

# **Konstruktion eines SCARA-Roboters zur Erforschung von Regelungsstrategien in der Telepräsenz**

Studienarbeit

Martin Kuschel, Matr.-Nr. 194411

Prof. Dr.-Ing./Univ. Tokio Martin Buss  
Betreuerin: Dipl.-Ing. Sandra Hirche

Berlin, 18.02.2004



**Technische Universität Berlin**

Institut für Energie- und Automatisierungstechnik  
Fachgebiet Regelungssysteme



## **Abstract**

Haptic Telepresence is still a considerable subject of research since there are many unsolved problems especially in connection with haptic displays, like instability caused by time delays during data transmission or non-authentic behaviour in contact situations.

The goal of this thesis was to set up a low-cost haptic display that has more than one degree of freedom. It's purpose should be the exploration of control strategies in the area of haptic telepresence.

To fulfil haptic requirements the mechanical system of the robot must offer high stiffness, low weight and is allowed to have only little momentum. The price of the whole system must be far below other haptic displays of this dimension.

Thus the constructed display is a 2-degrees-of-freedom SCARA-robot. It's nearly completely built out of aluminium and its gears are Harmonic Drives ensuring a very high accuracy with no backlash. As states of the system, the gear-positions are measured by encoders and the forces applied to the links are measured by strain gauges. To evaluate the gauge's signal an electronic circuit was designed. The robot is connected to a PC and runs in a real time environment. The complete system costs about 1000 Euro.

## **Zusammenfassung**

Haptische Telepräsenz ist immer noch ein wichtiger Forschungsbereich. Ungelöste Probleme gibt es speziell im Bereich haptischer Displays, z.B. Instabilität durch Signallaufzeiten oder unwirkliches Verhalten in Kontaktsituationen.

Ziel dieser Studienarbeit war es, ein preiswertes haptisches Display mit mehr als einem Freiheitsgrad anzufertigen. Es soll zum Erforschen von Regelungsstrategien im Bereich haptischer Telepräsenz eingesetzt werden.

Um haptischen Anforderungen zu genügen, muss das mechanische System des Roboters hohe Steifigkeit und geringes Gewicht aufweisen. Es darf nur wenig Eigendynamik besitzen. Der Preis des gesamten Systems muss weit unter denen anderer haptischer Displays der gleichen Dimension liegen.

Dementsprechend ist für das zu konstruierende Display ein SCARA-Roboter mit zwei Freiheitsgraden gewählt worden. Er ist fast komplett aus Aluminium gefertigt und als Getriebe kommen hochgenaue Harmonic Drives zum Einsatz, die kein Spiel besitzen. Als Zustände des Systems werden die Gelenkpositionen über Winkelencoder sowie die an den Links wirkenden Kräfte, mittels Dehnungsmessstreifen, gemessen. Zur Auswertung des von den Dehnungsmessstreifen erzeugten Signals wurde eine Schaltung konstruiert. Der Roboter ist an einen PC angeschlossen und wird in einer Echtzeitumgebung betrieben. Das gesamte System kostet ca. 1000 Euro.



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einführung</b>	<b>1</b>
1.1	Telepräsenz . . . . .	1
1.2	Haptik . . . . .	1
1.3	Zweck der Konstruktion . . . . .	1
<b>2</b>	<b>Mechanisches System des Roboters</b>	<b>5</b>
2.1	Konstruktion . . . . .	5
2.1.1	Design der Roboterlinks . . . . .	5
2.1.2	Maxon Motoren . . . . .	7
2.1.3	Harmonic Drive Getriebe . . . . .	7
2.2	Mathematische Beschreibung . . . . .	9
2.2.1	Geometrischer Aufbau . . . . .	10
2.2.2	Vorwärtstransformation . . . . .	12
2.2.3	Rückwärtstransformation . . . . .	14
2.2.4	Jacobi-Matrix . . . . .	16
2.2.5	Transformation der Geschwindigkeiten . . . . .	18
2.2.6	Transformation der Beschleunigungen . . . . .	18
2.2.7	Transformation der Kräfte und Momente . . . . .	19
2.3	Performanz . . . . .	20
2.3.1	Arbeitsraum . . . . .	20
2.3.2	Geschwindigkeitsabbildung vom Joint Space zum User Space	21
2.3.3	Kraftübertragung vom Joint Space zum User Space . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Elektronisches System des Roboters</b>	<b>29</b>
3.1	DMS-Schaltung . . . . .	29
3.2	DMS-Verstärker . . . . .	31
3.2.1	Allgemein . . . . .	31
3.2.2	Technische Details . . . . .	32
3.3	Winkelencoder . . . . .	35
3.4	Messkarte . . . . .	35
3.5	Datenverarbeitung . . . . .	36
3.6	PWM-Verstärker . . . . .	38
3.7	Netzteil . . . . .	39

<b>4</b>	<b>Inbetriebnahme und Einstellen des Systems</b>	<b>41</b>
4.1	Ansteuerung der Motoren . . . . .	41
4.2	Aufnahme des Kraftsignals . . . . .	44
4.3	Aufnahme des Positionssignals und Berechnung der Drehgeschwindigkeit . . . . .	44
4.4	Auswertung des Strommonitors . . . . .	45
4.5	Modellierung der Reibung der Harmonic Drive Getriebe . . . . .	45
<b>5</b>	<b>Performanzkennzahlen</b>	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>Fazit und Ausblick</b>	<b>51</b>
<b>A</b>	<b>Technische Daten des Scara-Roboters</b>	<b>53</b>
<b>B</b>	<b>Inhalt der CD</b>	<b>55</b>

# Abbildungsverzeichnis

1.1	SCARA-Roboter . . . . .	3
2.1	Konstruktionsskizze . . . . .	6
2.2	Eingespannter Balken mit neutraler Faser und Bereich größter Dehnung (schwarz) . . . . .	6
2.3	Konstruktion des Roboterlinks . . . . .	7
2.4	Hamonic Drive Getriebe . . . . .	8
2.5	Komponenten eines Harmonic Drive . . . . .	9
2.6	Festlegung der Koordinatensysteme nach Denavit-Hartenberg . . . . .	11
2.7	Prinzip der Vorwärtslösung . . . . .	12
2.8	Prinzip der Rückwärtslösung . . . . .	14
2.9	Mehrdeutigkeit beim SCARA . . . . .	14
2.10	Arbeitsraumsimulation des SCARA-Roboters . . . . .	20
2.11	Verlauf der reziproken Determinante der Jacobimatrix . . . . .	21
2.12	Transformation vom Joint Space zum User Space . . . . .	23
2.13	Verlauf der Ellipsen bezüglich $\varphi_2$ . . . . .	25
2.14	Dualität zwischen Geschwindigkeits und Kraftübertragung . . . . .	26
2.15	Maximale und minimale Kraft über Arbeitsraum . . . . .	26
3.1	Elektronisches System des Roboters . . . . .	30
3.2	Verschaltung der DMS mit Offsetabgleich . . . . .	31
3.3	DMS-Schaltung und DMS-Verstärker auf dem Roboter . . . . .	32
3.4	Verstärkung des INA125 in Abhängigkeit des gewählten Widerstandes . . . . .	33
3.5	Rauschminderung bei verschiedenen Grenzfrequenzen . . . . .	34
3.6	Wirkungsweise von RT-Linux . . . . .	37
3.7	Kommunikation zwischen Linux- und RTLinux-Prozess . . . . .	38
4.1	Veranschaulichung der Motoransteuerung . . . . .	43
4.2	Drehzahlregelung zur Aufnahme der Reibungskennlinie . . . . .	46
4.3	Reibungskennlinie des inneren Getriebes (ohne Haftreibung) . . . . .	46



# Kapitel 1

## Einführung

### 1.1 Telepräsenz

Die Telepräsenz besteht aus drei Teildisziplinen: der Robotik, der Telekommunikation und der Virtual Reality. Ziel ist es, dem Nutzer die Möglichkeit zu verschaffen durch einen ferngesteuerten Roboter in eine von ihm entfernte Umwelt einzugreifen und ein sensuelles Feedback der dortigen Situation zu erhalten.

So ist es z.B. denkbar, dass ein Arzt während einer medizinischen Untersuchung nur durch einen Roboter, den Teleoperator, vertreten ist. Dabei steuert er als Operator sein Handeln über einen weiteren Roboter, die Mensch-Machine-Schnittstelle, von einem anderen Ort aus. Über diesen nimmt er auch die Situation des Patienten wahr, um eine Diagnose zu stellen.

### 1.2 Haptik

Haptik ist ein wesentliches Kriterium der Telepräsenz und bezeichnet die Vermittlung fühlbarer Sinnesreize. Dabei unterscheidet man zwischen zwei Arten. Die Kinästetik bezeichnet die Vermittlung von Kräften, um beispielsweise einen Stoß zu übertragen. Das taktile Feedback beschreibt die Übertragung von Rauigkeiten und Vibrationen. Beispielsweise die Beschaffenheit einer Oberfläche.

### 1.3 Zweck der Konstruktion

Das hier vorliegende System soll dazu dienen, neue Regelungsstrategien zu entwickeln. Dazu werden insbesondere Strategien der haptischen Telepräsenz gehören. Solche Regelungen beinhalten Aspekte von Kraft-, Positions- und Geschwindigkeitsregelungen, als auch Eigenschaften des Übertragungskanals und den damit verbundenen Problemen. Sie sollen hier speziell auf eine Regelstrecke mit zwei Freiheitsgraden angepasst werden.

Hauptsächlich deswegen wurde die SCARA-Architektur gewählt (SCARA=Selective Compliant Articulated Robot Arm). Ein solcher Roboter besitzt zwei prismatische Gelenke, die ihn befähigen sich in einer Ebene zu bewegen.

Der zweite Grund für die gewählte Architektur liegt in der universellen Einsetzbarkeit. Um ein Telepräsenzsystem zu erstellen, benötigt man zwei Roboter, die Mensch-Maschine-Schnittstelle (MSS), die der Operator bedient und den Teleoperator. Beide können durch das SCARA-Konzept, wegen dessen allgemeiner Bauweise, verwirklicht werden.

Ein weiterer wesentlicher Grund, den Roboter in SCARA-Bauweise zu realisieren, liegt in der relativ einfachen Modellierung. Sowohl im kinematischen als auch im dynamischen Bereich.

Der beabsichtigte Einsatz als haptisches Telepräsenzsystems verlangt vom Roboter teilweise sehr sensible Bewegungen. Dies stellt nicht nur hohe Anforderungen an das später zum Einsatz kommende Regelungskonzept, sondern auch an des Roboters mechanische Struktur. Deswegen wurde darauf geachtet, dass der Roboter möglichst leicht, aber gleichzeitig steif ist und außerdem kein Getriebespiel auftritt, welches die spätere Regelung erheblich erschweren würde.

Das gesamte System soll möglichst kostengünstig sein. Deswegen wird die Kraft über Dehnungsmessstreifen (DMS) gemessen, deren Signal mit einer eigens entwickelten Verstärkerschaltung aufbereitet wird. Somit vermeidet man den Einsatz teurer Kraftmessdosen. Des Weiteren kann auf eine spezielle Elektronik zur Umsetzung des Regelungsgesetzes verzichtet werden, da man auf einen vorhandenen PC sowie Matlab/Simulink und dessen Realtime-Workshop zurückgreift. Auch das Herstellen der Einzelteile des Roboters benötigt nur begrenzten Aufwand, da dessen Abmessungen relativ klein sind und er nur aus wenigen Teilen besteht.

Im zweiten Kapitel wird das mechanische System vorgestellt. Darin wird die Konstruktion erläutert und danach das kinematische Modell aufgestellt und analysiert. Das dritte Kapitel stellt das elektronische System des Roboters vor. Erklärt werden alle eingesetzten elektronischen Komponenten.

Das vierte Kapitel beschreibt die Inbetriebnahme des Roboters und das Einstellen und Abstimmen der Elektronik, so dass ein sicherer und genauer Betrieb gewährleistet wird.

Im fünften Kapitel werden die Performanzkennwerte zusammengefasst und davon ausgehend eine Einordnung der Konstruktion vollzogen.

Die Arbeit schließt mit dem sechsten Kapitel, in dem ein Fazit gezogen wird und einen Ausblick auf die noch zu implementierende Regelung gegeben wird.

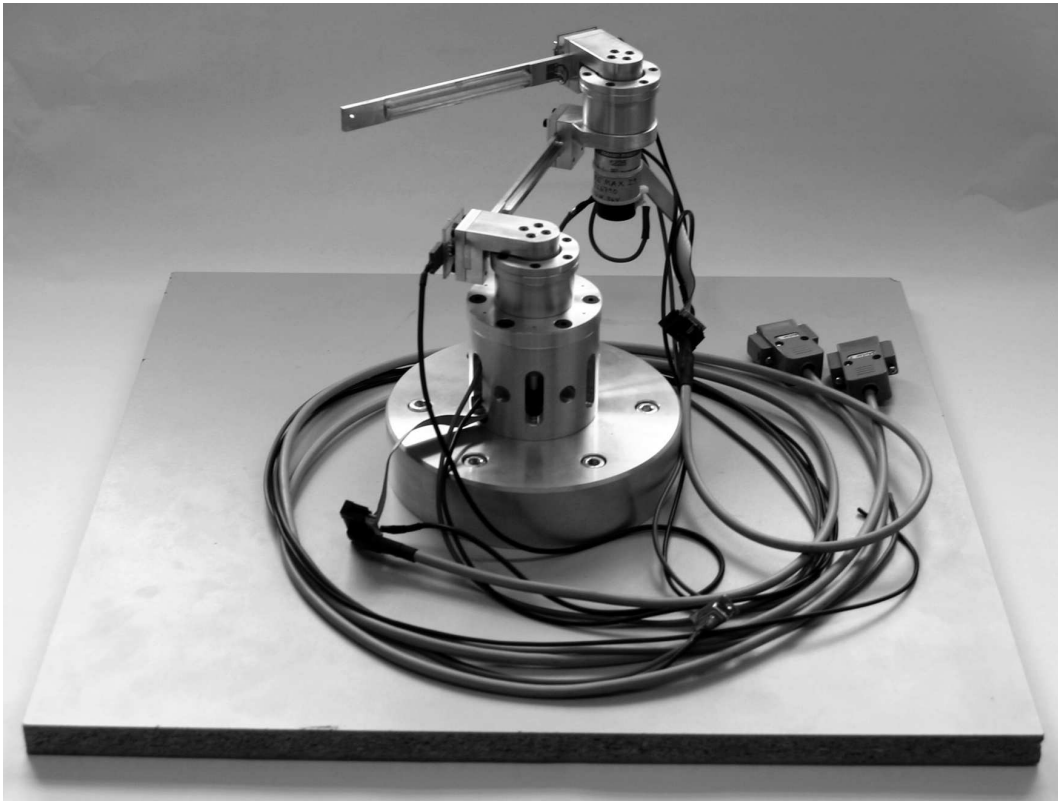


Abbildung 1.1: SCARA-Roboter



## Kapitel 2

# Mechanisches System des Roboters

Dieses Kapitel beschreibt den mechanischen Aufbau des SCARA-Roboters. Wie bereits erwähnt, war die Zielstellung, ein günstiges, kleines, universell einsetzbares haptisches Display mit zwei Freiheitsgraden zu konstruieren.

Im ersten Abschnitt werden die Konstruktion sowie die darin zugrunde gelegten Überlegungen erläutert. Diese orientieren sich am Einsatzgebiet des Roboters als haptisches Display in der Telepräsenz. Darüberhinaus werden mechanische Elemente, wie Motoren und Harmonic Drive Getriebe vorgestellt. In dem sich anschließenden Abschnitt wird das kinematische Modell des Roboters aufgestellt. Außerdem werden die Transformationen für Geschwindigkeiten, Beschleunigungen und Kräfte vom Gelenkwinkelraum des Roboters in kartesische Koordinaten hergeleitet. Die, aufgrund der SCARA-Konzeption des Roboters, spezifischen Eigenschaften zur Abbildung von Geschwindigkeiten und Kräften vom Gelenkraum in den Arbeitsraum werden im letzten Abschnitt analysiert.

### 2.1 Konstruktion

Bei der Konstruktion standen die Forderungen nach Leichtigkeit und Steifigkeit im Vordergrund. Um das Gewicht gering zu halten, wurden fast alle Teile des haptischen Displays aus Aluminium gefertigt. Der Roboter besitzt einen kreisförmigen Arbeitsraum mit einem Radius von ca. 30 cm. Seine Links sind ca. 15 cm lang.

#### 2.1.1 Design der Roboterlinks

Die Links des Roboters sind die Verbindungen zwischen dessen Gelenken. Sie sollen, wie der gesamte Roboter, möglichst leicht und steif sein. Allerdings sind an ihnen auch die Dehnungsmessstreifen (DMS) aufgeklebt, um die Kräfte zu messen, die auf beide Links des Roboterarmes wirken. Das genaue Messen der Kräfte ist die Voraussetzung für die spätere Kraftregelung. Um ein hohes DMS Signal zu erhalten, muss sich der Link bei Krafteinwirkung gut verbiegen.

Diese Forderung steht aber konträr zur angestrebten Steifigkeit.

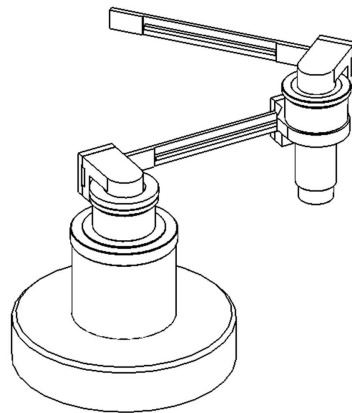


Abbildung 2.1: Konstruktionsskizze

Um beide Forderungen optimal zu erfüllen, muss die Verbiegung der Roboterlinks genauer betrachtet werden:

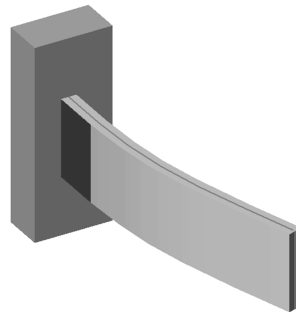


Abbildung 2.2: Eingespannter Balken mit neutraler Faser und Bereich größter Dehnung (schwarz)

Die Links ähneln in ihrer beabsichtigten Belastung einem einseitig eingespannten Balken, an dessen Ende eine Kraft aufgebracht wird (siehe Bild). Dabei werden die links liegenden Schichten des Balkens gestreckt, die in der Mitte liegende neutrale Faser ändert ihre Länge nicht und die unteren Schichten werden gestaucht. Die Stelle der höchsten Verbiegung erhält man durch Analyse der Krümmung des Balkens. Diese ergibt sich durch zweimaliges Ableiten der Biegelinie. Man erkennt, dass die Krümmung an der Einspannstelle am größten ist. Die an den Roboterlinks entstehende Verbiegung kann also am besten auf den seitlichen Oberflächen nahe der Einspannstelle gemessen werden.

Aus obiger Erklärung erschließt man weiter, dass sich die größtmögliche Verbiegung immer nahe der Einspannstelle ergibt, egal welche Geometrie der Link sonst hat. Diese Überlegung führt zur endgültigen Konstruktion der Links. Diese sind nahe der Einspannstellen wie ein Flachbalken geformt, um dort über die Wahl der Dicke und Breite eine leicht abschätzbare Verbiegung für die DMS vorgeben zu können. Im Mittelstück gleichen sie einem T-Träger, der bei weniger Gewicht eine höhere Steifigkeit besitzt als der flache Teil für die DMS.

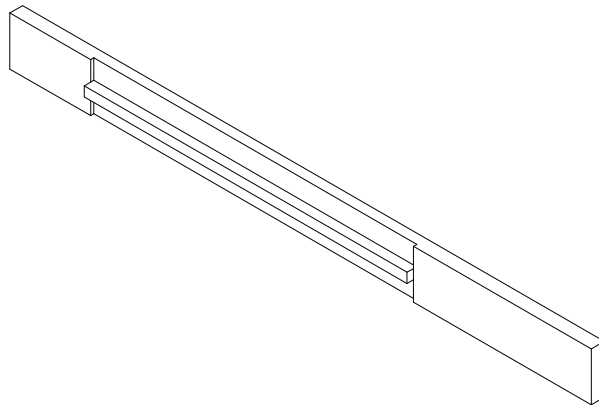


Abbildung 2.3: Konstruktion des Roboterlinks

### 2.1.2 Maxon Motoren

Die im Roboter verbauten Motoren sind die Modelle “RE-max 29“ der Firma Maxon.

Sie besitzen eine eisenlose Wicklung, die einen hohen Wirkungsgrad (75%) und eine ausgezeichnete Regeldynamik verspricht. Außerdem sorgen Graphit- und Edelmetallbürsten dafür, dass sowohl schnelle als auch feine Bewegungen verlustoptimal kommandiert werden können. Ihre Abmessungen sind in Relation zu den Leistungsdaten sehr klein.

Die Motoren besitzen eine Typenleistung von 22 Watt bei einer Nennspannung von 36 V und erzeugen ein Dauerdrehmoment von 33,3 mNm. [1]

An beiden Motoren befinden sich Encoder zur Positionsbestimmung, die in Abschnitt 3.3 vorgestellt werden.

### 2.1.3 Harmonic Drive Getriebe

Die Harmonic Drives bieten eine Reihe von Vorteilen, die sie besonders für den Einsatz in hochgenauen Geräten, wie haptischen Displays, empfehlen:

- Spielfreiheit
- Hoher Wirkungsgrad
- Hohe Torsionssteifigkeit
- Hohe Drehmomentkapazität, d.h. hohe Spitzendrehmomente
- Hohe Positionier- bzw. Wiederholgenauigkeit



Abbildung 2.4: Harmonic Drive Getriebe

### Funktionsprinzip

Harmonic Drives bestehen aus , wie in Abbildung 2.5 zusehen, aus drei Teilen:

- Dem *Wave Generator*. Einer elliptischen Stahlscheibe mit zentrischer Nabe und einem elliptisch verformbaren Kugellager. An ihm ist die Motorwelle angeschraubt.
- Dem *Flexspline*. Einer zylindrischen, verformbaren Stahlbüchse mit außen liegender Verzahnung.
- Dem *Circular Spline*. Einem massiven, zylinderförmigen Stahlring, der eine innen liegende Verzahnung besitzt. Er stellt die Abtriebsseite dar.

Der elliptische Wave Generator, an dem sich die Motorwelle befindet, verformt über das Kugellager den Flexspline. Dieser befindet sich durch die ellipsenförmige Dehnung in Verzahnung mit dem Circular Spline.

Da der Flexspline zwei Zähne weniger hat als der Circular Spline, drehen sich beide Teile relativ zueinander, wenn der Wavegenerator angetrieben wird. [2]

Der Circular Spline ist fest verschraubt, deshalb wirkt sich die relative Drehung nur auf den Flexspline aus. An diesem ist der Flansch für den Roboterlink angebracht. Die hier eingesetzten Getriebe besitzen eine Untersetzung von 100 : 1. Das Spitzendrehmoment beträgt 4,8N. Sie wiegen 0.026kg.



Abbildung 2.5: Komponenten eines Harmonic Drive

## 2.2 Mathematische Beschreibung

Das mathematische Modell des Roboters besteht aus der Beschreibung seiner geometrischen Struktur und der sich daraus ableitenden Kinematik.

Die geometrische Beschreibung stützt sich auf linkweise angeordnete Koordinatensysteme und stellt Transformationen zwischen diesen Koordinatensystemen zur Verfügung. Dadurch kann man die Position der einzelnen Roboterlinks und besonders die Spitze des Roboterarms, sowohl in kartesischen Koordinaten, im User Space, als auch in Gelenkwinkeln, dem Joint Space, angeben.

Das kinematische Modell leitet sich direkt aus der geometrischen Beschreibung her. Es gibt die Beziehung zwischen den Geschwindigkeiten im User Space (Weltkoordinatensystem) und im Joint Space (Gelenkwinkelraum), mittels der Jacobi-Matrix an. Es abstrahiert von allen dynamischen Aspekten. [3]

Die abschließende Performanzanalyse setzt auf dem kinematischen Modell auf und basiert auf Techniken der linearen Algebra, die vorher erläutert werden. Diese führen auf einige grundlegende Zusammenhänge der Bewegungs- und Kraftcharakteristik des SCARA-Roboters.

## 2.2.1 Geometrischer Aufbau

Der SCARA-Roboter besitzt wegen seiner zwei translatorischen Gelenke (auch: prismatische Gelenke), die ihm Bewegungen um je eine Achse ermöglichen, zwei Freiheitsgrade. Zur Beschreibung der Lage der einzelnen Roboterteile, insbesondere des Endeffektors (der hier mit der äußeren Linkspitze gleichzusetzen ist), werden kartesische Koordinatensysteme verwendet. Da der Roboter nur in einer Ebene arbeitet, ist die Lage mit den  $x$ - und  $y$ -Koordinaten vollständig beschrieben.

Der Roboter ist als offene kinematische Kette aufgebaut. Das bedeutet, jeder Link ist über genau ein Gelenk mit dem folgenden Armteil verbunden. Jedes Gelenk hat dabei nur eine Gelenkachse. Die Nummerierung der Gelenkachsen beginnt mit der feststehenden Basis.

### Festlegung der Koordinatensysteme nach der Denavit-Hartenberg-Konvention

Zur vollständigen, systematischen Beschreibung der Lage des Endeffektors hat sich die Beschreibung nach Denavit-Hartenberg durchgesetzt. Jeder Link wird mit einem kartesischen Koordinatensystem versehen, das nach bestimmten Regeln festgelegt wird.:

- Das Basis- oder Weltkoordinatensystem ist auf den ersten Link gelegt. Es ist sinnvoll, es im Mittelpunkt des ersten Gelenkes zu verankern. Die  $z_0$ -Achse zeigt entlang der ersten Gelenkachse. Sie bildet zusammen mit der  $y_0$ -Achse ein Rechtssystem.

Für die weiteren Koordinatensysteme  $K_i$  ( $n = 1, 2, \dots, n$ ) gilt:

- Der Ursprung von  $K_i$  liegt auf dem Schnittpunkt, der Gelenkachsen  $i$  und  $i+1$ . (Beim SCARA-Roboter ist die Gelenkachse 1 die Verbindungslinie der Mittelpunkte der beiden Gelenke, also parallel zum inneren Link. Für die Gelenkachse 2 gilt das gleiche.)
- Das Koordinatensystem des Endeffektors  $K_2$  liegt am Ende des äußeren Links. Da es noch keinen Endeffektor für den Scara gibt, wird es in den Berechnungen nicht weiter berücksichtigt.

Die hier aufgeführten Regeln zur geometrischen Strukturierung eines mechanischen Systems nach Denavit-Hartenberg sind nicht vollständig. Es sind nur die notwendigen Regeln für das beschriebene System.

### Umrechnungen zwischen den einzelnen Koordinatensystemen

Zwei benachbarte Koordinatensysteme können jetzt durch zwei Translationen und zwei Rotationen ineinander überführt werden. In unserem Fall sind es sogar nur eine Translation und eine Rotation, da der SCARA-Roboter sich nur in der  $xy$ -Ebene

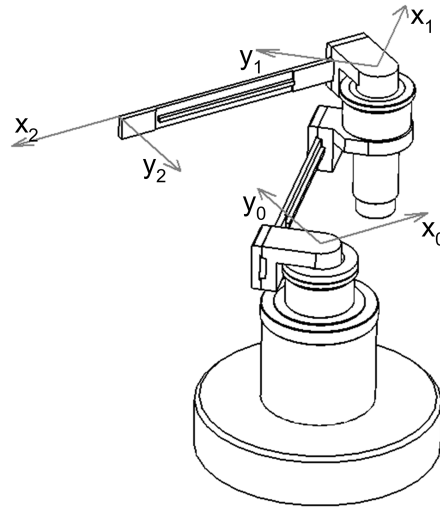


Abbildung 2.6: Festlegung der Koordinatensysteme nach Denavit-Hartenberg

bewegt.

Die Umrechnung zwischen den Koordinatensystemen geschieht allgemein mittels homogener Matrizen, sogenannten Frames. Das sind  $4 \times 4$ -Matrizen, die die Rotationsmatrix  ${}^i_k\mathbf{R}$  und den Verbindungsvektor  ${}^i_k\mathbf{x}$  der beiden Systeme beinhalten:

$${}^i_k\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cdot & \cdot & \cdot & {}^i_kx \\ \cdot & {}^i_k\mathbf{R} & \cdot & {}^i_ky \\ \cdot & \cdot & \cdot & {}^i_kz \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}.$$

Für die gewählte Struktur nach Denavit-Hartenberg werden folgende Parameter bestimmt:

1. Der absolute Drehwinkel  $\varphi_1$  um Gelenkachse 0, der  $x_0$  in  $x_1$  überführt.
2. Die Translation  $l_1$ , vom Ursprung des Weltkoordinatensystems  $K_0$  zum Ursprung des Koordinatensystems  $K_1$ .
3. Der absolute Drehwinkel  $\varphi_2$  um Gelenkachse 1, der  $x_1$  in  $x_2$  überführt. (Die Gelenkachsen sind danach nicht deckungsgleich, sondern parallel.)
4. Die Translation  $l_2$  vom Ursprung des Koordinatensystems  $K_1$ , die den Abstand zum Ursprung des Koordinatensystems  $K_2$  weitestmöglich verkleinert.
5. Die Translation  $a$ , die das System  $K_1$  schließlich in das System  $K_2$  des Endeffektors überführt. Sie beschränkt sich hier auf eine Verschiebung entlang der  $y_2$ -Achse.

Danach ergibt sich für den Frame, der den Zusammenhang zwischen  $K_0$  und  $K_1$  herstellt:

$${}^0_1\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_1) & -\sin(\varphi_1) & 0 & l_1 * \cos(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_1) & \cos(\varphi_1) & 0 & l_1 * \sin(\varphi_2) \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.1)$$

Und für den Frame, der den Zusammenhang zwischen  $K_1$  und  $K_2$  beschreibt, erhält man ein ähnliches Ergebnis:

$${}^1_2\mathbf{T} = \begin{pmatrix} \cos(\varphi_2) & -\sin(\varphi_2) & 0 & l_2 \cos(\varphi_2) \\ \sin(\varphi_2) & \cos(\varphi_2) & 0 & l_2 \sin(\varphi_2) + a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (2.2)$$

Die geometrische Struktur des Robotersystem ist damit vollständig beschrieben.

## 2.2.2 Vorwärtstransformation

Als Vorwärtstransformation oder auch direktes kinematisches Problem bezeichnet man eine eindeutige Abbildung von Gelenkkoordinaten auf kartesische Koordinaten.:

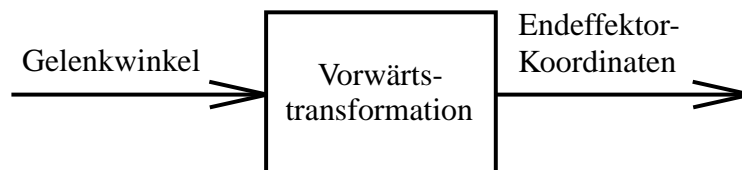


Abbildung 2.7: Prinzip der Vorwärtslösung

Sind demnach zu einem bestimmten Zeitpunkt die Gelenkkoordinaten bekannt, so ist die Lage des Roboterarms vollständig beschrieben. Insbesondere die Lage des Endeffektors.

Die Lage des Endeffektors des SCARA-Roboters im Weltkoordinatensystem  $\mathbf{x}^{(0)}$  ergibt sich aus den entsprechenden Denavit-Hartenberg-Frames:

$$\mathbf{x}^{(0)} = {}^0_1\mathbf{T} \cdot {}^1_2\mathbf{T} \cdot \mathbf{x}^{(2)}$$

$$= \underbrace{\begin{pmatrix} \cos(\varphi_1+\varphi_2) & -\sin(\varphi_1+\varphi_2) & 0 & l_1*\cos(\varphi_1)+l_2*\cos(\varphi_1+\varphi_2) \\ \sin(\varphi_1+\varphi_2) & \cos(\varphi_1+\varphi_2) & 0 & l_1*\sin(\varphi_1)+l_2*\sin(\varphi_1+\varphi_2)+a \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}}_{:= \mathbf{T}} \cdot \mathbf{x}^{(2)}. \quad (2.3)$$

Dabei haben die Vektoren der kartesischen Koordinaten folgende Struktur:

$$\mathbf{x}^{(i)} = \begin{pmatrix} x^{(i)} \\ y^{(i)} \\ z^{(i)} \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.4)$$

Der Index kennzeichnet das jeweilige Koordinatensystem.

Da der Roboter keinen richtigen Endeffektor besitzt, berechnen wir die Vorwärtstransformation vom Ursprung des Endeffektor-Koordinatensystems aus:

$$\mathbf{x}^{(0)} = \mathbf{T} \cdot \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \quad (2.5)$$

Wir erhalten schließlich die Endeffektor-Koordinaten im Weltkoordinatensystem:

$$\begin{aligned} x^{(0)} &= l_1 \cos(\varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2), \\ y^{(0)} &= l_1 \sin(\varphi_1) + l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2), \\ z^{(0)} &= 0. \end{aligned} \quad (2.6)$$

Damit ist die Lage des Roboters und insbesondere des Endeffektors vollständig definiert, wenn die Gelenkwinkel  $\varphi_1$  und  $\varphi_2$  bekannt sind. Die Konstante  $a$  wird ab jetzt vernachlässigt.

### 2.2.3 Rückwärtstransformation

Ist die Lage des Roboters durch seine kartesischen Koordinaten bekannt, besteht die Frage, wie daraus die Gelenkwinkel errechnet werden können. Diese Aufgabe

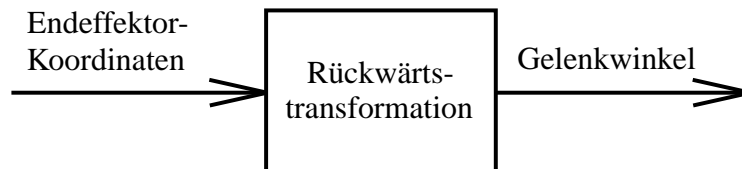


Abbildung 2.8: Prinzip der Rückwärtslösung

wird Rückwärtstransformation oder auch inverse Kinematik genannt. Im Vergleich zur Vorwärtstransformation kann die Rückwärtstransformation jedoch beträchtliche Schwierigkeiten bereiten, wenn Mehrdeutigkeiten oder Singularitäten auftauchen.

Die beim SCARA-Roboter auftretende Mehrdeutigkeit ist in Abbildung 2.5 gezeichnet.

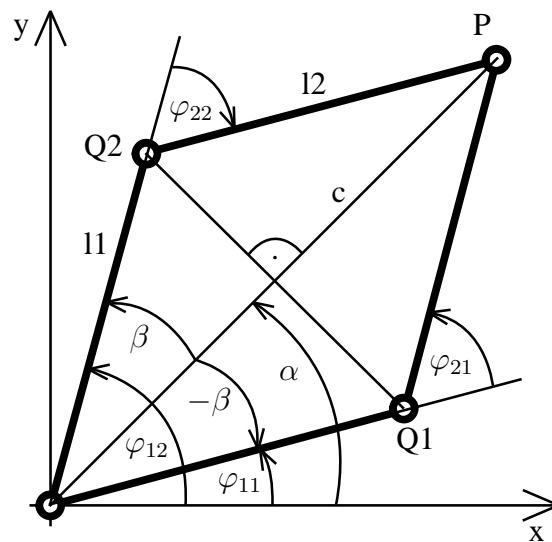


Abbildung 2.9: Mehrdeutigkeit beim SCARA

Die Lösung ergibt sich wie folgt:

Die Hilfsgerade  $c$ , die zum anzusteuernenden Punkt  $P$  zeigt, ergibt sich aus dem Satz von Pythagoras.

$$c = \sqrt{x^2 + y^2}.$$

Für  $c > L_1 + L_2$  gibt es keine Lösung. Der anzusteuern Punkt befindet sich in diesem Fall außerhalb des Arbeitsbereiches.

Für  $c = 0$  befindet sich der Endeffektor, wenn  $l_1 = l_2$  ist, am Ursprung des Weltkoordinatensystems. Die Winkel lauten:  $\varphi_1 = \text{beliebig}$  und  $\varphi_2 = \pm\pi$ . Dies ist eine Singularität des Systems, denn der Winkel  $\varphi_1$  kann dabei jede beliebige Stellung einnehmen, also unendlich viele Werte. Dieses Problem kann mit einem Gütekriterium gelöst werden, durch das eine Lösung angestrebt wird, welche möglichst nahe zur vorhergehenden Lage des Roboters ist.

Den Winkel  $\alpha$  bestimmt man durch

$$\alpha = \text{atan2}(y, x). \quad (2.7)$$

Man erhält somit für  $\alpha$  stets einen Wert im Bereich von  $-\pi < \alpha \leq \pi$ . (Mit Ausnahme des Falls  $(x, y) = (0, 0)$  der ja zu  $c = 0$  führt und bereits abgehandelt wurde.)

Für  $c = l_1 + l_2$ , ergibt sich mit  $\varphi_1 = \alpha, \varphi_2 = 0$  genau eine Lösung. Der Roboterarm ist vollständig ausgestreckt.

Im Normalfall, d.h. für  $c < l_1 + l_2$  gilt für das Dreieck  $O, Q_i, P$  der Kosinussatz:

$$x^2 + y^2 = c^2 = l_1^2 + l_2^2 + 2l_1l_2\cos(\varphi_{2i}).$$

Da  $\varphi_{21} > 0$  und  $\varphi_{22} < 0$  -wie aus obiger Skizze zu ersehen- kann man auflösen zu:

$$\varphi_{2i} = \pm \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 - (l_1^2 + l_2^2)}{2l_1l_2}\right). \quad (2.8)$$

Die Werte für  $\varphi_{1i}$  erhält man als  $\alpha - \beta$  bzw.  $\alpha + \beta$ . Wobei sich  $\beta$  abermals über den Kosinussatz

$$l_2^2 = l_1^2 + c^2 - 2cl_1\cos(\beta)$$

ergibt:

$$\beta = \arccos\left(\frac{l_1^2 - l_2^2 + c^2}{2l_1c}\right). \quad (2.9)$$

Mit den Gleichungen 2.7, 2.8, 2.9 erhält man die theoretischen Lösungen:

$$(\varphi_{11}, \varphi_{21}) = (\alpha - \beta, \varphi_{21}), \quad (2.10)$$

$$(\varphi_{12}, \varphi_{22}) = (\alpha + \beta, \varphi_{22}). \quad (2.11)$$

Diese Gleichungen ergeben keine, eine oder zwei Lösungen. Im letzteren Fall ist mittels einer Randbedingung eine Lösung auszuwählen, die der Roboterarm zu realisieren hat.

Des Weiteren gibt es neben der analytischen Methode zur Bestimmung der Rückwärtslösung auch den numerischen Weg. Mit steigender Komplexität der Robotergeometrie, wird auch die Rückwärtslösung zunehmend schwieriger. Eventuell lässt sich

gar keine analytische Lösung finden. In diesem Fall ist man auf numerische Berechnungsverfahren angewiesen. Ausgehend von einem Punkt, bei dem die Rückwärtslösung vorliegt, errechnet man dabei näherungsweise die Lösung für einen benachbarten Punkt. Man nutzt die Jacobimatrix zur Beschreibung infinitesimaler Änderungen.:

$$d\mathbf{x} = \mathbf{J}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \cdot d\boldsymbol{\varphi}. \quad (2.12)$$

Dabei steht  $d\mathbf{x}$  für den Vektor der infinitesimalen Änderung der kartesischen Koordinaten und  $d\boldsymbol{\varphi}$  für den Vektor der infinitesimalen Winkeländerungen. Durch Umstellen erhält man nun die geänderten Winkel. Notwendige Bedingung ist die Invertierbarkeit der Jacobimatrix. Dabei ist zu beachten, dass dieses Verfahren bei großem Abstand zwischen bekanntem Punkt und Zielpunkt mehrmals angewendet werden muss. Damit sich die Fehler nicht addieren, führt man dazwischen eine Vorwärtstransformation durch und rechnet vom korrigierten Punkt aus weiter. Im SCARA-Roboter ist die analytische Methode implementiert. Die numerische Beschreibung wird allerdings als Basis für die kinematische Beschreibung genutzt.

## 2.2.4 Jacobi-Matrix

Die Jacobimatrix oder Funktionalmatrix ergibt sich aus der Taylorreihen-Entwicklung um obige kartesischen Koordinaten durch alleinige Betrachtung des Gliedes 1. Ordnung:

$$\begin{aligned} dx &= x - x_0 \approx \left( \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_1} d\varphi_1 + \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} d\varphi_2 + \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_3} d\varphi_3 \right), \\ dy &= y - y_0 \approx \left( \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_1} d\varphi_1 + \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} d\varphi_2 + \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_3} d\varphi_3 \right), \\ dz &= z - z_0 \approx \left( \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_1} d\varphi_1 + \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_2} d\varphi_2 + \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_3} d\varphi_3 \right). \end{aligned}$$

Wobei  $f_i$  für die Funktionen 2.6 steht.

In Matrixschreibweise erhält man somit Gleichung 2.12 und für die Jacobimatrix entsprechend

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_3} \\ \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial f_2}{\partial \varphi_3} \\ \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_1} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_2} & \frac{\partial f_3}{\partial \varphi_3} \end{pmatrix}. \quad (2.13)$$

Und unter Berücksichtigung des Wegfalls der  $z$ -Koordinate ergibt sich nach Ausrechnen:

$$\mathbf{J} = \begin{pmatrix} -l_1 \sin(\varphi_1) - l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) & -l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \\ l_1 \cos(\varphi_1) + l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \end{pmatrix}. \quad (2.14)$$

Gleichungen 2.12 (sowie die folgende Gleichung 2.17) können nur umgestellt werden, wenn die Jacobimatrix invertierbar ist. Das heisst, sie muss quadratisch und regulär ( $\det(\mathbf{J}) \neq 0$ ) sein. Eine quadratische Jacobimatrix ergibt sich, wenn die Anzahl der kartesischen Freiheitsgrade gleich der Anzahl der Gelenkfreiheitsgrade ist. Da sich der SCARA-Roboter in der  $x, y$ -Ebene bewegt, und zwei prismatiche Gelenke besitzt, ist die Jacobimatrix quadratisch.

Die zweite Bedingung ist dagegen nicht immer erfüllt. Die Determinante des Roboters wird nämlich Null, wenn er sich in einer Singularität befindet. In diesen Fällen verliert er mindestens einen Freiheitsgrad. Grundsätzlich gibt es zwei Arten von Singularitäten, von denen je eine beim SCARA-Roboter auftritt:

1. Singularitäten am Rande des erreichbaren Arbeitsraumes, z.B. wenn der Roboterarm voll ausgestreckt ist.
2. Singularitäten im Inneren des Arbeitsbereiches, z.B. wenn Gelenkachsen auf einer Linie liegen.

Eine Singularität der ersten Art ergibt sich beim SCARA-Roboter für  $\varphi_1 = \text{beliebig}$  und  $\varphi_2 = \pi$ . Der Roboter verliert einen Freiheitsgrad.

Eine Singularität der zweiten Art ergibt sich für  $\varphi_1 = \text{beliebig}$  und  $\varphi_2 = 2\pi$ . Der Endeffektor befindet sich in diesem Fall direkt über dem ersten Gelenk. Der Roboter verliert zwei Freiheitsgrade.

Für die inverse Jacobimatrix ergibt sich nun:

$$\mathbf{J}^{-1} = \frac{1}{\underbrace{l_1 l_2 \sin(\varphi_2)}_{:= \det(\mathbf{J})}} \cdot \begin{pmatrix} l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) & l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) \\ -l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) - l_1 \cos(\varphi_1) & -l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) - l_1 \sin(\varphi_1) \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

Wie man sieht, ist die Determinante vom Winkel  $\varphi_1$  unabhängig, deswegen muss man für ihn beliebige Werte annehmen, um die Singularitäten zu beschreiben.

*Anmerkung:*

Bei der Inversion mit symbolischen Algebrasystemen ( wie z.B. Maple) ergibt sich die Determinante

$$\det(J) = \frac{1}{l_1 l_2 [\sin(\varphi_1 + \varphi_2) \cdot \cos(\varphi_1) - \cos(\varphi_1 + \varphi_2) \cdot \sin(\varphi_1)]},$$

die sich durch Anwendung des Additionstheorems

$$\sin(\alpha) \cdot \cos(\beta) = 1/2[\sin(\alpha - \beta) + \sin(\alpha + \beta)]$$

zu obiger aussagekräftigen Form reduzieren lässt.

## 2.2.5 Transformation der Geschwindigkeiten

Außer den statischen Transformationen (VWL, RWL), die die Beziehungen zwischen kartesischen Koordinaten und Gelenkwinkeln beschreiben, sind auch die Beziehungen zwischen kartesischen Geschwindigkeiten und Winkelgeschwindigkeiten wichtig. Soll sich der Endeffektor des Roboters z.B. mit konstanter Geschwindigkeit längs einer Geraden bewegen, werden nur die kartesischen Geschwindigkeiten konstant sein, die Gelenkwinkelgeschwindigkeiten jedoch nicht.

Damit die Regelung des Roboters jederzeit die geforderten Winkelgeschwindigkeiten produzieren kann, ist eine Umrechnung von kartesischen Geschwindigkeiten in Winkelgeschwindigkeiten notwendig. Dazu leitet man beide Seiten (2.12) nach der Zeit ab:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{J}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \cdot \frac{d\boldsymbol{\varphi}}{dt}$$

und erhält mit

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{J}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \cdot \dot{\boldsymbol{\varphi}}, \quad (2.16)$$

also die einzelnen Geschwindigkeiten:

$$\begin{pmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \end{pmatrix} = \mathbf{J}(\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3) \cdot \begin{pmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix}. \quad (2.17)$$

Die Auswirkung der im vorherigen Abschnitt beschriebenen Singularitäten besteht in der Kinematik darin, dass aus kleinen kartesischen Geschwindigkeiten nahezu unendlich große Gelenkwinkelgeschwindigkeiten resultieren. Da diese jedoch physikalisch nicht realisierbar sind, wird der Roboter seine Bahn nicht einhalten können.

## 2.2.6 Transformation der Beschleunigungen

Nochmaliges Ableiten von (2.16) nach der Zeit ergibt den Zusammenhang zwischen den Beschleunigungen des User Space und den Beschleunigungen des Joint Space. Hier ist allerdings zu beachten, dass die Jacobimatrix selber zeitabhängig ist und dementsprechend die Produktregel angewendet werden muss. Somit folgt:

$$\ddot{\mathbf{x}} = \dot{\mathbf{J}} \cdot \dot{\boldsymbol{\varphi}} + \mathbf{J} \cdot \ddot{\boldsymbol{\varphi}}. \quad (2.18)$$

Für die zeitliche Ableitung der Jacobimatrix des SCARA-Roboters ergibt sich:

$$\dot{\mathbf{j}} = \begin{pmatrix} -l_1 \cos(\varphi_1) \dot{\varphi}_1 - l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) & -l_2 \cos(\varphi_1 + \varphi_2) (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \\ -l_1 \sin(\varphi_1) \dot{\varphi}_1 - l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) & -l_2 \sin(\varphi_1 + \varphi_2) (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_2) \end{pmatrix}. \quad (2.19)$$

### 2.2.7 Transformation der Kräfte und Momente

Eine weitere Transformation mittels der Jacobi-Matrix erlaubt es, die Kräfte des User Space in Momente des Joint Space zu transformieren. Allerdings wird auch hier nur der statische Fall betrachtet.

Aus dem Prinzip der virtuellen Verrückung oder der virtuellen Arbeit ergibt sich:

$$\mathbf{f} \bullet \partial \mathbf{x} = \boldsymbol{\tau} \bullet \partial \varphi.$$

Darin kennzeichnen die dicken Punkte die Verwendung des Skalarproduktes. Durch Transponieren der ersten Faktoren kann man das Skalarprodukt in ein Matrizenprodukt überführen:

$$\mathbf{f}^T \partial \mathbf{x} = \boldsymbol{\tau}^T \partial \varphi.$$

Einsetzen der Vorwärtslösung (2.12) führt zu

$$\mathbf{f}^T \mathbf{J} \partial \varphi = \boldsymbol{\tau}^T \partial \varphi.$$

Vereinfachung ergibt

$$\mathbf{f}^T \mathbf{J} = \boldsymbol{\tau}^T.$$

und durch nachfolgende Transposition erhält man schließlich

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}. \quad (2.20)$$

## 2.3 Performanz

Aus der mechanischen Struktur des Roboters, die in den vorherigen beiden Abschnitten beschrieben wurde, ergeben sich bereits grundsätzliche Aussagen zur Leistungsfähigkeit. Dabei wird nach wie vor von allen dynamischen Aspekten abstrahiert, d.h. Kräfte und Momente werden nur im statischen, also konstanten Fall einbezogen.

### 2.3.1 Arbeitsraum

Der maximale Arbeitsraum des Roboters ist der mit dem Endeffektor ansteuerbare Bereich. Bei der hier vorliegenden Konstruktion ist das eine Kreisfläche mit dem Radius der sich addierenden Linklängen.

Eine Simulation des Arbeitsraumes zeigt Bild 2.10, wobei zu beachten ist, dass alle Punkte des Kreises zum maximalen Arbeitsraum gehören, nicht nur die hier abgefahren Linien.

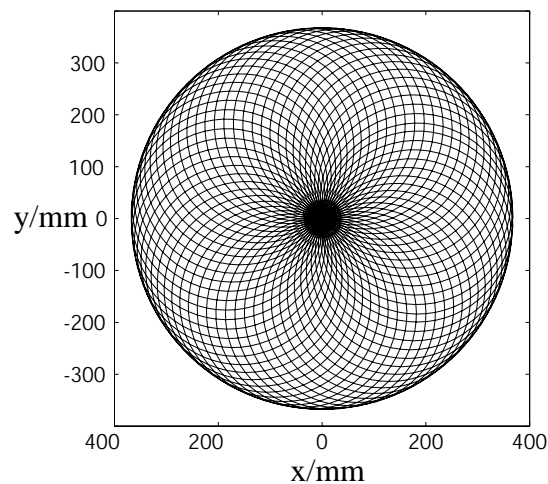


Abbildung 2.10: Arbeitsraumsimulation des SCARA-Roboters

Im normalen Betrieb ist dieser Raum jedoch wegen der in Abschnitt 2.2.4 beschriebenen Singularitäten etwas eingeschränkt.

An welchen Stellen Singularitäten auftauchen, kann über den Kehrwert der Determinante der Jacobimatrix errechnet werden. Ihre Werte sind in Abbildung 2.11 über dem Arbeitsraum dargestellt.

Man sieht, dass eine singuläre Stellung, also ein gegen Unendlich strebender Wert, nur am Rand und im Mittelpunkt existieren. Also bei ganz ausgestrecktem und ganz eingeknicktem Arm.

Diese beiden Bereiche, inklusive eines kleinen Sicherheitsrandes, müssen bei der

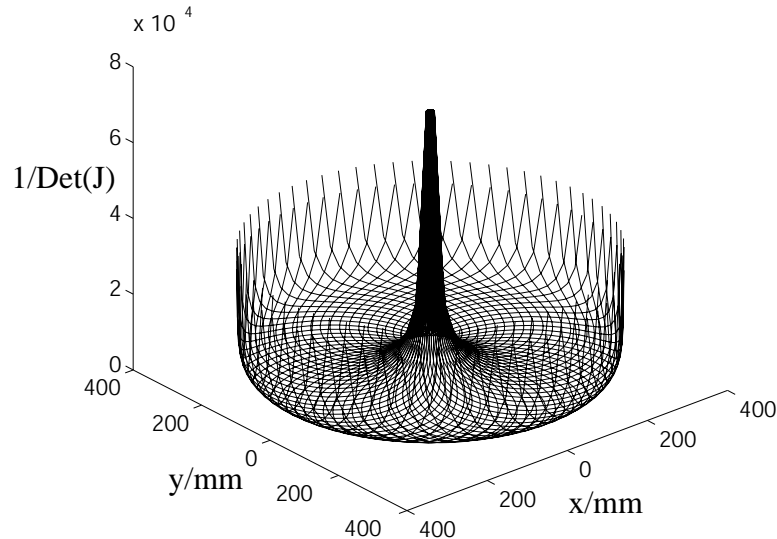


Abbildung 2.11: Verlauf der reziproken Determinante der Jacobimatrix

späteren Regelung aus dem theoretischen Arbeitsraum des Roboters ausgeschlossen werden.

### 2.3.2 Geschwindigkeitsabbildung vom Joint Space zum User Space

#### Theorie

Anhand des inversen kinematischen Modells

$$\dot{\varphi} = J^{-1}\dot{x}, \quad (2.21)$$

kann eine prinzipielle Betrachtung vorgenommen werden, wie Gelenkgeschwindigkeiten aufgrund der Geometrie des Roboters in kartesische Geschwindigkeiten übersetzt werden.

Da nur die Gelenkgeschwindigkeiten über die beiden Motoren direkt beeinflusst werden können, ist es für praktische Anwendungen wichtig zu wissen, wie sie in den User Space transformiert werden.

Da die Gelenkgeschwindigkeiten über die Jacobimatrix auf die kartesischen Geschwindigkeiten abgebildet werden, ist der Zusammenhang wegen der nichtlinearen Matrixelemente auch nichtlinear.

Um zu berechnen, wie sich alle möglichen Kombinationen von Gelenkgeschwindigkeiten im User Space verhalten, definiert man einen Einheitskreis im Joint Space:

$$1 = \dot{\varphi}_1^2 + \dot{\varphi}_2^2.$$

In Vektorschreibweise wird daraus

$$1 = (\dot{\varphi}_1 \dot{\varphi}_2) \begin{pmatrix} \dot{\varphi}_1 \\ \dot{\varphi}_2 \end{pmatrix}.$$

bzw.

$$1 = \dot{\varphi}^T \dot{\varphi}. \quad (2.22)$$

Entsprechend ergeben sich dazu die kartesischen Geschwindigkeiten des User Space aus der rechten Seite von (2.19). Nach Multiplikation mit  $\varphi^T$  ergibt sich:

$$\begin{aligned} 1 &= \dot{\varphi}^T \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}} \\ &\Downarrow \\ 1 &= [\mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}}]^T \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}} \\ &\Downarrow \\ 1 &= \dot{\mathbf{x}}^T (\mathbf{J}^{-1})^T \mathbf{J}^{-1} \dot{\mathbf{x}} \\ &\Downarrow \\ 1 &= \dot{\mathbf{x}}^T [\mathbf{J}\mathbf{J}^T]^{-1} \dot{\mathbf{x}}. \end{aligned} \quad (2.23)$$

Diese Gleichung ist eine sogenannte Quadrik und stellt in diesem speziellen Fall eine Ellipse dar. Sie ist in den kartesischen Geschwindigkeiten  $\dot{x}, \dot{y}$  des User Space dargestellt. Die Ellipse beschreibt die Endeffektorgeschwindigkeiten, die durch die Kombinationen von Gelenkwinkelgeschwindigkeiten  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  mit dem Betrag Eins hervorgerufen werden.

Der Übergang von (2.20) zu (2.21) ist eine Hauptachsentransformation. Als Hauptachsen bezeichnet man die Orthonormalbasis, die durch die Spalten von  $[\mathbf{J}\mathbf{J}^T]^{-1}$  definiert werden, wenn (2.21) rein quadratisch ist. Da wir allerdings beide Koordinatensysteme getrennt darstellen, sind die Richtungen, die durch diese Hauptachsen definiert werden ohne Belang. [10]

Wichtig ist hierbei, dass jede Ellipse nur für eine Kombination von Gelenkwinkeln gilt. Bild 2.12 verdeutlicht das Prinzip.

Der Einheitskreis in den Koordinaten der Gelenkwinkelgeschwindigkeiten  $\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2$  wird (für bestimmte Gelenkwinkel  $\varphi_1, \varphi_2$ ) auf eine Ellipse in den Koordinaten der User-Space-Geschwindigkeiten  $\dot{x}, \dot{y}$  abgebildet.

Die Abmessung der Ellipse ergibt sich aus den Wurzeln der Eigenwerte von  $[\mathbf{J}\mathbf{J}^T]^{-1}$ , wenn die Koordinaten  $\dot{x}, \dot{y}$  orthogonal zu einander sind (Orthonormalbasis). Diese Wurzeln werden auch Singulärwerte  $\sigma_i$  von  $\mathbf{J}$  genannt, dürfen aber nicht mit den Singularitäten des Roboters verwechselt werden.

Die Lage der Ellipse im Koordinatensystem wird durch die Eigenvektoren  $\mathbf{u}_i$  von  $[\mathbf{J}\mathbf{J}^T]^{-1}$  bestimmt. Es liegt eine im  $(\dot{x}, \dot{y})$ -System gedrehte Ellipse vor. Sie hat ihren

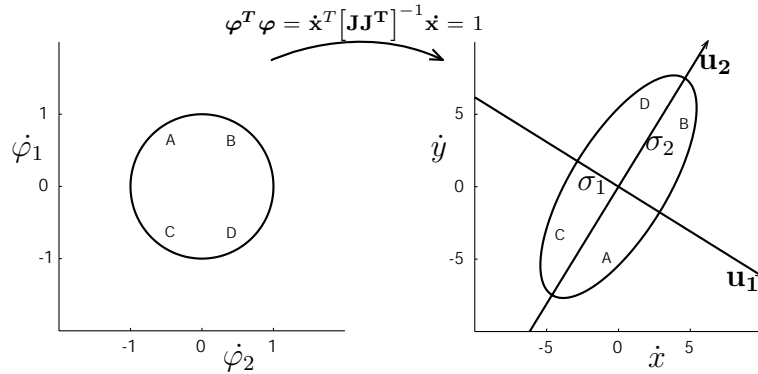


Abbildung 2.12: Transformation vom Joint Space zum User Space

Mittelpunkt im Ursprung, da die Quadrik (2.21) rein quadratisch ist.

Die Vektoren  $\mathbf{u}_i$  sind die Spalten einer Matrix  $\mathbf{U}$ , die dem Hauptachsensystem einer weiteren Hauptachsentransformation entsprechen. Sie wurde nicht explizit durchgeführt, da sie nur zur Berechnung der Ellipsenneigung im  $(\dot{x}, \dot{y})$ -System dient.

*Demnach repräsentieren die Singulärwerte  $\sigma_i$  das minimale und maximale Geschwindigkeitsübersetzungsverhältnis vom Joint-Space in den User-Space. Allerdings sind diese Übertragungseigenschaften an die Richtungen gebunden, die durch die Hauptachsen  $\mathbf{u}_i$  festgelegt sind.*

*Also wird eine Regelung in Richtung des minimalen Übersetzungsverhältnisses die höchste Auflösung erzielen, wogegen in Richtung des maximalen Übersetzungsverhältnisses die höchste Geschwindigkeit erzielt werden kann.*

*Die restlichen Punkte auf der Ellipse geben richtungsabhängig den Kompromiss dieser zwei dualistischen Eigenschaften wieder.*

Um Eigenwerte und Eigenvektoren für eine durch die Gelenkwinkel bestimmte Matrix  $[\mathbf{J}\mathbf{J}^T]^{-1}$  effizient bestimmen zu können, bedient man sich der *Singulärwertzerlegung*

$$\mathbf{J} = \mathbf{U}\mathbf{\Sigma}\mathbf{V}^T. \quad (2.24)$$

Diese zerlegt die Matrix  $\mathbf{J}$  in zwei orthogonale Matrizen  $\mathbf{U}$  und  $\mathbf{V}$ , die, wenn  $\mathbf{J}$  quadratisch ist, auch quadratisch sind. Die Matrix  $\mathbf{\Sigma}$  beinhaltet die Singulärwerte von  $\mathbf{J}$ .

Also ist:

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &\perp \mathbf{V}, \\ \mathbf{\Sigma} &= \text{diag}(\sigma_i). \end{aligned}$$

Die Spalten von  $\mathbf{U}$  sind die Eigenvektoren von  $[\mathbf{J}\mathbf{J}^T]^{-1}$ . Sie stellen - wie oben beschrieben - die Basen des neuen Hauptachsensystems dar. Die Spalten von  $\mathbf{V}$  sind die Eigenvektoren von  $\mathbf{J}$ . Sie markieren die ursprüngliche Basis, in unserem Fall die Richtungen des  $(\dot{\varphi}_1, \dot{\varphi}_2)$ -Systems.

Ausgehend von (2.16) ergibt sich nach Einsetzen von (2.22) für das direkte kinematische Modell:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^T \dot{\boldsymbol{\varphi}}.$$

Da  $\Sigma$  die Singulärwerte enthält, ergibt sich über

$$\dot{\mathbf{x}} = \sum \sigma_i \mathbf{u}_i \mathbf{v}_i^T \dot{\boldsymbol{\varphi}}$$

die mathematische Beschreibung des zuvor erläuterten Sachverhaltes

$$\mathbf{u}_i^T \dot{\mathbf{x}} = \sigma_i \mathbf{v}_i^T \dot{\boldsymbol{\varphi}}. \quad (2.25)$$

Auf der rechten Seite dieser Gleichung steht die resultierende Geschwindigkeit des Endeffektors im User Space.

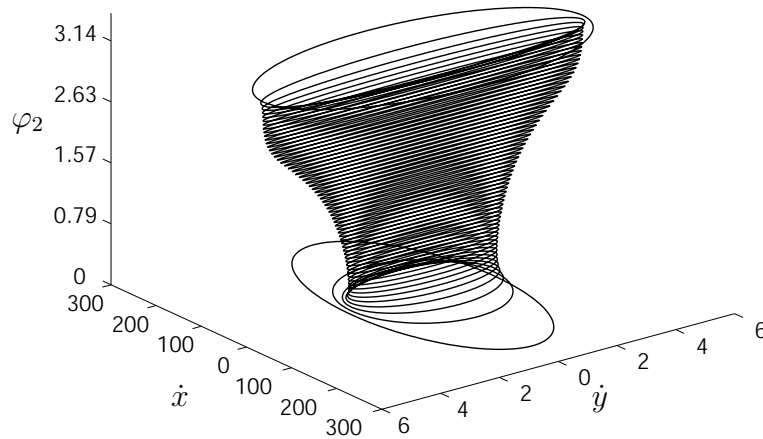
Abermals ist zu bemerken, dass die  $\sigma_i$  die maximale und minimale Geschwindigkeitsübertragungsfaktoren darstellen. Allerdings nur für je eine Richtung  $\mathbf{u}_i$  und auch nur für die in der Jacobi-Matrix eingehende Kombination von Gelenkwinkeln  $\varphi_1, \varphi_2$ . Außerdem gilt die Theorie von Ober- und Untergrenze so nur für einen Roboter mit ebenen Arbeitsraum, also zwei Freiheitsgraden.

## Anwendung

Folgendes Bild zeigt die aus dem Einheitskreis der Gelenkwinkelgeschwindigkeiten entstehenden Ellipsen für den Scara-Roboter mit den Linklängen  $0,184m$  über dem Winkel  $\varphi_2$ . Die Stellung des inneren Gelenkes  $\varphi_1$  spielt keine Rolle, da  $\varphi_1$  nicht in die Eigenwerte von  $[\mathbf{J}\mathbf{J}^T]^{-1}$  eingeht und somit das Aussehen der Ellipse nicht beeinflusst. Allerdings werden die Richtungen der Hauptachsen, also die Eigenvektoren  $\mathbf{u}_i$  durch den Winkel  $\varphi_1$  beeinflusst. Dies ist jedoch beim Scara-Roboter unerheblich, da wir jede Stellung  $\varphi_1$  aufgrund des runden Arbeitsraumes in eine Stellung  $\varphi_1 = 0$  umdefinieren können.

Aus dieser Graphik lassen sich sehr deutlich die Singularitäten des Roboters ablesen. Sie liegen, wie schon in den Abschnitten zuvor erwähnt, bei  $\varphi_2 = 0$  und  $\varphi_2 = \pi$ . Interessanterweise bilden nur die Geschwindigkeiten in x-Richtung singuläres Verhalten aus. In y-Richtung bleiben die Geschwindigkeiten im ausführbaren Bereich.

Damit ergibt sich die Beziehung zwischen Singulärwert und singulärer Stellung: Sobald ein Singulärwert unendlich groß wird, ist der Roboter in einer singulären Stellung. Er verliert also einen Freiheitsgrad.

Abbildung 2.13: Verlauf der Ellipsen bezüglich  $\varphi_2$ 

### 2.3.3 Kraftübertragung vom Joint Space zum User Space

Analog zur Geschwindigkeitsübertragung lässt sich auch für die Kraftübertragung von den angetriebenen Gelenken zum Endeffektor eine derartige Beschreibung angeben:

$$\boldsymbol{\tau} = \mathbf{J}^T \mathbf{f}.$$

Allein die Struktur dieser Formel lässt im Vergleich zur inversen Kinematik (2.19) erkennen, dass die Hauptachsentransformation eines Kreises wiederum auf eine Ellipse im Ursprung führen wird:

$$1 = \mathbf{f}^T [\mathbf{J}\mathbf{J}^T] \mathbf{f}. \quad (2.26)$$

Allerdings besitzt diese Ellipse eine reziproke Konfiguration der Ellipse des vorherigen Abschnitts. Denn die lineare Abbildung der Momente (, die durch die Motoren in den Gelenken erzeugt werden) auf die Kräfte (, die der Endeffektor in x- und y-Richtung aufbringt) erfolgt über die transponierte Jacobi-Matrix und nicht, wie bei der Rückwärtskinematik, über die invertierte.

Dies führt auf einen weiteren Dualismus, nämlich zwischen Geschwindigkeit und Kraft:

*Die Geschwindigkeitsellipsen und die Kraftellipsen haben gleiche Achsenrichtungen und den gleichen Mittelpunkt. Allerdings ergeben sich die Halbachsenlängen der Kraftellipsen aus den reziproken Halbachsenlängen der Geschwindigkeitsellipsen. Beide Ellipsenscharen haben also reziproke Singulärwerte.*

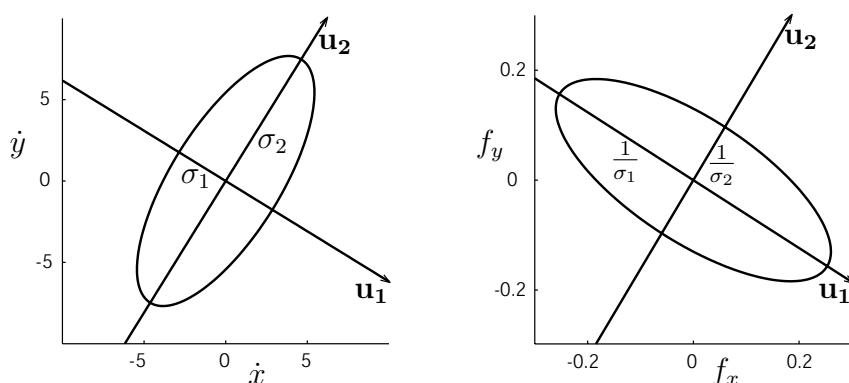


Abbildung 2.14: Dualität zwischen Geschwindigkeits- und Kraftübertragung

Das bedeutet, die beste Richtung, um hohe Geschwindigkeit zu kommandieren, ist gleichzeitig die Richtung, in der man die höchste Kraftauflösung besitzt, aber die kleinsten Kräfte kommandieren kann.

Außerdem ist die Richtung mit der besten Positionsauflösung gleichzeitig die Richtung, in der man die größten Kräfte aufbringen kann; diese allerdings mit einer relativ schlechten Auflösung.

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, die maximalen und minimalen Übersetzungsverhältnisse vom Joint Space zum User Space, also die Längen der Halbachsen der Kraftellipsen, über dem Arbeitsraum darzustellen.

Für die Momente, die in den Gelenken erzeugt werden können, wurde hierbei das wiederholbare Spitzendrehmoment der Harmonic Drive Getriebe veranschlagt (4.8Nm). Dieser Wert entspricht dem Radius des Kreises, von dem die Hauptachsentransformation in den User Space ausgeht.

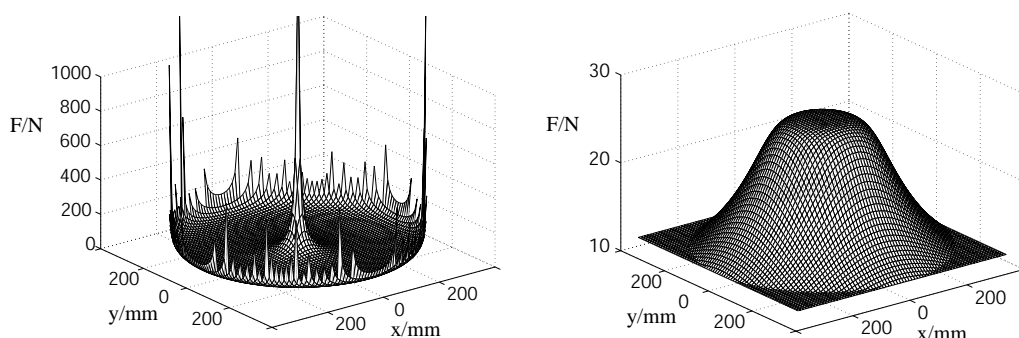


Abbildung 2.15: Maximale und minimale Kraft über Arbeitsraum

Allerdings ist diese Darstellung mit einiger Vorsicht zu genießen.

Das Hauptproblem hierbei ist, dass die Richtungsabhängigkeit der maximalen und

minimalen Kräfte in diese Darstellung nicht eingearbeitet werden kann. Die angezeigten Werte gelten nur für jeweils eine Richtung und ihre Gegenrichtung. Welche das aber sind, wird nicht dargestellt.

Außerdem werden die hohen Kräfte nahe den Singularitäten des Roboters im Betrieb, also im dynamischen Fall, nicht realisierbar sein. [9]

Was bleibt ist die Erkenntnis, dass der Roboter in jeder Stellung eine theoretische Kraft aufbringen kann, die größer als 10N ist. Berücksichtigt man die Ungenauigkeiten, die durch Vernachlässigung der Massen, Trägheitsmomente, Reibungen, und der kompletten Dynamik hinzutreten, ist dies eine Aussage, der man nach visuellem Betrachten des SCARA-Roboters sofort zustimmen wird.

*Anmerkung:*

Die Matlab Skripte, um die einzelnen Graphiken nachzurechnen oder weitergehende Analysen zu betreiben, finden sich auf der beiliegenden CD.



## Kapitel 3

# Elektronisches System des Roboters

Das elektronische System stellt die Verbindung der mechanischen Konstruktion mit dem Computer her und sorgt für die Datenverarbeitung in Echtzeit.

Die Messung der Kräfte an den Roboterarmen geschieht über Dehnungsmessstreifen (DMS), deren Verschaltung im ersten Abschnitt erklärt wird. Dieses Signal wird bereits auf dem Roboter mit einer speziell dafür entwickelten Verstärkerschaltung vorverarbeitet. Sie ist Inhalt des zweiten Abschnittes. Der folgende Abschnitt ist den Winkelencodern gewidmet, die die Positionssignale der Roboter-Links erzeugen. Beide Signale werden dann von einer Messkarte in den Computer geschleust, die auch die im Computer errechneten Signale für die Motoren an die PWM-Verstärker ausgibt. Diese Messkarte wird im vierten Abschnitt erläutert. Der fünfte Abschnitt stellt die Signalverarbeitung und Regelung unter Matlab/Simulink vor. Dessen Realtime-Workshop generiert ein echtzeitfähiges C-Programm. Dieses Programm läuft daraufhin in einem Realtime-Linux-Kernel auf dem gleichen Computer. Die letzten beiden Abschnitte erklären die PWM-Verstärker sowie das Netzteil, das die gesamte, für den Roboter notwendige Energie liefert.

### 3.1 DMS-Schaltung

Zur Detektion von Kräften, die auf die Roboterarme aufgebracht werden, sind auf jedem Link Dehnungsmessstreifen angebracht. Sie messen die Durchbiegung der Roboterarme, die proportional zur aufgebrachten Kraft ist (im Hookschen Bereich). Das Funktionsprinzip eines DMS ergibt sich aus der Längenabhängigkeit des elektrischen Widerstandes.

Wird der Roboterarm bewegt, dann verbiegt er sich unmerklich. Diese Verbiegung reicht aber aus, um in den aufgeklebten DMS eine Widerstandsänderung zu verursachen. Wie im ersten Kapitel bereits erwähnt, sollen die Roboterarme einerseits möglichst steif sein, andererseits soll sich eine aufgebrachte Kraft aber genau messen lassen. Dies führt zur bereits erklärten Konstruktion der Links.

Aber auch die Verschaltung der DMS spielt eine wesentlich Rolle bei der Signalzeugung.:

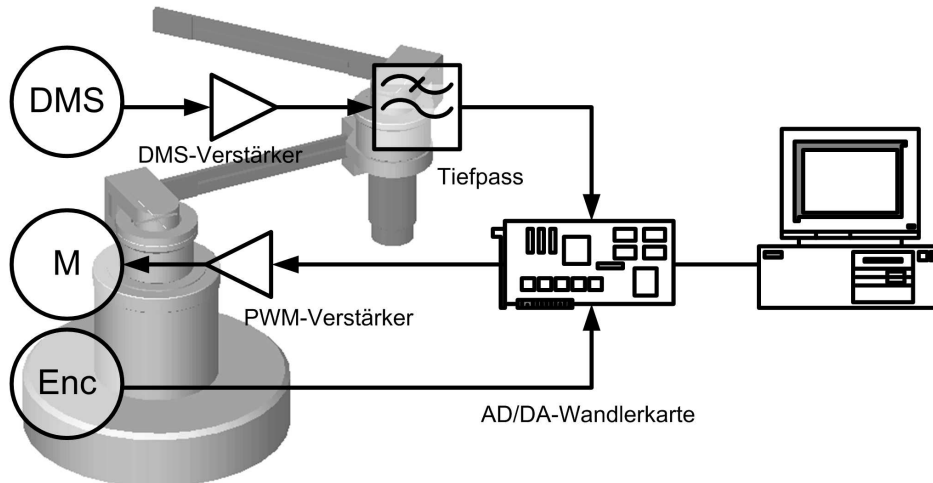


Abbildung 3.1: Elektronisches System des Roboters

Die DMS sind in einer Wheatstonschen Brücke verschaltet und zwar als aktive Vollbrücke. Das bedeutet, alle vier Widerstände der Brücke bestehen aus DMS. Wegen der bereits in Kap. 2 erläuterten Art der Beanspruchung des Roboters werden je zwei DMS auf jede Seite des Links möglichst nahe der Einspannstelle geklebt. Diese Art der Verschaltung sichert nicht nur die größtmögliche Signalausbeute gegenüber einer Halb- oder gar einer Viertelbrücke; darüberhinaus sorgt sie auch für die höchste Robustheit gegen Temperatureinflüsse. [4]

Das Potentiometer wird für einen Offsetabgleich genutzt. Dieser muss zeitweise durchgeführt werden, da die Links immer eine unterschiedliche Anfangsverbiegung aufweisen. Dies führt allerdings zu einer kleinen Nichtlinearität in (3.1).

Als Widerstandswerte wurden  $120\Omega$ -DMS gewählt. Diese verursachen zwar einen höheren Leistungsumsatz als  $1000\Omega$ -DMS, aber das Signal-Rausch-Verhältnis ist größer, da ein ein höherer Strom fließt. Die DMS dürfen je mit einer Spannung von 8V belastet werden, wobei etwas größere Spannungen nicht zur Zerstörung führen, aber eventuell zu unerwarteten Ergebnissen.

Das zu erwartende Ausgangssignal ist die Differenz der beiden Spannungsteiler:

$$U_a = 1/2 \frac{U_{ref} (R - dR)}{R} - 1/2 \frac{U_{ref} (R + dR)}{R} = -\frac{U_{ref} dR}{R}.$$

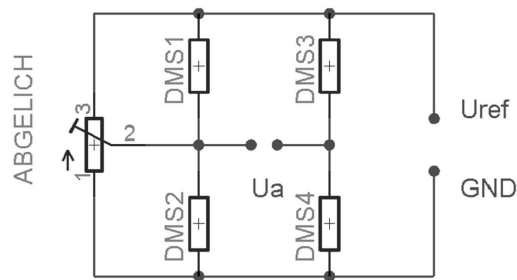


Abbildung 3.2: Verschaltung der DMS mit Offsetabgleich

Da aber die relative Widerstandsänderung  $dR/R$  gleich dem Produkt aus k-Faktor der DMS und relativer Längenänderung  $dl/l$  ist, ergibt sich schließlich:

$$U_a = -\frac{kdl}{l} U_{ref}. \quad (3.1)$$

## 3.2 DMS-Verstärker

### 3.2.1 Allgemein

Das durch die DMS-Schaltung erzeugte Signal ist äußerst klein. Auch bei entsprechend großer Kraftanwendung. In dieser Form ist es extrem empfindlich gegenüber von außen einwirkenden Störungen. Es muß also schnellstmöglichst verstärkt werden, bevor es zur Weiterverarbeitung in den Computer geleitet werden kann. Dazu wurde eine Verstärkerschaltung entwickelt, die verschiedene Anforderungen erfüllt:

- Verstärkung des DMS-Signals
- Bereitstellung einer Referenzspannung für die DMS-Schaltung
- Tiefpassfilterung zur Rauschreduktion des verstärkten Signals
- Kleine Abmessungen zur DMS-nahen Montage
- Robustheit gegenüber mechanischen Schwingungen

Die Lösung dieser Realisierungsprobleme wurde in dem Differenzenverstärker „INA125“ von Texas Instruments gefunden. Er ist speziell zur Verwendung mit Messbrücken ausgelegt. Das bedeutet, er sorgt für die Signalverstärkung und stellt eine stabilisierte Referenzspannung zur Verfügung.

Das ist ein erheblicher Vorteil, denn eine Referenzspannung ist für Messbrücken unabdinglich, weil das Ausgangssignal auf dieser Referenzspannung basiert. Die externe Realisierung einer solchen Referenzspannungsquelle bestünde aus mehreren Komponenten. Es ist offensichtlich, dass damit die obigen Entwurfsziele kaum zu erreichen wären.

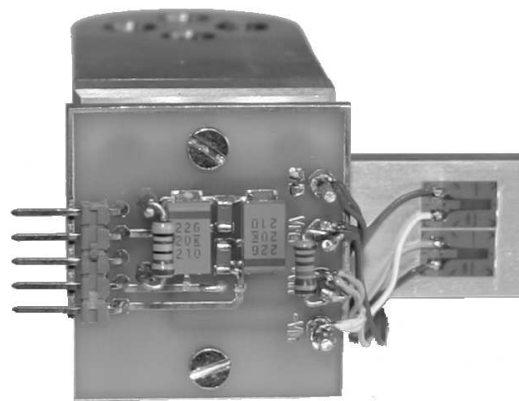


Abbildung 3.3: DMS-Schaltung und DMS-Verstärker auf dem Roboter

Außerdem ist der INA125 ein preiswertes Bauteil, dass sich als sehr robust erwiesen hat. Somit wird durch diese Schaltung das Ziel, ein kostengünstiges haptisches Display zu konstruieren, erheblich unterstützt. Andere Schaltungen oder industrielle Kraftmessdosen sind weitaus teurer.

Ein kompletter Schaltplan findet sich auf der anliegenden CD.

### 3.2.2 Technische Details

#### Energieversorgung

Zur Spannungsversorgung der Schaltung sind drei Zuleitungen erforderlich:  $+15V$ ,  $-15V$  und Erde (*GND*). Über die *GND*-Leitung wird gleichzeitig das Null-Potenzial der DMS-Schaltung zu Verfügung gestellt. Sollte es notwendig sein, kann die Versorgungsspannung auf minimal  $1,25V$  über der Referenzspannung abgesenkt werden.

#### Signalverstärkung

Die Verstärkung des INA125 liegt theoretisch im Bereich von  $4$  bis  $10000$ . Sie ist in der Schaltung durch einen ohmschen Widerstand fest eingestellt. Zum Nach-

justieren kann dieser durch ein  $1k\Omega$ -Potentiometer ersetzt werden. Damit wird der gewünschte Wert festgelegt und später wieder durch einen Widerstand ersetzt. Im unteren Widerstandsbereich des Potentiometers ist Vorsicht geboten, da die Abhängigkeit von der Verstärkung dort nichtlinear zunimmt und eventuell die maximale Ausgangsspannung überstiegen wird. Die Schaltung sollte davon allerdings keinen Schaden nehmen.

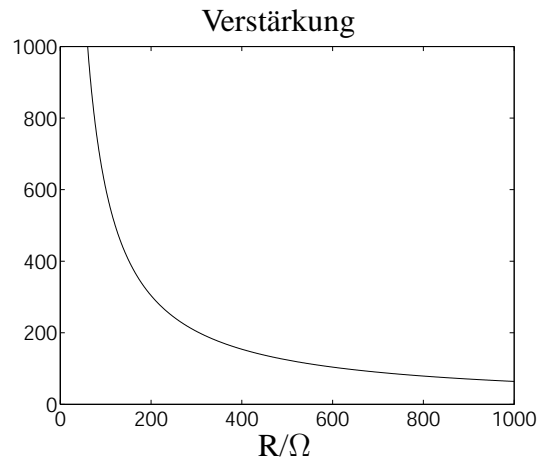


Abbildung 3.4: Verstärkung des INA125 in Abhängigkeit des gewählten Widerstandes

### Spannungsreferenz

Die Spannungsreferenz für die Messbrücke ist am INA125 über dessen Pins einstellbar. Man kann zwischen  $2,5V$ ,  $5V$  oder  $10V$  wählen. Um ein möglichst großes DMS-Signal zu erhalten, ist hier die  $10V$ -Referenz fest verlötet. Das bedeutet, dass die Versorgungsspannung maximal auf  $\pm 11,25V$  abgesenkt werden darf, um ein fehlerfreies Arbeiten des INA125 zu gewährleisten.

### Stromverstärkte Spannungsreferenz

Da die Referenzspannungsquelle des INA125 nur einen Strom von maximal  $5mA$  liefern kann, die Messbrücke aber einen Strom von ca.  $80mA$  benötigt, muss noch eine Stromverstärkung konstruiert werden. Dies geschieht über einen zusätzlichen npn-Transistor dessen Kollektor mit den positiven  $15V$  der Spannungsquelle verbunden ist, die genug Strom liefern kann. Seine Basis und sein Emitter sind mit dem Instrumentenverstärker der Referenzspannungsquelle nach dem Prinzip der Serienschaltung verschaltet. Dadurch werden die nicht stabilisierten  $15V$  am Kollektor auf stabilisierte  $10V$  am Emitter aberegelt. [5]

Diese stehen nun als stabile Versorgung der DMS-Bücke zur Verfügung.

### Tiefpass

Als Tiefpass wurde ein abschaltbares RC-Filter 1.Ordnung mit einer 3dB-Grenzfrequenz von 333Hz gewählt. Diese Frequenz wurde heuristisch bestimmt (Abbildung 3.5). Das Filter dient dazu, das in der DMS-Schaltung und bei der Signalverstärkung hinzukommende Rauschen zu mindern. Dabei wurde darauf geachtet, dass die Grenzfrequenz genügend Abstand zu den niedrigeren Nutzfrequenzen besitzt. Diese Nutzfrequenzen werden durch die Anwendung des Roboters als haptisches Display definiert. Es sind die Frequenzen unter 50 Hz, die zur Verarbeitung kinästetischer Sinneseindrücke bei einem haptischen Display wichtig sind.

Da die spätere Regelung besonders auf die Kontrolle der Signale im Bereich jener Frequenzen ausgelegt sein wird, muss eine Phasenverschiebung in diesem Bereich vermieden werden, da dies ein instabiles Verhalten begünstigt.

Die Übertragungsfunktion des Tiefpass lautet:

$$G(s) = \frac{1}{s + 300}. \quad (3.2)$$

Der Tiefpass kann per Jumper überbrückt werden.

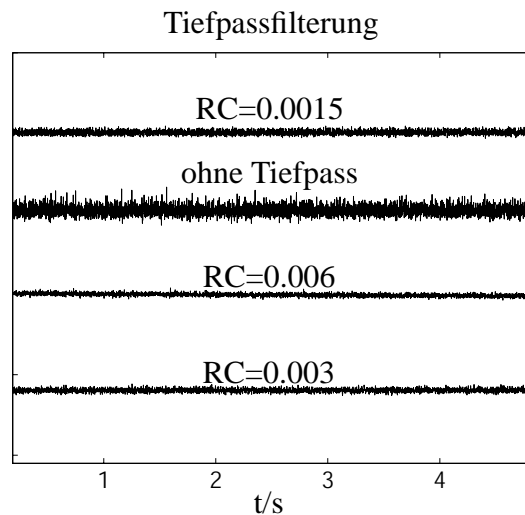


Abbildung 3.5: Rauschminderung bei verschiedenen Grenzfrequenzen

### Empfindlichkeit

Während der Entwicklung der Schaltung hat sich gezeigt, dass sie elektronisch sehr robust ist. Insbesondere der INA125 entpuppte sich als ein nahezu unverwüchliches

Bauteil, dass auch durch mehrmaliges falsches Einstecken in den Sockel nicht beeinträchtigt wurde. Eine lange Funktionszeit der Schaltung ist demnach zu erwarten.

### 3.3 Winkelencoder

An den Motoren sind werksseitig bereits digitale Inkrementalencoder montiert, die nach dem magnetoresistiven Prinzip arbeiten (MR-Encoder). Dabei erzeugt eine auf der Motorwelle angebrachte vierpolige Magnetscheibe einen sinusförmigen Spannungsverlauf im MR-Sensor. Durch Interpolation und elektronische Weiterverarbeitung entstehen daraus die typischen rechteckigen Encodersignale.

Die Encoder stellen drei Kanäle zur Verfügung. Kanal *A* und *B* erfassen phasenverschobene Signale, die zur Drehrichtungserkennung genutzt werden. Der Kanal *I* (Indexkanal) sendet einen Homeimpuls nach jedem Nulldurchgang. Dieses Signal kann als Referenzpunkt zur genauen Bestimmung des Drehwinkels genutzt werden [1]. Es wird aber vom Roboter nicht verwendet.

Die Encoder erzeugen 1000 Impulse pro Umdrehung und werden mit 5V versorgt. Dabei verbrauchen sie maximal 5mA Strom pro Kanal [1].

Die Vorteile des MR-Encoders liegen in seinem geringen Platzbedarf und in seinem optionalen Line Driver. Der Line Driver erzeugt die Komplementärsignale  $\bar{A}$ ,  $\bar{B}$ ,  $\bar{I}$ . Damit können die bei langen Leitungen auftretenden Störungen durch Addition mit Ausgangssignalen eliminiert werden [1]. Auch dieses Feature wird hier allerdings nicht verwendet.

### 3.4 Messkarte

Als Messkarte verwendet das System das Modell „626“ der Firma Sensoray. Sie bietet AD-Wandler, DA-Wandler und Zählfunktionen.

Für den SCARA nutzen wir:

- Zwei 16 Bit A/D-Wandler zur Aufnahme des Signals der DMS-Brücke.
- Zwei 16 Bit A/D-Wandler zur Aufnahme der Signale des Strommonitors.
- Zwei 14 Bit D/A-Wandler zur Ausgabe des Signals zur Motorsteuerung an die PWM-Verstärker.
- Zwei 24 Bit Zähler zur Aufnahme der Rechteckimpulse der Winkelencoder.

Die Ein- und Ausgänge der Messkarte werden auf eine Adapterkarte geführt. Daran sind alle ein- und abgehenden Signale des Roboters über 9-polige Sub-D Stecker angeschlossen. Diese Adapterkarte stellt vier Kanäle mit je einem A/D- und D/A-Wandler sowie einem Encodereingang der Messkarte zur Verfügung. Ein genauer

Schaltplan findet sich im Anhang.

## 3.5 Datenverarbeitung

Die Datenverarbeitung geschieht auf einem PC über Matlab/Simulink und dessen Realtime Workshop. Dieser wird dazu genutzt, die in Simulink mathematisch modellierte Signalverarbeitung und Regelung in echtzeitfähigen C-Code zu transformieren und zu compilieren. Dabei sorgt der Realtime Workshop dafür, dass die Treiber der Messkarte und des Zielbetriebssystems eingebunden werden.

Das Zielbetriebssystem ist RTLinux der Firma FSMLabs („RT“ steht für „real time“). Es läuft auf demselben PC wie das normale Linux unter dem Matlab/Simulink ausgeführt wird, allerdings mit höchster Priorität. In RTLinux wird das Programm in Echtzeit ausgeführt. Das System reagiert demnach auf Signale vom Roboter innerhalb einer fest vorgegebenen, sehr geringen Zeitspanne.

### Harte Echtzeitfähigkeit

Linux ist kein Echtzeitbetriebssystem. Das bedeutet, neue Ereignisse werden je nach Systemauslastung abgearbeitet. Tritt z.B ein Hardwareinterrupt auf, während eine Linux-Kernel-Funktion abgearbeitet wird, so wird auf diesen Interrupt erst reagiert, nachdem der Computer die Kernel-Funktion vollständig abgearbeitet hat. Das Zeitverhalten ist somit nicht deterministisch. Dieser Nachteil wird von RTLinux kompensiert.

RTLinux, in dem das echtzeitfähige C-Programm läuft, verleiht dem Robotersystem eine sogenannte harte Echtzeitfähigkeit. Das bedeutet, der Computer vermag lastunabhängig, innerhalb einer exakt definierten Zeitspanne auf den Roboter zu reagieren. Es werden keine Eingangssignale des Roboters zugunsten von anderen Programmen, die auf dem Computer laufen, ignoriert. Da die Roboterregelung den einzigen RT-Task darstellt, hat sie immer oberste Priorität.

Die Erfüllung dieser Rechtzeitigkeit wird - mit einer Einschränkung - unter allen Umständen gewährleistet:

Je niedriger die Abtastzeit ist, desto weniger Zeit bleibt dem Rechner, um die im Simulink-Modell enthaltenen Berechnungen durchzuführen, bis sie beim nächsten Abtastschritt erneut angestoßen werden. Somit ist harte Echtzeitfähigkeit nur dann gewährleistet, wenn die Rechenzeit kleiner als die Abtastzeit ist. Die Berechnungszeit wird im Datalogging-Betrieb pro Abtastintervall ausgegeben. Überschreitet sie die Abtastzeit, erfüllt der Roboter nur noch die weiche Echtzeitanforderung. Dies ist besonders bei der hier beabsichtigten Verwendung des Systems als haptisches Display unbedingt zu vermeiden, da derartige Verzögerungen zu Instabilität führen können.

### Zusammenspiel von RT-Linux und Linux

Der RTLinux-Kernel erweitert den Standard-Linux-Kernel durch zusätzliche Module. Diese legen sich unterhalb des normalen Linux-Kernel direkt über die Hardware. Man kann in diesem Fall von einem Zwei-Kernel-System sprechen. Dabei wird unter anderem die Verbindung zwischen dem System-Timer und dem Standard-Linux-Kernel so unterbrochen, daß jeder Timer-Interrupt direkt den RTLinux-Kernel erreicht. Somit ist der Standard-Linux-Scheduler entmachtet und der RTLinux-Scheduler verteilt nun nach Echtzeitgesichtspunkten Rechenzeit an die einzelnen Tasks. Die RTLinux-Tasks, wie die Roboterregelung, erhalten stets die höchsten Prioritäten und das Standard-Linux läuft als sogenannter Idle-Task. Das bedeutet, nur wenn kein RTLinux-Task Rechenzeit beansprucht, wird diesem Task der Prozessor zugewiesen und auch nur so lange, wie kein Hardwareinterrupt auftritt. Dieser wird sofort wieder vom zuständigen RTLinux-Task abgearbeitet. [6]

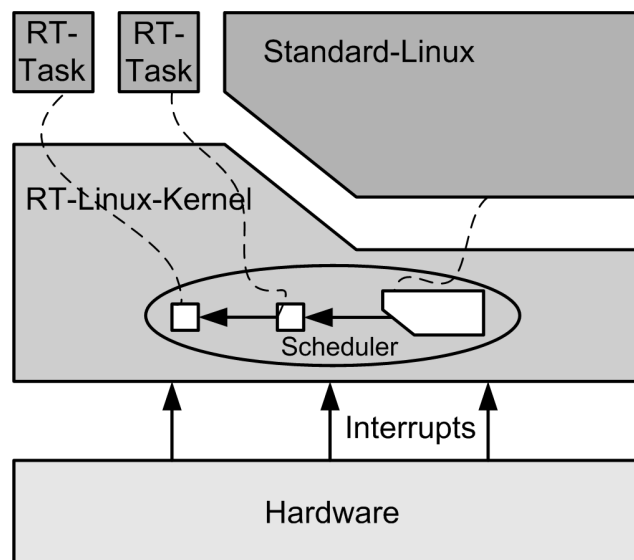


Abbildung 3.6: Wirkungsweise von RT-Linux

RTLinux Anwendungen basieren auf dem Thread-Modell. Somit können RT-Tasks auch als RT-Threads bezeichnet werden. Threads sind Funktionen, die nebenläufig ablaufen. Eine Anwendung kann aus vielen Threads bestehen. Um günstige Verarbeitungszeiten zu erzielen, werden nur die echtzeitkritischen Teile eines Programms als RT-Threads ausgelegt. Alle anderen zeitunkritischen Aufgaben, wie z.B. die Kommunikation mit der Festplatte werden als Standard-Linux-Threads implementiert und unterliegen den oben erläuterten Einschränkungen. (Die Programmierung von bestimmten Kommunikationsarten, wie z.B. ein Festplattenzugriff aus einem RTLinux-Thread heraus, ist aufwendig oder gar unmöglich.)

Es ergibt sich die Notwendigkeit einer Kommunikation zwischen einem RTLinux-Thread und einem Standard-Linux-Thread. Hierfür stellt RTLinux FIFO-Datenpuffer bereit, die der RTLinux-Thread anlegen, beschreiben, auslesen und löschen kann. Der Standard-Linux-Thread als anderer Teilnehmer dieser Kommunikation greift auf diese FIFOs über linuxtypische Devices wie `/dev/rxf0` mittels der Funktionen `read()` und `write()` zu.

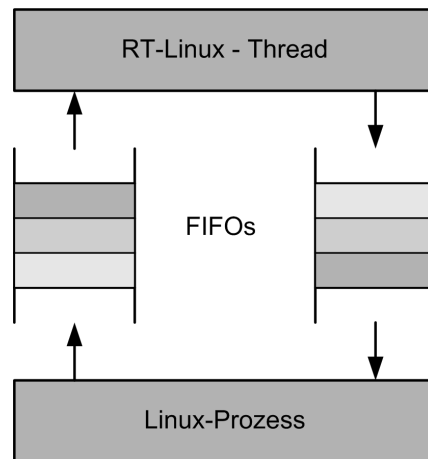


Abbildung 3.7: Kommunikation zwischen Linux- und RTLinux-Prozess

### Angepasster Matlab Realtime Workshop

Der Realtime Workshop von Matlab unterstützt etliche Echtzeitbetriebssysteme. Allerdings wurde die hier genutzte Verbindung mit RT-Linux am Fachbereich Regelungssysteme der TU-Berlin implementiert, einschließlich des RTLinux-Treibers für die Messkarte. Dadurch werden anwendungsspezifische Anpassungen möglich. Der Matlab Realtime Workshop erstellt nun nach den obigen Gesichtspunkten aus dem zu kompilierenden Simulink-Modell zwei Dateien: Das Kernelmodul `lrt_process`, welches wiederum über den RT-Thread `*thread_code()` die mathematischen Berechnungen sowie die Kommunikation mit der Messkarte ausführt sowie das Standard-Linux-Programm `applic2`. Es enthält die zeitunkritischen Funktionen, die z.B. das Schreiben von Daten auf die Festplatte organisieren.

Letztere Datei kann darüberhinaus Daten von anderen Anwendungen aufnehmen und dem RT-Thread zur Verfügung stellen. Dies stellt die besondere Stärke der hier angewendeten RTW/RTLinux-Verbindung dar.

## 3.6 PWM-Verstärker

Die Motoren des Roboters werden über je einen PWM-Verstärker angesteuert. Diese Geräte wandeln das analoge Steuersignal der Messkarte in eine pulsweitenmo-

dulierte Rechteckspannung. Die Amplitude dieser Rechteckspannung ist auf die Nennspannung des Motors eingestellt. Die durch das Steuersignal kommandierte Leistung ergibt sich als Mittelwert des Rechtecksignals.

Die PWM-Verstärker besitzen einen Strommonitor dessen Ausgangsspannung über dem Faktor 0.8 in den im Verstärker und damit im Motor fließenden Strom umgerechnet werden kann.

### **Funktionsprinzip**

Der benutzte PWM-Verstärker erzeugt eine Taktfrequenz von 50 KHz, mit der dessen Endstufentransistoren immer ein- bzw. ausgeschaltet werden (Volldurchgang bzw. Sperre). Diesem Takt wird das analoge, zu verstärkende Eingangssignal aufmoduliert, wobei sich der Informationsgehalt des Signals in Dauer und Polarität des Pulses wiederfindet (Zweipunktregelung).

PWM-Verstärker arbeiten mit einem sehr hohen Wirkungsgrad (95%), da ihre Endstufentransistoren nur in den beiden Zuständen betrieben werden, in denen theoretisch keine Verlustleistung in Form von Abwärme anfällt (Sperre und Volldurchgang). Sie benötigen im Vergleich zu einem analogen Verstärker nur ca. die Hälfte der Energie, um die gleiche Leistung bereitzustellen. Daraus resultiert die kompakte Größe, das geringe Gewicht und eine längere Lebensdauer. [1] [7]

## **3.7 Netzteil**

Der Roboter benötigt ein Netzteil, das in der Lage ist, die notwendige Leistung für die PWM-Verstärker bzw. die Motoren bereitzustellen. Außerdem müssen die beiden DMS-Verstärker versorgt werden.

Das Netzteil besitzt folgende Ausgänge:

- ca. +33V, 3.2A
- $\pm 15V$ , 0.2 A



## Kapitel 4

# Inbetriebnahme und Einstellen des Systems

Das folgende Kapitel beschreibt die Anpassungen und Einstellungen, die durchgeführt wurden, um den Roboter für den Betrieb vorzubereiten.

Im ersten Abschnitt wird die Ansteuerung der Motoren über PWM-Verstärker und Messkarte beschrieben. Der zweite Abschnitt widmet sich der Einstellung des DMS-Verstärkers, der für die Kraftsignale verantwortlich ist. Danach wird die Aufnahme des Positionssignals erläutert, aus dem die Winkelgeschwindigkeit errechnet werden kann. Der vierte Abschnitt zeigt, wie die Strommonitorsignale aufgenommen werden. Im letzten Abschnitt wird ein Reibungsmodell der Harmonic Drives aufgestellt, das Momente kompensieren soll, die durch deren Reibung entstehen.

### 4.1 Ansteuerung der Motoren

Die Ansteuerung der Motoren aus einem Simulink-Modell heraus geschieht über den Interfaceblock zum D/A-Wandler der Sensoray-Karte. Der Eingabewert dieses Blocks darf zwischen  $+10$  und  $-10$  liegen. Sie bewirken am Ausgang des D/A-Wandlers ein entsprechendes analoges Signal zwischen  $+10V$  und  $-10V$ . Dieses Signal ist wegen der Auflösung des D/A-Wandlers in  $14\text{Bit} = 16384$  Stufen unterteilt. Entsprechend ergibt sich eine quantisierte Spannung in Stufen von  $U_{LSB} = 0,0012V$ .

Der PWM-Verstärker ist in ähnlicher Weise zu betreiben. Anliegende Eingangsspannungen zwischen  $+10V$  und  $-10V$  führen an seinem Ausgang zu einem PWM-Signal maximaler positiver Spannung bzw. maximaler negativer Spannung. Der PWM-Verstärker wird in der Betriebsart der Stromregelung betrieben. Das bedeutet, der Verstärker führt dem Motor einen zum Sollwert proportionalen Strom zu, indem er ein PWM-Signal generiert, aus dessen Mittelwert sich dieser Strom ergibt. Somit verhält sich auch das Motordrehmoment proportional zum Sollwert. Als Sollwert ist der vom D/A-Wandler kommende Wert anzusehen. Der Strom ist außerdem davon

abhängig mit welcher Spannung der PWM-Verstärker versorgt wird. Sie ist gleich dem Betrage der Spannung zwischen der das PWM-Signal hin und her springt. Das Netzteil liefert dafür ca. +33V.

Über ein Potentiometer ist am PWM-Verstärker der maximale Strom einzustellen, der im Motor fließen darf. Da sich das Motordrehmoment proportional zum Strom verhält, ist es auch proportional des am Interfaceblock anliegenden Wertes im Simulink-Modell. Der maximale Strom darf nicht über dem maximalen Dauerbelastungsstrom des Motors liegen. Er darf auch nicht dazu führen, dass das durch ihn erzeugte Drehmoment die Getriebe beschädigt.

Im Folgenden wird die Umrechnung hergeleitet, um im Simulink-Modell bereits ein Moment vorgeben zu können, das im Rahmen der geforderten Beschränkungen bleibt.

Zunächst wird untersucht, ob Motor oder Getriebe das begrenzende Element darstellen, welches den maximalen Strom vorschreibt.

Wegen der Drehmomentbegrenzung des Getriebes würde sich der maximale Strom zu

$$I_{max} = \frac{\tau_{HD}}{k_{\tau} \cdot \ddot{U}} = \frac{4,8Nm}{38,5 \frac{mNm}{A} \cdot 100} = 1,24675A$$

ergeben. Wobei  $\tau_{HD}$  das wiederholbare Spitzendrehmoment der Harmonic Drives,  $k_{\tau}$  die Drehmomentkonstante der Robotermotoren und  $\ddot{U}$  die Untersetzung der Harmonic Drives bezeichnen.

Da dieser Strom den Motor laut Datenblatt überlasten würde, wenn er länger flösse, ist also das begrenzende Element der Motor. Der maximal fließende Strom muss gleich dem Dauerbelastungsstrom des eingesetzten Motors sein:

$$I_{max} = I_{max_{Mot}} = 0,862A. \quad (4.1)$$

Damit lässt sich nun das maximal erzeugbare Moment errechnen, welches unter dem des wiederholbaren Spitzendrehmoments der Harmonic Drives liegen wird:

$$\tau_{max} = k_{\tau} \cdot \ddot{U} \cdot I_{max} = 38,5 \frac{mNm}{A} \cdot 100 \cdot 0,862A = 3,3178Nm. \quad (4.2)$$

Jetzt kann man eine Proportionalitätskonstante  $\alpha$  berechnen, über die man im Simulink Modell direkt ein Moment vorgeben kann:

$$\alpha = \frac{U_{max}}{\tau_{max}} = \frac{10V}{3,3178Nm} = 3,014 \frac{V}{Nm}. \quad (4.3)$$

Das Begrenzen des Stromes direkt am Verstärker hat gegenüber der Methode des Begrenzen des Eingangssignals vom Simulinkblock des D/A-Wandlers bei maximal verfügbarem Verstärkerstrom den Vorteil, dass man die Auflösung des D/A-Wandlers voll ausnutzen kann, weil man den begrenzten Verstärker zu 100% auslenken darf. Im anderen Fall erhielte man bei diesem System eine geringere Auflösung,

da man den auf  $I_{max} = 5A$  ausgelegten Verstärker aus dem Simulink-Modell heraus nur mit maximal  $0,862A$  ansteuern, d.h. ihn weniger als 20% auslenken dürfte. Für Simulationszwecke sei noch die Übertragungsfunktion des PWM-Verstärkers angegeben, die sich aus den vorliegenden Werten berechnen lässt:

$$k_{PWM} = \frac{I_{max}}{U_{max}} = \frac{0,862A}{10V} = 0,0862S. \quad (4.4)$$

Dabei muss erwähnt werden, dass dies natürlich nur das statische Übertragungsverhältnis kennzeichnet. Tatsächlich besitzt die reale Übertragungsfunktion des PWM-Verstärkers mit Sicherheit ein Einschwingverhalten, welches aber im Vergleich zu den Zeitkonstanten des mechanischen Systems so gering ist, dass man es vernachlässigen darf.

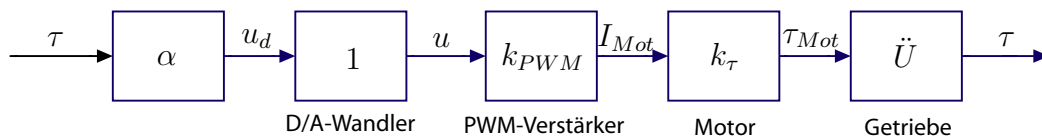


Abbildung 4.1: Veranschaulichung der Motoransteuerung

Die Einstellung des maximalen Motorstromes (4.1) kann auf zwei Wegen erfolgen. Zum einen über den Strommonitor des Maxon-Verstärkers, zum anderen über ein definiertes Moment.

Im ersten Fall bringt man den angesteuerten Motor zum Stehen, indem man ihn an einem Link festhält. Der dann fließende Strom, den man durch Messung der Spannung am Strommonitor und nachträglicher Umrechnung

$$I = \frac{U_{Monitor}}{0.8V/A}$$

erhält, darf (4.1) nicht überschreiten. Man beginnt dabei mit der Nullstellung des Potentiometers, um den Motor nicht zu überlasten.

Im zweiten Fall errechnet man sich ein Gewicht, welches dem Motor über den Link das Moment (4.2) zuführt. Der maximale Strom muss am Potentiometer nun so eingestellt sein, dass der Motor durch dieses Moment zum Stillstand kommt. Dies ist der Strom (4.1). Um den Motor beim Justieren nicht zu überlasten, ist es besser, diese Kalibrierungen bei einem Bruchteil der Werte durchzuführen, z.B. muss bei einem fünften Teil des Momentes (4.2) der fünfte Teil des Stromes (4.1) fließen.

## 4.2 Aufnahme des Kraftsignals

Das Kraftsignal wird über den A/D-Wandler der Messkarte in den Computer geschleust. Der A/D-Wandler der Karte wandelt analoge Signale zwischen +5V und -5V in digitale Signale zwischen +5 und -5 um. Er besitzt eine Auflösung von  $16\text{Bit} = 65536$  Stufen.

Um die volle Auflösung der Karte auszunutzen, muss das Signal der DMS-Brücke durch den DMS-Verstärker gezielt verstärkt werden. Dabei wählt man die maximale Kraft, die  $|5V|$  am Ausgang des DMS-Verstärkers erzeugen soll, entsprechend des maximalen Moments (4.2), welches abtriebseitig des Getriebes anliegen kann.

Die Umrechnung des Momentes geschieht über die Länge der Links. Man geht davon aus, dass die Kraft immer rechtwinklig am Ende des äußeren Links angreift. Die Berechnung der maximalen Kraft wird im Fall des gestreckten Roboterarms berechnet. Dabei ist zu beachten, dass auf das innere Gelenk die Kraft über einen doppelt so langen Hebelarm wirkt, wie auf das äußere Gelenk. Das bedeutet, nur am inneren Gelenk darf in diesem Fall das maximale Moment (4.2) anliegen.

Die maximal aufbringbare Kraft berechnet sich demnach zu:

$$F_{max} = \frac{\tau_{max}}{l_1 + l_2} = \frac{3,014Nm}{0,321m} = 9,3894N \quad (4.5)$$

Dieser Wert ist allerdings nur im Fall eines völlig ausgestreckten Armes der maximale Wert. In allen anderen Positionen des Roboterarms darf wegen des geringeren Hebelarms zum inneren Gelenk mehr Kraft aufgebracht werden. Nach diesen Kriterien wird eine Verstärkung an den DMS-Verstärkern eingestellt. Eventuell kann man zwischen innerem und äußerem Link verschiedene Verstärkungen wählen und somit unterschiedlich skalieren, um in beiden Fällen eine individuelle Auflösung zu erhalten. Dies wurde hier nicht durchgeführt.

## 4.3 Aufnahme des Positionssignals und Berechnung der Drehgeschwindigkeit

Über die Winkelencoder der Motoren können die Positionssignale aufgenommen werden. Diese werden dann über die Zähler der Messkarte dem Computer zugeführt. Sie haben eine Auflösung von  $24\text{Bit}$ . Die Winkelencoder liefern 1000 Impulse pro Umdrehung der Motorwelle. Multipliziert man sie mit der Untersetzung der Getriebe  $\ddot{U} = 100$  ergeben sich 100000 Impulse pro Umdrehung. Man erhält also ein hoch aufgelöstes Signal, welches robust gegenüber Störungen ist, da es über die Zähler und nicht über die A/D-Wandler aufgenommen wird.

Um die eingehenden Impulse in ein Winkelsignal zu konvertieren, wird der Ausgang des Encoderblocks in Simulink mit  $\frac{2 \cdot \pi}{4 \cdot 100000}$  multipliziert. Der Faktor 4 kommt dadurch zustande, dass die Messkarte die steigende und fallende Flanke beider Kanäle  $A$  und  $B$  auswertet. Dadurch wird die Auflösung nochmals erhöht.

Um aus dem Winkelsignal eine Winkelgeschwindigkeit zu erhalten, wird das Signal unter Simulink abgeleitet. Des Weiteren ist noch eine Umrechnung der Einheiten von  $[\frac{rad}{s}]$  in  $[\frac{U}{min}]$  nötig. Der Umrechnungsfaktor  $\frac{60}{2\pi}$  ergibt sich aus

$$\frac{rad}{s} \cdot \left( \frac{U/2\pi}{rad} \cdot \frac{60s}{min} \right) = \frac{60}{2\pi} \frac{U}{min}.$$

## 4.4 Auswertung des Strommonitors

Die eingesetzten PWM-Verstärker besitzen einen Strommonitor. Damit lässt sich der im Motor fließende Strom überwachen. Die Spannung, die an diesem Strommonitor abfällt, steht über eine Konstante mit dem Strom in Verbindung:

$$I_{Mot} = \frac{1}{0,8V/A} \cdot U_{Mon}. \quad (4.6)$$

Da die Gleichung aber laut Datenblatt nur ungefähr gilt, ist es besser, diese Schnittstelle nur zur Überwachung und nicht zur exakten Analyse einzusetzen. Dennoch wird sie zur Modellierung der Getriebereibung eingesetzt.

## 4.5 Modellierung der Reibung der Harmonic Drive Getriebe

Die Reibung, die im Betrieb der Harmonic Drive Getriebe entsteht, ist im Vergleich zum maximalen Moment (4.2), auf welches das System geregelt werden kann, relativ groß. Deswegen wurde sie genauer analysiert, um sie als Störgröße aus dem System zu eliminieren. Dies geschieht dadurch, dass die ermittelte Reibungskennlinie als geschwindigkeitsabhängiger Offset zur Führungsgröße addiert wird. Je genauer die Modellierung, desto weniger wird die Regelung des Systems damit belastet, Störungen durch diese Reibung entgegenzuwirken.

Die Modellierung geschieht im fast unbelasteten Fall, d.h. die Links an den Gelenken wurden entfernt. Die Motoren sind nur mit den Getrieben bestückt. Jegliche Belastung der Motoren geschieht also nur durch die Getriebe. Um das durch die Getriebereibung erzeugte Moment über den gesamten Drehzahlbereich zu erhalten, wurde eine Drehzahlregelung konzipiert.

Als Führungsgröße wurde eine stufenförmige Rampe gewählt, damit sich der Regelkreis einschwingen kann und sich der gesamte positive bzw. negative Drehzahlbereich in einem Experiment abbilden lässt. Um die Haftreibung aus dem Versuch zu eliminieren, wurde die Rampe bei maximaler Drehzahl gestartet. Sie endet bei der Drehzahl Null.

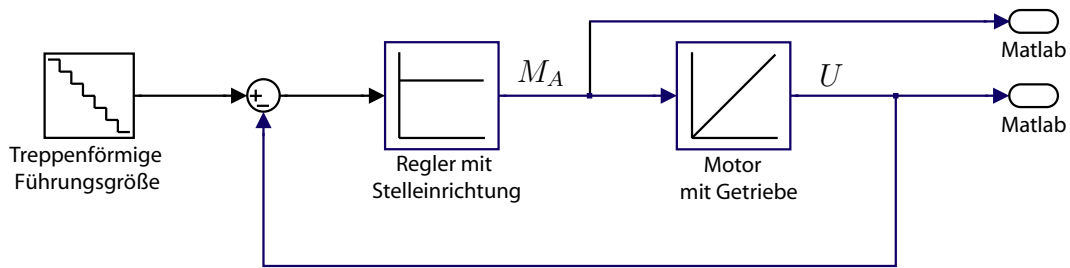


Abbildung 4.2: Drehzahlregelung zur Aufnahme der Reibungskennlinie

Als Regler wurde ein P-Glied gewählt. Das Störmoment greift zwar vor dem Integrator an, so dass keine Sollwertfolge gesichert wird, jedoch wird der Sollwert durch das P-Glied ausreichend genug angenähert. Das Ankermoment  $M_A$ , welches proportional dem Ankerstrom ist, kann über den Strommonitor aufgenommen werden. Da die Links mit den DMS abgeschraubt sind, besteht neben dem Strommonitor keine weitere Möglichkeit das Moment zu messen.

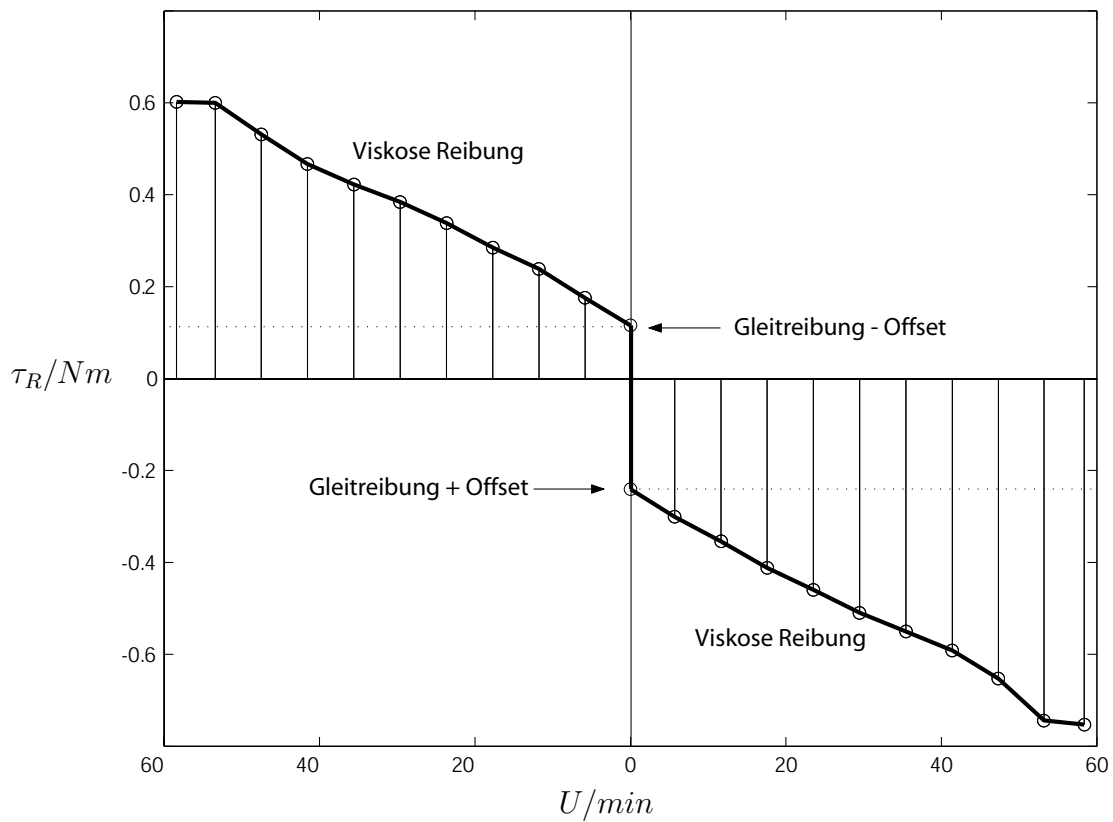


Abbildung 4.3: Reibungskennlinie des inneren Getriebes (ohne Haftreibung)

Das bei den einzelnen Drehzahlstufen nach Abklingen des Einschwingvorganges vom Motor erzeugte Moment wird gemittelt. Damit werden die durch den Regler erzeugten Schwingungen herausgerechnet. Diese entstehen dadurch, dass der P-Regler das Moment sofort absenkt bzw. erhöht, wenn es vom Sollwert abweicht und so im Mittel annähernd Sollwertfolge erreicht wird. Die so erhaltenen Stützstellen lassen sich zu einer Reibungskennlinie interpolieren.

Die Kennlinie lässt deutlich die zwei verschiedenen Reibungsarten erkennen, aus denen sich  $\tau_R$  zusammensetzt. Den konstanten Anteil verursacht die Gleitreibung. Proportional zur Geschwindigkeit ist die viskose Reibung. [8] [3] Der Sättigungseffekt bei hohen Drehzahlen lässt sich allerdings nicht mit dem Modell der viskosen Reibung erklären. Sein Grund liegt darin, dass wegen der Drehzahlsättigung des Motors, die unteretzte Drehzahl 60 zwar kommandiert wurde, jedoch vom Motor nicht mehr umzusetzen war. Damit konnte kein größerer Strom mehr fließen und das Moment dementsprechend nicht weiter linear ansteigen.

Außerdem deutlich zu erkennen ist ein Offset. Dieser entsteht durch den Offset der PWM-Verstärker. Er führt dazu, dass, auch ohne kommandiertes Moment, ständig ein Moment anliegt, welches den Motor zwingt, sich in eine Richtung zu bewegen. Da dieses Moment allerdings unter der Gleitreibung der Getriebe liegt, bewegt sich der Motor bzw. das Getriebe dadurch nicht. Es macht sich nur bei kleinen Getrieben in den Kennlinien so deutlich bemerkbar. Man kann den Offset der PWM-Verstärker allerdings beseitigen, in dem man das Potenzial derjenigen Hälfte des Differenzeingangs, an dem nicht die Drehmomentführungsgröße liegt, entsprechend ändert. Dafür stehen am PWM-Verstärker  $\pm 12V$  bereit.

Da es jedoch nicht möglich ist, den Offset ganz zu beseitigen und darüberhinaus auch die Getriebe nicht völlig gleich sind, wird die Reibungskennlinie für beide Verstärker-Getriebe-Kombinationen aufgenommen.

Zuletzt muss allerdings erwähnt werden, dass diese statische Modellierung sicherlich nicht die optimale Lösung darstellt. Besonders Temperatur und Lage des Roboters sind Einflussgrößen, die die Reibung der Getriebe zusätzlich zur Drehzahl beeinflussen. Die hier vorliegenden Reibungskennlinien wurden bei Betriebstemperatur aufgenommen.

Aus diesen Gründen reicht je eine quadratische Interpolation für positive und negative Drehzahlen. Die interpolierten Reibungskennlinien lauten:

Inneres Gelenk:

$$\text{positive Drehzahl} \quad y = 6,9569 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,015492x - 0,2768$$

$$\text{negative Drehzahl} \quad y = -5,25 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0146x + 0,191$$

Äußeres Gelenk:

$$\text{positive Drehzahl} \quad y = -1,27 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0076x - 0,187$$

$$\text{negative Drehzahl} \quad y = -2,65 \cdot 10^{-5}x^2 - 0,0106x + 0,218.$$



## Kapitel 5

### Performanzkennzahlen

Im folgenden werden die Kennzahlen des Roboters, welche dessen Performanz beschreiben nochmals zusammengefasst. Dies ermöglicht einen Vergleich mit andern haptischen Displays oder ähnlichen Systemen.

Freiheitsgrade	2	
Arbeitsraum	Radius 30cm.	
Abtastfrequenz	1000Hz	
Max. Kraft bei ausgestrecktem Arm	9,4N	theoretisch < 10N
Masse Link 1	0.54kg	
Masse Link 2	0.15kg	
Gesamtmasse des Roboters	3kg?	
Preis	1000Euro	

Die Daten lassen erkennen, dass das konstruierte haptische Display ähnliche Leistung erbringt wie andere Geräte der gleichen Dimension, die allerdings wesentlich teurer sind.

Der hier vorliegende Roboter zeichnet sich besonders durch seine Leichtigkeit aus. Der bewegte Teil, bestehend aus den beiden Links, wiegt nur 0.69kg. Das verspricht auch im Geschwindigkeitsbereich eine hohe Performanz.

Allerdings ist der Roboter durch diese leichte Bauweise nicht robust gegenüber Bewegungen des Operators, die nicht im Arbeitsraum des haptischen Displays realisiert werden können. Der Roboter arbeitet nur in der Ebene. Treten am Endeffektor Kräfte auf, die zu dieser Ebene geneigt sind, so entstehen besonders am inneren Link Torsionsverbiegungen, die zu falschen Kraftsignalen führen können.

Zum Vergleich sind nachstehend technische Daten des haptischen Displays „Phantom“ vom Massachusetts Institute of Technology aufgeführt. Da die Messmethoden der einzelnen Werte nicht bekannt waren, können sie auch nicht zum direkten Vergleich dienen. Die Daten zeigen jedoch, dass der in dieser Studienarbeit entstandene

preiswerte Roboter, sich durchaus in Konkurrenz mit professionellen Geräten begeben kann. Für einen direkten Vergleich müssten beide Displays allerdings mit den gleichen Messmethoden analysiert werden.

**Phantom:**

Freiheitsgrade	3
Arbeitsraum	$20 \times 27 \times 38 \text{cm}^3$
Max. Kraft	8,5N
Preis	?Euro

## Kapitel 6

### Fazit und Ausblick

In der vorliegenden Studienarbeit wurde zuerst das mechanische Design des Roboters festgelegt. Danach wurden dessen grundlegende mathematischen Beschreibungsformen hergeleitet. Ausgehend davon wurden Performanzaspekte erläutert und theoretisch berechnet. Das elektronische System des Roboters wurde vorgestellt, inklusive der Anbindung an einen Computer und der Betrieb in einer Echtzeitumgebung. Abschließend wurde gezeigt, wie die eingesetzten Kanäle der Ansteuerung und der Sensoren genutzt werden, so dass für eine spätere Regelung alle Voraussetzungen bestehen. Außerdem wurde die Reibung der Getriebe modelliert.

Der Roboter stellt ein Beispiel dar, wie sich ein günstiges haptisches Display erstellen lässt. Der Preis für das gesamte System liegt unter 1000 Euro und damit weit unter denen anderer haptischer Displays ähnlicher Größe mit ähnlichem Arbeitsraum. Die Ausstattung ist dennoch hochwertig. Mit seinen Maxon Motoren sowie den spielfreien Harmonic Drives lassen sich hochauflösende Bewegungen kommandieren. Die DMS-Sensoren sind sehr empfindlich, so dass der Roboter auch auf kleine Kraftänderungen reagieren können wird.

Des Weiteren ist das System wegen seiner geringen Abmessungen und seines niedrigen Gewichtes standortunabhängig. Die zum Verstehen und Erweitern des Roboters notwendigen Konstruktionspläne, Schaltpläne, Datenblätter sowie m-Files zum nachvollziehen der einzelnen Berechnungen sind auf der beiliegenden CD enthalten.

Insbesondere wegen der Forderung nach Leichtigkeit und dem Einsatz von DMS anstatt teurer Kraftmessdosen, neigt besonders der innere Link zur Torsion, wenn die Kraft auf den Endeffektor nicht - wie vorgesehen - in der Ebene, sondern vertikal dazu aufgebracht wird. Um dies zu beheben, könnte man für den inneren Link ein steiferes Material (z.B. Stahl) verwenden, welches allerdings zu einer Gewichtserhöhung führen würde.

Zum Einsatz des Gerätes als haptisches Display ist allerdings noch die dafür notwendige Regelung zu entwerfen. Da man über die Winkelencoder die Position als auch die Geschwindigkeiten erhält, bilden sie die Grundlage für Positions- und Ge-

schwindigkeitsregelung. Über die DMS kann man die Kraft regeln, die auf die Links wirkt.

Um die Auflösungen der Regelungen zu erhöhen, ist es sinnvoll, zuvor ein inverses Modell der dynamischen Bewegungsgleichungen des Roboters aufzustellen. Damit wird ein linearer Regler ein besseres Ergebnis erzielen.

Außerdem ist es für ein Telepräsenzsystem notwendig, dass noch ein zweiter Roboter, entweder als MSS oder als Teleoperator, vorhanden ist. Dazu kann entweder ein zweites Gerät des hier vorgestellten Typs konstruiert werden oder man wählt ein anderes Gerät mit mindestens zwei Freiheitsgraden.

## Anhang A

# Technische Daten des Scara-Roboters

Hier sind einige Daten zusammengestellt, die während der Arbeit mit dem Scara-Roboter von Interesse sein könnten.

Eine vollständige Zusammenstellung findet man in den Datenblättern, Modellen und Schaltplänen, die auf der CD angelegt sind.

### Abmessungen

Länge des inneren Links	0,157 m	(Mitte inneres Gelenk bis Mitte äußeres Gelenk)
Länge des äußeren Links	0,165 m	(Mitte äußeres Gelenk bis Bohrung)

### Motoren

Typ	Maxon RE MAX 29 (267690)
Typenleistung	29 W
Nennspannung	36 V
Drehmomentkonstante	38,5 $mNmA^{-1}$
Massenträgheitsmoment des Rotors	0,00000127 $kgm^2$

### Winkelencoder

Typ	Maxon Digital-MR-Encoder (225780)
Impulszahl pro Umdrehung	1000

### Getriebe

Typ	Harmonic Drive HFCU 2A Size 8
Untersetzung	100 : 1
Maximal wiederholbares Spitzendrehmoment	4,8 Nm

Massenträgheitsmoment des Wave Generators	0,0000003 $kgm^2$
Gewicht	0,026 $kg$

**PWM-Verstärker**

Typ	Maxon 4Q-DC Servoverstärker ADS 50/5 (145391)
Maximaler Ausgangsstrom	10 $A$
Ausgangsstrom, dauernd	5 $A$
Übertragungsfaktor des Strommonitors	$ca. 0,8 \text{ V}I^{-1}$

# Anhang B

## Inhalt der CD

Während dieser Arbeit sind viele Daten entstanden, die sich nicht im Hauptteil wiederfinden. Diese beschreiben den Roboter in weiteren Details.

Um dem künftigen Anwender die Möglichkeit zu bieten, den Roboter über die obigen Erklärungen hinaus zu verstehen, um ihn zu reparieren, zu verbessern oder an neue Aufgabenstellungen anzupassen, sind auf der beiliegenden CD sämtliche dazu notwendigen Informationen zusammengestellt.

### **CAD-Konstruktionspläne**

Die CAD-Konstruktionspläne bilden die Grundlage der Roboterkonstruktion. Alle Teile des SCARA-Roboters sind nach den darin beschriebenen Vorgaben gefertigt.

### **Solidworks-Modell**

Das Solidworksmodell ist aus den Angaben der CAD-Pläne erstellt. Es dient zur Aufstellung des mathematischen Modells und ist dementsprechend vereinfacht. Sein Hauptzweck besteht darin, die Trägheitstensoren beliebiger Roboterteile zu erzeugen. Diese werden für die Berechnung des dynamischen Modells mittels Autolev benötigt.

### **Schaltplan des DMS-Verstärkers**

Der Schaltplan liegt im Eagle-Format vor.

### **Datenblatt des INA125-Instrumentenverstärkers**

Das Datenblatt des INA-125 stellt die Grundlage für den DMS-Verstärker dar.

### **Messkarte Sensoray 626 - Datenblatt**

### **Schaltplan der Adapterkarte**



## Literaturverzeichnis

- [1] *maxon 2003*; Katalog der Firma Maxon, 2003
- [2] *Harmonic Drive, Getriebefunktion*; [www.harmonicdrive.de](http://www.harmonicdrive.de), 01.08.2003
- [3] *Industrieroboter*; Wolfgang Weber, Fachbuchverlag Leipzig, 2002
- [4] *Elektrische Messtechnik*; E. Schrüfer , 6.Auflage, Hanser, 1995
- [5] *Analoge Schaltungen*; M. Seifart, 5.Auflage, Verlag Technik Berlin, 1996
- [6] *Messen, Steuern, Regeln mit Linux*; K.-D. Walter, Franzis Verlag GmbH, 2001
- [7] *Halbleiter-Schaltungstechnik*; U.Tietze/C.Schenk, 9.Auflage, Springer Verlag Berlin,1989
- [8] *Grundlagen der Technischen Mechanik*; K. Magnus/H.H. Müller, Teubner, 1979
- [9] *Modelling, Identification and Control of Robots*; W. Khalil/E.Dombre, Hermes Penton Ltd., 2002
- [10] *Höhere Mathematik für Ingenieure 2*; Burg/Haf/Wille, Teubner, 2002