutlich ausgeglichener Spektrum des Drehmoments an der Antriebsachse 2. Dabei ist das Maximum nahe, aber nicht komplett am Rande des Arbeitsbereiches und beträgt 12,1 Nm. Für einen Direktantrieb der Achse müsste somit ein um 3,3-fach stärkerer Motor verwendet werden, beziehungsweise anders ausgedrückt kann durch die Verwendung der Viergelenksketten über 70% der Antriebsleistung des Motors gespart werden.

Dabei wird diese Verbesserung der maximal benötigten Antriebsleistung sowohl durch die dynamische Übersetzung als auch durch die Entlastung durch den Motor 3 erreicht.

ACHSE/MOTOR 3

Abbildung 38 (d) wurde anhand der folgende Gleichung erstellt:

$$t3(\theta_2, \theta_3) \quad (6.2)$$

$min \leq \theta_2 \leq max; min \leq \theta_3 \leq max$

Gleichung 6.3: Drehmoment Motor 3

(c) zeigt das Drehmoment der Achse 3 während in (d) das Drehmoment des Motors 3 darstellt.

Für die Achse 3 ist das Drehmoment immer dann maximal, wenn die Achse parallel zum Boden, d.h. orthogonal zur Gewichtskraft, steht. Damit ist das Maximum auch abhängig von der Stellung der vorherigen Roboterachse, dies ergibt ein breites Maximum ungefähr in der Mitte des Arbeitsraumes, es beträgt 18,1 Nm.

Im Gegensatz dazu fokussiert sich das maximale Drehmoment des Antrieb 3 am Rande des inneren Arbeitsraumrandes. Das Maximum beträgt 13,8 Nm. Die Lage ist hierdurch zu erklären, da an dieser Stelle die dynamische Übersetzung ($g3(\theta_3_{min}) = 1,08$) minimal ist.

ACHSE/MOTOR KOMBINIERT

Abschließend wird in Abbildung 38 (e) (f) die Summe der maximalen Drehmomente dargestellt. Die Berechnung lautet dabei:

$$t2(\theta_2, \theta_3) + t3(\theta_2, \theta_3) \quad (6.3)$$

$min \leq \theta_2 \leq max; min \leq \theta_3 \leq max$

Gleichung 6.3: Drehmoment Motoren kombiniert

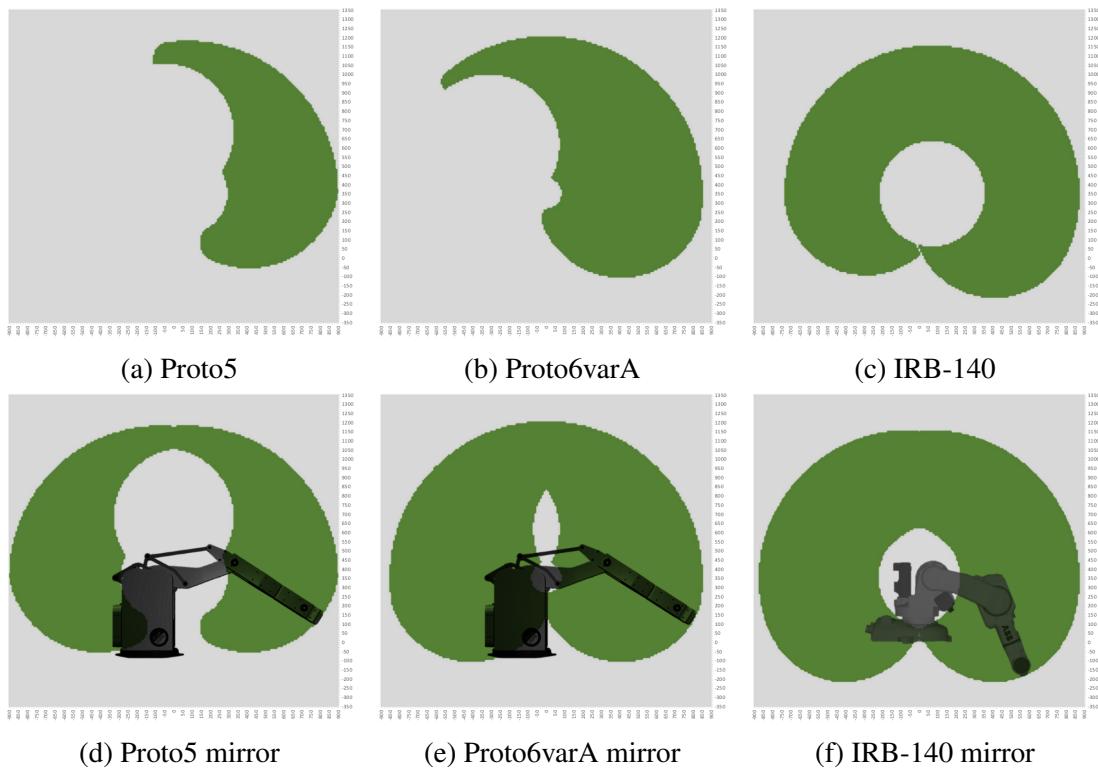


Abbildung 39: Workspace

6.1.2 Workspace

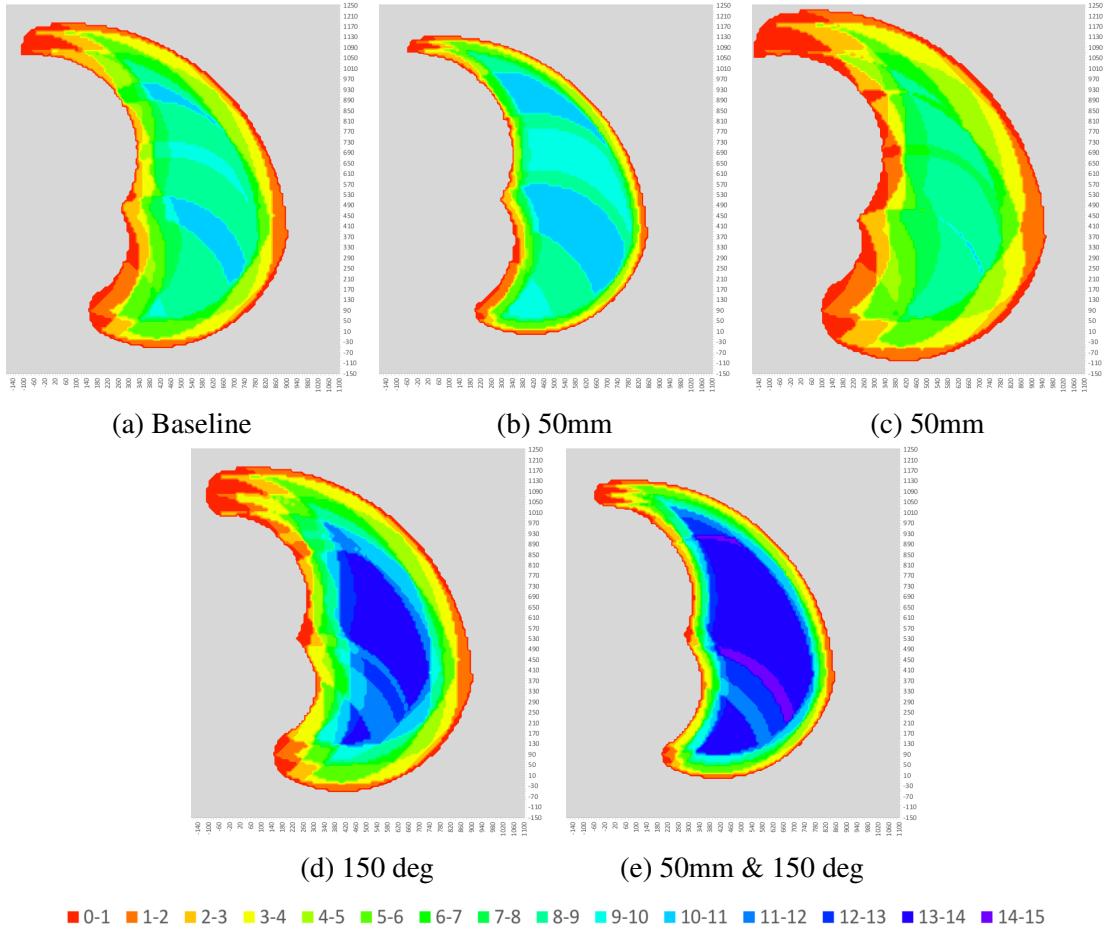


Abbildung 40: Resultate des Kinematik-Benchmark

6.1.3 Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark

Im Folgenden werden die Ergebnisse des Kinematik-Benchmarks, eine Messmethode der Beweglichkeit eines Roboters innerhalb seines Arbeitsbereiches, aufgeführt. Dabei wird die in Kapitel 5.1.5 vorgestellte Methode des virtuellen Anfahrens der sechs Flächen und acht Ecken eines Würfels verwendet. Dies wird für jeden Punkt innerhalb des Arbeitsbereiches ausgeführt, die Schrittweite betrug bei diesen Messungen jeweils 10mm. Die Schrittweite wurde für ausreichende Genauigkeit bei akzeptabler Rechenzeit ausgewählt.

Abbildung 40 zeigt die Resultate des Kinematik-Benchmarks verschiedener Robotermodelle. Es ist deutlich der Arbeitsbereich zu sehen. Die Tiefenachse zeigt die anfahrbaren Orientierungen pro Punkt und reicht von 0 (rot) bei keiner möglichen Orientierung bis zu 14 (violett) für den Fall, dass an einem Punkt alle Seiten und Ecken des Würfels angefahren werden können. Gut sichtbar ist die Abnahme des Farbwertes am Rande des Arbeitsraumes, dies ist dadurch zu erklären, dass an diesen Stellen die Achsen schon weit ausgestreckt sind und somit die Handachsen auch nur noch wenige Orientierungen erreichen können. Neben den Schaubildern kann der Kinematik-

Benchmark auch anhand eines einfachen Scores verglichen werden. Dazu werden die durchschnittlich erreichbaren Orientierungen im gesamten Arbeitsraum ermittelt. Dieser Score liegt daher wieder im Spektrum zwischen 0 - 14.

Für die Beweglichkeit des Roboters (hier anhand des Prototyp 5 gemessen) hat sich insbesondere die Länge und die Achsbegrenzung des Armteils 5, einer der drei Handachsen, als signifikant herausgestellt. Daher sind in Abbildung 40 Variationen dieser Achse - in Länge und Achsbegrenzung - dargestellt.

Graph	Besonderheit	Armlänge	Achsbegrenzung (θ_{5max})
(a)	Baseline: Prototyp 5	100mm	110 °
(b)	kurze Achse 5	50mm	110°
(c)	lange Achse 5	150mm	110°
(d)	bewegl. Achse 5	100mm	150°
(e)	bewegl.&kurze Achse 5	50mm	150°

Die Ergebnisse der Kinematik-Benchmarks der in Abbildung 40 dargestellten Variationen des RobotermODELLES sind ebenfalls in folgender Tabelle aufgeführt.

Graph	Dimension Arbeitsraum	Avg. Orientierungen
(a)	0.649 m^2	5,73
(b)	0.500 m^2	7,20
(c)	0.808 m^2	4,75
(d)	0.693 m^2	7,21
(e)	0.519 m^2	9,28

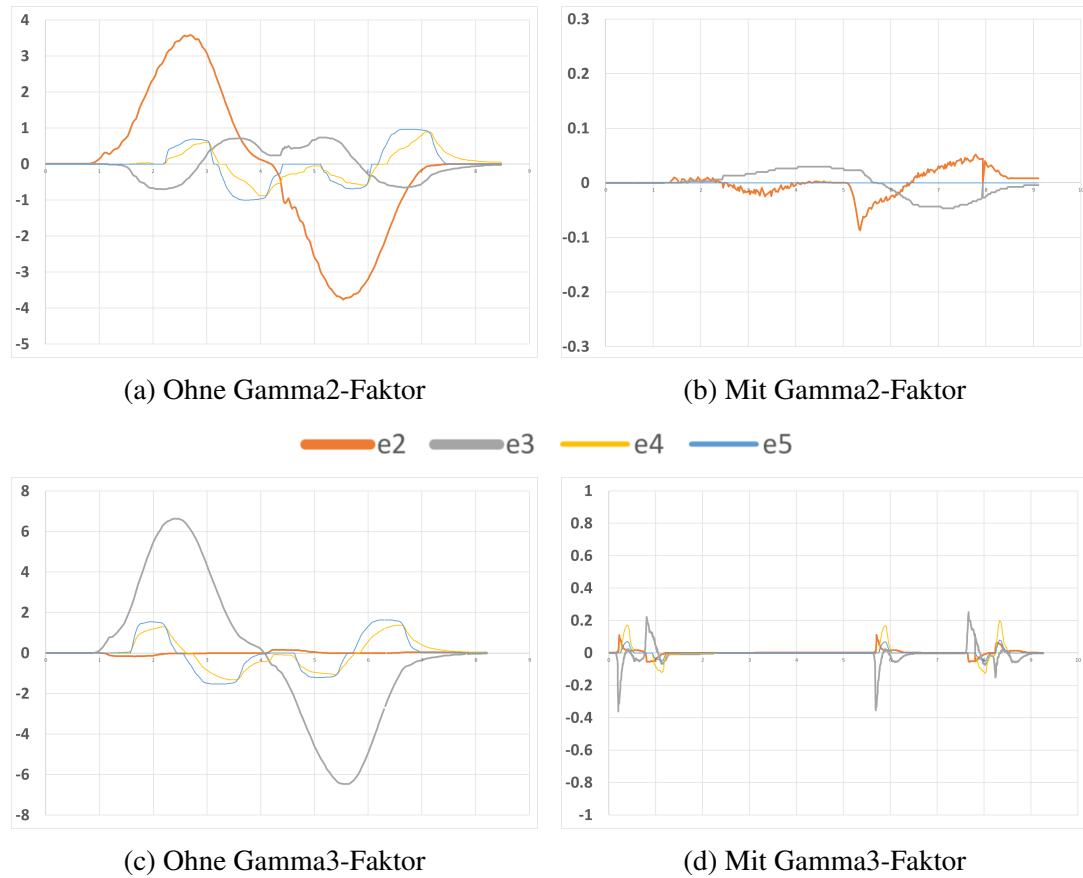


Abbildung 41: Steuerung mit und ohne Gamma-Faktoren

6.2 Steuerung des Roboters

In diesem Kapitel werden verschiedene Messreihen zur Steuerung des Roboters vorgestellt. Alle Messungen wurden an realen Robotern durchgeführt. Die Schaubilder zeigen jeweils die Abweichung der Ist- zur Soll-Position der einzelnen Achsen. Die Sollwerte wurden anhand verschiedener Bewegungsabläufe (mit sinoiden Bewegungsprofil sofern explizit anders erwähnt) generiert. Die Ist-Werte wurden anhand der verbauten Sensoren des Roboters gemessen. Die Abweichung zwischen Ist- und Soll-Wert, die Regelabweichung (in den Schaubildern als Error e_1 - e_5 bezeichnet), soll minimiert werden.

Im Folgenden werden drei Messreihen vorgestellt:

- Zunächst wird der Effekt der dynamischen Übersetzung (Funktionen g2 und g3) getestet
 - In der nächsten Testreihe werden die Unterschiede von Regelung, Vorsteuerung sowie die Kombination der beiden unter praxisnahen Bedingungen getestet
 - Die dritte Messreihe zeigt den Unterschied zwischen sinoiden und trapezförmigen Bewegungsprofil

6.2.1 Einfluss Gamma-Faktor

In Abbildung 41 wird der Einfluss der dynamischen Übersetzung gezeigt.

Auf der linken Seite (a), (c) sind jeweils die Messungen ohne Berücksichtigung des Übersetzungsfaktors g_2 bzw. g_3 zu sehen. Auf der rechten Seite (b), (d) wurde die gleiche Bewegung ausgeführt, jedoch mit Berücksichtigung der korrekten dynamischen Übersetzung. Man beachte auch unterschiedliche Scala zwischen linker und rechter Seite. Da die Werte im rechten Schaubild deutlich kleiner sind, musste zur Lesbarkeit die Scala angepasst werden.

Wie deutlich zu sehen ist, führt die Vernachlässigung der korrekten dynamischen Übersetzung zu einer großen Regelungsabweichung. (Abbildung 41 (a) (c)) Die maximale Abweichung beträgt $3,8^\circ$ bei Achse 2 in (a) und $6,7^\circ$ bei Achse 3 in (c).

Im Vergleich dazu ist durch die Verwendung der korrekten Übersetzungswerte von g_2 und g_3 die Abweichung deutlich geringer.

Durch das Abrollen der Achsen 4 und 5 wirkt sich eine Regelabweichung der Hauptachsen 2 und 3 auch auf die nachfolgenden Achsen aus. Aus diesem Grund ist Minimierung des Achserrors noch entscheidender. Die entstehende Regelabweichung der Achse 4 und 5 sind in (a) und (c) deutlich zu sehen. Durch die fehlerhafte Geschwindigkeit der Hauptachsen ist auch die Kompensation dieser Achsen, die aufgrund des Abrollens notwendig ist, nicht korrekt. Aus diesem Grund entsteht eine Abweichung an Gelenken die an der Bewegung gar nicht beteiligt waren. (e4 in gelb, e5 in blau in Abbildung 41)

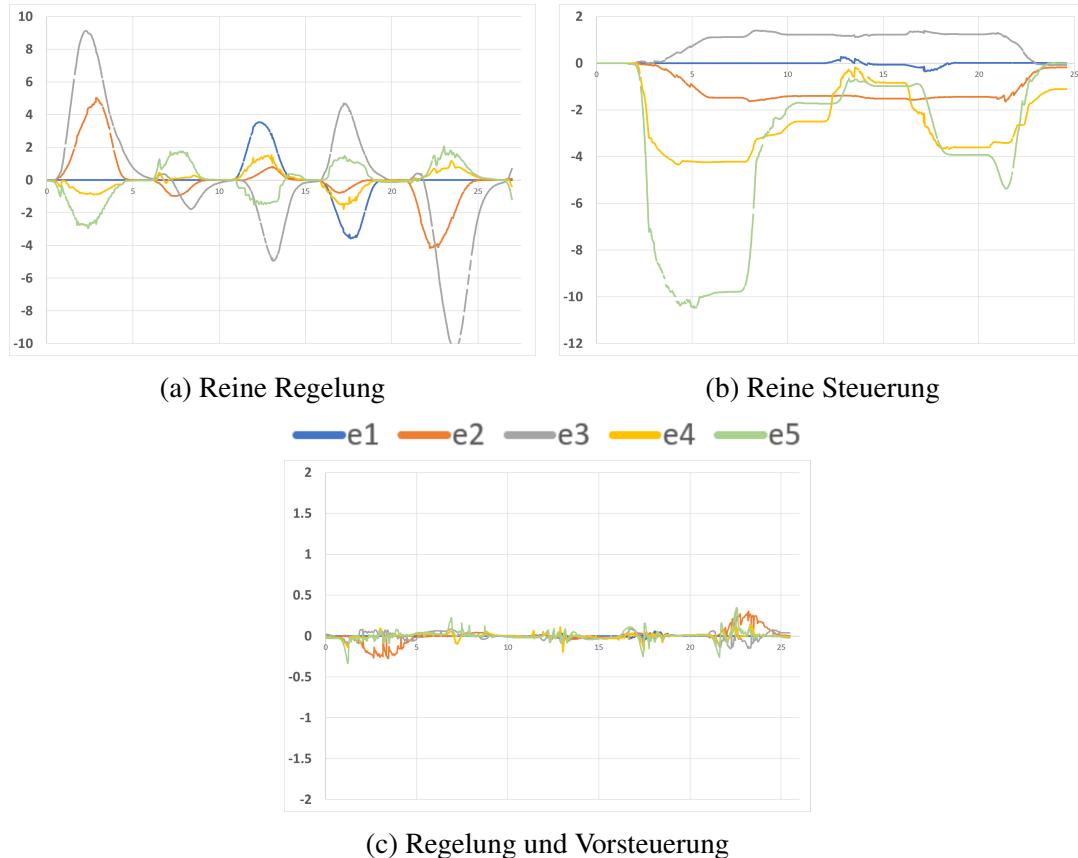


Abbildung 42: Lineare Bahnfahrten mit und ohne aktiver Regelung und Vorsteuerung

6.2.2 Steuerung & Regelung

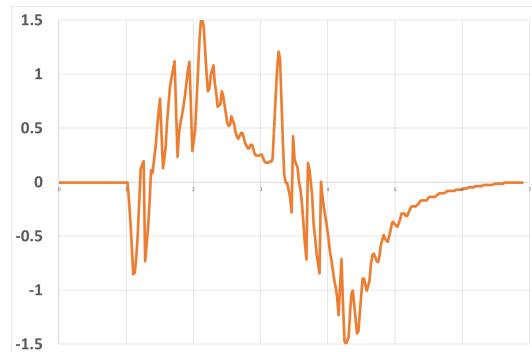
In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Regelung und Vorsteuerung anhand der Messdaten in Abbildung 42 vorgestellt. Da der Einfluss der Regelung und Vorsteuerung in sehr restriktiven Testumgebungen (etwa die Bewegung einzelner Achsen) nur wenig repräsentativ ist wurde ein praxisnahere Bewegungsablauf in Form mehrerer linearen (kartesischen) Bewegungen im Raum, an denen alle Achsen beteiligt sind.

REINE REGELUNG

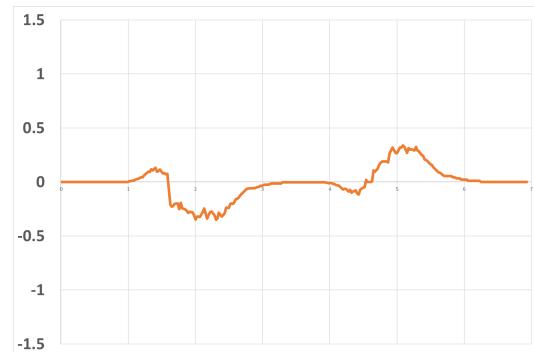
REINE STEUERUNG

REGELUNG MIT VORSTEUERUNG

REGELUNG MIT VORSTEUERUNG



(a) Lineares Profil



(b) Sinoides Profil

Abbildung 43: Bewegung der Achse 1 mit linearem und sinoidem Bewegungsprofil

6.2.3 Bewegungsprofile

- Vollsynchron vs Asynchron, synchron
- Ramp vs Sinoid

VERSCHIEDENE BEWEGUNGSPROFILE

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: Steuerung mit und ohne Gamma-Faktoren	6
Abbildung 7: Eulerwinkel (Z-X'-Z'')	9
Abbildung 8:	11
Abbildung 9:	11
Abbildung 10: Verschiebung des TCP durch Endeffektor	11
Abbildung 11: Schematische Darstellung der direkten Kinematik	11
Abbildung 12: Schematische Darstellung der inversen Kinematik	12
Abbildung 13: Mehrdeutigkeit bei Zwei-Achs-Roboter	13
Abbildung 14: Mehrdeutigkeit und Singularität	13
Abbildung 15:	16
Abbildung 16:	16
Abbildung 17: Lineares bzw. Rampenprofil	16
Abbildung 18: Sinoidenprofil	16
Abbildung 19: Asynchrone PTP: Achsen erreichen die Zielposition in verschiedenen Zeiten	18
Abbildung 20: Modell 3	19
Abbildung 21: Versionshistorie der Prototypen des Roboter "HORST"	20
Abbildung 22: Konstruktionszeichnung neben Strichmodell von Prototyp 5 . .	21
Abbildung 23: Detailschaubilder der zwei Viergelenksketten	22
Abbildung 24: Dynamische Übersetzung der Achsen 2 und 3	23

Abbildung 25:	26
Abbildung 26: Schema der Antriebsübertragung	27
Abbildung 27: Punkt-Stabmodell	30
Abbildung 28: Berechnung der variablen Punkte	33
Abbildung 29: Funktionsgraph von g_2 und g_3 in Abhängigkeit der Achswinkel	34
Abbildung 30: Torque 2	36
Abbildung 31: Torque 2	37
Abbildung 32: Visualisierung des Kinematik-B	38
Abbildung 33: Kraftübertragung über Viergelenksketten	39
Abbildung 34: Kraftübertragung und Achsabrollen	40
Abbildung 35: Regelung und Steuerung	41
Abbildung 36: Verschiedene Hebellängen ($Hebel_{2-4}$)	43
Abbildung 37: Scoring Funktions	46
Abbildung 38: Achs-Drehmoment neben Motor-Drehmoment	48
Abbildung 39: Workspace	50
Abbildung 40: Resultate des Kinematik-Benchmarks	51
Abbildung 41: Steuerung mit und ohne Gamma-Faktoren	53
Abbildung 42: Lineare Bahnfahrten mit und ohne aktivierter Regelung und Vorsteuerung	55
Abbildung 43: Bewegung der Achse 1 mit linearem und sinoidem Bewegungsprofil	56

Literaturverzeichnis

- [1] J. Rieger and M. Frey, “Roboter mit mehreren koppelgetrieben in leichtbauweise,” July 13 2017. WO Patent App. PCT/IB2017/050,073.
- [2] A. Colamussi, “High-speed industrial handler,” Nov. 15 2000. EP Patent App. EP20,000,201,629.
- [3] F. Ehrenleitner, “Knickarmroboter mit armantrieb,” Dec. 21 2011. EP Patent App. EP20,110,450,074.
- [4] and others, “,” May 20 2015. CN Patent App. CN 201,410,825,915.
- [5] “,” Nov. 25 2015. CN Patent 103,787,205.
- [6] P. Steibler, J. Rieger, and M. Frey, “Verbindungstechnik von carbonfaserverstärkten kunststoff-halbzeugen in dynamischen robotersystemen,” 2015.
- [7] Wikipedia, “Platzhalter Wikipedia.” <https://de.wikipedia.org>, 2017.
- [8] W. Weber, *Industrieroboter - Methoden der Steuerung und Regelung*. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
- [9] 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 30. November 2017, Tim Schmiedl