



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 : 13. Dezember 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 Kinematiktypen	1
1.2 Robotmodell HORST	2
1.3 Ziel der Arbeit	3
1.3.1 Analyse des kinematischen Modells	3
1.3.2 Steuerung des Roboters	3
1.3.3 Analyse und Optimierung der Kinematik	3
1.4 Aufbau der Arbeit	4
2 Verwandte Arbeiten	5
3 Grundlagen	9
3.1 Roboterkomponenten	9
3.2 Roboterpositionierung	11
3.2.1 Koordinatensysteme & Orientierung	11
3.2.2 Denavit-Hartenberg Parameter	12
3.3 Berechnung der Kinematik	14
3.3.1 Vorwärtstransformation	14
3.3.2 Rückwärtstransformation	14
3.4 Roboterbewegung	16
3.4.1 PTP-Bahn	17
3.4.2 CP-Bahnsteuerung	18
3.4.3 Bewegungsprofil & Interpolation	19
3.5 Kräfte und Drehmomente	20

3.6	Viergelenkskette	21
3.7	Arbeitsraum und Beweglichkeit	22
4	Viergelenksroboter HORST	25
4.1	Versionshistorie	26
4.2	Definitionen der kinematischen Elemente	27
4.3	Viergelenksketten	28
4.3.1	Viergelenksketten der Roboterachse 2	28
4.3.2	Viergelenksketten der Roboterachse 3	28
4.3.3	Dynamische Übersetzung	29
4.4	Antrieb & Sensorik	30
4.4.1	Motoren	30
4.4.2	Kraftübertragung	31
4.4.3	Achsenencoder	32
5	Ansatz und Methodik	33
5.1	Kinematische Analyse	34
5.1.1	Punkt-Stabmodell	34
5.1.2	Gamma-Funktionen	36
5.1.3	Analytische Inverse Kinematik	37
5.1.4	Drehmomente	38
5.1.5	Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark	40
5.2	Steuerung des Roboters	42
5.2.1	Abrollen der Achsen	42
5.2.2	Regelung und Vorsteuerung	44
5.3	Optimierung der Kinematik	46
5.3.1	Gradientenabstiegsverfahren	47
5.3.2	Scoring-Funktionen	48
5.3.3	Partielle Ableitungen	50
5.3.4	Gradientenabstieg	51
5.3.5	Startwert-Generierung und Gradient-Noise	51
6	Experimente	53
6.1	Kinematische Analyse	54

6.1.1	Drehmomente	54
6.1.2	Workspace	56
6.1.3	Beweglichkeit & Kinematik-Benchmark	58
6.2	Steuerung des Roboters	60
6.2.1	Einfluss Gamma-Faktor	61
6.2.2	Steuerung & Regelung	62
6.2.3	Bewegungsprofile	64
6.3	Optimierung der Kinematik	65
6.3.1	Zufällige Hebelkinematiken	65
6.3.2	Optimierte Hebelkinematiken	65
6.3.3	Workspace & Beweglichkeit	69
7	Zusammenfassung	71
7.1	Kinematische Analyse	71
7.2	Steuerung des Roboters	72
7.3	Optimierung der Kinematik	72
7.4	Fazit	73
Anhang		75
Anhang A Erster Anhang		1
Abbildungsverzeichnis		i
Literaturverzeichnis		iii
Eidesstattliche Erklärung		v

1 Einleitung

Ein Industrieroboter ist ein universell einsatzbares, frei programmierbares Handhabungsgerät. Anwendungsgebiete sind dabei Montage, Bearbeitung von Werkstücken und viele weitere Handhabungsprozesse, die in ähnlicher Form zuvor von Menschenhand erledigt werden mussten.

Aus diesem Grund ist die Struktur eines Industrieroboter in vielen Fällen grob dem menschlichen Arm nachempfunden. Diese Roboter nennt man daher auch Knickarm-Roboter. In den meisten Fällen werden dabei sechs Rotationsachsen verbaut um die sechs Freiheitsgrade einer räumlichen Lage eines Werkstück, kurz Pose abdecken zu können.

1.1 Kinematiktypen

Als Kinematik eines Roboters werden alle an der Bewegung beteiligten Komponenten, insbesondere die Armteile und Gelenksachsen, bezeichnet.

Die einfachste und verbreiteste Methode der Anordnung der Roboterachsen ist dabei der Aufbau einer seriellen Struktur. Hier bei ist jedes Gelenk aktiv durch einen Antrieb gesteuert.

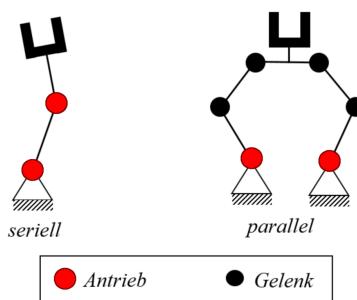


Abbildung 1: Offene und geschlossene Kinematische Kette

Im Gegensatz dazu gibt es in einer geschlossenen kinematischen Kette eine Unterscheidung zwischen aktiven und passiven Gelenken. Der Antrieb erfolgt über einen oder mehrere Punkte in der Kette und wird über Stäbe an die zu bewegende Achse weitergeleitet.

Abbildung 2 zeigt verschiedene serielle und parallele Roboter. Ein klassischer Vertreter einer seriellen Struktur ist etwa der Knickarmroboter IRB140 der Firma ABB

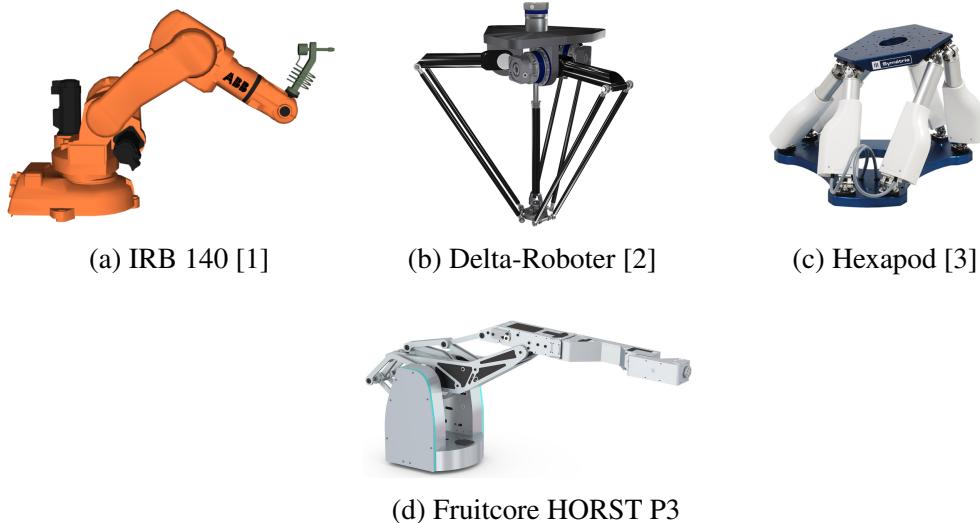


Abbildung 2: Verschiedene serielle und parallele Roboter

(a). Dagegen sind Delta-Roboter (b) und Hexapod (c) Vertreter paralleler Kinematiken.

Während serielle Kinematiken aufgrund der einfacheren Steuerung sowie der weniger komplexen Konstruktion und Montage weit verbreitet sind, können parallele Strukturen mit hoher Dynamik und großer Präzision punkten. Der Roboter HORST (d) der Firma fruitcore GmbH verwendet sowohl parallele als auch serielle Antriebe und versucht damit die Vorteile beider Kinematiken zu verbinden. Dieses Robotermodell liegt dieser Abschlussarbeit zugrunde.

1.2 Robotermodell HORST

Der Roboter HORST wird von der Firma fruitcore GmbH gebaut. Das kinematische Modell wurde in den Forschungslaboren der Hochschule Konstanz entwickelt. Nach der Gründung der Firma fruitcore wurde die spezielle Hebelkinematik des Roboters 2017 zum europa- und weltweiten Patent angemeldet.

Der Roboter besteht aus einer hybriden Kinematik, es werden sowohl parallel sowie serielle Aufbauten verwendet. Die dritte Generation des Roboters ist in Abbildung 2 (d) zu sehen. Die Besonderheit des Roboters ist die Verwendung von mehreren gekoppelten Viergelenksketten zum Antrieb der Hauptachsen. Durch die vorteilhafte Platzierung der Viergelenksketten können die statisch und dynamisch auftretenden Kräfte geschickt abgeleitet werden um so eine deutliche Leistungssteigerung der Hauptachsen zu erreichen. Die parallele Struktur und die Platzierung der Motoren im festen Sockel ermöglicht es die beweglichen Armteile des Roboters in Leichtbauweise zu fertigen und somit eine deutliche Kosteneinsparung zu erreichen.

Das komplexe kinematische Modell erfordert eine angespaßt Steuerung. Durch die dynamischen Übersetzungsverhältnisse der Viergelenksantriebe sind die Parameter der

Steuerung von der Stellung des Roboters abhängig.

1.3 Ziel der Arbeit

Das Ziel dieser Arbeit ist es die Kinematik des Viergelenksroboters HORST zu analysieren, eine darauf angepasste Steuerung zu entwickeln und anschließend Vorschläge für die Optimierung der Hebelkinematik vorzustellen. Diese dreigeteilte Zielsetzung wird in den folgenden Abschnitten genau erläutert.

Die (vorläufigen) Erkenntnisse und Resultate dieser Arbeit wurden schon während dem Bearbeitungszeitraum für die zeitgleich stattfindende Planung eines neuen neuen Prototypen für die nächste Generation des Roboters verwendet.

1.3.1 Analyse des kinematischen Modells

Zu Beginn der Arbeit wird das kinematische Modell genau beschrieben und anschließend analysiert. Es werden die Besonderheiten beschrieben, die durch den Einsatz der verketteten Viergelenksketten entstehen. Dies umfasst die sich ergebende dynamische Übersetzungen als auch die auftretenden Kräfte und Drehmomente. Zusätzlich wird eine Berechnungsart der direkten Kinematik vorgestellt. Um die maximalen Drehmomente der Antrieb- und Roboterachsen in allen Stellungen des Roboters zu ermitteln werden verschiedene Schaubilder vorgestellt. Für die Vergleichbarkeit der Beweglichkeit und der Größe des Arbeitsraumes verschiedener Roboter wird ein einfacher Benchmark eingeführt.

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 realen Roboter getestet. In den entsprechenden Kapiteln wird insbesondere auf die dynamischen Übersetzungen als auch die Verkopplung verschiedener Achsen durch die Kraftübertragung der Riemen eingegangen. In verschiedenen Experimenten werden die Auswirkungen verschiedener Methoden zur Steuerung und Regelung anhand von realen Robotern gemessen. Dabei insbesondere auf die Genauigkeit und Stabilität des Roboters geachtet.

1.3.3 Analyse und Optimierung der Kinematik

Die dritte Zielsetzung behandelt die Möglichkeiten der Optimierung der Kinematik. Als Grundlage hierzu dienen die Erkenntnisse aus dem Analyseteil der Arbeit. Es werden die veränderlichen Parameter der Hebelkinematik herausgearbeitet. Anschließend

werden verschiedene Scoring-Funktionen vorgestellt, welche eine Bewertung einer vorliegenden Kinematik erlauben. Anhand dieser Funktionen wird ein Optimierungsverfahren verwendet um unter Berücksichtigung verschiedener Einschränkungen neue verbesserte Kinematiken automatisch generieren zu können. Durch die im ersten Teil entwickelten Benchmarks konnten die generierten Kinematiken evaluiert werden.

1.4 Aufbau der Arbeit

Neben dem Einführungskapitel besteht diese Arbeit aus sechs weiteren Kapiteln.

Kapitel 2 stellt verschiedene mit dieser Arbeit verwandte Arbeiten vor. Es wird das dieser Abschlussarbeit zugrundeliegende Patent, sowie ähnliche Kinematiken beschrieben. Zusätzlich wird relevante und für die vorliegende Ausarbeitung verwendete Fachliteratur vorgestellt.

Kapitel 3 beschreibt Grundlagen zum Thema Industrieroboter. Es die Komponenten und Beschreibung und Berechnung einer Roboterstellung eingeführt. Zusätzlich werden die in dieser Arbeit ausführlich diskutierten Themen der Viergelenksketten, Drehmomente der Roboterachsen und der Arbeitsraum eines Roboters vorgestellt.

Kapitel 4 stellt den Viergelenksroboter HORST vor. Es werden die Besonderheiten des Roboters, insbesondere die Viergelenksketten, genau beschrieben.

Kapitel 5 stellt den Ansatz und die Methodik dieser Masterthesis vor. Zunächst wird die Kinematik des Roboters HORST analysiert. Anschließend wird die entwickelte Steuerung vorgestellt. Abschließend werden Methoden zur Optimierung der Kinematik diskutiert.

Kapitel 6 überprüft die Ideen und Methoden des vorherigen Kapitels experimentell. Dazu werden neben Simulationen auch diverse Messreihen an einem realen Roboter durchgeführt.

Kapitel 7 fasst die Erkenntnisse dieser Abschlussarbeit nochmals zusammen. Die Ergebnisse werden in einem Fazit bewertet.

2 Verwandte Arbeiten

Die überwiegende Anzahl der auf dem Markt befindlichen Knickarmroboter sind anhand einer seriellen Struktur aufgebaut.

In [4] stellen die Erfinder einen Industrieroboter mit mehreren Koppelgetrieben vor. Eine schematische Abbildung des Roboters ist in Abbildung 3 (a) und (b) zu sehen, wobei (a) aus der Skizze der Patentanmeldung übernommen wurde. Der aus sechs Achsen bestehende Roboterarm wird in den Hauptachsen 2 und 3 von mehreren gekoppelten Viergelenksketten angetrieben. Dabei ist der Schwenkarm an einen soliden Sockel gelagert und durch einen Antriebshebel über zwei gekoppelte Viergelenksketten angetrieben. Die dritte Hauptachse, als Tragarm bezeichnet, wird ebenfalls über mehrere Viergelenksketten angetrieben. Dabei befindet sich der Antriebshebel auf der gleichen Welle wie die vorherige Roboterachse. Diese Problemstellung wird von den Erfindern mit dem Einsatz von Hohlwellen gelöst. Die spezielle Hebelkinematik des Roboters leitet Teile der statischen Kräfte durch die Stäbe der Viergelenksketten auf die feste Struktur ab. Somit kann für den Betrieb der Hauptachsen deutlich leistungsärmere und damit preiswerte Motoren eingesetzt werden. Die in Leichtbauweise aufgebaute mechanische Struktur des Roboters ermöglicht eine weitere Kostenersparnis zu erzielen.

Die Verwendung von Koppelgetrieben in der Robotik ist nicht sehr weit verbreitet. Die Autoren von [6] stellen ein mobilen Roboter mit vier Freiheitsgraden vor. In Abbildung 3 (d) wird ist der Roboter schematisch dargestellt. Der Knickarm-Mechanismus wird über mehrere Viergelenksketten angetrieben. Der Knickarm ist auf einer rotierenden Platte montiert, welche mit der fahrenden Plattform zwei weitere Freiheitsgrade hinzufügt.

In [7] wird ein mobiler Transportkran mit mehreren Koppelgetrieben vorgestellt. Der Einsatz der Viergelenksketten soll die in diesem Feld übliche Verwendung von hydraulischen Antrieben ersetzen. Eine Abbildung des Transporters ist in Abbildung 3 (e) zu sehen.

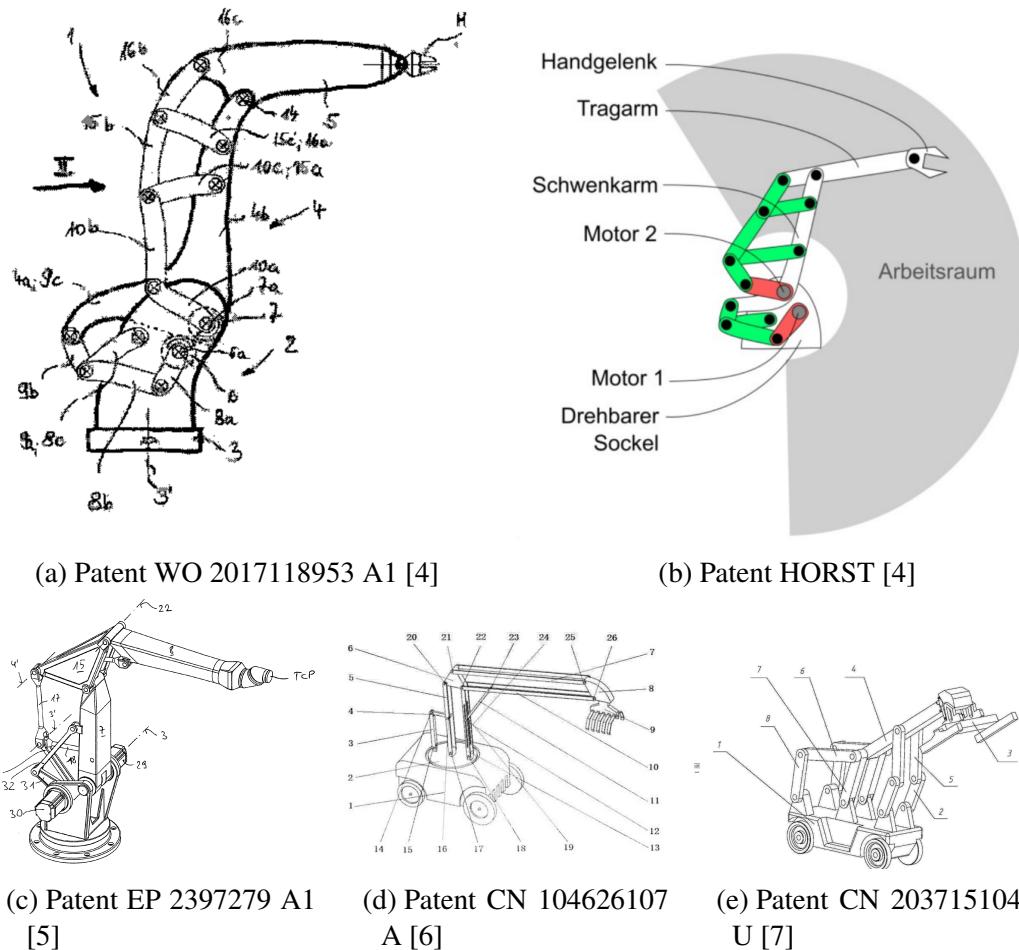


Abbildung 3: Roboter mit Antrieb über Viergelenksketten

FACHLITERATUR ROBOTIK

Im Zuge dieser Arbeit wurden viele Methoden und Ansätze aus der Fachliteratur betrachtet.

In [8] werden verschiedene Methoden zur Steuerung und Regelung von Industrierobotern vorgestellt. Es werden zunächst Formalismen zur Beschreibung der Roboterstellung erklärt, sowie die Transformation zwischen Roboter- und Weltkoordinaten beschrieben. Es wird die Erstellung eines dynamischen Modells und verschiedene Regelungskonzepte vorgestellt.

Das umfangreiche Fachbuch [9] umfasst viele Themen der Robotik, sowohl die Steuerung und Lokalisierungsmethoden von mobilen Robotern als auch verschiedene Konzepte der Bilderkennung und optischen Steuerung von Robotern. Relevant für diese Arbeit waren hauptsächlich die Kapitel zur Beschreibung und Steuerung von Arm-Robotern. Neben der direkten und inversen Kinematik wird etwa die Geschwindigkeitsbeziehungen der Gelenkwinkel und der Punkte im kartesischen Raum mithilfe von Jacobi-Matrizen beschrieben.

Weitere Grundlagen der Kinematik und Robotik sind in [10] aufgeführt. Es werden

die mathematischen und geometrischen Grundlagen der ebenen Kinematik als auch die der Raum- und Roboterkinematik vorgestellt.

In [11] werden Grundlagen der Robotik anhand von Knickarm-Robotern vorgestellt. Es werden die Grundbegriffe der Freiheitsgrade, des Arbeits- und Kollisionsraum vorgestellt als auch Methoden zur Beschreibung und Berechnung einer Kinematik aufgeführt.

In [12] werden die Vor- und Nachteile von Parallel-Robotern ausführlich dargestellt. Es werden verschiedene mechanisch mögliche Kinematiken vorgestellt und analysiert.

Weitere Analysen von Parallelstrukturen werden in [13] behandelt. Hierbei werden die Annäherungen an singuläre Stellungen betrachtet und ein geometrischer Ansatz entwickelt um diese Singularitäten zu beschreiben.

FACHLITERATUR TECHNISCHE MECHANIK

Ein zentraler Bestandteil dieser Arbeit sind die Berechnungsmethoden von Hebelkräften, Drehmomenten, Trägheitsmomenten und Beschleunigungen. Dies fällt unter den Teilbereich der Technischen Mechanik.

Dazu wird in [14] und [15] das Teilgebiet der Statik behandelt. Es werden alle Kräfte auf einen ruhenden Körper beschrieben. Dagegen behandeln [16] und [17] den Teilbereich der Dynamik. Dabei befasst sich das Fachbuch um hauptsächlich um die Kinetik, die sich mit Kräften und Momenten in bewegten Systemen beschäftigt.

WEITERE FACHLITERATUR

In [18] und [19] werden Grundlagen der Steuerung- und Regelungstechnik erklärt. Es werden unterschiedliche Regler vorgestellt und die Methodik der Vorsteuerung erklärt.

[20] stellt eine Einführung in Optimierungsverfahren vor. Für diese Abschlussarbeit war insbesondere die Kapitel der Gradientenverfahren von Interesse. Auch in [21] und [22] wird das Abstiegsverfahren genau beschrieben.

3 Grundlagen

In diesem Kapitel werden einige Grundlagen im Bereich der Robotik, insbesondere im Feld von Industrierobotern, erklärt. Insbesondere werden folgende Themen erläutert:

- Definitionen der verschiedenen Komponenten eines Industrieroboters
- Koordinatensysteme und Beschreibung der Orientierung eines Werkstückes
- Beschreibung der Kinematik eines Knickarmroboter durch die Denavit-Hartenberg-Konvention
- Berechnung der direkten und inversen Kinematik
- Bewegung der Achsen und Bahnplanung
- Viergelenksketten und Koppelgetriebe
- Arbeitsraum und Beweglichkeit eines Roboters

3.1 Roboterkomponenten

Ein Industrieroboter ist eine komplexe Maschine mit vielen Einzelteilen. Im Folgenden werden die wichtigsten Komponenten vorgestellt. In Abbildung 4 sind die wichtigsten Komponenten am Beispiel des Robotermodells IRB140 hervorgehoben.

Definition 1 Als **Roboterachse (Joint)** wird das bewegliche Gelenk zwischen zwei Armteilen bezeichnet. Es gibt Knick- und Rotationsachsen. Der Rotationswinkel wird als θ_i bezeichnet.

Die zentralen Komponenten (blaue Punkte in Abbildung 4) eines Industrieroboters sind seine Rotationsachsen. Zumeist besitzt ein Industrieroboter sechs Achsen, drei *Hauptachsen* und drei *Handachsen*.

Definition 2 Als **Hauptachse** werden die ersten drei Roboterachsen (Achse 1, 2 und 3) bezeichnet. Sie sind hauptsächlich für die Position des Endeffektors verantwortlich.

Definition 3 **Handachse (Hand, Roboterhand)** bezeichnet die letzten drei Roboterachsen (Achse 4, 5 und 6). Sie sind hauptsächlich für die Ausrichtung des Endeffektors verantwortlich.

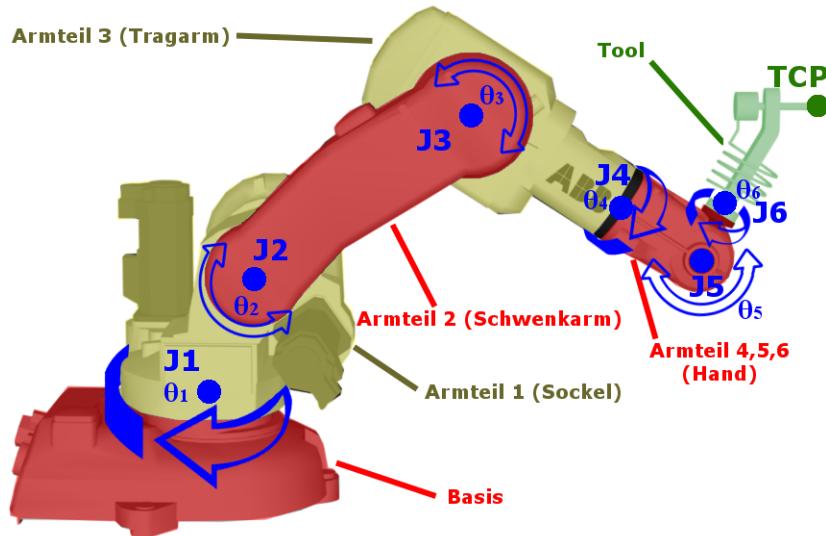


Abbildung 4: Roboterachsen

Mit den sechs beweglichen Gelenken kann der Roboter sechs Freiheitsgrade im Raum beschreiben. Der *Endeffektor* bzw. *TCP* kann somit die drei translatorische (Position) und die drei rotatische (Orientierung) Komponenten einer räumlichen Lage, als *Pose* bezeichnet, beschreiben.

Definition 4 Als *Endeffektor* (bzw. *Tool Center Point TCP*) wird ein gedachter Referenzpunkt an der letzten Roboterachse bezeichnet. Dieser kann entweder direkt auf Höhe der letzten Achse liegen, oder an geeigneter Stelle an einem angeschlossenen Werkzeug.

Definition 5 *Flansch* (*Roboterflansch*) bezeichnet das Anschlussstück der letzten Handachse. Ist kein Werkzeug montiert ist der Flansch auch gleichzeitig der TCP.

In Abbildung 4 sind alle Roboterachsen (J1 - J6) und ihre Drehrichtungen eingezeichnet. Zusätzlich ist auch ein Werkzeug montiert, der TCP liegt somit nicht auf der gleichen Position wie der Roboterflansch J6. In dem Schaubild sind auch die Armteile des Roboters farblich hervorgehoben: *Basis*, *Sockel*, *Schwenkarm*, *Tragarm* und *Roboterhand*.

Definition 6 Die *Basis* eines Roboters ist fest mit dem Boden verbunden.

Definition 7 Der *Sockel* (Armteil 1) wird durch die Hauptachse 1 bewegt. Es handelt sich um eine Rotationsachse. Der Sockel kann somit massiv gebaut werden, da die Achse von der Schwerkraft nicht beeinflusst wird.¹

Definition 8 Als *Schwenkarm* (Armteil 2) wird der von Hauptachse 2 angetriebene Armteil bezeichnet.

Definition 9 Der *Tragarm* (Armteil 3) wird von der dritten Hauptachse bewegt.

¹Eine aufrechte oder Kopf-Über-Positionierung des Roboters vorausgesetzt.

3.2 Roboterpositionierung

3.2.1 Koordinatensysteme & Orientierung

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

Pose

Die Lage eines Werkstückes wird neben der Position zusätzlich durch die Orientierung des Objektes beschrieben. Die Kombination aus Position- und Orientierungsbeschreibung wird als räumliche Lage bzw. *Pose* bezeichnet. Die drei translatorischen (Position) und drei rotatorischen (Orientierung) Angaben bilden somit die sechs Freiheitsgrade der Lagebeschreibung in einem dreidimensionalen Raum.

Während die Position eines Teiles im Raum in einem kartesischen Koordinatensystem einfach und sehr anschaulich beschrieben werden kann ist die Orientierung eines Teiles schwieriger darzustellen. Die drei meistverwendeten Darstellung einer Orientierung im Raum sind Rotationsmatrizen, 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:

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

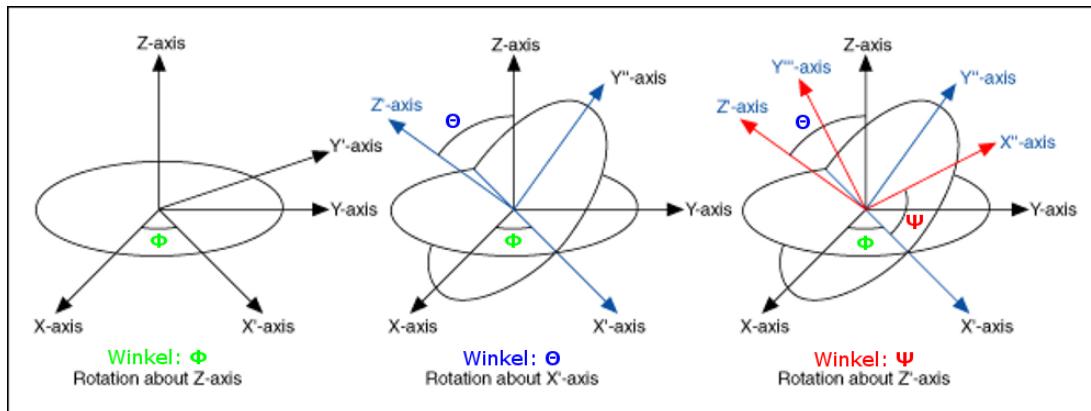


Abbildung 5: Eulerwinkel (Z-X'-Z'')

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. [23]

Dabei werden die Drehungen jeweils auf den Achsen der entstehenden Koordinatensystemen angewendet. Es existieren 12 verschiedene Kombinationen dieser 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''

3.2.2 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

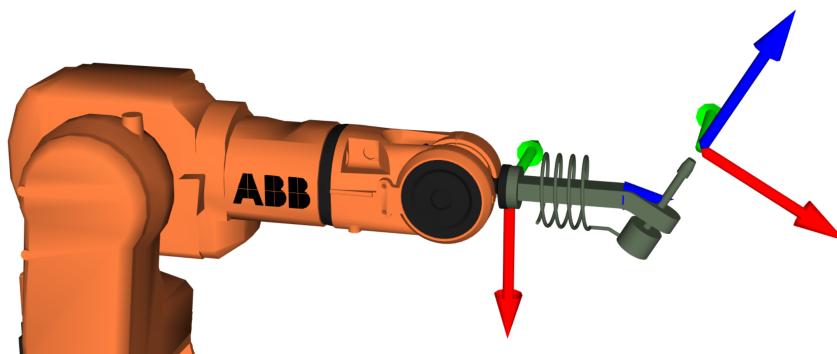


Abbildung 6: Verschiebung des TCP durch Endeffektor

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.

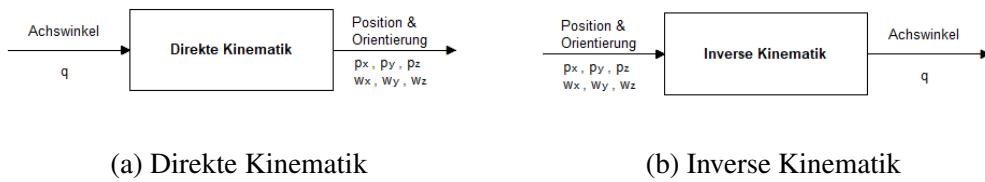


Abbildung 7: Schematische Darstellung der direkten/inversen Kinematik

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

3.3 Berechnung der Kinematik

3.3.1 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.

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

3.3.2 Rückwärtstransformation

Die Rückwärtstransformation oder inverse Kinematik ist das logische Gegenstück zur direkten Kinematik. Sie ermöglicht die Bestimmung der Gelenkwinkel anhand einer Pose des Endeffektors. [23]

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.

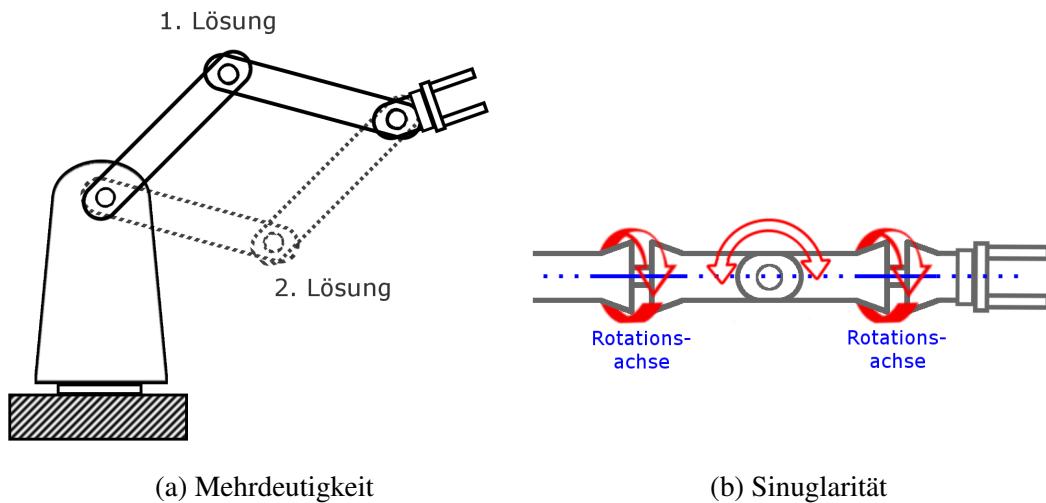


Abbildung 8: Mehrdeutigkeiten und Singularität

MEHRDEUTIGKEITEN

Abbildung ?? 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 kollinear sind, also in die gleiche Richtung zeigen.

In einer solchen Stellung hat die Rotation um die erste Drehachse (Achse 4 in Abbildung ??) den gleichen Effekt wie die Rotation der nachfolgenden Drehachse (Achse 6 in Abbildung ??). 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.

Dementsprechend gibt es Singularitäten sobald:

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

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

BERECHNUNGSFORMEN

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

Grundsätzlich gibt es zwei Ansätze:

- **Algebraische Methoden:** Durch sukzessive Invertierung der Denavit-Hartenberg-Transformationsmatrizen und damit Lösung des folgenden Gleichungssystems können nach und nach die einzelnen Vektorkomponenten der Gelenkwinkel berechnet werden.[23]
- **Geometrische Methoden:** Aufgrund des Wissens über die Geometrie des Roboters wird versucht, zum Beispiel mit Hilfe von Kosinussatz oder Sinussatz den Gelenkwinkel-Vektor q zu berechnen.[23] Dabei werden die Lösungen aller Konfigurationen gefunden.
- **Numerische Methoden:** Sind Näherungsverfahren die iterativ versuchen eine Lösung für den Gelenkwinkel-Vektor q zu finden. Hierbei kann es problematisch sein ein geeigneten Startwert zu finden.

3.4 Roboterbewegung

Während sich die Kinematik eines Roboters mit der Beschreibung und Berechnung der statischen Roboterstellung beschäftigt, umfasst die Bahnsteuerung sich mit den Bewegungsabläufen die notwendig sind um den Roboter in eine definierte Stellung zu bringen.

Die einfachste Art einen Roboter von einer Stellung A zu einer Stellung B zu bewegen ist die Punktsteuerung, auch PTP-Bahn (Point-To-Point) genannt. 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 voraussehbar.

Für viele Anwendungen ist jedoch eine vorhersehbare - z.B. lineare - Bahn des TCP notwendig. Somit muss die Bahnplanung anhand von kartesischen Koordinaten stattfinden. Diese Art der Bewegung wird CP-Bahn (Continous Path) oder kartesische Bahnsteuerung genannt.

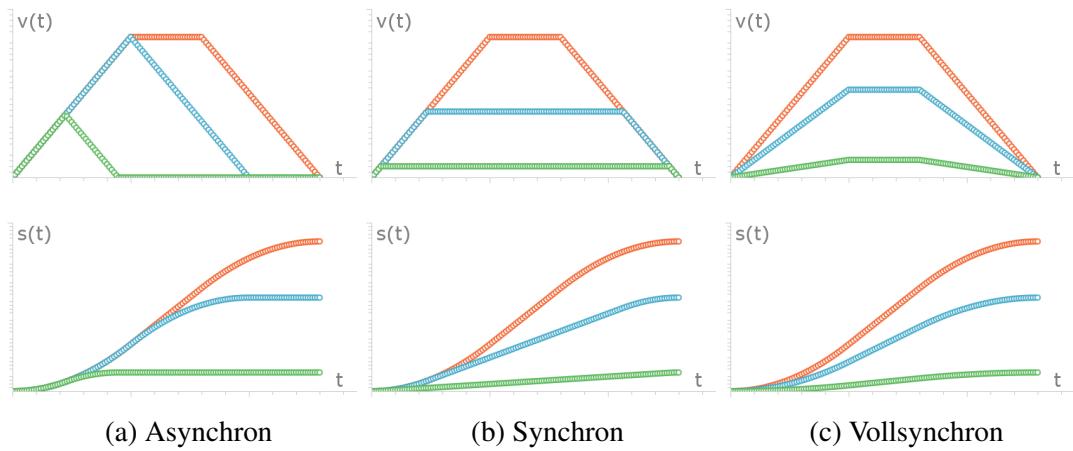


Abbildung 9: Bewegungsprofil verschiedenere PTP-Bahnen

3.4.1 PTP-Bahn

Für die PTP-Bahn muss zunächst die Zielstellung vorgegeben werden. Dies kann entweder explizit mit der Vorgabe der Achsstellungen am Zielpunkt geschehen oder wird durch Berechnung der Inversen Kinematik der Zielpose vorgegeben. Somit sind sowohl Start- als auch die Zielstellung in Joint-Koordinaten beschrieben.

Um die Zielstellung zu erreichen gibt es mehrere Möglichkeiten. Bei der **asynchronen PTP-Bahn** verfährt jede Achse vollständig unabhängig von den anderen Achsen zur jeweiligen Zielposition. Dabei erreichen die Achsen ihre Endpositionen allerdings im Allgemeinen nicht zur gleichen Zeit. In Abbildung ?? ist zu sehen, dass Roboterachsen mit kürzeren Weg schneller zum Stillstand kommen als Achsen die weitere Wege zurücklegen müssen.²

SYNCHRON UND VOLLSYNCHRONE PTP-BAHN

Um alle Roboterachsen gleichzeitig zu ihren jeweiligen Zielstellungen zu bringen wird die synchrone PTP-Bahn verwendet. Dabei wirkt die Bewegung des Roboters flüssiger und erscheint dem Benutzer intuitiver.

Für die Berechnung der Bahn muss zunächst eine Leitachse bestimmt werden. Dies ist diejenige Roboterachse, welche die längste Fahrtzeit von Start- zu Zielstellung aufweist. Alle anderen Achsbewegungen werden nun so angepasst, dass sie zur gleichen Zeit an der Zielstellung beendet sind. Dies ist auf zwei Arten zu erreichen:

- In der *synchronen PTP-Bahn* werden die Höchstgeschwindigkeiten der jeweiligen Achsen so angepasst, dass die Bewegung der Achse zeitgleich mit der Leitachse beendet ist.

²siehe etwa Achse 1

- In der *vollsynchronen PTP-Bahn* werden zusätzlich auch Beschleunigungen der Achsen angepasst, sodass auch der Beschleunigung- und Abbremspunkt zum gleichem Zeitpunkt erreicht wird.

In Abbildung ?? sind die verschiedenen Möglichkeiten der PTP-Bahnplanung dargestellt.

3.4.2 CP-Bahnsteuerung

In vielen Anwendungsfällen ist das Abfahren definierter Pfade notwendig. Hierbei muss die Bahnplanung anhand der kartesischen Koordinaten der Start- und Endposition stattfinden. Die Berechnung der zeitabhängigen Zwischenstellungen der Roboterachsen erfolgt in Abhängigkeit der gewählten Geschwindigkeit und Beschleunigung des Weltkoordinatensystems. Da sich der TCP kontinuierlich auf dem vordefinierten Pfad fortbewegt wird diese Steuerung *Continuous Path* Bahn genannt.

Die CP-Bahnplanung besteht aus mehreren Schritten. Zunächst wird der Pfad in viele kleine Bahnsegmente unterteilt. Für jedes dieser Segmente wird per inversen Kinematik eine Roboterstellung berechnet. Dabei ist Ausgangsstellung der Berechnung die Zielstellung des letzten Bahnsegmentes. Die (rechenaufwendige) Berechnung wird vor der Ausführung der Bewegung ausgeführt und die berechneten Werte zwischengespeichert. Nun wird die eigentliche Bewegung gestartet. Dabei werden die Sollwerte für die Gelenkachsen aus den zuvor gespeicherten Werten ausgelesen und an die Regelung der Achsen geleitet.

Im Gegensatz zur Point-to-Point-Bahn ist eine CP-Bahn nicht immer möglich, selbst wenn sowohl Start- und Zielpunkt durch den Roboter erreicht werden kann. Dies ist etwa dann der Fall, wenn gewünschte Pfad des TCP den Roboterarm selbst durchfahren sollte. Eine geeignete Bahnplanung erkennt die Selbstkollision und führt diese Bewegung nicht aus. Weiterhin ist auch das Durchfahren singulärer Stellungen problematisch. Da die Sollwerte der Achsen durch die Verwendung kartesischer Koordinaten entstanden, ist die Geschwindigkeit und Beschleunigung der Roboterachsen nicht beschränkt. In der Nähe von singulären Stellungen sind die Geschwindigkeiten der Roboterachsen bei kleinen kartesischen Änderungen sehr groß.³ Überschreitet die Geschwindigkeit bzw. Beschleunigung der Achsen die durch den Antrieb limitierten Maximalen Werte kann die Bewegung nicht ausgeführt werden, da sonst an der Stelle der Singularität Abweichungen des Endeffektors von der vordefinierten Bahn kommen kann.

³In der Stellung der Singularität ist die Gewindigkeit unendlich, da hier ein Freiheitsgrad verloren gegangen ist.

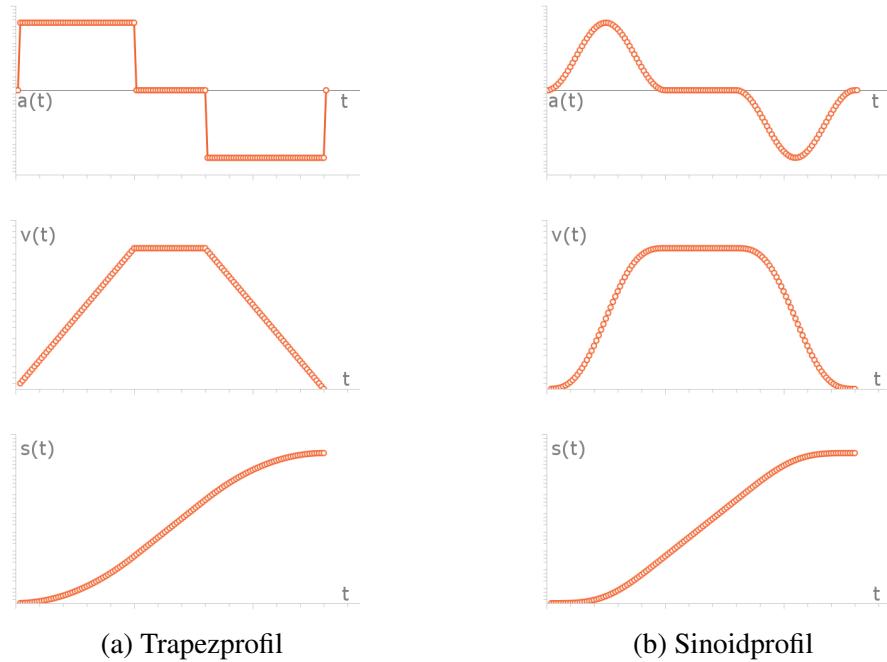


Abbildung 10: Bewegungsprofile: Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg

3.4.3 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 Schwingungen 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 **Trapezprofils**. In Abbildung ?? 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 Trapezprofils 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 Eigenschwingungen des Roboter. 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.

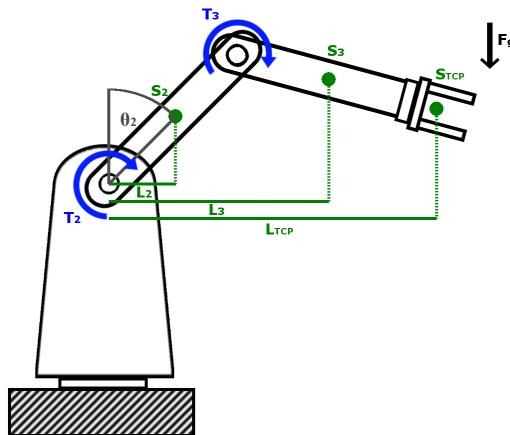


Abbildung 11: Drehmomente eines Drei-Achs-Roboter

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

3.5 Kräfte und Drehmomente

Für die Auslegung der Antriebselemente, die Steifigkeit der Armteile sowie die Lagerung der Rotationsachsen sind die Kräfte und Drehmomente in der Roboterstruktur von zentraler Bedeutung.

Definition 10 Das **Drehmoment** (englisch *Torque* T) beschreibt die Drehwirkung einer Kraft auf einen Körper. Sie ist von der (rechtwinklig) wirkenden Kraft F und dem Hebelarm l abhängig.

$$T := F * l \quad (3.2)$$

Häufig ist die wirkende Kraft dabei die Gewichtskraft. Um das durch die Gewichtskraft entstehende Drehmoment zu bestimmen wird der Schwerpunkt des rotierenden Teiles bestimmt, anschließend wird die wirkende Kraft durch die Masse und den angreifenden Winkel bestimmt.

Die Berechnung des Drehmoments einer Roboterachse ist aufgrund der Kopplung der Roboterarme von der Stellung aller nachfolgenden Achsen abhängig. Abbildung 11 zeigt die Bestimmung des Drehmoments anhand eines Drei-Achs-Roboters. Das Drehmoment der Achse 2 T_2 ist von der Stellung der Achse 2 (θ_2) und Achse 3 (θ_3) abhängig. Weiterhin müssen die Schwerpunkte und Masse der Armteile (S_2, S_3), sowie die Traglast (S_{TCP}), bestimmt sein.

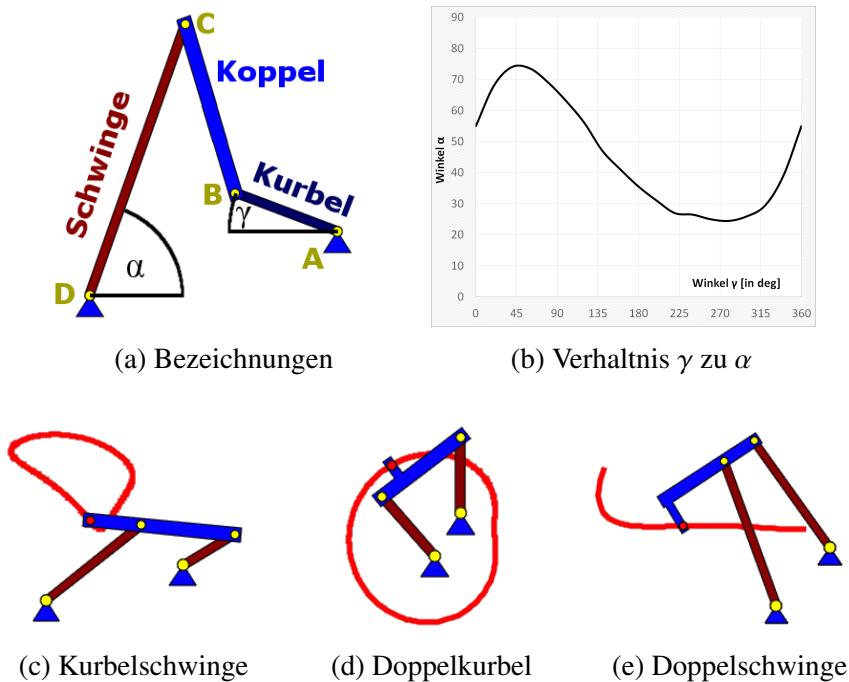


Abbildung 12: Viergelenksketten

In abgebildetem Beispiel lautet die Gleichung für das Drehmoment der Achse 2 etwa:

$$T_2 = m_2 * g * l_2 + m_3 * g * l_3 + m_{TCP} * g * l_{TCP}$$

3.6 Viergelenkskette

Abbildung ?? (a) zeigt das Schema einer Viergelenkskette.

Definition 11 Eine *Viergelenkskette* ist die einfachste Art eines **Koppelgetriebes** und besteht aus vier Gelenken und drei beweglichen Stäben. Sie gehört zu der Gruppe der ungleichförmig übertragenen Getrieben.

Der Antrieb einer Viergelenkskette erfolgt per Definition von der *Kurbel* (Glied A-B), welche fest mit einem der Fixpunkte verbunden ist. Das mit dem anderen Fixpunkt verbundene Glied (Glied D-C) heißt *Schwinge*. Beide Elemente sind mit der *Koppel*, dem Übertragungsglied, miteinander verbunden. Die Abhängigkeit des Winkels α (Schwinge) von γ (Koppel) ist in Abbildung ?? (b) dargestellt. Die Characteristik der dieser Funktion ist von den Längen der Glieder und die Lage der Fixpunkte abhängig. Wird eine Viergelenkskette zum Antrieb (etwa eines Roboterarms) verwendet, stellt diese Funktion das Übersetzungsverhältnis zwischen eingehender (Koppel) und ausgehender (Schwinge) Drehzahl dar.

Durch Veränderung der Längen der Glieder und die Lage der Fixpunkte können verschiedene Variationen der Viergelenkskette entstehen. Exemplarisch sind drei dieser

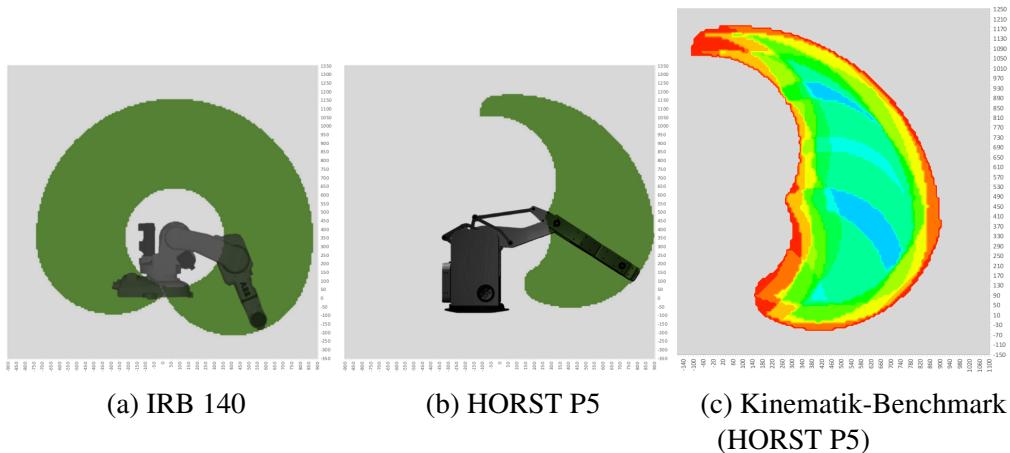


Abbildung 13: Arbeitsraum

Variationen in Abbildung ?? (c) - (e) dargestellt. (c) zeigt eine Kurbelschwinge, hierbei kann nur die Antriebskoppel komplett umlaufen, das anders gelagerte Getriebeglied schwingt in einem gewissen Winkelbereich hin und her. Bei einer Doppelkurbel (d) können sowohl Kurbel als auch Schwinge umlaufen. Im Gegensatz dazu können bei einer Doppelschwinge weder Kurbel noch Schwinge umlaufen, beide Getriebeglieder können sich nur in einem begrenztem Winkelbereich bewegen.

3.7 Arbeitsraum und Beweglichkeit

Als Arbeitsraum (engl. Workspace) eines Industrieroboters wird der Raumbereich bezeichnet, der mit dem TCP/Roboterflansch erreicht werden kann. Dabei ist die Größe dieses Bereiches hauptsächlich durch die Längen der Hauptachsen, insbesondere der Knickachsen 2 und 3 (Schwenkarm, Tragarm), bestimmt. Da es sich der Endeffektor eines Industrieroboter mit sechs Achsen frei im Raum bewegen kann ergibt sich ein Volumenkörper. Für die vereinfachte Darstellung des Arbeitsraums wird im Normalfall ein zweidimensionales Schaubild gewählt. Dabei wird die erste Hauptachse festgesetzt und es werden alle Punkte markiert, welche durch die Rotation des Schwenk- und Tragarm erreicht werden können. In Abbildung ?? sind die Arbeitsräume der Roboter IRB140 (a) und HORST P5 (b) dargestellt.

Bei der Darstellung des Arbeitsraumes ist allerdings zu beachten, dass die Orientierung des Endeffektors nicht berücksichtigt wird. Es handelt sich um den Bereich, der in der maximal ausgestreckten Stellung des Roboters erreicht werden kann. Dies bedeutet, dass am Rande des Arbeitsraumes nur noch wenige Orientierung des TCPs möglich sind. Eine Darstellung welche die möglichen Orientierungen innerhalb des Arbeitsraum aufzeichnet ist in Abbildung ?? (c) zu sehen. Hierbei wird zu jeden Punkt anhand eines Farbspektrums die möglichen Orientierungen (von rot = wenig zu blau = viel) angezeigt. Diese als Kinematik-Benchmark bezeichnete Darstellungsform wird

in Kapitel 5.1.5 genauer vorgestellt.

4 Viergelenksroboter HORST

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

Die Besonderheit des Roboters gegenüber anderen Industrierobotern ist die Verwendung von Viergelenksketten für den Antrieb der Hauptachsen 2 und 3. Diese können Kräfte und Drehmomente auf die feste Struktur ableiten bevor sie noch an den Antriebsachsen ankommen. Zusammen mit der sich durch das Koppelgetriebe der Viergelenksketten ergebenden dynamischen Übersetzung ergeben sich deutlich kleinere Drehmomente an den Antriebsachsen. Im Vergleich zu einer seriellen Kinematik können somit bei gleicher Traglast und Dynamik deutlich kleinere und somit kostengünstigere Antriebe verwendet werden. Die Hebelkinematik wurde 2017 als europa- und weltweites Patent angemeldet. [4]

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 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 ca. 15.000 € deutlich preisgünstiger als vergleichbare Industrieroboter.[?]

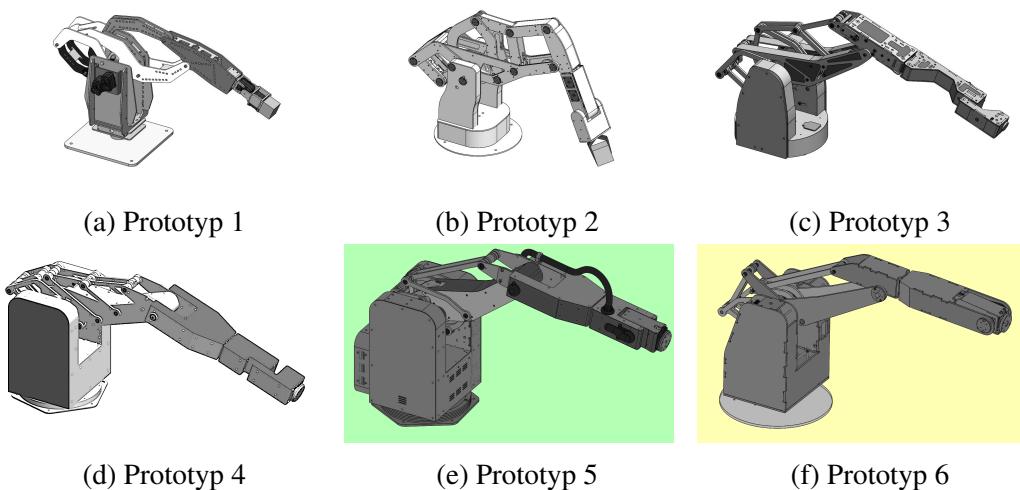


Abbildung 14: Versionshistorie der Prototypen des Roboter HORST

4.1 Versionshistorie

Die Entwicklung des RobotermodeLL HORST wird zum Zeitpunkt dieser Arbeit aktiv weiterverfolgt. Seit dem Ende der Forschungszeit an der Hochschule Konstanz wurden vier Verschiedene Modelle des Roboters geplant und aufgebaut.

Abbildung 14 zeigt alle realisierten Prototypen des Roboters, wobei (a) noch in den Forschungslaboren der Hochschule entwickelt wurde. (b) war der letzte auf Kunststoff basierende Roboter und das erste Modell was nach dem Erlangen des EXIST-Gründerstipendium aufgebaut wurde. Mit dem aus Aluminium gebauten Roboter (c) wurde das RobotermodeLL auf der Fachmesse für Produktions und Montageautomatisierung *Motek* im Oktober 2016 erstmal der Öffentlichkeit vorgestellt. Das darauffolgende Modell (d) war die Vorversion des in dieser Arbeit verwendeten Prototyp 5 (e). Von dieser als Pilotversion bezeichneten RobotermodeLL wurden fünf Exemplare aufgebaut um sie in Absprache mit Kunden in Pilotprojekten einzusetzen zu können.

Alle Messungen und Schaubilder beziehen sich daher auf die Version des Prototyp 5 (kurz P5), sofern es nicht explizit anders erwähnt.

Während der Bearbeitungszeit dieser Abschlussarbeit wurde die Planung für einen neuen Modell (Prototyp P6) aktiv verfolgt. Dabei wurden auch einige der vorläufigen Erkenntnisse dieser Arbeit miteinbezogen. Dies wird in den späteren Kapiteln, insbesondere im dritten Teil der Arbeit (Optimierung der Kinematik), genauer beschrieben.

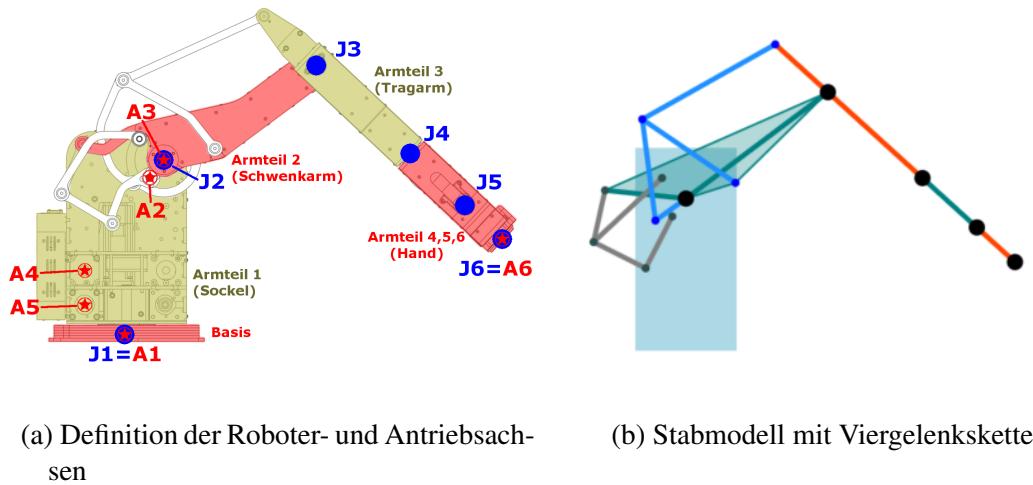


Abbildung 15: Beschreibung der Kinematik des Roboters HORST

4.2 Definitionen der kinematischen Elemente

Um das kinematische Modell des Roboters beschreiben zu können werden im Folgenden einige Definitionen vorgestellt.

Definition 12 *Die Antriebsachse bezeichnet den Kraftübertragungspunkt des Motors. Liegt die Antriebsachse und die Roboterachse an einem gemeinsamen Punkt, so spricht man von einem **Direktantrieb**.*

Definition 13 *Ein **Stab** ist das einfachste Trageglied in einem Tragwerk. Er kann Normalkräfte und Torsionen übertragen.*

Definition 14 *Ein **Antriebshebel** kann im Gegensatz zu einem Stab auch Drehmomente übertragen.*

Definition 15 *Ein **Treibriemen** oder kurz **Riemen** ist in der Antriebstechnik ein flexibles, in sich geschlossenes Band zur Kraftübertragung in einem Riemengetriebe.*

In Abbildung ?? sind die Roboterachsen (blau) und die Antriebsachsen (rot) dargestellt. Im Gegensatz zu den meisten Industrierobotern werden nur zwei der sechs Roboterachsen mit Direktantrieben angetrieben. Diese Direktantriebe sind in den Roboter- und Antriebsachsen 1 und 6 vorhanden.

Bemerkenswert sind insbesondere die Antriebsachsen 2 und 3, welche ihre Leistung über Viergelenksketten übertragen. Dies ist in den nächsten Abschnitten näher erläutert.

Der Antrieb der Roboterachsen 4 und 5 erfolgt über Treibriemen, welche von den Motoren im Sockel bis an die jeweilige Achse geleitet werden. Dies wird ebenfalls in einem der folgenden Abschnitten genauer beleuchtet.

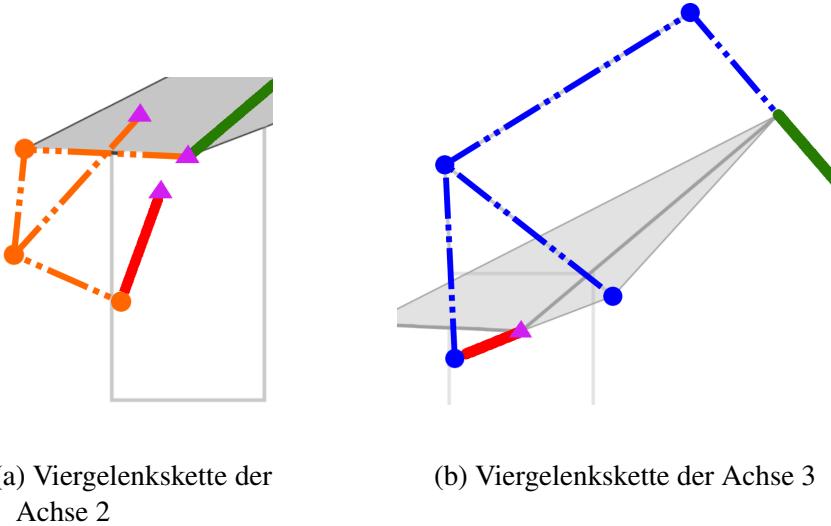


Abbildung 16: Detailschaubilder der zwei Viergelenksketten

4.3 Viergelenksketten

Die zentrale Innovation des Roboters sind die Verwendung von mehreren Viergelenksketten für die Antriebe der Hauptachsen 2 und 3. Abbildung ?? zeigt die Kinematik des Roboters anhand einer beschrifteten Konstruktionszeichnung, in Abbildung ?? ist die Kinematik nochmals schematisch dargestellt.

4.3.1 Viergelenksketten der Roboterachse 2

Für den Antrieb der Hauptachse 2 werden zwei Viergelenksketten verwendet. Diese sind in Abbildung ?? nochmal detailliert abgebildet.

Die Fixpunkte der Viergelenksketten sind dabei lila eingefärbt. Sie sind die Lagerstellen der fest mit dem Sockel verbundenen Getriebeglieder. Die Kraftübertragung der Motorleistung erfolgt anhand des Antriebstrangs (rot eingefärbt). Dabei wird der Drehmoment über die angeschlossenen zwei Viergelenksketten (grün) auf die Hauptachse 2 übertragen (orange).

4.3.2 Viergelenksketten der Roboterachse 3

Der Antrieb der Hauptachse 3 wird ebenfalls mithilfe zweier Viergelenksketten ermöglicht. Abbildung ?? zeigt diese detailliert auf.

Der Antriebstrang (rot) liegt wiederum im festen Sockel des Roboters. Über diesen Hebel wird das Drehmoment des Motors 3 über die zwei angeschlossenen Viergelenksketten (blau) auf die Hauptachse 3 übertragen (orange).

Erwähnenswert ist hierbei, dass sich der Antriebstrang und die Hauptachse 2 eine gemeinsame Achse teilen. Dies ist durch die Verwendung einer Hohlwelle an dieser

Stelle möglich. Diese entkoppelt die Rotationen der beiden Wellen.

4.3.3 Dynamische Übersetzung

Bei den meisten Industrierobotern wird ein Direktantrieb der Roboterachsen mithilfe von Riemen- oder Rädergetrieben umgesetzt. Dabei ist der Übersetzungsfaktor i konstant.

Im Gegensatz dazu wird beim Robotmodell HORST für den Antrieb der Hauptachsen 2 und 3 ein Koppelgetriebe in Form der oben beschriebenen Viergelenksketten verwendet. Dabei ist die Übersetzung nicht gleichförmig, sondern ändert sich je nach Stellung der Viergelenksketten.

Die in den foldenden Abschnitten beschriebenen Übersetzungsfunktionen beziehen sich auf Beziehung zwischen Antrieb- und Roboterachse. (Eine Übersetzung von 1:2 bedeutet, dass sich der Antriebstrang mit der doppelten Drehzahl der Roboterachse dreht).

DYNAMISCHE ÜBERSETZUNG DER ACHSE 2

Die Koppelgetriebe der Viergelenksketten der Hauptachse 2 erzeugen ein Übersetzungsverhältnis zwischen 1:1.08 und 1:2.71.

Abbildung ?? (a) zeigt das variable Übersetzungsverhältnis der Achse 2. In (c) wird das Übersetzungsverhältnis nochmals grafisch bezogen auf die Stellungen der Hauptachsen im gesamten Arbeitsraum dargestellt.

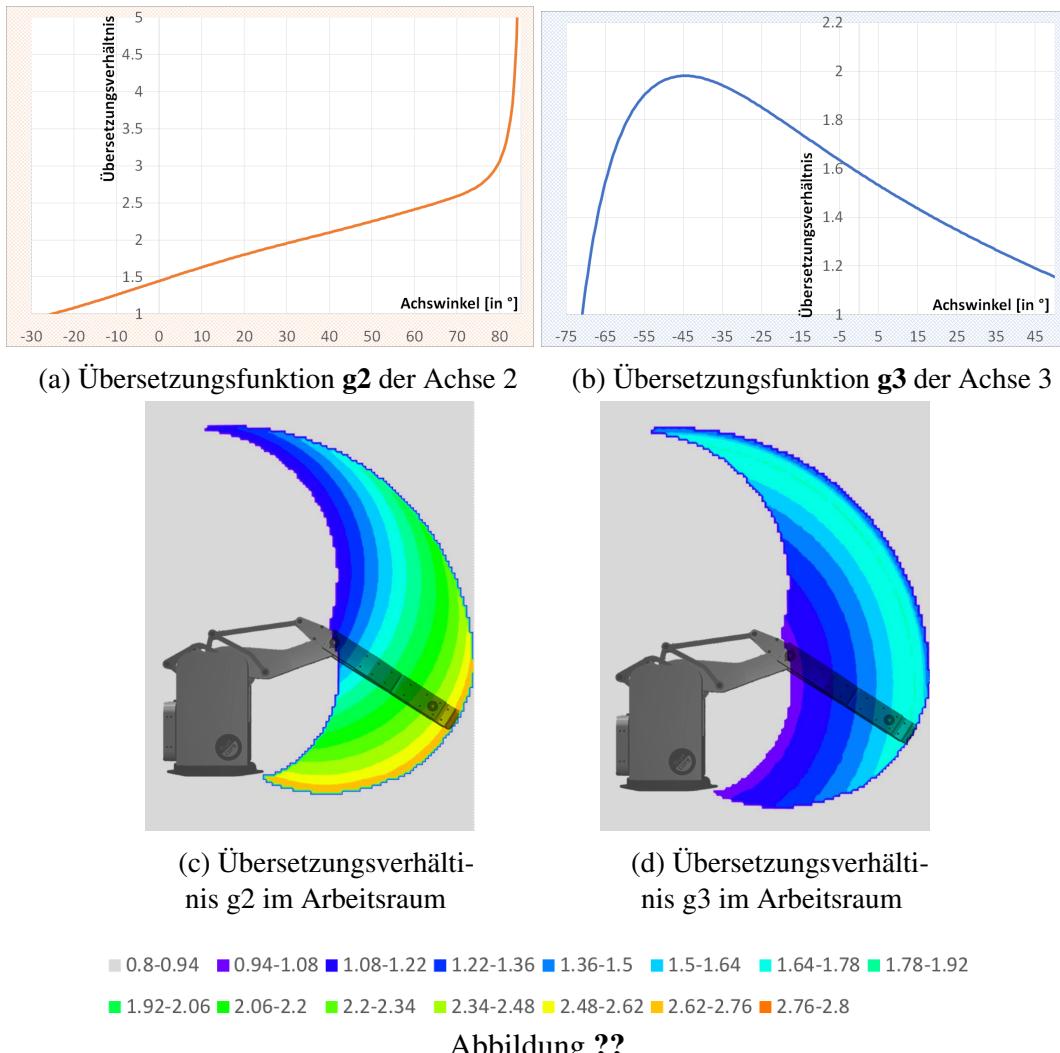
Anhand des Farbspektrums der Tiefenachse ist zu erkennen, dass die Übersetzung insbesondere in der ausgestreckten Stellung des Roboters hoch ist. Dies hat den positiven Effekt, dass der in dieser Stellung auftretende hohe statische Drehmoment mithilfe der hohen Übersetzung leichter für den Motor zu bewältigen ist.

DYNAMISCHE ÜBERSETZUNG DER ACHSE 2

Auch der Antrieb der Hauptachse 3 erfolgt anhand der Koppelgetriebe der zwei Viergelenksketten. Dadurch ergibt sich auch hier eine dynamische Übersetzung. Abbildung ?? (c) zeigt die Übersetzungsfunktion. In (c) wird das Übersetzungsverhältnis wiederum grafisch auf den gesamten Arbeitsraum dargestellt.

ÜBERSETZUNGSFUNKTIONEN G2 UND G3

Die oben beschrieben und in Abbildung ?? dargestellten Übersetzungsfunktionen werden im Folgenden als **g2** (Achse 2) und **g3** (Achse 3) bezeichnet. Diese, durch die Koppelgetriebe entstehenden Übersetzungsfunktionen, stellen einen zentralen Bestand-



teil der Hebelkinematik und damit dieser Arbeit dar. Sie werden in Kapitel ?? nochmals genau vorgestellt.

4.4 Antrieb & Sensorik

4.4.1 Motoren

Als Antriebseinheiten des Roboters werden Schrittmotoren verwendet. Ein Schrittmotor ist ein Synchronmotor mit einem drehbaren Rotor, welcher durch ein gesteuertes schrittweise rotierendes, elektromagnetisches Feld verdreht werden kann. Dabei kann der Rotor um fest definierte Winkel (Schritte) gedreht werden.

Durch seine einfache Ansteuerung und dem Verzicht auf Sensoren zur Positionsrückmeldung ist ein Schrittmotor bei gleicher Leistungsklasse deutlich preislich deutlich günstiger als ein Servomotor.

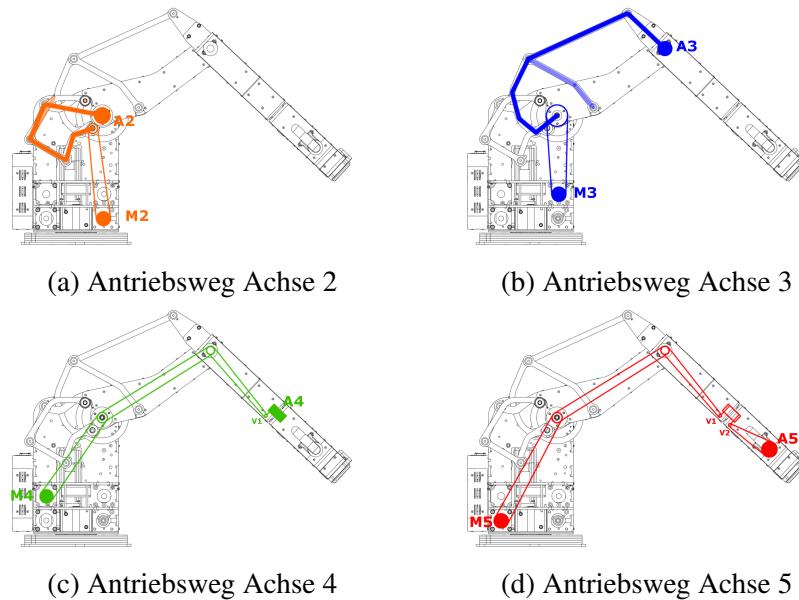


Abbildung 18: Dynamische Übersetzung der Achsen 2 und 3

4.4.2 Kraftübertragung

Die Kraftübertragung von Motor zu Roboterachsen ist bei dem Roboter HORST komplexer als bei den meisten seriellen Robotern. Lediglich die Motoren und Achsen 1 (erste rotierende Hauptachse) sowie der Achse 6 (letzte rotierende Handachse) sind durch ein Direktantrieb umgesetzt. Hierbei sind zwischen Antriebseinheit und Roboterachse lediglich ein einfaches Getriebe mit einer konstanten Übersetzung gelagert.

KOPPELGETRIEBE HAUPTACHSE 2 UND 3

Wie in den vorherigen Abschnitten erwähnt, erfolgt der Antrieb der Hauptachsen 2 und 3 über jeweils zwei Viergelenksketten. Abbildung 18 (a) zeigt die Kraftübertragung des Motors M2 über die Stäbe der Viergelenksketten (magenta-farben) bis zur knickenden Hauptachse 2.

(b) zeigt die Kraftübertragung des sich im Sockel befindlichen Motors M3 über die blau eingezeichneten Stäbe der Viergelenksketten bis zur Hauptachse 3.

RIEMENLAUF HANDACHSEN DER ACHSEN 4 UND 5

Um die Masse in der bewegten Struktur des Roboters möglichst klein zu halten wurden auch die Motoren der Handachsen 4 und 5 im Sockel platziert. Dadurch bedarf es weitreichenden Kraftübertragung, welche mithilfe von Riemen umgesetzt wurde.

Abbildung 18 (c) zeigt den Antriebsweg des Motors M4 bis zur Handachse A4 (grün). In (d) ist der noch längere Antriebsweg von Motor M5 bis zur Handachse A5 (rot) dargestellt.

Da die Riemen über die beweglichen Achsen 2, 3 und 4 abrollen, müssen die Rotationen dieser Achsen bei der Steuerung der Handachsen 4 und 5 aktiv ausgeglichen werden. Dies wird in Kapitel ?? genauer erläutert.

Zusätzliche Schwierigkeiten der Riementriebe entstehen durch die Lage der Roboterachse 4. Hierbei handelt es sich um eine rotierende Roboterachse, d.h. die Rotationsachse steht orthogonal zu den Rotationsachsen der Hauptachsen 2 und 3. Damit sind die Achsen nicht in der gleichen Ebene, was eine Umlenkung des Riemens in die entsprechende Ebene erzwingt. Die gleiche Problematik entsteht direkt in der nächsten Handachse erneut. Um den Antrieb der Achse 5 zu ermöglichen muss der Riemen erneut in die korrekte Ebene umgeschränkt werden.

4.4.3 Achsencoder

Um den Drehwinkel θ_i aller Roboterachsen bestimmen zu können sind an jeder Achse Sensoren angebracht. Dabei handelt es sich um optische Inkrementalgeber, die mithilfe von Scheiben mit hochauflösten Teilstichen die Änderung des Drehwinkels erfassen können.

Die Positionierung der Encoder an der Achse und somit am Ende der Kraftübertragungskette ist von großer Bedeutung. Es ermöglicht die Erfassung des Drehwinkels der Achse unabhängig von Elastizitäten und Spiel des Antriebweges zu messen. Dies ist für eine Regelung und damit exakte Positionierung der Roboterachsen von zentraler Bedeutung.

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.

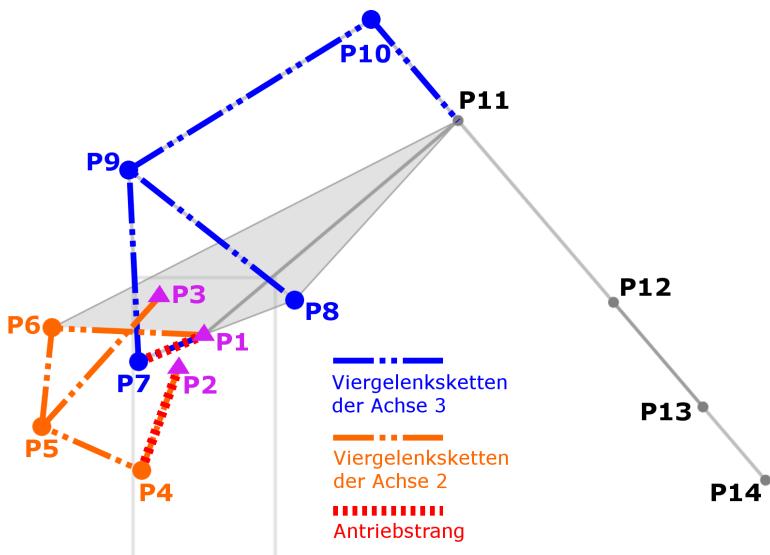


Abbildung 19: Punkt-Stabmodell

5.1 Kinematische Analyse

5.1.1 Punkt-Stabmodell

Für die Beschreibung des kinematischen Modells wird hier ein Punkt-Stabmodell eingeführt. In Abbildung 19 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 19) besteht aus den drei Gliedern *Antriebshebel*₂₋₄, *Stab*₄₋₅ und *Stab*₃₋₅.

Angeschlossen an den Viergelenkpunkt P5 ist der Kraftübertragungshebel *Stab*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	verbundene Hebel/Stäbe	Besonderheit
P2	Fixpunkt Sockel	<i>Hebel</i> ₂₋₄	Antriebstrang, Winkel γ_2
P4	beweglich	<i>Hebel</i> ₂₋₄ , <i>Stab</i> ₄₋₅	
P5	beweglich	<i>Hebel</i> ₄₋₅ , <i>Stab</i> ₃₋₅	
P3	Fixpunkt Sockel	<i>Hebel</i> ₃₋₅	leitet Kräfte in Sockel
P6	Fixpunkt Armteil 2	<i>Hebel</i> 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 19) 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	<i>Hebel</i> ₁₋₇	Antriebstrang, Winkel γ_3
P7	beweglich	<i>Hebel</i> ₁₋₇ , <i>Hebel</i> ₇₋₉	
P9	beweglich	<i>Hebel</i> ₇₋₉ , <i>Hebel</i> ₈₋₉	
P8	Fixpunkt Armteil 2	<i>Hebel</i> ₈₋₉	Fixpunkt der Viergelenkskette
P10	Fixpunkt Armteil 3	<i>Hebel</i> 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 Übersetzungsverhältnis von Motor zur Antriebsachse entscheidend.

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

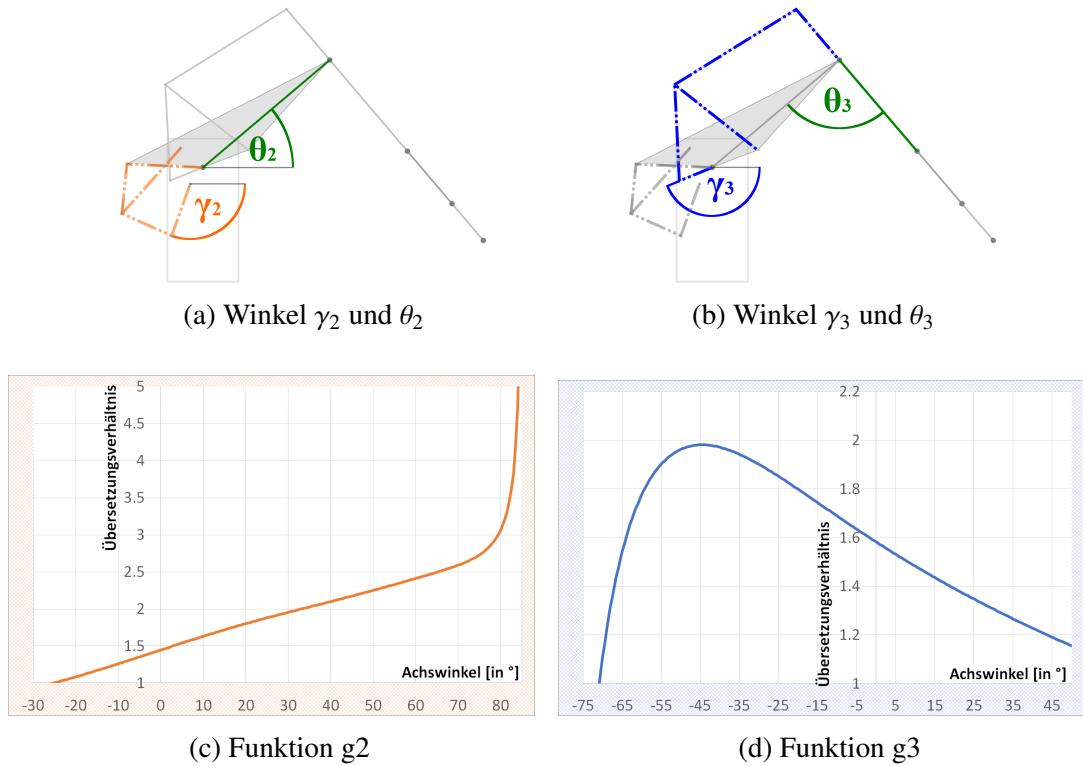
$$G3 : \theta_3 \mapsto \gamma_3 \quad (5.2)$$

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 Lesbarkeit wird hier die Matlab-Implementierung aufgeführt.

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

Abbildung 20: Funktionsgraph von $g2$ und $g3$ in Abhängigkeit der Achswinkel

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, wodurch sich auch der *Kraftbertragshhebel*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 Definitionsbereiches ein Maximum und fällt dann bis zur anderen Grenze des Definitionsbereiches annähernd linear ab.

5.1.3 Analytische Inverse Kinematik

- Iksfast

Algorithmus 1 : Berechnung von γ_2

Input : θ_2 [in rad]**Output :** γ_2 [in rad]

- 1 Dist_P1_P6 = dist(P1, P6);
 - 2 P6.X = -sin(θ_2) * Dist_P1_P6 + P1.X;
 - 3 P6.Y = cos(θ_2) * Dist_P1_P6 + P1.Y;
 - 4 Circle_P3_P5 = circle(midpoint=P3, radius = dist(P3, P5));
 - 5 Circle_P6_P5 = circle(midpoint=P6, radius = dist(P5, P6));
 - 6 P5 = circleIntersect(Circle_P3_P5, Circle_P6_P5);
 - 7 Circle_P5_P4 = circle(midpoint=P5, radius = dist(P5, P4));
 - 8 Circle_P2_P4 = circle(midpoint=P2, radius = dist(P2, P4));
 - 9 P4 = circleIntersect(Circle_P5_P4, Circle_P2_P4);
 - 10 $\gamma_2 = -\text{atan2}(P4.Y - P2.Y, P4.X - P2.X);$
-

- Begrenzte Konfiguration (Elbow alway above)

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:

$$T_2 = F_g * \sin(\theta_2) * L_{\text{Armteil}2} \quad (5.5)$$

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 21 zeigt wirkenden Kräfte und Drehmomente der ersten Viergelenkskette, wobei T_2 das Drehmoment der Roboterachse 2 darstellt und \widehat{T}_2 das Drehoment an der Antriebseinheit. Die Einheitent 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 Berechnung aus Abbildung 21 und Abbildung 22.

Algorithmus 2 : Berechnung von γ_3 **Input :** θ_3 [in rad], P11, P8**Output :** γ_3 [in rad]

- 1 $P10.X = -\cos(\theta_3) * \text{Dist_P10_P11} + P11.X;$
- 2 $P10.Y = \sin(\theta_3) * \text{Dist_P10_P11} + P11.Y;$
- 3 $\text{Circle_P10_P9} = \text{circle}(\text{midpoint}=P10, \text{radius} = \text{dist}(P10, P9));$
- 4 $\text{Circle_P8_P9} = \text{circle}(\text{midpoint}=P8, \text{radius} = \text{dist}(P8, P9));$
- 5 $P9 = \text{circleIntersect}(\text{Circle_P10_P9}, \text{Circle_P8_P9});$
- 6 $\text{Circle_P9_P7} = \text{circle}(\text{midpoint}=P9, \text{radius} = \text{dist}(P9, P7));$
- 7 $\text{Circle_P1_P7} = \text{circle}(\text{midpoint}=P1, \text{radius} = \text{dist}(P1, P7));$
- 8 $P7 = \text{circleIntersect}(\text{Circle_P9_P7}, \text{Circle_P1_P7});$
- 9 $\gamma_3 = \text{atan2}(P7.X - P1.X, P1.Y - P7.Y);$

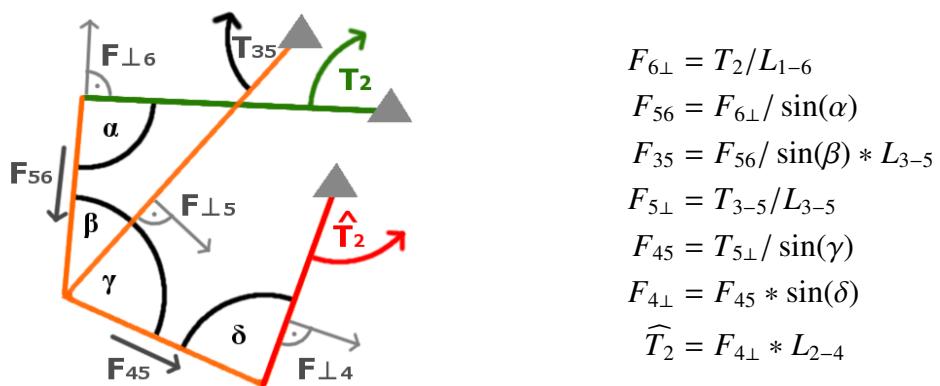


Abbildung 21: Torque 2

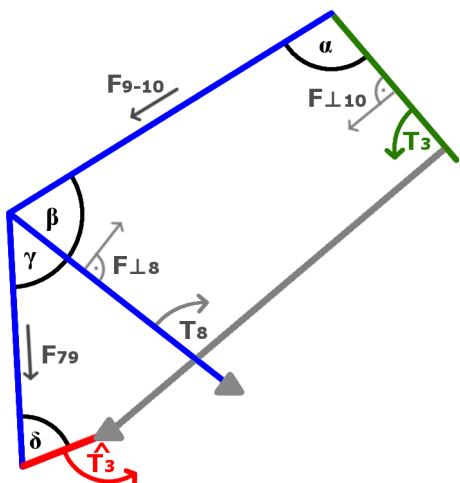
$$t2(\theta_2, \theta_3) = \text{Torque at Motor 2} \quad (5.6)$$

Gleichung 5.6: Drehmoment der Achse 2

ACHSE 3 / ZWEITE VIERGELENKSKETTE

Abbildung 22 zeigt wirkenden 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 den Längen der entsprechenden Hebel.

In den folgenden Kapiteln wird zur Berechnung die Drehmoments-Funktion $t3$ ver-



$$\begin{aligned}
 F_{10\perp} &= T_3 / L_{10-11} \\
 F_{9-10} &= F_{10\perp} / \sin(\alpha) \\
 T_8 &= F_{9-10} * \sin(\beta) * L_{8-9} \\
 F_{8\perp} &= T_8 / L_{8-9} \\
 F_{79} &= F_{8\perp} / \sin(\gamma) \\
 \widehat{T}_3 &= F_{79} * \sin(\delta) * L_{1-7}
 \end{aligned}$$

Abbildung 22: Torque 3

wendet. Diese entspricht den Berechnungen aus Abbildung 22.

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

Gleichung 5.18: Drehmoment der Achse 3

ENTLASTUNG DER ACHSE 2

Eine Besonderheit in der Drehmomentsberechnung ergibt sich aus der Lage der zweiten Viergelenkkette. 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 ?? 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.

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

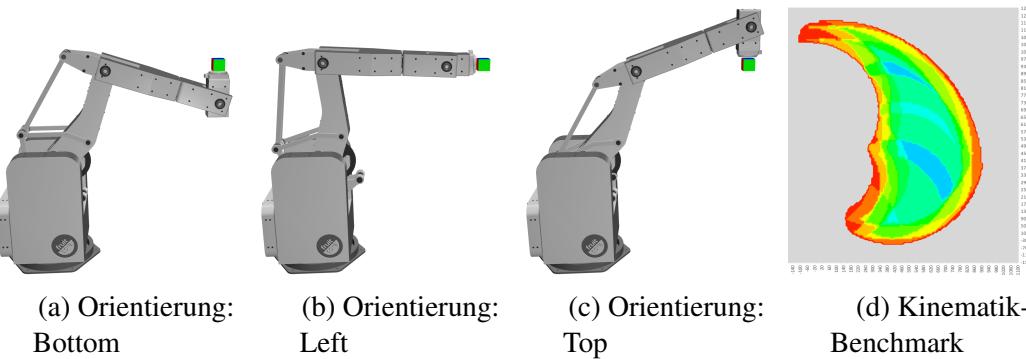


Abbildung 23: Visualisierung des Kinematik-B

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 möglichen 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 23 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 23d zu sehen, oder einfach in der Angabe der durchschnittlichen erreichbaren Orientierung im gesamten Bereich ausgedrückt werden. Diese beträgt im dargestellten Fall von Abbildung 23d (Prototyp 5) 5,73 (von maximal 14).

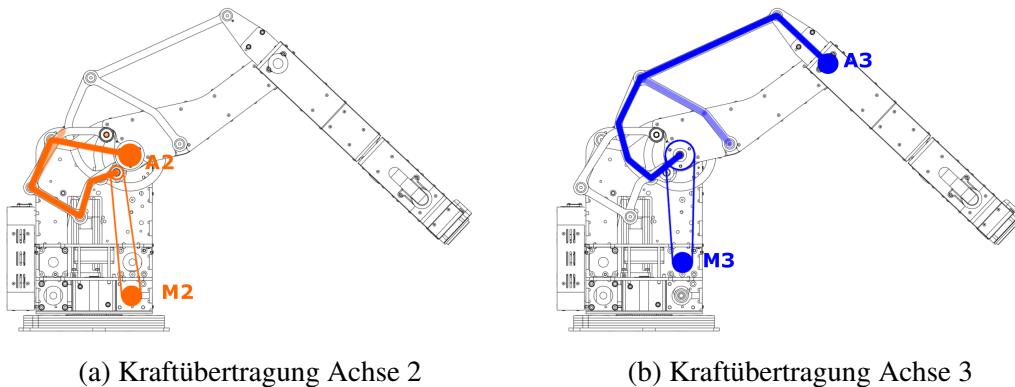


Abbildung 24: Kraftübertragung über Viergelenksketten

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

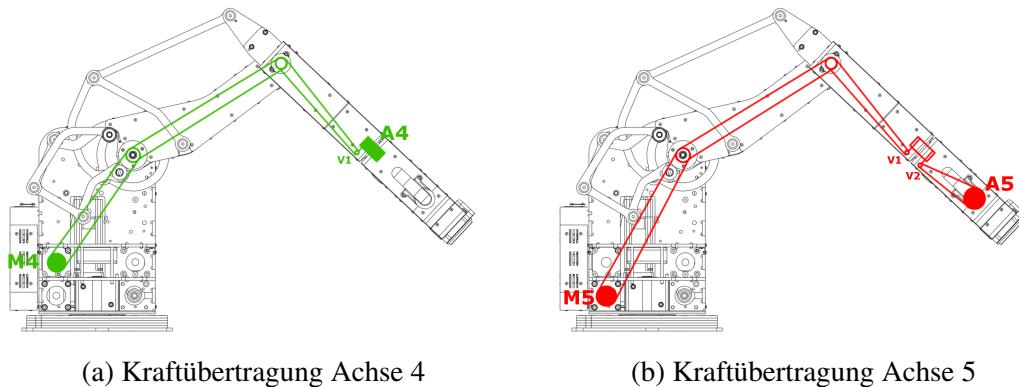


Abbildung 25: Kraftübertragung und Achsabrollen

den Achswinkel θ_3 konstant zu halten.

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

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 benötigten Riemenförderung 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.

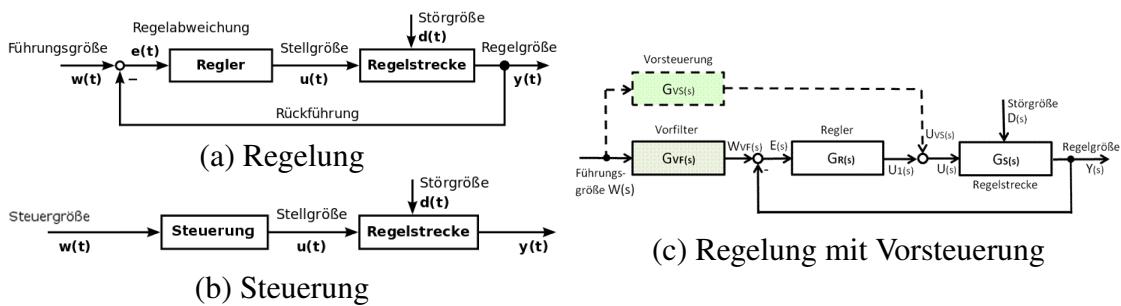


Abbildung 26: Regelung und Steuerung

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 Schwinungen 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:

$$U(s_i) = \underset{i \in \{1,4,5,6\}}{K_{pi} * E(s_i) * GEAR_i} \quad (5.14)$$

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

5.3 Optimierung der Kinematik

Die Viergelenksketten des Roboters sind durch verschiedene Parameter, namentlich die Fixpunkte der Kurbel und Schwinge sowie der Hebellängen, bestimmt. Für die ursprüngliche Wahl dieser Parameter wurden empirische Tests sowie "Trial-and-Error"-Verfahren mit der Evaluation von FEM-Analysen aus CAD-Programmen.

Das Hauptanliegen ist dabei jeweils, 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, d.h. das die Antriebsleistung möglichst gleichmäßig im Arbeitsbereich verteilt ist und wenig hohe Spitzen enthält.

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

Gleichung 5.17: Statisches Drehmoment an Antriebsachse 2

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

Gleichung 5.18: Statisches 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.

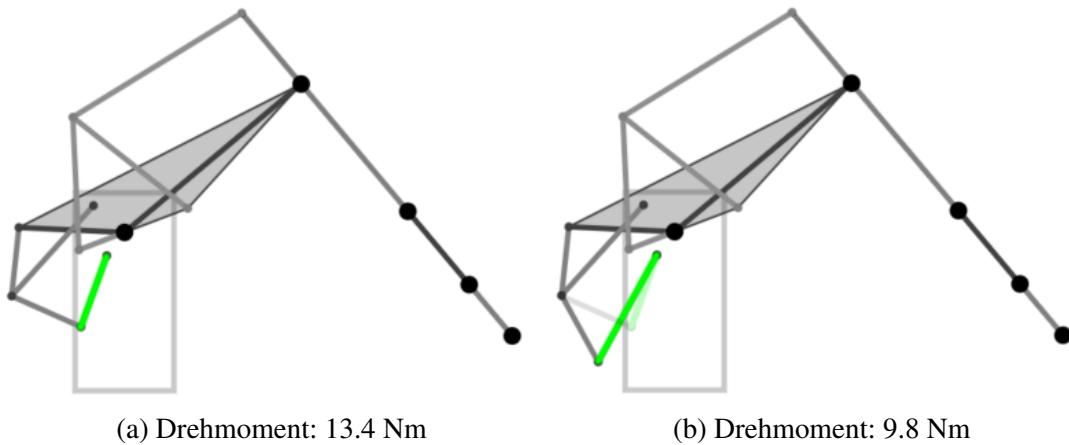
Die Länge der Hebel und die Lage der Fixpunkte unterliegen einigen Beschränkungen (hauptsächlich konstruktive Einschränkungen wie das Überscheiden von Hebeln), können jedoch in einem gewissen Maße frei gewählt werden. Für die bisherige Hebelkinematik wurden diese Parameter wie bereits erwähnt durch CAD-Studien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

Doch bereits kleine Änderungen in der Länge der Hebel hat große Auswirkung auf die Drehmomente der Motoren. Abbildung 28 zeigt etwa eine Änderung in der Länge des *Hebels₂₋₄* und die dazugehörigen statischen Drehmomente in der Achse 2.

HEBELKONFIGURATION

Die Beschreibung des kinematischen Hebelmodells erfolgt über die Längen der Hebel, sowie die Koordinaten den Fixpunkte.

Diese ergeben somit, wie in Tabelle ?? zu sehen ist, die 15 veränderlichen Parameter der Kinematik. Eine eindeutige Beschreibung aller dieser Parameter wird im Folgenden **Hebelkonfiguration Ω** genannt.

Abbildung 27: Verschiedene Hebellängen (*Hebel*₂₋₄)

$$\Omega = \begin{pmatrix} \omega_1 \\ \vdots \\ \omega_{15} \end{pmatrix}, \quad \Omega \in \mathbb{R}^{15} \quad (5.19)$$

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	

Tabelle 1: Dimensionen $\omega_{1..15}$ der Hebelkonfiguration Ω

5.3.1 Gradientenabstiegsverfahren

Als Minimierungsverfahren der Funktion $f : \mathbb{R}^n \mapsto \mathbb{R}$ ($n = 15$) wurde in dieser Arbeit das Gradientenabstiegsverfahren eingesetzt. Als allgemeines Verfahren für Optimierungsprobleme schreitet man den negativen Gradienten (die Richtung des steilsten Abstiegs) entlang. Das Optimierungsproblem lautet dabei wie folgt:

$$\min_{x \in \mathbb{R}^n} f(x)$$

Der Gradient ∇f der Funktion f ist ein Spaltenvektor mit den n -Dimensionen (15 Dimensionen im vorliegenden Fall) der Eingangsvariablen. Dabei sind die Einträge $\frac{\partial f}{\partial x_i}$ die partiellen Ableitungen von f in x_i -Richtung.

$$\text{grad}(f) = \nabla f = \frac{\partial f}{\partial x_1} + \cdots + \frac{\partial f}{\partial x_n} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5.20)$$

Gleichung 5.24: Definition Gradient

5.3.2 Scoring-Funktionen

HEBELKINEMATIK-SCORE

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

$$f : \mathbb{R}^{15} \mapsto \mathbb{R}, \omega_{1\dots 15} \mapsto s \quad (5.21)$$

Gleichung 5.21: Hebelkinematik Scoring-Funktion

Die (15-Dimensionale) Eingangsvariablen $\omega_{1\dots n}$ der Funktion sind alle Längen und Fixpunkte der Kinematik. Die Ausgabe der Funktion s entspricht dem Score und somit einer Güteklaasse dieser Hebelkonfiguration. Wie in den folgenden Abschnitten beschrieben, entspricht dieser Score hauptsächlich dem maximalen Drehmoment, d.h. ein niedriger Score ist erstrebenswert.

MAX-DREHMOMENT-SCORE

Wie zuvor schon erwähnt ist ein zentrales Anliegen bei der Auslegung der Hebelkonfiguration die Ermittlung des maximalen Drehmoments in verschiedenen Roboterstellungen. Für die Ermittlung dieses maximalen Drehmoments müssen alle Stellungen des Roboters getestet werden. Da nur die Hauptachsen 2 und 3 davon betroffen sind, reicht eine zweifach geschaltete Iteration über diese beiden Achsen aus.

$$s_{maxtorque} = \max_{\theta_{2min} \leq \theta_2 \leq \theta_{2max}} \max_{\theta_{3min} \leq \theta_3 \leq \theta_{3max}} \{ t_2(\theta_2, \theta_3), t_3(\theta_2, \theta_3) \} \quad (5.22)$$

Gleichung 5.22: Scoring-Funktion des maximalen Drehmoments

In der zweifach geschalteten Iteration werden alle Kombinationen der Achse 2 und Achse 3 angefahren. An diesen Positionen wird der statische Drehmoment der Motoren 2 und 3 ermittelt und anschließend der größere Wert gespeichert. Nach Durchlauf der Iterationen ist schließlich der maximale Drehmoment $s_{maxtorque}$ ermittelt worden.

Abbildung 28 (c) zeigt die Ermittlung des Max-Drehmoment grafisch dar. Es zeigt die maximalen statischen Drehmomente der Motoren bei jeder Stellung im Arbeitsbereich. Die Ausgangsgröße der Funktion ist schließlich das Maximum, welches durch die Markierung gezeigt wird.

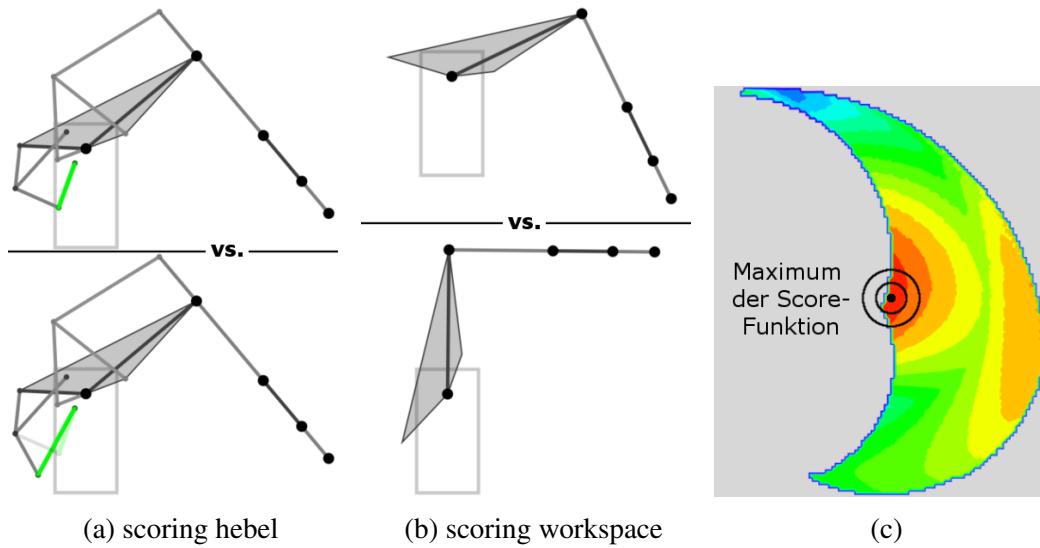


Abbildung 28: Scoring Funktions

Listing 5.1 zeigt das Verfahren zusätzlich auch als Java Pseudocode.

Listing 5.1: 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 }
```

WEITERE SCORE-FUNKTIONEN

Während den ersten Testläufen des Gradientenverfahrens wurde schnell klar, dass viele Hebelkonfigurationen trotz minimierten Max-Drehmoment nicht umsetzbar sind. Dies hat mit diversen Einschränkungen aus konstruktiver Seite zu tun. So dürfen manche Hebel eine minimale Länge nicht unter- und eine maximale Länge nicht überschreiten. Oft sind diese Mini- bzw. Maximallängen jedoch nicht direkt sondern als Kombination verschiedner Stäbe beschränkt.

Für die Berücksichtigung dieser zusätzlichen Constraints wurden verschiedene Bestrafungsfunktionen aufgestellt.

Als Scoring Funktion wurde schließlich eine Kombination aller Funktionen gewählt, siehe Gleichung (5.23). Da es sich bei den Bestrafungsfunktionen um konstruktive Einschränkungen handelt, die ein Ausschlusskriterium für die Hebelkinematik darstellt wird jeweils das Maximum aller Funktionen gewählt. Dies stellt sicher, dass jegliche generierte Kinematik auch konstruktiv umsetzbar ist. Durch die zusätzliche

Bezeichnung	Constraint		Beschreibung
SockelHeighth	$\min(X_{P2,P3})$ $\min(X_{P4,P5})$ 160mm	$-$ \geq	Der niedrigste durschwenkende Hebel soll nicht länger als 160mm unter der Achse 2 liegen
Axis3Length	$L(Hebel_{10-11})$ 180mm	\geq	Für die Unterbringung des Motors und Getriebe ist eine Mindestlänge von 180mm notwendig
Distance P1-P2	$dist(P1, P2)$ 50mm	\geq	Die Wellen in P1 und P2 haben einen Mindest-Radius von 25mm
Distance P6-P9	$dist(P6, P9)$ $\theta_{2min} \leq \theta_2 \leq \theta_{2max}$ $\theta_{3min} \leq \theta_3 \leq \theta_{3max}$ 50mm	\geq	Um die Viergelenksketten aneinander vorbei zu führen zwischen P6 und P9 ein Abstand von mind. 50 mm notwendig

Berücksichtigung der Bestrafungsfunktionen ist jedoch häufig die Minimierung der Max-Drehmomentsfunktion $s_{maxtorque}$ deutlich eingeschränkt.

$$s_{gesamt} : \max \left\{ \begin{array}{l} score_maxtorque(\Omega) \\ score_socketheight(\Omega) \\ score_Axis3Length(\Omega) \\ score_Distance_P1_P2(\Omega) \\ score_Distance_P6_P9(\Omega) \end{array} \right. \quad (5.23)$$

5.3.3 Partielle Ableitungen

Für die Erstellung des Gradienten sind alle partiellen Ableitungen der Funktion f notwendig. Dazu wird der Score der Funktion $f(x_0 + \Delta x)$ berechnet und mit der Basescore von $f(x_0)$ verglichen und mithilfe des Differenzialquotienten $\frac{f(x_0 + \Delta x) - f(x_0)}{\Delta x}$ berechnet. Abbildung 28 (a) visualisiert etwa die Berechnung der partiellen Ableitung der Dimension $Hebel_{2-4}$.

Alle partiellen Ableitungen in einem Spaltenvektor notiert ergeben den Gradienten der Funktion f .

$$\text{grad}(f) = \nabla f = \begin{pmatrix} \frac{\partial f}{\partial x_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial f}{\partial x_n} \end{pmatrix} \quad (5.24)$$

Die Berechnung der partiellen Ableitungen sowie das Bilden des Gradienten ist in Listing 5.2 als Java-Pseudocode dargestellt.

Listing 5.2: 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();

```

5.3.4 Gradientenabstieg

Sobald der Gradient und damit die Richtung des steilsten Abstiegs $d^{(j)} = -\nabla f(x^{(j)})$ bestimmt wurde kann mit dem Abstiegsverfahren an der Anfangsstelle $x^{(j)}$ begonnen werden. Dazu wird mit einer Schrittweite von $\alpha^{(j)}$ durch folgende Gleichung iteriert:

$$x^{(j+1)} = x^{(j)} + \alpha^{(j)} d^{(j)} \quad (5.25)$$

Dazu muss zunächst die Schrittweite bestimmt werden. Hierzu gibt es verschiedene Varianten. Für das vorliegende Problem wird versucht $\alpha^{(j)}$ durch das Minimierungsproblem

$$f(x^{(j+1)}) = \min_{\alpha > 0} f(x^{(j)} + \alpha d^{(j)})$$

zu lösen.

Anschaulich beschrieben wird dabei in kleinen Schritten dem negativen Gradienten entlang geschritten, bis sich der Funktionswert nicht mehr kleiner wird. Der erreichte Punkt $x^{(j+1)}$ ist nun der neue Startpunkt für den nächsten Iterationsschritt des Abstiegsverfahren. An dieser Stelle werden nun wieder die partiellen Ableitungen gebildet um so einen neuen Gradienten zu berechnen.

5.3.5 Startwert-Generierung und Gradient-Noise

Das Gradientenabstiegsverfahren kann wie alle numerischen Optimierungsverfahren nur lokale Minima finden. Dabei das Resultat sehr stark von der Wahl der Startparameter abhängig. Um das Verfahren schnell mit anderen Startparameter zu starten wurde eine Startwerte-Generierung implementiert. Dabei werden die Parameter mit zufälligen Werten initialisiert. Dabei werden jedoch viele nicht umsetzbare Hebelkonfigura-

tionen gefunden. Für die Überprüfung der Umsetzbarkeit einer Konfiguration wird der Hebelscore bemüht. Ergibt sich eine reelle Zahl als Score, ist die Hebelkonfiguration möglich und kann als Startwert verwendet werden. Ist der Score ungültig, ist auch die Konfiguration unmöglich, es werden solange zufällige Hebelkonfigurationen erstellt, bis sich eine Gültige ergibt.

Algorithmus 3 : Zufällige Startwertgenerierung

Input : Hebelkinematik: baseline

Output : zufällige valide Hebelkinematik

```

1 while hebelkinematik is not valid do
2   for parameter  $\in$  gradient dimensions do
3     hebelkinematik[parameter] = random(baseline[parameter]);
4   end
5 end
```

Mit dem gültigen Startwert kann nun das Abstiegsverfahren beginnen. Der Abstieg erfolgt nun jeweils anhand des negativen Gradienten. Sobald der Gradient die Länge 0 hat, bzw. die partiellen Ableitungen in alle Richtungen positiv sind ist ein lokales Minimum erreicht. Dieses Minimum wird für die spätere Evaluierung der Hebelkonfiguration gespeichert. Da an diesem Punkt kein negativer Abstieg mehr möglich ist, wäre das Verfahren hier beendet. Jedoch kommt es aufgrund der Hochdimensionalität der Funktion häufig vor, dass lokale Minima sehr ungünstig sind und nur wenig entfernt von einem viel tieferen Punkt liegt. Um diesem lokalen Minimum zu entkommen wird an dieser Stelle t der Gradient mit einer Noise-Funktion ersetzt.

$$\nabla f_t = \mathcal{N}_i(0, \sigma^2)_{i \in \{0, \dots, n\}} \quad (5.26)$$

Die Hebelkonfiguration wird nun mit dem zufälligen "Gradienten" ergänzt. Dabei ergibt sich im Normalfall ein schlechterer Score, es wurde jedoch sehr wahrscheinlich das Minimum verlassen. Basierend auf dieser neuen Kinematik wird das Abstiegsverfahren weiter ausgeführt. Die Idee des Verfahrens besteht auf der Hoffnung durch einen kleinen zufälligen Schritt aus dem Minimum herauszutreten um beim anschließenden Abstieg ein tieferes Minimum zu finden.

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-Benchmark.
- 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 Constrains und Scoring-Funktionen eingegangen.

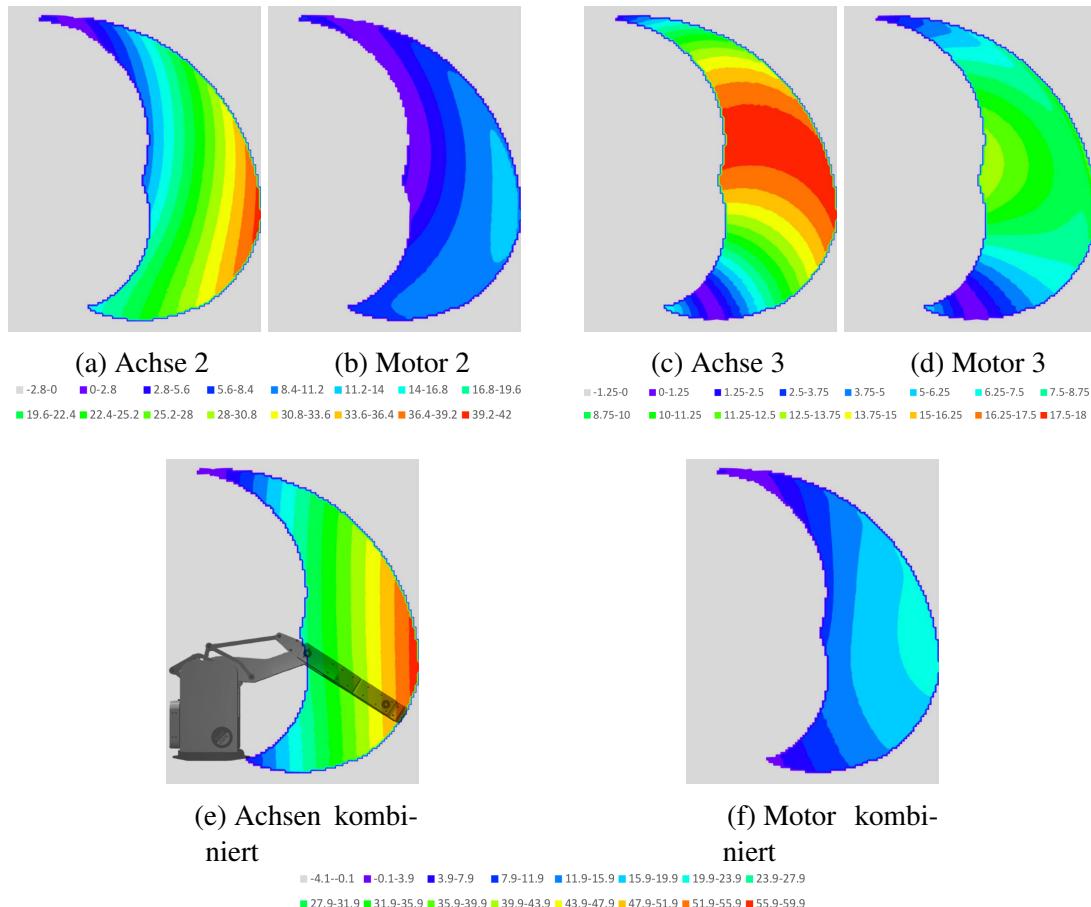


Abbildung 29: Achs-Drehmoment neben Motor-Drehmoment

6.1 Kinematische Analyse

6.1.1 Drehmomente

Eine Zusammenfassung der Drehmomentsstudien ist in Abbildung 29 zu sehen. Hierbei sind jeweils die Drehmomente der Roboterachse der entsprechenden Antriebsachse gegenübergestellt. Die Einheit der anhand eines Farbspektrums dargestellten Tiefenachse ist Nm (Newtonmeter), die SI-Einheit des Drehmoments. Alle Schaubilder sind bei einer Traglast von 1,5 kg am Flansch generiert.

Achse/Motor 2

Abbildung 29 (b) wurde anhand der folgende Gleichung erstellt:

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

Gleichung 6.3: Drehmoment Motor 2

In (a) ist das Drehmoment der Achse 2 dargestellt, dies entspricht einem Direktantrieb der Achse 2. Demgegenüber zeigt (b) den Drehmoment am Antriebsstrang der

Viergelenkskette. Wie anhand des weiter gefächerten Farbspektrums deutlich zu erkennen ist, deckt (a) ein eindeutig breiteres Spektrum ab. In der ausgestreckten Lage ($\theta_{2_{max}}, \theta_{3_{max}}$) führt dies zu einem maximalen Drehmoment von 40,3 Nm und damit der benötigten Motorenleistung eines Direktantriebs.

(b) zeigt ein deutlich ausgeglicheneres Spektrum des Antriebstrangs. Dabei ist das Maximum nahe, aber nicht komplett am Rande des Arbeitsbereiches erreicht und beträgt 12,1 Nm. Ein Direktantrieb der Achse würde somit ein 3,3-fach leistungsstärkeren Motor benötigen, d.h. durch die Verwendung der Viergelenksketten können über 70% der Antriebleistung 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 29 (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 29 (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

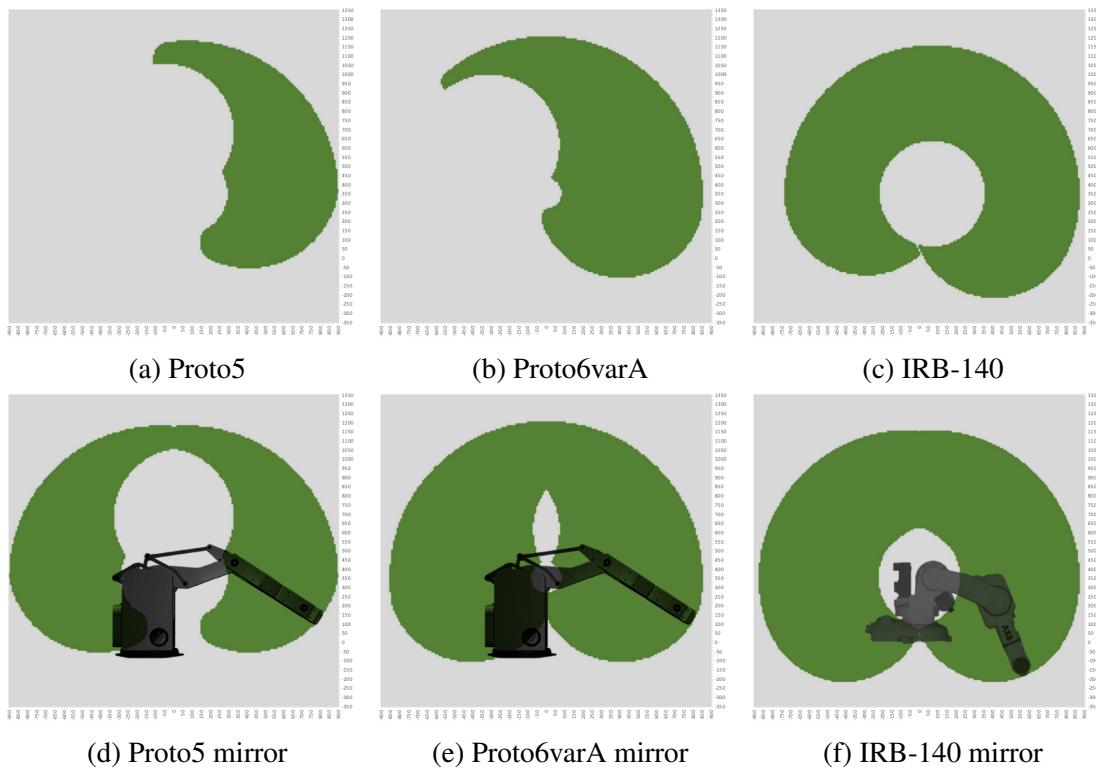


Abbildung 30: Workspace

6.1.2 Workspace

Das Aussehen und die Größe des Arbeitsbereiches eines Knickarmroboters ist hauptsächlich von den Hauptachsen abhängig. Insbesondere die Länge der Knickachsen 2 und 3 sowie deren Achsbegrenzungen (Minimum/Maximum θ_2 und θ_3) sind entscheidend für die Form und Größe des Workspace. In Abbildung 30 sind die Arbeitsräume von drei verschiedenen Robotermodellen dargestellt.

Da die meisten Industrieroboter eine rotierende erste Achse besitzen ist der Arbeitsbereich ein dreidimensionaler Volumenkörper. Aus Darstellungsgründen wird im Normalfall ein Querschnitt dieses Volumens dargestellt. Dabei kann die Darstellung in zwei Varianten geschehen. Die oberen Schaubilder der Abbildung 30 (a), (b) und (c) zeigen alle erreichbaren Positionen des TCPs bei einer fixierten Achse 1 (θ_1 konstant). Bei großen Achswinkelbegrenzungen der Hauptachsen 2 und 3 ist diese Darstellungsart oft ausreichend, dies ist etwa bei beim Robotermodell IRB140 von ABB (Abbildung 30 (c) und (f)) der Fall.

Eine weitere Darstellungsart ist ein korrekter Querschnitt durch den realen Volumenkörper des dreidimensionalen Arbeitsbereiches. (Schaubilder (d), (e) und (f)). Hierbei ist die Achse 1 nicht fixiert, d.h. θ_1 kann jeden Winkel innerhalb der entsprechenden Achsbegrenzung annehmen.

Die Schaubilder (a) und (d) zeigen den Arbeitsbereich des Prototyp 5. Wie deutlich

zu erkennen ist, ist dieser durch die Achsbeschränkungen deutlich eingeschränkter als etwa der Arbeitsbereich des seriellen Roboters IRB140. Trotz der Rotation um Achse 1 kann ein großer Bereich nahe des Ursprungs der Drehachse 1 nicht erreicht werden. Diese Einschränkung des Arbeitsbereiches ist typisch bei Parallel-Robotern.

In den Schaubildern (b) und (e) ist der Arbeitsbereich des Prototyp 6 dargestellt, der während dem Bearbeitungszeitraum unter anderem mithilfe der Erkenntnisse dieser Arbeit entstand. Durch die geschickte Anordnung der Viergelenksketten konnte der Freiheitsgrad von Achse 2 von 95° auf 140° gesteigert werden. Der Freiheitsgrad von Achse 3 konnte von 105° auf 140° erhöht werden

Roboter	Freiheitsgrad Achse 2	Freiheitsgrad Achse 3	Fläche Arbeits- raum
Prototyp 5	95°	105°	$0,649 \text{ m}^2$
Prototyp 6	130°	125°	$0,828 \text{ m}^2$
IRB 140	200°	280°	$1,447 \text{ m}^2$

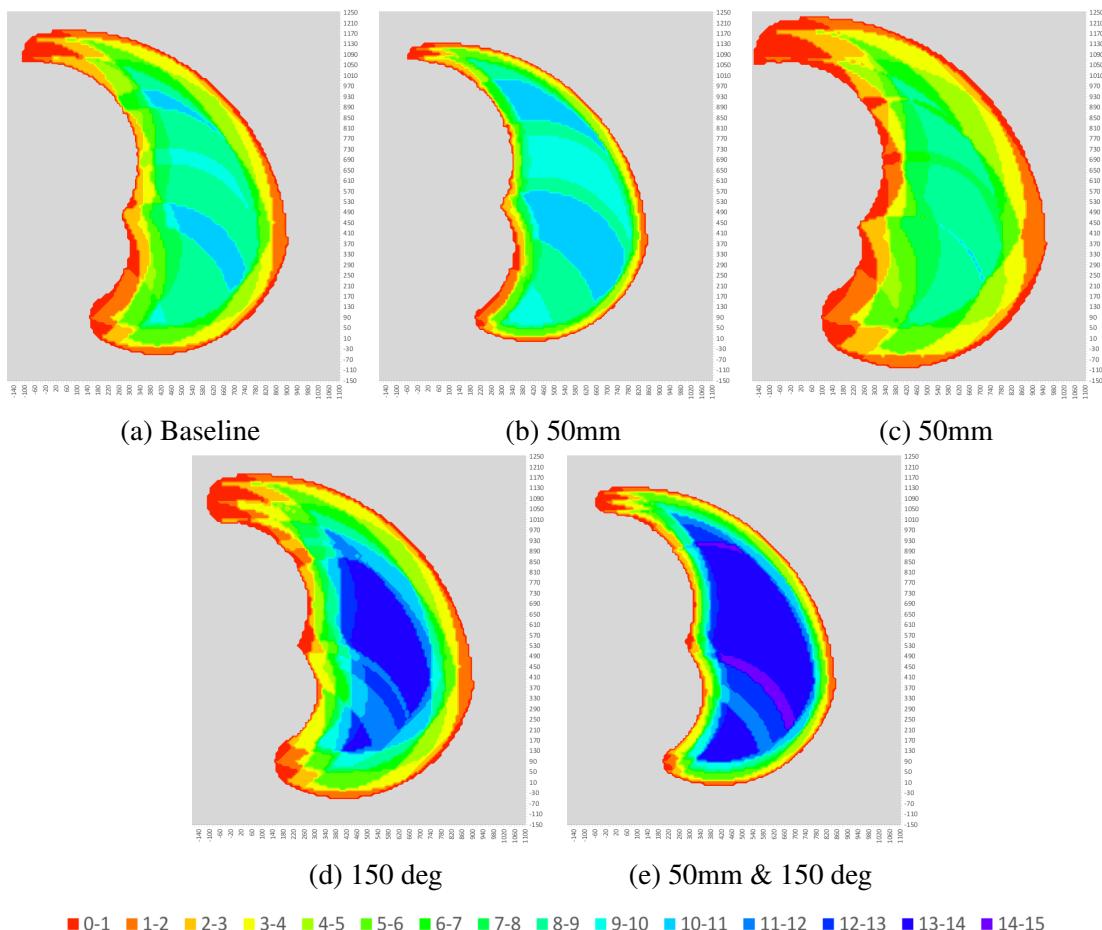


Abbildung 31: Resultate des Kinematik-Benchmarks

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 31 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 31 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 31 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

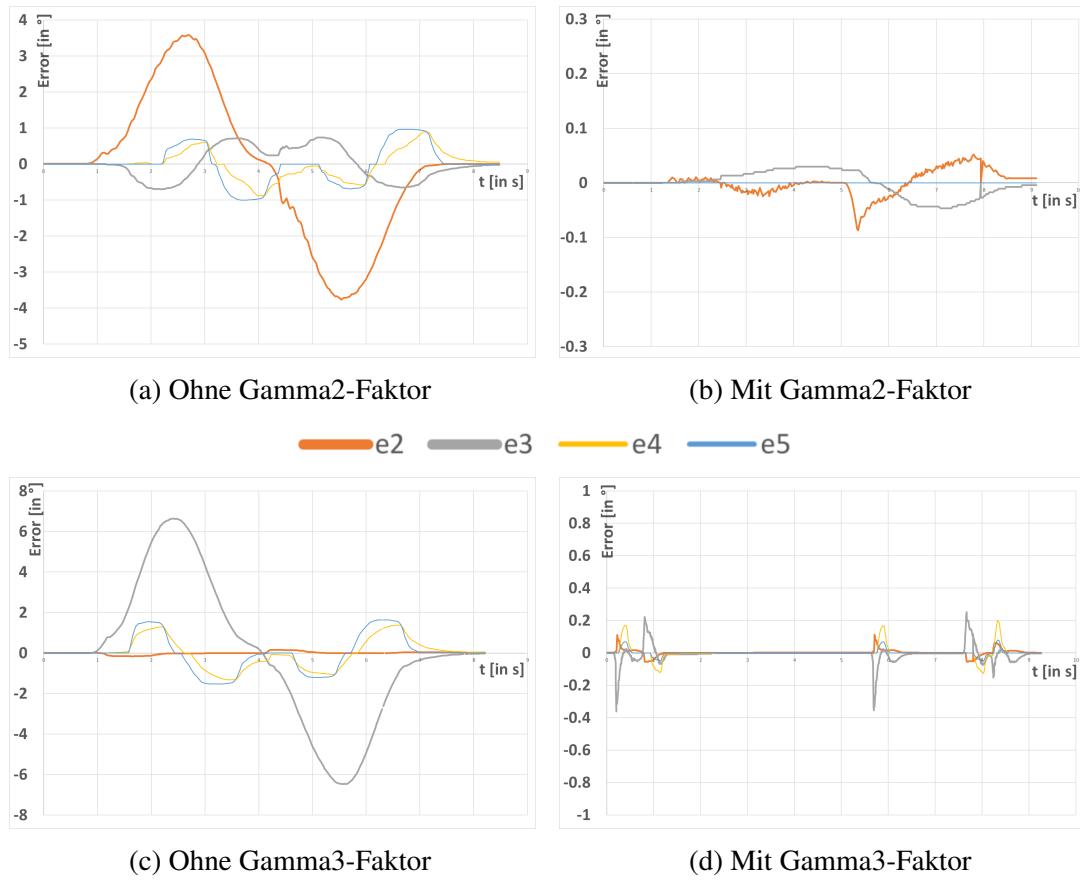


Abbildung 32: Steuerung mit und ohne Gamma-Faktoren

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 $e1$ - $e5$ 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 32 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 32 (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 32)

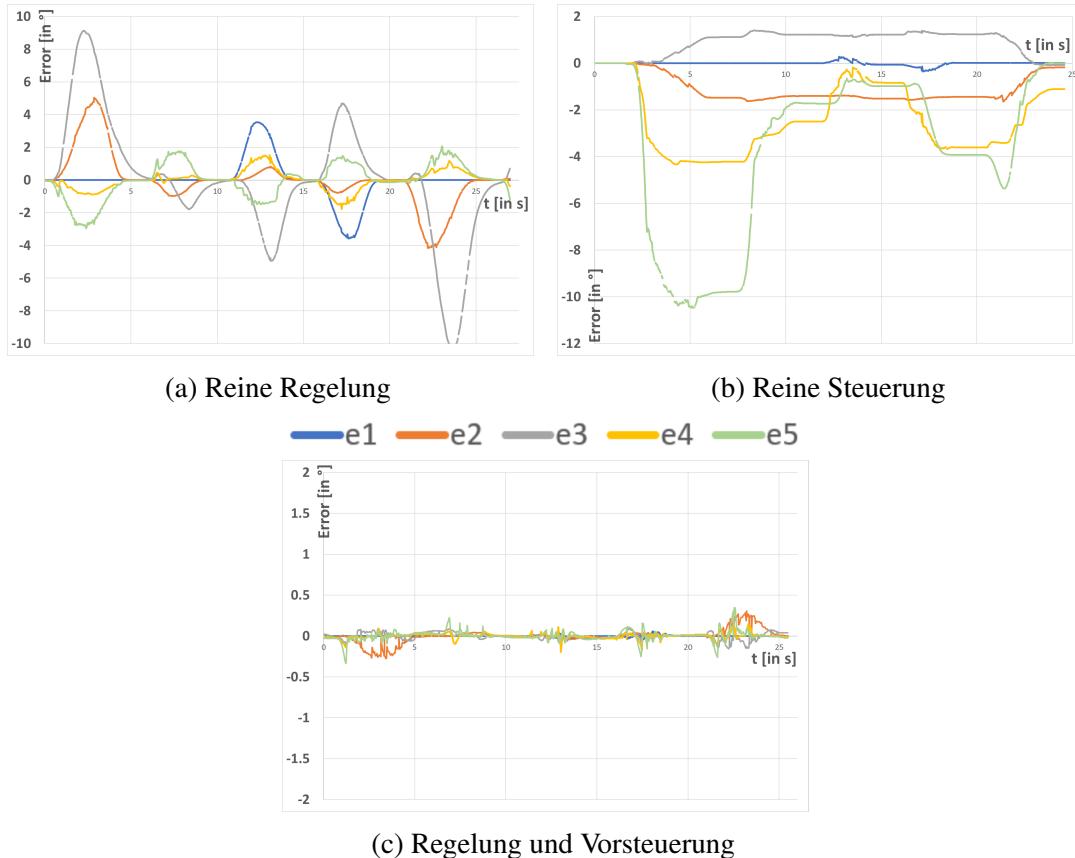


Abbildung 33: Lineare Bahnfahrten mit und ohne aktivierter Regelung und Vorsteuerung

6.2.2 Steuerung & Regelung

In diesem Abschnitt werden die Auswirkungen der Regelung und Vorsteuerung anhand der Messdaten in Abbildung 33 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

In Abbildung 33 (a) sind die Regelabweichungen der einzelnen Achsen aufgezeichnet bei der Verwendung einer reinen Regelung. Es ist deutlich zu erkennen, dass es zu großen Regelabweichung kommt. Die fünf linearen Fahrten sind anhand der Maxima der Error-Werte gut zu sehen; die Abweichung steigt während der Beschleunigung der Bewegung und sinkt beim Bremsen. Dies ist zu erwarten, da eine Regelung kein Vorwissen über den Sollwertverlauf hat und dementsprechend nur auf Regelabweichungen reagieren kann. Im Maximum beträgt die Abweichung etwa der Achse 3 über 10°.

REINE STEUERUNG

Die Verwendung einer reinen Steuerung ist in Abbildung 33 (b) zu sehen. Für die Steuerung werden die berechneten Sollwerte der Geschwindigkeit (anhand des zuvor erstellten Sollwertverlaufes) direkt an die Motoren weitergeleitet. In einem perfekten Modell (ohne Reibung, Elastizität etc.) sollten dabei gar keien Abweichungen enstehen. (b) zeigt hingegen, dass mit einer offenen Wirkungskette ebenfalls große Abweichungen enstehen. Insbesondere ist gut zu sehen, dass Achse 5 (grün e5) und Achse 4 (gelb e4) zu sehr großen Abweichungen neigen. Dies ist hauptsächlich mit der Elastizität der Riemen und dem sehr langen Kraftübertragungsweg dieser Achsen (Motoren im Sockel, Abrollen über Achsen 2,3 und 4) zu erklären. Um eine Achswinkeländerung zu erzeugen müssen zunächst alle Riemen auf Spannung gebracht werden, bis eine Kraftübertragung an die eigentliche Drehachse stattfinden kann.

Ebenfalls ersichtlich ist, dass die Abweichung der relativ starren Achsen 2 und 3 (Kraftübertragung über Stahlhebel der Viergelenkskette) deutlich geringer ausfällt.

REGELUNG MIT VORSTEUERUNG

Abbildung 33 (c) zeigt die Verwendung einer Regelung mit aktivierter Vorsteuerung. Wie in Kapitel 5.2.2 bereits beschrieben wurde resultiert die Verwendung einer Regelung mit Vorsteuerung in den besten Ergebnissen. Der Graph zeigt deutlich die geringe Abweichung der Achsen von dem vorgegebenen Sollwertverlauf. Die maximale Abweichung beträgt hier gerade noch $0,3^\circ$, was gegenüber von $\geq 10^\circ$ eine Verbesserung von einem Faktor von über 30 entspricht.

Die Gründe für diese massive Verbesserung liegen sowohl in der durch die Steuerung mögliche Achskompenstation (Abrollen der Achsen) sowie dem Ausgleichen der Elastizitäten durch den Regelungsteil.

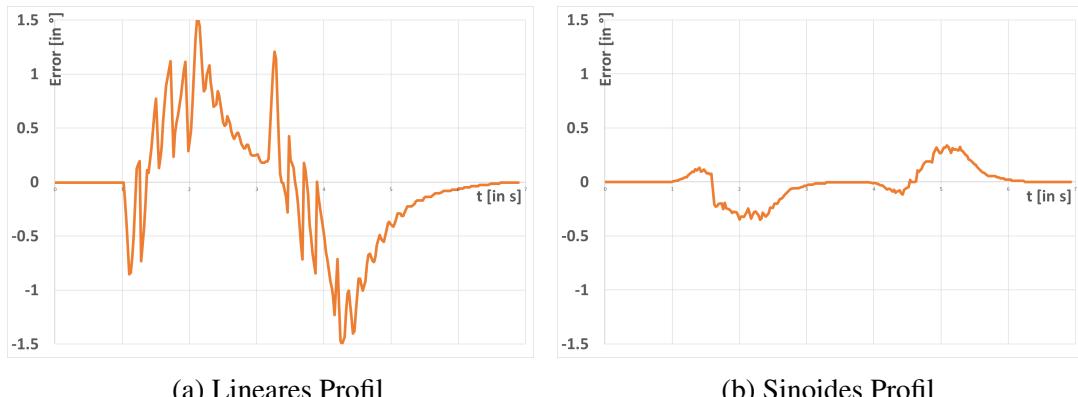


Abbildung 34: Bewegung der Achse 1 mit linearem und sinoidalem Bewegungsprofil

6.2.3 Bewegungsprofile

In der letzten Messreihe wurde der Effekt von verschiedenen Bewegungsprofilen untersucht. Abbildung 34 stellt die Auswirkung der Verwendung eines linearen Bewegungsprofils (Trapezprofil) gegenüber einem sinoiden Bewegungsprofil gegenüber. Für die Messung wurde eine Rotation der Hauptachse 1 um 90° gewählt.

Wie in Kapitel ?? beschrieben wird der Sollwertverlauf durch ein Bewegungsprofil generiert. Die einfachste Art ist dabei ein Trapezprofil, wobei die Beschleunigung sprunghaft zugeschalten wird. Dies führt dazu, dass zu Beginn (Beschleunigung) und Ende der Bewegung (Abbremsen) die zeitliche Ableitung der Beschleunigung (Ruck) unbeschränkt ist. Dies kann in einem mechanischen System zur Anregung von Schwingungen führen.

Im Gegensatz dazu wird in einem Sinoidprofil eine weichere Beschleunigung berechnet. Die Beschleunigung wird nicht sprunghaft aufgeschalten, sondern gehorcht einer sinoiden Zeitfunktion. Dadurch ist auch die Ableitung (Ruck) zu jedem Zeitpunkt der Bewegung beschränkt.

Abbildung 34 zeigt die den Regelfehler der Achse beim Ausführen einer Bewegung mit Trapezprofil. Die dadurch verursachten Schwingungen sind klar erkennbar. (b) zeigt die gleiche Bewegung bei einer Verwendung eines Sinoidenprofils. Es ist deutlich ersichtbar, dass es kaum zu Schwingungen kommt. Ebenfalls sind die absoluten Regelabweichungen geringer als bei der Verwendung des Trapezprofils.

Die Auswirkungen der beiden Bewegungsprofile sind stark vom Trägheitsmoment der an Bewegung beteiligten Achsen abhängig. Je mehr Masse bewegt werden muss, desto stärker wirkt sich der unbeschränkte Ruck zu Beginn und Ende der Bewegung aus. Für die Messung in Abbildung 34 wurde die Hauptachse 1 bei einer Traglast von 1 kg verwendet.

6.3 Optimierung der Kinematik

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Kinematik-Optimierung vorgestellt. Dabei wurden die in Kapitel ?? vorgestellten Methoden verwendet. Zur Evaluierung der Hebelkonfigurationen Ω wird die dort vorgestellte Scoring-Funktion $s(\Omega)$ verwendet. Sofern nicht anders erwähnt wird dabei die Max-Drehmoment Funktion $s_{maxtorque}(\Omega)$ verwendet.

$$s_{maxtorque} : \max \left\{ score_maxtorque(\Omega) \right. \quad (6.4)$$

Einige Hebelkinematiken wurden zusätzlich mit der Scoring-Funktion $s_{gesamt}(\Omega)$ aller Einschränkungen bewertet.

$$s_{gesamt} : \max \left\{ \begin{array}{l} score_maxtorque(\Omega) \\ score_socketheight(\Omega) \\ score_Axis3Length(\Omega) \\ score_Distance_P1_P2(\Omega) \\ score_Distance_P6_P9(\Omega) \end{array} \right. \quad (6.5)$$

6.3.1 Zufällige Hebelkinematiken

In Abbildung 37 sind verschiedene generierte Hebelkinematiken dargestellt. In der oberen Reihe (a), (b) und (c) sind drei Hebelkonfigurationen abgebildet, die durch Generierung zufälliger Startwerte entstanden sind. Wie alle gültigen Kinematiken besitzen sie einen reellen Max-Drehmoment Score $s_{maxtorque}$. Damit ist sichergestellt, dass alle Stellungen des Roboterkonfigurationsbereich Θ erreicht werden können. Dies ist eine Grundvoraussetzung für einen Startwert des Gradientenverfahrens. Ist diese Bedingung nicht erfüllt sind wären manche Stellungen im Arbeitsraum nicht anfahrbar. Dies ist etwa dann der Fall, wenn die Länge eines bzw. mehrerer Hebel zu kurz sind und somit in manchen Stellungen keine Schnittpunkte mehr bilden. (vgl. Abbildung ??)

Die Startwerte sind im Normalfall weit von einer idealen Hebelkinematik entfernt und haben wie in Abbildung 37 (a) - (c) zu sehen einen hohen Hebelkinematik-Score.

6.3.2 Optimierte Hebelkinematiken

Die untere Reihe in Abbildung 37 zeigt Hebelkinematiken die durch das Optimierungsverfahren des Gradientenabstieg enstanden sind. Der Max-Drehmoment-Score von (d) beträgt nur 10,01, d.h. der maximale statische Drehmoment der Motoren 2 und 3 sind

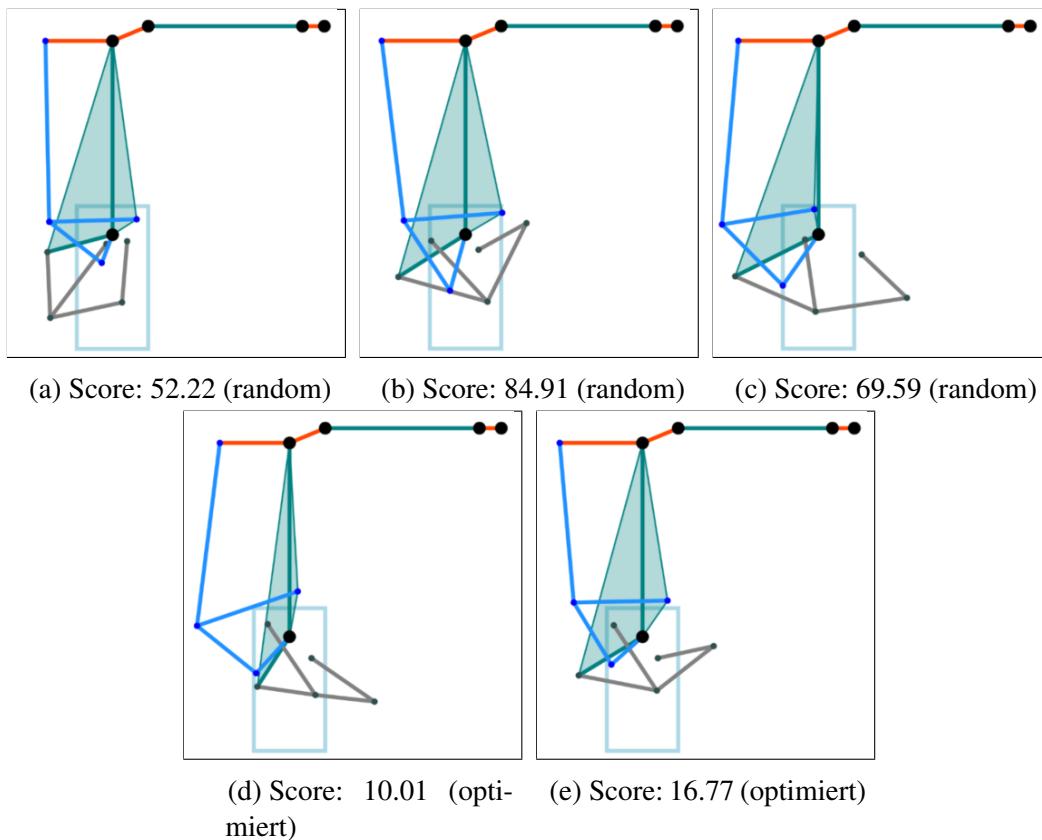


Abbildung 35: Verschiedene Hebelkinematiken

in der ungünstigsten Stellung des Roboters nur 10,01 Nm. Im Gegensatz dazu hat eine serielle Kinematik mit gleichen Abmessungen einen Spitzendrehmoment von 40,3 Nm und würde damit 403 % höhere Antriebsleistung erfordern.

In den folgenden Abschnitten und Abbildungen werden zwei der optimierten Hebelkinematiken genauer vorgestellt. Dabei wurde die Hebelkonfiguration von Abbildung 37 (d) alleinig anhand der Max-Drehmoment-Funktion optimiert während (e) anhand der Gesamt-Score-Funktion optimiert wurde. Eine detaillierte Analyse der Hebelkinematiken ist in Abbildung 36 zu sehen.

HEBELKINEMATIK OPTIMIERUNG: $S_{maxtorque}$

In diesem Abschnitt wird eine Hebelkinematik vorgestellt die durch das Gradientenabstiegsverfahren mit Verwendung der Max-Drehmoment-Funktion $s_{maxtorque}$ entstanden ist. Während der Testphase wurden sehr viele optimierte Kinematiken generiert, hier wird eine der Besten herausgepickt und beschrieben.

Durch die einfache Scoring-Funktion - keinerlei Einschränkungen an Hebellängen oder Punktabständen - ist das Optimierungsverfahren schnell und erfolgreich. Dabei wird das maximale Drehmoment in der ungünstigsten Stellung gefunden

und durch Änderungen der Hebellängen minimiert. Basierend auf einer zufälligen Startkonfiguration wurde nach ca. 15 Iterationen ein lokales Minimum mit guten Max-Drehmoment-Werten gefunden. Diese Hebelkonfiguration ist in Abbildung 36 (a) dargestellt. Die Abbildung zeigt in der linken Spalte die Drehmoment-Analyse sowie die entstehenden Gamma-Funktionen der dynamischen Übersetzung.

HEBELKINEMATIK OPTIMIERUNG: s_{gesamt}

Mit den zusätzlichen Beschränkungen der Scoring-Methode s_{gesamt} war es deutlich schwieriger Hebelkonfigurationen mit niedrigen Max-Drehmoment zu finden. Die Analyse der zuvor gefunden Hebelkonfiguration unter Berücksichtigung des erweiterten Scorings s_{gesamt} ergab einen Wert von 301,140:

Bezeichnung	Score
score_maxtorque	10,018
score_sockelheight	44,854
score_Distance_P1_P2	1,188
score_Distance_P6_P9	301,140
score_Axis3Length	224.841
s_{gesamt}	301,140
$s_{maxtorque}$	10,018

Es ist zu erkennen, dass die zuvor nicht berücksichtigen zusätzlichen Scoring-Funktionen den gesamten Score deutlich erhöhen.

Mit der vorliegenden Hebelkonfiguration als Startwert wurde nun das Optimierungsverfahren unter Verwendung der gesamten Score-Funktion s_{gesamt} neu gestartet.

Da die Optimierungsfunktion nun aus dem Maximum mehrerer Teilstücke besteht, wird während der Optimierung jeweils der größte Wert aller Teilstücke minimiert. Dies führt im Allgemeinen dazu, dass sich der Max-Drehmoment erhöht. Eine Optimierung dieser Funktion wird erst dann relevant, wenn die Werte aller Bestrafungsfunktionen kleiner dem des Max-Drehmoments sind. Durch die komplexere Scoring-Methode ist der Gradientenabstieg nun deutlich langsamer. Häufig springt das Optimierungsverfahren zwischen der Optimierung der verschiedenen Teilstücke hin und her und es werden viele lokale Minima gefunden, die mithilfe der Noise-Funktion verlassen werden.

Die in Abbildung 36 (b) gefundene Hebelkonfiguration hat ein Score von 16,879 bei einem maximalen Drehmoment von 16,777 Nm und wurde nach 879 Iterationen gefunden.

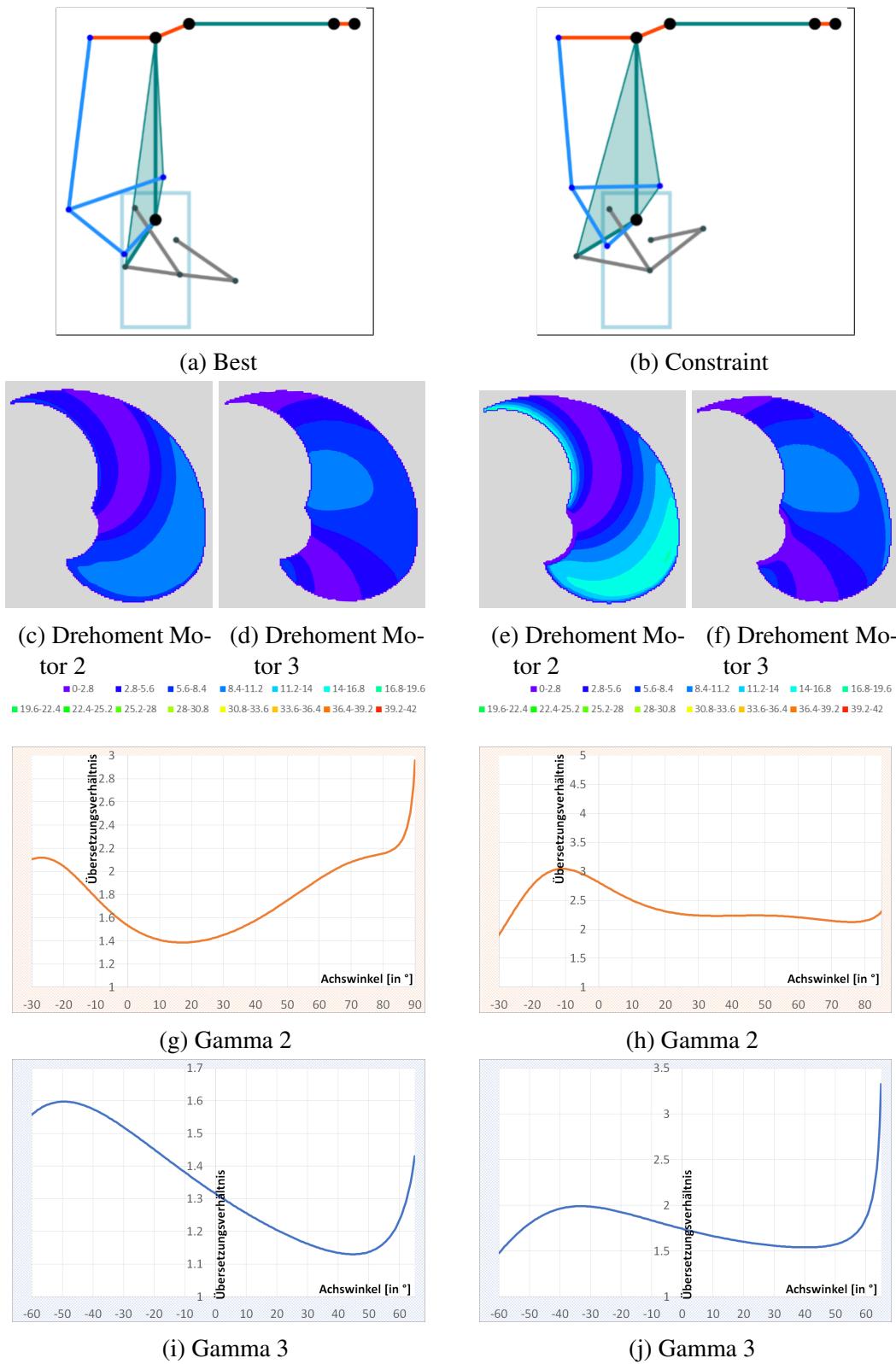


Abbildung 36: Analyse der optimierten Kinematiken

Die Werte der einzelnen Scoring-Methoden sind in folgender Tabelle aufgelistet. Wie zu sehen ist, wird der Gesamtscore von 16,879 durch das Maximum in der Funktion *score_sockelheight* bestimmt.

Bezeichnung	Score
score_maxtorque	16,777
score_sockelheight	16,879
score_Distance_P1_P2	1,360
score_Distance_P6_P9	2.042
score_Axis3Length	7.068
S_{gesamt}	16,879
S_{maxtorque}	16,777

6.3.3 Workspace & Beweglichkeit

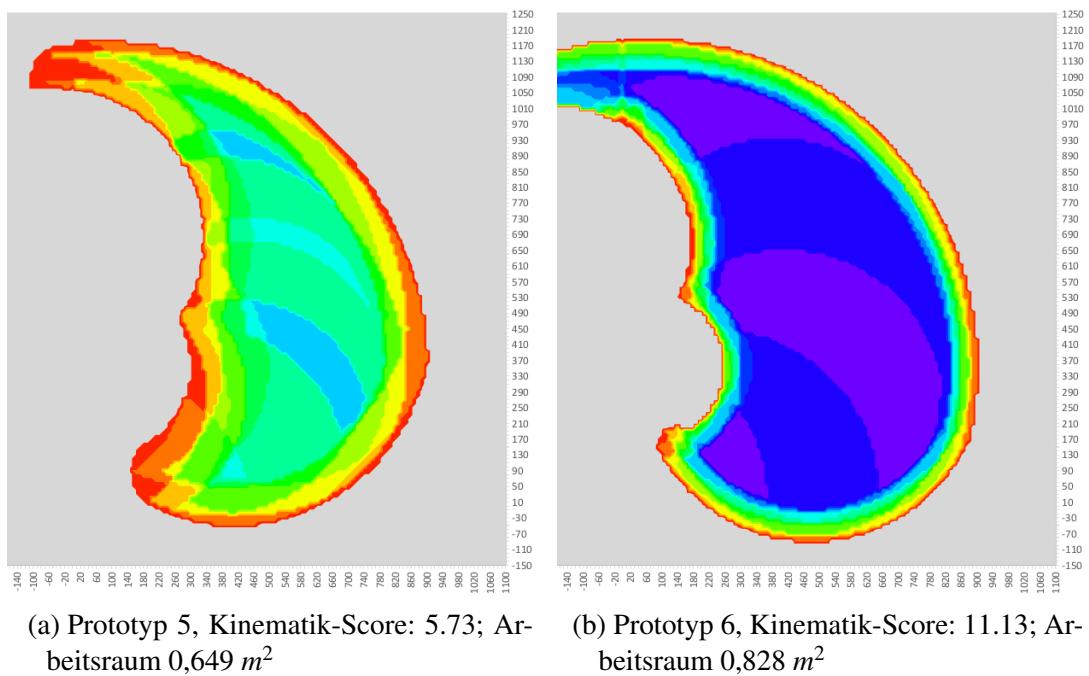


Abbildung 37: Verschiedene Hebelkinematiken

7 Zusammenfassung

In diesem Kapitel werden die Ansätze und Ergebnisse dieser Arbeit nochmals zusammengefasst und anschließend in einem Fazit bewertet.

Die Zielsetzung war dabei dreigeteilt. Der erste Teil der Arbeit befasste sich mit der Analyse des kinematischen Modells, der Berechnung der Kräfte und Drehmomente, der Berechnung des Arbeitsraumes sowie der Beweglichkeit des Roboters. Im zweiten Teil wurde eine Steuerung für den Roboter entwickelt. Dabei wurden die speziellen Eigenschaften der Viergelenkskinematik berücksichtigt. Der abschließende dritte Teil der Arbeit beschäftigt sich mit der Optimierung der Hebelkinematik. Es wurde versucht die Hebelkonfiguration anzupassen und mit Bezug auf maximale Drehmomente zu optimieren.

7.1 Kinematische Analyse

Zu Beginn der Thesis wurde das kinematische Hebelmodell des Roboters "HORST" anhand eines Punkt-Stabmodell beschrieben. Es wurden die Zusammenhänge der Viergelenksketten herausgearbeitet und die zentralen Funktionen **g2** und **g3** beschrieben. Diese ergeben sich durch die nichtlinearen Übersetzungen der Koppelgetriebe der Hauptachsen 2 und 3.

Für genaue Studien der entstehenden Kräfte und Drehmomente der Achsen und Stäben wurde ein Berechnungsprogramm entwickelt. Hierzu wurden die Viergelenksketten analysiert und mithilfe von Drehmoments- und Hebelgesetzen berechnet. Um die benötigten Drehmomente der Antriebseinheiten im gesamten Arbeitsbereich visualisieren zu können wurden dazu Schaubilder generiert, welche die Belastung der Motoren in jeder Stellung des Roboters darstellt.

Um die Beweglichkeit des Roboters HORST in verschiedenen Prototypen-Ausführungen sowie gegenüber anderen (seriellen) Knickarm-Robotern auswerten zu können wurde ein einfacher "Kinematik-Benchmark" entwickelt. Hierbei wird mithilfe der inversen Kinematik versucht ein virtuellen Würfel in jedem Punkt des Arbeitsraum anzufahren. Die erreichbaren Orientierungen jedes Punktes wurde in einem Schaubild geplottet und die getestete Roboterkinematik mit einem Score benotet.

7.2 Steuerung des Roboters

Unter der Berücksichtigung der zuvor durchgeführten Analyse des kinematischen Modells wurde im zweiten Teil der Arbeit eine Steuerung des Roboters entworfen. Diese wurde experimentell an einem reellen Roboter getestet und bemessen.

Durch die Besonderheiten des Roboters, die Verwendung der Viergelenksketten und das Abrollen der Antriebsriemen, mussten bei der Steuerung des Roboters einige Dinge beachtet werden. Dabei spielte insbesondere die dynamische Übersetzung der Achse 2, ausgedrückt in der Funktion **g2** und die dynamische Übersetzung der Achse 3, ausgedrückt in der Funktion **g3** eine Rolle. Die Verkopplung der Motoren durch das Abrollen der Riemen auf den vorherigen Achsen wurde in der Steuerung berücksichtigt.

Es wurde eine Regelung mit aktiver Vorsteuerung entwickelt und anhand eines realen Roboters getestet. Dabei wurde ebenfalls die Verwendung von verschiedenen Bewegungsprofilen diskutiert und experimentell getestet.

7.3 Optimierung der Kinematik

Nach der Analyse der Kinematik im ersten Teil und der Evaluierung der Machbarkeit der Steuerung dieser im zweiten Teil der Arbeit beschäftigte sich der abschließende dritte Teil mit den Optimierungsmöglichkeiten der Kinematik des Roboters HORST. Dazu wurden die veränderlichen Parameter der Hebelkinematik herausgearbeitet: die Länge der Stäbe sowie die Position der Fixpunkte der Viergelenksketten. Es wurde eine Scoring Funktion für die Bewertung der Hebelkinematik eingeführt. Diese drückt das zentrale Anliegen, den maximal entstehenden statischen Drehmoment an den Antriebsachsen, aus. Später wurde die Scoring-Funktion erweitert um verschiedene konstruktiven Einschränkungen ausdrücken zu können. Mithilfe dieser Funktion wurden die partiellen Ableitungen aller Dimensionen der Hebelkinematik gebildet und im *Gradienten* in dem Spaltenvektor zusammengefasst. Mit diesem wurde ein Gradientenabstiegsverfahren gestartet. Da das Verfahren von den gewählten Startwerten abhängig ist, wurde ein Methode zur Generierung zufälliger Hebelkinematiken entwickelt, welche als Startwerte für das Gradientenverfahren verwendet werden konnte. Da sich durch die vielen Dimensionen und Einschränkungen der Scoring-Funktion viele lokale Minima ergeben, wurde mit der Hinzunahme einer zufälligen Noise-Funktion eine einfache Möglichkeit entwickelt lokale Minima zu verlassen um das Abstiegsverfahren ohne Abruch weiter durchzuführen.

7.4 Fazit

Die Ablauf der Abschlussarbeit verlief sehr erfolgreich, es konnten viele Erkenntnisse gewonnen werden. Das für die Arbeit entwickelte Drehmoment- und Kräfteanalyseprogramm kann neben dem Exportieren der Drehmomentschaubilder (etwa Abbildung ??) die Hebel- und Stabkräfte und Drehmomente interaktiv in verschiedenen Stellungen und bei verschiedenen Traglasten darstellen. Zusätzlich kann auch die Dynamik und Bewegungsabläufe des Roboters simuliert werden. Mit der Berechnung von statischen und dynamischen Kräften in allen Stellungen des Roboters war dieses Programm ein zentraler Bestandteil für die Auslegung der Motoren und Getriebeübersetzungen.

Die Darstellung des Arbeitsraumes, insbesondere verbunden mit der Beweglichkeit des Roboters in diesem, ermöglichte eine gute Vergleichbarkeit zwischen verschiedenen Prototypen als auch zu Knickarmrobotern anderer Hersteller. Durch die Analyse der Einflüsse verschiedener kinematischen Kenngrößen - insbesondere die Länge und Beweglichkeit der Handachse 5 - konnten die Erkenntnisse des Kinematik-Benchmarks in die Planung des in der Entwicklungsphase befindlichen Prototyp 6 einfließen. Die Anpassungen der signifikantesten kinematischen Kenngrößen konnten den Arbeitsbereich von 0.65 m^2 (Prototyp 5) auf 0.828 m^2 vergrößern, eine Vergrößerung um 25%. Insbesondere aber die Beweglichkeit konnte mit einem Kinematik-Score von 5.73 (Prototyp 5) auf 11.13 (Prototyp 6) fast verdoppelt werden. Damit ist der Prototyp 6 des Roboters HORST um über 25% beweglicher als vergleichbar aufgebaute Roboter IRB 140 der Firma ABB (Benchmark-Score 8.76).

Die während der Abschlussarbeit entwickelte Steuerung des Roboters stellt eine deutliche Verbesserung gegenüber der zuvor vorhandenen achsunabhängigen Steuerung dar. Durch die Geschwindigkeits-Vorsteuerung konnte die Präzision während eines Bewegungsablaufs enorm gesteigert werden (Abweichungen vom Sollwert der Achswinkel von unter 0.3° zum Vergleich von über 10° ohne Vorsteuerung). Die Verwendung von sinoiden Bewegungsprofilen statt Trapezrampen konnte Schwingungen effektiv verringern und somit eine deutlich ruhigere Beschleunigen und Abbremsen von Achsen ermöglichen.

Weiterhin konnten auch Probleme des Regelungsverhalten der Handachsen 4 und 5 aufgedeckt werden. Die langen Riemenwege und die Umschränkung der Riemen in den Tragarmen des Roboters führten zu Problemen in der Genauigkeit und Stabilität des Roboters. Als Reaktion auf diese Schwierigkeiten wurde die Position der Motoren dieser Achsen diskutiert und bei der Planung des darauffolgenden Prototyps in den Tragarm verlegt. Dadurch werden die Handachsen 4 und 5 des nächsten Robotermodells als Direktantrieb umgesetzt, wodurch das Abrollen der Riemen mitsamt aller negativen Effekte wegfällt.

Mit dem zeitlichen Zusammenfall der Abschlussarbeit und der Planung eines neuen Prototypen spielte auch die Optimierung der Kinematik eine entscheidende Rolle. Viele Erkenntnisse der Analyse konnten in die Planung des neuen Modelles einfließen. Bemerkenswert ist dabei insbesondere die Verwendung der Kenngrößen der Hebelkinematik, welche aus einem der Resultate des Gradientenverfahrens hervorging. Trotz der erhöhten Massen in der Tragstruktur durch die Positionierung der Motoren 4 und 5 im Tragarm konnte eine Hebelkinematik gefunden werden, welche die gleichen maximalen Drehmomente des vorherigen Prototypen 5 benötigt. Dies ist insbesondere dadurch bemerkenswert, da durch die Erhöhung des Freiheitsgrad der Hauptachsen 2 und 3 ein deutlich größerer Arbeitsraum ermöglicht wurde. Durch die Anpassung zusätzlicher kinematischen Kenngrößen - insbesondere die Verkürzung des Armteils 5 und der Beweglichkeit der Achse 5 - konnte wie zuvor erwähnt die Beweglichkeit des Roboters fast verdoppelt werden.

Anhang A Erster Anhang

Section

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Offene und geschlossene Kinematische Kette	1
Abbildung 2:	Verschiedene serielle und parallele Roboter	2
Abbildung 3:	Roboter mit Antrieb über Viergelenksketten	6
Abbildung 4:	Roboterachsen	10
Abbildung 5:	Eulerwinkel (Z-X'-Z'')	12
Abbildung 6:	Verschiebung des TCP durch Endeffektor	13
Abbildung 7:	Schematische Darstellung der direkten/inversen Kinematik	14
Abbildung 8:	Mehrdeutigkeiten und Singularität	15
Abbildung 9:	Bewegungsprofil verschiedenere PTP-Bahnen	17
Abbildung 10:	Bewegungsprofile: Beschleunigung, Geschwindigkeit, Weg	19
Abbildung 11:	Drehmomente eines Drei-Achs-Roboter	20
Abbildung 12:	Viergelenksketten	21
Abbildung 13:	Arbeitsraum	22
Abbildung 14:	Versionshistorie der Prototypen des Roboter HORST	26
Abbildung 15:	Beschreibung der Kinematik des Roboter HORST	27
Abbildung 16:	Detailschaubilder der zwei Viergelenksketten	28
Abbildung 17:	Dynamische Übersetzung der Achsen 2 und 3	30
Abbildung 18:	Dynamische Übersetzung der Achsen 2 und 3	31
Abbildung 19:	Punkt-Stabmodell	34
Abbildung 20:	Funktionsgraph von g2 und g3 in Abhängigkeit der Achswinkel	37
Abbildung 21:	Torque 2	39
Abbildung 22:	Torque 3	40
Abbildung 23:	Visualisierung des Kinematik-B	41
Abbildung 24:	Kraftübertragung über Viergelenksketten	42
Abbildung 25:	Kraftübertragung und Achsabrollen	43

Abbildung 26: Regelung und Steuerung	44
Abbildung 27: Verschiedene Hebellängen (<i>Hebel</i> ₂₋₄)	47
Abbildung 28: Scoring Funktions	49
Abbildung 29: Achs-Drehmoment neben Motor-Drehmoment	54
Abbildung 30: Workspace	56
Abbildung 31: Resultate des Kinematik-Benchmarks	58
Abbildung 32: Steuerung mit und ohne Gamma-Faktoren	60
Abbildung 33: Lineare Bahnfahrten mit und ohne aktivierter Regelung und Vorsteuerung	62
Abbildung 34: Bewegung der Achse 1 mit linearem und sinoidem Bewegungsprofil	64
Abbildung 35: Verschiedene Hebelkinematiken	66
Abbildung 36: Analyse der optimierten Kinematiken	68
Abbildung 37: Verschiedene Hebelkinematiken	70

Literaturverzeichnis

- [1] “IRB140 - ABB Industrieroboter.” <http://new.abb.com/products/robotics/de/industrieroboter/irb-140>, 2017.
- [2] “Delta-Roboter - Getriebe und Aktuatoren.” <https://www.wittenstein.de/de-de/delta-roboter/>, 2017.
- [3] “Hexapod - Faulhaber.” <https://www.faulhaber.com/de/maerkte/luft-raumfahrt/hexapod/>, 2017.
- [4] J. Riegger and M. Frey, “Roboter mit mehreren koppelgetrieben in leichtbauweise,” July 13 2017. WO Patent App. PCT/IB2017/050,073.
- [5] F. Ehrenleitner, “Knickarmroboter mit armantrieb,” Dec. 21 2011. EP Patent App. EP20,110,450,074.
- [6] Qinzhou-University, “Four-degree-of-freedom seven-connecting-rod controllable moving operation mechanical arm with sliding plug pin,” May 20 2015. CN Patent App. CN 201,410,825,915.
- [7] Qinzhou-University, “Front hoisting-transporting crane with two degrees of freedom and double closed-loop hybrid driving,” Nov. 25 2015. CN Patent 103,787,205.
- [8] W. Weber, *Industrieroboter - Methoden der Steuerung und Regelung*. M: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
- [9] P. Corke, *Robotics, Vision and Control - Fundamental Algorithms in MATLAB*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [10] M. Husty, A. Karger, H. Sachs, and W. Steinhilper, *Kinematik und Robotik* -. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2013.
- [11] Klaus Wüst, “Grundlagen der Robotik,” 2014.
- [12] J.-P. Merlet, *Parallel Robots* -. Berlin Heidelberg: Springer Science Business Media, 2012.
- [13] C. C. Bier, *Geometrische und physikalische Analyse von Singularitäten bei Parallelstrukturen*. Essen: Vulkan-Verlag GmbH, 2006.
- [14] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, and W. A. Wall, *Technische Mechanik 1 - Statik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2016.
- [15] D. Gross, W. Ehlers, P. Wriggers, J. Schröder, and R. Müller, *Formeln und Aufgaben zur Technischen Mechanik 1 - Statik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2016.

- [16] D. Gross, W. Hauger, J. Schröder, and W. A. Wall, *Technische Mechanik 3 - Kinetik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015.
- [17] D. Gross, W. Ehlers, P. Wriggers, J. Schröder, and R. Müller, *Formeln und Aufgaben zur Technischen Mechanik 3 - Kinetik, Hydrodynamik*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2015.
- [18] G. Pritschow, *Einführung in die Steuerungstechnik* -. München: Hanser, 2006.
- [19] W. Schumacher and M. Maure, “Grundlagen der Regelungstechnik.” https://www.ifr.ing.tu-bs.de/static/files/lehre/vorlesungen/gdr/Skript_GdR.pdf, 2014.
- [20] Bastian von Harrach, “Einführung in die Optimierung.” <http://www.mathematik.uni-stuttgart.de/~harrach/lehre/Optimierung.pdf>, 2015.
- [21] J. Snyman, *Practical Mathematical Optimization - An Introduction to Basic Optimization Theory and Classical and New Gradient-Based Algorithms*. Berlin Heidelberg: Springer Science Business Media, 2005.
- [22] A. Meister, *Numerik linearer Gleichungssysteme - Eine Einführung in moderne Verfahren. Mit MATLAB®-Implementierungen von C. Vömel*. Berlin Heidelberg New York: Springer-Verlag, 2014.
- [23] Wikipedia, “Platzhalter Wikipedia.” <https://de.wikipedia.org>, 2017.

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 13. Dezember 2017, Tim Schmiedl