

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
CHEMNITZ

# Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion

von der Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik

der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte Dissertation  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur  
(Dr.-Ing.)

vorgelegt

von Dipl.-Ing. Alexander Winkler  
geboren am 03.06.1976 in Karl-Marx-Stadt  
eingereicht am 17.03.2006

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Jozef Suchý  
Prof. Dr. sc. nat. Peter Maißer  
Prof. Dr.-Ing. Friedrich M. Wahl

Tag der Verleihung: 26.09.2006

## **Bibliographische Beschreibung**

Verfasser: Alexander Winkler  
Titel: Ein Beitrag zur kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion  
Art: Dissertation  
Seiten: 152  
Abbildungen: 64  
Tabellen: 9  
Literatur: 130

## **Kurzreferat**

Ausgehend von einem mit Kraft-/ Momentsensor ausgestatteten seriellen Roboter, wird die kraftbasierte Mensch-Roboter-Interaktion, als ein Spezialfall der Kraft-/ Momentregelung, untersucht. Betrachtet werden dabei sowohl die kinematischen Eigenschaften verschiedener Algorithmen als auch das dynamische Verhalten des Roboters während der kraftgeführten Bewegung (Handführen). Vorgeschlagen für die anschließende Implementierung in reale Steuerungssysteme wird der Ansatz zur kraftgeführten Bewegung im Gelenkraum. Er hat im Vergleich zum kartesischen Algorithmus verschiedene Vorteile. Diese werden an konkreten Beispielen verdeutlicht. Außerdem werden diverse Zusatzfunktionalitäten und Anwendungsfelder vorgestellt. Besondere Erwähnung findet die Problematik der Bedienersicherheit während der Mensch-Roboter-Interaktion.

Am Beispiel eines Robotersystems mit sog. offener Steuerung wird untersucht, inwieweit es möglich ist, den Kraft-/ Momentsensor durch einen Algorithmus zum Schätzen von Kontaktkräften und -momenten zu ersetzen. Verwendet werden dabei die Werte der Motorenströme. Darauf basierend wird die kraftgeführte Bewegung des Roboters ohne zusätzliche Sensorik demonstriert.

## **Schlagwörter**

Gelenkraum, Handführen, Impedanzregelung, Industrieroboter, Kraft-/ Momentregelung, kraftgeführte Bewegung, sensorloses Kraftführen, Motorenströme

# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	<b>6</b>
<b>Vorwort</b>	<b>7</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>8</b>
1.1 Industrieroboter mit Kraft-/ Momentsensorik . . . . .	8
1.2 Ziel der Arbeit . . . . .	10
1.3 Gliederung und Aufbau der Arbeit . . . . .	10
<b>2 Ausgewählte Grundlagen und Stand der Technik bei stationären Robotern</b>	<b>12</b>
2.1 Kinematik . . . . .	12
2.1.1 DKP serieller Roboter . . . . .	12
2.1.2 Orientierungsrepräsentation . . . . .	13
2.2 Dynamik . . . . .	15
2.3 Antriebskonzepte . . . . .	16
2.4 Sensorik . . . . .	16
2.4.1 Interne Sensorik . . . . .	17
2.4.2 Externe Sensorik . . . . .	17
2.5 Regelungskonzepte . . . . .	18
2.5.1 Modellbasierte Regelung . . . . .	18
2.5.2 Kaskadenregelung . . . . .	19
2.5.3 Sonstige Regler . . . . .	19
2.6 Positionsregelung . . . . .	20
2.7 Kraft-/ Momentregelung . . . . .	21
2.7.1 Indirekte Kraft-/ Momentregelung . . . . .	21
2.7.2 Direkte Kraft-/ Momentregelung . . . . .	22
2.7.3 Hybride Kraft-/ Lageregelung . . . . .	23
2.7.4 Parallele Kraft-/ Lageregelung . . . . .	24
<b>3 Kraftgeführte Bewegungen</b>	<b>25</b>
3.1 Ansätze zur kraftgeführten Bewegung . . . . .	26
3.1.1 Kartesischer Ansatz mit Kraft-/ Momentsensor . . . . .	27
3.1.2 Gelenkraumansatz mit Kraft-/ Momentsensor . . . . .	31
3.1.3 Momentmessung in den Gelenken . . . . .	38
3.2 Beispiel <i>Planar Two Link Manipulator</i> . . . . .	39
3.2.1 Kartesischer Ansatz zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des <i>Planar Two Link Manipulators</i> . . . . .	40
3.2.2 Ansatz im Gelenkraum zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des <i>Planar Two Link Manipulators</i> . . . . .	42

3.3	Weitere kinematische Beispiele . . . . .	46
3.3.1	6-Gelenk-Knickarmroboter . . . . .	46
3.3.2	SCARA-Roboter . . . . .	47
3.3.3	Kartesische Roboter . . . . .	48
3.3.4	Redundante Manipulatoren . . . . .	49
3.3.5	Parallele Roboter . . . . .	51
3.3.6	Mobile Roboter . . . . .	53
3.4	Wunschverhalten des Manipulators . . . . .	55
3.4.1	Dynamik des Robotersystems . . . . .	55
3.4.2	Wahl der Struktur des Wunschverhaltens . . . . .	57
3.4.3	Parametrierung des Wunschverhaltens . . . . .	58
3.4.4	Weitere Funktionen im Wunschverhalten . . . . .	60
3.5	Implementierung der kraftgeführten Bewegung bei Verwendung eines Kraft-/ Momentsensors . . . . .	67
3.5.1	Kompensation von Gewichtskräften und -momenten . . . . .	67
3.5.2	Kraftgeführte Bewegung am Beispiel des Industrieroboters STÄUBLI RX90B . . . . .	68
3.5.3	Kraftgeführte Bewegung am Beispiel des Industrieroboters MANUTEC r3 . . . . .	76
3.5.4	Kraftgeführte Bewegung mit weiteren Industrierobotern . . . . .	81
3.6	Spezielle Funktionen und Anwendungen zur kraftgeführten Bewegung und ihre Implementierung . . . . .	89
3.6.1	Virtuelle Begrenzung des Arbeitsraumes . . . . .	89
3.6.2	Teleoperation . . . . .	92
3.7	Sicherheitsaspekte . . . . .	94
3.8	Zusammenfassung . . . . .	96
<b>4</b>	<b>Kraftgeführte Bewegungen ohne zusätzliche Sensorik</b>	<b>99</b>
4.1	Sensorlose Bestimmung von Kontaktkräften und -momenten . . . . .	99
4.1.1	Theoretische Betrachtungen . . . . .	99
4.1.2	Verifizierung an einem realen Robotersystem . . . . .	102
4.2	Sensorlose Bewegungssteuerung . . . . .	111
4.2.1	Wunschverhalten . . . . .	111
4.2.2	Implementierung . . . . .	113
4.2.3	Versuche . . . . .	115
4.2.4	Auswertung . . . . .	119
4.3	Industrielle Lösungen . . . . .	120
4.3.1	Momentenbetrieb . . . . .	120
4.3.2	Strom- bzw. Momentmessung mittels RSI-Expertenprogrammierung . .	122
4.4	Zusammenfassung . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>125</b>
<b>A</b>	<b>Anhang</b>	<b>127</b>
A.1	Vorwärtstransformation und Jacobi-Matrix STÄUBLI RX90B . . . . .	127
A.2	Vorwärtstransformation MANUTEC r3 . . . . .	130
A.3	Koordinatensysteme KUKA KR6/2 . . . . .	131
A.4	Ableitung des Vier-Quadranten-Arkustangens . . . . .	132

---

<b>B</b>	<b>Betreute Diplom- und Studienarbeiten</b>	<b>133</b>
<b>C</b>	<b>Eigene Veröffentlichungen und Vorträge</b>	<b>134</b>
	Abbildungsverzeichnis	136
	Tabellenverzeichnis	139
	Literaturverzeichnis	140
	Selbstständigkeitserklärung	149
	Thesen	150
	Lebenslauf	152

## Abkürzungsverzeichnis

BKS	Basiskoordinatensystem
DKP	direktes kinematisches Problem
IKP	inverses kinematisches Problem
KB	kraftgeführte Bewegung
KMR	Kraft-/ Momentregelung
KMS	Kraft-/ Momentsensor
RSI	engl. <i>robot sensor interface</i>
TCP	Werkzeugmittelpunkt, engl. <i>tool center point</i>
WKS	Werkzeugkoordinatensystem
WV	Wunschverhalten

$x, X$	Skalare
$\vec{x}, \vec{X}$	Vektoren
$\underline{x}, \underline{X}$	Matrizen

## Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur Robotersysteme der Technischen Universität Chemnitz. Mein besonderer Dank gilt deshalb Herrn Professor Jozef Suchý für die wissenschaftliche Betreuung dieser Arbeit.

Ebenso bedanke ich mich bei Herrn Professor Peter Maißer und Herrn Professor Friedrich Wahl für die Übernahme des Korefferats und die damit verbundenen Mühen.

Des Weiteren gilt mein herzlicher Dank allen Kollegen, die mit anregenden Gesprächen und Diskussionen wertvolle Denkanstöße lieferten sowie allen von mir, im Rahmen ihrer Studien- und Diplomarbeiten, betreuten Studenten, die wesentlich zum Gelingen der Versuche beitrugen.

# 1 Einleitung

Der Einsatz von Robotern ist aus der heutigen Produktionswirtschaft nicht mehr wegzudenken. Die seit vielen Jahren ansteigenden Kosten für menschliche Arbeit und der hohe Druck, die Produktionskosten zu senken, führen häufig dazu, dass der Automatisierungsgrad in vielen Bereichen des produzierenden Gewerbes steigt. So ist laut [109] das Arbeitnehmerentgelt in den Jahren 1990 bis 2003 um 44% gestiegen. Oft werden bei der Umsetzung von Automatisierungslösungen auch Industrieroboter verwendet, deren Preise im gleichen Zeitraum um 49% gefallen sind. Dabei wurde noch nicht einmal die höhere Leistungsfähigkeit heutiger Industrieroboter berücksichtigt [109].

Aber nicht nur die teure menschliche Arbeitskraft macht den Einsatz von Robotern unumgänglich. Häufig arbeiten Roboter auch in für den Menschen gefährlichen Umgebungen oder führen körperlich anstrengende Arbeiten aus. Bei vielen industriellen Produktionsabläufen kommt es außerdem auf sehr hohe Präzision, Zuverlässigkeit und Kontinuität an, die oft nur der Roboter zu leisten in der Lage ist.

Aus diesen Gründen liegt die geschätzte Anzahl der weltweit eingesetzten Industrieroboter laut [108] zwischen 800.000 und 1.090.000 Stück. Die Bundesrepublik Deutschland nimmt dabei mit 143 Industrierobotern pro 10.000 Beschäftigte den Spitzenplatz ein. Trotz konjunktureller Schwankungen steigt die Anzahl der installierten Systeme weiter an und soll laut Schätzungen im Jahre 2007 in Deutschland bei 151.000 Stück liegen (Stand 2003: 112.700).

Betrachtet man die Entwicklung der Industrieroboter aus rein technischer Sicht, so stellt man fest, dass seit vielen Jahren keine prinzipiellen Veränderungen stattgefunden haben. Im hohen Maße verbessert haben sich allerdings die technischen Parameter [31], wie Geschwindigkeit, Wiederholgenauigkeit und Zuverlässigkeit. Auch hinsichtlich der Bedienbarkeit sind deutliche Fortschritte gemacht worden. Viele Systeme basieren auf *Microsoft Windows* als Betriebssystem für die Bedienoberfläche oder ähnlichen Konzepten. Sie vereinfachen die Bedienung erheblich. Gleich geblieben ist aber die Steuerungsarchitektur der Robotersysteme. Die Manipulatoren sind immer noch fast ausschließlich lagegeregelt. Besonders der Einsatz komplexer, externer Sensorik, wie Kraft-/ Momentsensoren (KMS) oder Bildverarbeitungssystemen ist recht selten. Im industriellen Umfeld spielen lediglich sog. Initiatoren eine wesentliche Rolle, z. B. für das Detektieren des Greiferzustandes.

## 1.1 Industrieroboter mit Kraft-/ Momentsensorik

Soll der Roboter dynamisch mit seiner Umgebung interagieren, dann kann auf komplexe, externe Sensoren in der Regel nicht verzichtet werden. In gewissem Umfang finden dann Bildverarbeitungssysteme ihren industriellen Einsatz. Dafür existiert eine Vielzahl von Anbietern. Das Bildverarbeitungssystem wird häufig als externe Einheit betrieben und mit der Robotersteuerung über ein Bussystem (z. B. Profibus oder Ethernet) verbunden. Je nach Hersteller

besteht z. T. auch die Möglichkeit der direkten Integration in das Steuerungssystem des Roboters. Gängige Anwendungsfälle sind Handhabungsaufgaben, wie Sortieren und Anordnen.

Obwohl der Informationsgehalt eines Kamerabildes wesentlich höher ist, als der von Messwerten eines KMS, ist dieses Messsystem für Kontaktoperationen besonders wichtig. Sehr anschaulich lässt sich dieser Fakt anhand des folgenden Beispiels erklären: Im Gegensatz zu einem Menschen ohne Tastsinn in den Händen ist ein blinder Mensch sehr gut in der Lage, manuelle Aufgaben zu lösen. Der Mensch mit fehlendem Tastsinn hat ohne Hilfsmittel (Kraft-/ Momentsensorik) so gut wie keine Möglichkeit, selbst uns primitiv erscheinende Operationen durchzuführen, wie z. B. das Anfädeln und Festschrauben einer Mutter auf eine Schraube.

Der KMS ist also das Tastsinnesorgan des Roboters. Mit ihm werden Kontaktkräfte und -momente zwischen Roboter und Umgebung gemessen und daraufhin entsprechende Reaktionen des Manipulators ausgelöst. Zusammen mit den dafür notwendigen Algorithmen wird das System dann als sog. Kraft-/ Momentregelung bezeichnet. Sie findet immer dort Anwendung, wo der Roboter im direkten physischen Kontakt mit seiner Umgebung ist [71].

Einsatzfälle der Kraft-/ Momentregelung (KMR) außerhalb der Roboterlabore von Forschungseinrichtungen sind jedoch noch äußerst selten. Die überwiegende Anzahl der Industrieroboter arbeitet rein positionsgeregelt. Tritt ein lagegeregelter Roboter dennoch in physischen Kontakt mit einer z. T. unbekanntem Umgebung, dann werden üblicherweise passive Nachgiebigkeitselemente verwendet, um die Kontaktkräfte und -momente zu reduzieren. Diese sind in verschiedenen Formen verfügbar. Sie reichen von den eindimensionalen sog. Z-Achsen-Nachgiebigkeiten bis hin zu den komplexen RCC-Gliedern (*Remote Center Compliance*, [115], [118]) mit 6-dimensionaler Steifigkeitsmatrix. Der Einsatz passiver Nachgiebigkeiten ist unter dem Gesichtspunkt der Dynamik eine sehr gute Lösung, da keine steuerungsbedingten Totzeiten auftreten. Allerdings sind derartige Systeme sehr unflexibel und müssen meist für einen speziellen Anwendungsfall zugeschnitten werden.

Der Einsatz von KMS in Verbindung mit stationären Robotern wird seit ca. 30 Jahren intensiv untersucht. Zahlreiche Forschungsaktivitäten internationaler Institute fanden dazu auf dem Gebiet der KMR statt. Dabei entstanden verschiedenen Regelungsgrundstrukturen wie direkte KMR, Impedanzregelung, hybride Regelung und parallele Regelung, die im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch näher erläutert werden. Ebenso fanden viele Untersuchungen hinsichtlich Stabilität, Adaption, usw. statt. Nur ein kleiner Teil der Arbeiten auf dem Gebiet der KMR liefert neben den theoretischen Aspekten auch praktische Lösungen, [122]. Einige untersuchte Anwendungsfälle sind z. B.:

- Schleifen [13], Entgraten [84], Bohren [4], Pollieren,
- Metalldrücken (engl. *metal spinning*) [7],
- Schrauben [110].

Dass die KMR zum größten Teil in den Forschungslaboren der Robotikinstitute anzutreffen ist, liegt u. A. daran, dass die Sensoren noch relativ teuer und somit für den industriellen Einsatz oft unwirtschaftlich sind. Ein 6-Komponenten-KMS kann durchaus mehrere tausend Euro kosten. Im Vergleich mit dem Preis für einen kompletten 6-Gelenk-Knickarm-Roboter der kleinen Klasse, kann somit der Sensor durchaus 20% der Gesamtsystemkosten ausmachen.

Ein weiterer Grund für den mangelnden industriellen Einsatz ist die oft unzureichende Integration der Kraft-/ Momentsensorik in existierende Robotersteuerungen, [16]. In vielen wissenschaftlichen Arbeiten wird davon ausgegangen, dass die KMR die Gelenkmomente bzw.

-kräfte steuert. Bei den meisten Industrierobotern besteht jedoch ohne umfangreiche Umbaumaßnahmen am Steuerschrank keine Möglichkeit, die Motorenströme direkt vorzugeben, da in den Achsverstärkern bereits Strom- und Geschwindigkeitsregler enthalten sind. Ein Beispiel für die relativ starke Trennung von Robotersteuerung und Kraft-/ Momentmesssystem sind die seit vielen Jahren verkauften Sensoren der Fa. SCHUNK (entwickelt durch ATI Industrial Automation). Diese werden u. A. mit einem sog. *Stand Alone Controller* angeboten, der die Messwerte in Form analoger Signale oder per serieller oder paralleler Schnittstelle zur Verfügung stellt. Außerdem ist der *Stand Alone Controller* programmierbar, so dass in Abhängigkeit von den Kraft- und Momentmesswerten und anderen Eingangssignalen digitale Ausgänge geschaltet werden. Somit können die SCHUNK-KMS mit nahezu jeder Robotersteuerung verbunden werden. Jedoch kann nur selten von echter KMR gesprochen werden. Vielmehr beschränkt man sich häufig auf reine Überwachungsfunktionen. Andere Systeme basieren z. B. auf PC-Einsteckkarten. Dort ist der Sachverhalt ähnlich.

## 1.2 Ziel der Arbeit

Wie schon kurz erwähnt, führt die KMR von Robotern, bezogen auf den industriellen Bereich, eher ein Schattendasein. Deshalb beschäftigt sich diese Arbeit intensiv mit der Anwendung der KMR, welche durchaus industrielles Einsatzpotenzial hat. Ausgewählt wurde dafür der Spezialfall der kraft-/ momentbasierten Interaktion zwischen Roboter und Umgebung, bei dem der Mensch die Kontaktumgebung darstellt. Aus der sog. Mensch-Roboter-Interaktion auf der Basis von Kraft-/ Momenteinwirkung lassen sich interessante Anwendungsmöglichkeiten ableiten.

Die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter wird bei modernen Produktionsabläufen zukünftig eine wichtige Rolle spielen. Der Faktor Mensch im System erhöht dessen Flexibilität erheblich. Der KMS ist dabei für den Roboter ein wichtiges Sinnesorgan.

Ziel dieser Arbeit soll es aber nicht sein, sich mit speziellen Algorithmen zur KMR zu beschäftigen, um z. B. den Vorgang des Kontaktfindens zwischen Roboter und Umgebung zu beschleunigen oder deren Regelgüte zu verbessern. Vielmehr sollen Ansätze zur kraft-/ momentbasierten Interaktion des Menschen mit dem Roboter, der sog. kraftgeführten Bewegung (KB) oder dem Handführen, erarbeitet und untersucht werden. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die spätere Realisierung an einem industriellen Robotersystem gelegt.

Die Algorithmen zur KB können durch unterschiedliche Funktionen erweitert werden, die den zukünftigen Anwendungsbereich vergrößern. Diese Sonderfunktionen werden ebenfalls eingehend untersucht. Eine wesentliche Anwendung der KB ist das komfortable Anlernen von Positionen und Orientierungen des Endeffektors. Neben ihr existieren weitere interessante Einsatzgebiete, die in dieser Arbeit Erwähnung finden sollen.

Da die Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter mittels eines KMS nicht nur Vorteile hat, soll des Weiteren die Frage beantwortet werden, ob gegebenenfalls auf diesen verzichtet werden kann. Ein Kapitel dieser Arbeit beschäftigt sich deshalb mit der sensorlosen, kraft-/ momentbasierten Mensch-Roboter-Interaktion.

## 1.3 Gliederung und Aufbau der Arbeit

Als Erstes werden im nächsten Kapitel die wichtigsten Grundlagen der stationären Robotik erläutert. Zielsetzung dabei ist nicht, einen Überblick über das gesamte Wissensgebiet zu geben, sondern nur die für diese Arbeit unbedingt notwendigen Bereiche anzuschneiden. Diese reichen von der Vorwärtstransformation für serielle Kinematiken über Sensoren für Roboter,

bis hin zu Grundstrukturen der Steuerung und Regelung. Sehr wichtig für den weiteren Verlauf dieser Arbeit sind die verschiedenen Möglichkeiten der Darstellung der Orientierung des Endeffektors. Deshalb behandelt das Kapitel 2 außerdem ausführlich die Orientierungsrepräsentation.

Das Kapitel 3 stellt den eigentlichen Kern der Arbeit dar. Es setzt sich mit der KB von Robotern auf der Basis von Kraft-/ Momentsensoren auseinander. Nach der Beschreibung verschiedener Anwendungsfälle der KB werden die Grundansätze vorgestellt, wobei hauptsächlich zwischen kartesischem und Gelenkraumansatz unterschieden wird. Die KB eines Roboters im Gelenkraum hat im Vergleich zur kartesischen Steuerung diverse Vorteile bzw. Unterschiede. Der Vergleich erfolgt ausführlich am Beispiel des *Planar Two Link Manipulators*. Die Eigenschaften des Gelenkraumansatzes werden anschließend für weitere Kinematiken untersucht. Dazu zählen u. A. SCARA-Roboter, Parallelkinematiken und mobile Roboter.

Neben der kinematischen Betrachtungsweise spielt die Dynamik des Roboters beim Handführen eine wichtige Rolle. Darum behandelt das Kapitel 3 außerdem die Dynamik von Robotersystemen und mögliche Vorgaben des Bewegungsverhaltens. Dazu zählen auch verschiedenen Sonderfunktionalitäten.

Danach wird an verschiedenen zur Verfügung stehenden Robotersystemen die Implementierung der KB gezeigt. Daran werden Eigenschaften und Funktionsweise der Algorithmen deutlich. Besonders wichtig sind dabei auch die unterschiedlichen Möglichkeiten der Bewegungssteuerung von Industrierobotern.

Nach dem Vorstellen ausgewählter Sonderfunktionen und Anwendungen des Handführens schließt das Kapitel 3 mit der Betrachtung der Bediener-sicherheit ab.

Da es aus verschiedenen Gründen nicht immer günstig ist, den Roboter mit einem KMS auszurüsten, werden im nächsten Kapitel die Möglichkeiten der sensorlosen KB untersucht. Der Fokus liegt dabei auf der Substitution des KMS durch einen Algorithmus zum Schätzen von Kontaktkräften und -momenten aus den Motorenströmen. Nach der Betrachtung der theoretischen Grundlagen erfolgt dessen Überprüfung an einem Experimentalrobotersystem.

Anschließend wird im Kapitel 4 der Algorithmus zur KB im Gelenkraum ohne zusätzliche Sensorik ausführlich vorgestellt und getestet. Ein kurzer Blick auf Möglichkeiten der sensorlosen KMR mittels kommerziell verfügbarer Robotersysteme beendet dieses Kapitel.

Mit einer Zusammenfassung und einem Ausblick auf weitere mögliche Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der kraft-/ momentbasierten Mensch-Roboter-Interaktion schließt diese Arbeit mit Kapitel 5 ab.

## 2 Ausgewählte Grundlagen und Stand der Technik bei stationären Robotern

In vielen Fachbüchern wie z. B. [6], [21], [59], [67] und [79] werden die Grundlagen der stationären Robotik ausführlich behandelt. Dennoch sollen die wichtigsten Punkte, die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit notwendig sind, noch einmal kurz angesprochen werden.

### 2.1 Kinematik

Als Kinematik eines Roboters wird dessen Aufbau aus Gliedern und Gelenken bezeichnet, [27]. Besteht der Weg von der Roboterbasis bis zum Endeffektor aus nur einer kinematischen Kette, so spricht man von einem seriellen Roboter. Wird der Endeffektor durch mehrere kinematische Ketten bewegt, dann handelt es sich um einen parallelen Roboter. Für serielle und parallele Kinematiken sind jeweils verschiedenste Strukturen möglich. Davon haben sich einige Wenige im industriellen Einsatz durchgesetzt, [30]. Bei den seriellen Robotern sind das vor allem die Portalroboter, SCARA-Roboter und 6-Gelenk-Knickarm-Roboter. Hexa- bzw. Pentapoden sind die üblichen Typen paralleler Manipulatoren.

Aus der Kinematik lassen sich das direkte kinematische Problem (DKP) und das inverse kinematische Problem (IKP) ableiten. Das DKP berechnet aus den gegebenen Gelenkstellungen die Position und Orientierung des Endeffektors. Im Gegensatz dazu ist beim IKP die Stellung des Endeffektors vorgegeben und es sollen dazu passend die Gelenkpositionen berechnet werden.

Da sich der überwiegende Teil dieser Arbeit mit seriellen Manipulatoren beschäftigt, setzt sich dieses Kapitel nur mit deren Kinematik weiter auseinander.

#### 2.1.1 DKP serieller Roboter

Für das DKP eines seriellen Manipulators existiert immer eine eindeutige Lösung, die sich relativ einfach berechnen lässt. Sie beschreibt die Lage des Werkzeugkoordinatensystems (WKS) in Bezug auf das Basiskoordinatensystem (BKS) des Roboters. Im Allgemeinen geschieht dies durch die homogene Transformationsmatrix  ${}^0\underline{A}_T$ .

$${}^0\underline{A}_T = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{n} & \vec{s} & \vec{a} & \vec{p} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{R} & \vec{p} \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (2.1)$$

In (2.1) repräsentiert die Rotationsmatrix  $\underline{R} = [\vec{n} \ \vec{s} \ \vec{a}]$  die aktuelle Orientierung des WKS in Form von Einheitsvektoren der Koordinatenachsen und der Vektor  $\vec{p} = [p_x \ p_y \ p_z]^T$  die Position des Werkzeugmittelpunktes (*Tool Center Point, TCP*).

Die Transformationsmatrix  ${}^0\underline{A}_T$  setzt sich aus der Vorwärtstransformation des Manipulators  ${}^0\underline{A}_m$  und der Transformation vom Flanschkoordinatensystem zum WKS  ${}^m\underline{A}_T$  zusammen, wobei  ${}^0\underline{A}_m$  und  ${}^m\underline{A}_T$  wiederum homogene Transformationsmatrizen sind und  $m$  die Anzahl der Gelenke des Roboters ist.

$${}^0\underline{A}_T = {}^0\underline{A}_m \cdot {}^m\underline{A}_T \quad (2.2)$$

Die Lage des Flanschkoordinatensystems in Bezug auf das BKS erhält man durch Multiplikation der Teiltransformationsmatrizen  ${}^{i-1}\underline{A}_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) des Roboters, die die Beziehungen zwischen den einzelnen Gliedern beschreiben. Dazu wird jedem Glied ein Koordinatensystem zugeordnet. Ein allgemein übliches Verfahren, deren Lage festzulegen und daraus die Transformationsmatrizen zu erstellen, ist die Methode nach *Denavit-Hartenberg* [25], [97].

$${}^0\underline{A}_m = {}^0\underline{A}_1 \cdot {}^1\underline{A}_2 \cdot \dots \cdot {}^{m-1}\underline{A}_m, \quad {}^{i-1}\underline{A}_i = \begin{bmatrix} \underline{R}_i & \vec{p}_i \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dabei sind die Koordinatensysteme 0 und  $m$  das BKS bzw. das Flanschkoordinatensystem. Die Transformation vom Flansch- zum Werkzeugkoordinatensystem richtet sich nach dem verwendeten Werkzeug und kann vom Benutzer individuell festgelegt werden. Für einen Zwei-Finger-Parallelgreifer ist es z. B. üblich, sich an folgende Festlegung zu halten, siehe dazu auch [30] und [97]:

- Der Koordinatenursprung  $\vec{p}$  liegt zwischen den Fingerspitzen des Greifers,
- Dessen z-Achse zeigt entlang der Greiferfinger, senkrecht zum Roboterflansch (Vektor  $\vec{a}$ , *approach vector of hand*),
- Dessen y-Achse zeigt entlang der Bewegungsrichtung der Greiferfinger (Vektor  $\vec{s}$ , *sliding vector of hand*),
- Dessen x-Achse wird so gelegt, dass ein Rechtssystem entsteht (Vektor  $\vec{n}$ , *normal vector of hand*).

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit wird meistens davon ausgegangen, dass Flansch- und Werkzeugkoordinatensystem in der Nullstellung des Roboters mit der Orientierung des BKS übereinstimmen. Es findet lediglich eine Verschiebung des WKS gegenüber dem Flanschkoordinatensystem entlang dessen z-Achse statt.

### 2.1.2 Orientierungsrepräsentation

Üblicherweise erfolgt die Orientierungsangabe nicht als Rotationsmatrix wie in (2.1). Da die Vektoren  $\vec{n}$ ,  $\vec{s}$  und  $\vec{a}$  in  $\underline{R}$  die Länge 1 haben und senkrecht (orthogonal) zueinander sind, sind die 9 Elemente in  $\underline{R}$  teilweise voneinander abhängig. Zur vollständigen Angabe der Orientierung im 3-dimensionalen Raum sind aber 3 Verdrehwinkel ausreichend. Für die Wahl dieser Winkel gibt es unterschiedliche Möglichkeiten, die in der entsprechenden Literatur (z. B. [21], [67], [95] und [97]) ausführlich beschrieben werden. Leider sind die Bezeichnungen der Orientierungsrepräsentationen und ihrer einzelnen Winkel oft sehr unterschiedlich, so dass es leicht zu Verwechslungen kommen kann. Aus diesem Grunde werden die wichtigsten 3 Arten der Orientierungsangabe mittels Verdrehwinkeln an dieser Stelle noch einmal genau erläutert.

**XYZ-System** Eine gebräuchliche Methode zur Orientierungsrepräsentation ist u. A. das XYZ-System. Es wird auch als *Yaw-Pitch-Roll System* bezeichnet. Die Transformation vom BSK zum WKS erfolgt dabei, neben der Verschiebung um den Vektor  $\vec{p}$ , durch folgende 3 Drehungen:

1. Drehung um die x-Achse des BKS um den Winkel *Yaw* ( $\psi$ ),
2. Drehung um die y-Achse des BKS um den Winkel *Pitch* ( $\theta$ ),
3. Drehung um die z-Achse des BKS um den Winkel *Roll* ( $\phi$ ).

Da beim *Yaw-Pitch-Roll System* immer um die Achsen des BKS gedreht wird, erhält man die entsprechende Rotationsmatrix  $\underline{R}_{xyz}$ , bestehend aus den Verdrehwinkeln  $\psi$ ,  $\theta$  und  $\psi$ , durch Multiplikation von rechts nach links der Elementarrotationsmatrizen<sup>1</sup>.

$$\underline{R}_{xyz}(\psi, \theta, \phi) = ROT(z, \phi) \cdot ROT(y, \theta) \cdot ROT(x, \psi) \quad (2.4)$$

$$\underline{R}_{xyz}(\psi, \theta, \phi) = \begin{bmatrix} C\phi C\theta & C\phi S\theta S\psi - S\phi C\psi & C\phi S\theta C\psi + S\phi S\psi \\ S\phi C\theta & S\phi S\theta S\psi + C\phi C\psi & S\phi S\theta C\psi - C\phi S\psi \\ -S\theta & C\theta S\psi & C\theta C\psi \end{bmatrix}$$

Durch Vergleich geeigneter Elemente von  $\underline{R}$  und  $\underline{R}_{xyz}$ , lassen sich die Orientierungswinkel *Yaw*, *Pitch* und *Roll* bestimmen [67]. Es gilt<sup>2,3</sup>:

$$\psi = \arctan2(s_z, a_z), \quad \theta = \arcsin(-n_z), \quad \phi = \arctan2(n_y, n_x) \quad (2.5)$$

Das XYZ-System wird vor allem in der Luft- und Schifffahrt verwendet. Da die Drehungen immer im BKS stattfinden, ist es sehr anschaulich.

**ZY'X"-System** Manchmal kann es günstig sein, die einzelnen Rotationen nicht im BKS erfolgen zu lassen, sondern sie auf das schon gedrehte Koordinatensystem zu beziehen. Dies ist z. B. bei ZY'X"-System (*Roll-Pitch-Yaw System*) der Fall. Folgende 3 Drehungen finden nacheinander statt:

1. Drehung um die z-Achse des BKS um den Winkel  $\phi$ ,
2. Drehung um die y-Achse des neuen Koordinatensystems (y'-Achse) um den Winkel  $\theta$ ,
3. Drehung um die x-Achse des neuen Koordinatensystems (x''-Achse) um den Winkel  $\psi$ .

Da sich die Rotationen auf schon gedrehte Koordinatensysteme beziehen, erfolgt die Berechnung der Rotationsmatrix im Gegensatz zu (2.4) durch Multiplikation der Elementarrotationsmatrizen von links nach rechts.

$$\underline{R}_{zy'x''}(\phi, \theta, \psi) = ROT(z, \phi) \cdot ROT(y, \theta) \cdot ROT(x, \psi) \quad (2.6)$$

Man kann erkennen, dass die in (2.6) entstehende Rotationsmatrix identisch mit der von Gleichung (2.4) ist und es gilt:

$$\underline{R}_{zy'x''}(\phi, \theta, \psi) = \underline{R}_{xyz}(\psi, \theta, \phi) \quad (2.7)$$

Die Berechnung der Verdrehwinkel erfolgt daher nach (2.5).

<sup>1</sup>Zur Vereinfachung gelten folgende Abkürzungen:  $\sin(\alpha) = S\alpha$ ,  $\cos(\alpha) = C\alpha$ .

<sup>2</sup>Die Funktion  $\arctan2$  repräsentiert den Vier-Quadranten-Arkustangens. Damit lassen sich mehrdeutige Lösungen verhindern.

<sup>3</sup>Diese Lösung beschränkt sich auf einen Wertebereich von  $\theta = -90^\circ \dots 90^\circ$ .

**ZY'Z''-System** Eine weitere, häufige verwendete Möglichkeit zur Orientierungsrepräsentation sind die sog. Euler-Winkel z. B. im ZY'Z''-System. Die Rotationen beziehen sich wieder auf die schon gedrehten Koordinatenachsen. Im Einzelnen werden nacheinander folgende Rotationen durchgeführt:

1. Drehung um die z-Achse des BKS um den Winkel  $\phi$ ,
2. Drehung um die y-Achse des neuen Koordinatensystems (y'-Achse) um den Winkel  $\theta$ ,
3. Drehung um die z-Achse des neuen Koordinatensystems (z''-Achse) um den Winkel  $\psi$ .

Die Gesamttrotationsmatrix berechnet sich dann nach Gleichung (2.8).

$$\begin{aligned} \underline{R}_{zy'z''}(\phi, \theta, \psi) &= ROT(z, \phi) \cdot ROT(y, \theta) \cdot ROT(z, \psi) \\ \underline{R}_{zy'z''}(\phi, \theta, \psi) &= \begin{bmatrix} C\phi C\theta C\psi - S\phi S\psi & -C\phi C\theta S\psi - S\phi S\psi & C\phi S\theta \\ S\phi C\theta S\psi + C\phi S\psi & -S\phi C\theta S\psi - C\phi C\psi & S\phi S\theta \\ -S\theta C\psi & S\theta S\psi & C\theta \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2.8)$$

Daraus lassen sich, ähnlich wie in Gleichung (2.5), die Orientierungswinkel im ZY'Z''-System ermitteln [67]. Es gilt<sup>4</sup>:

$$\phi = \arctan2(a_y, a_x), \quad \theta = \arccos(a_z), \quad \psi = \arctan2(s_z, -n_z) \quad (2.9)$$

Abhängig von der Wahl der Orientierungsrepräsentation kann die Position des WKS, statt durch die Transformationsmatrix  ${}^0\underline{A}_T$ , nun auch mit dem Vektor  $\vec{P}$  beschrieben werden.

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \phi \\ \theta \\ \psi \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

## 2.2 Dynamik

Die Dynamik eines Roboters beschreibt dessen Bewegungsverhalten als Folge auf ihn einwirkender Kräfte und Momente. Diese können zum einen durch die Antriebs Elemente hervorgerufen werden, als auch von außen auf den Roboter wirken, z. B. in Form von Kontaktkräften.

Zunächst soll der unregelmäßige Roboter im freien Raum etwas genauer betrachtet werden. Zur Berechnung seines dynamischen Verhaltens gibt es verschiedene Möglichkeiten. Dazu zählen die Methoden nach *Newton-Euler* und *Lagrange*. Das Prinzip von *Newton-Euler* basiert auf Impuls- und Drallsatz der Teilkörper und der Formalismus nach *Lagrange* auf der kinetischen und potentiellen Energie des Systems, siehe dazu auch [57] und [83]. Beide Methoden liefern als Ergebnis die sog. Bewegungsgleichungen in Form von verkoppelten, nichtlinearen Differenzialgleichungen. Mit steigender Gelenkanzahl des Roboters nimmt die Komplexität der Differenzialgleichungen stark zu, so dass z. B. für einen üblichen 6-Gelenk-Knickarmroboter bereits umfangreiche Berechnungen notwendig sind. Außerdem ist deren Parametrierung an

<sup>4</sup>Diese Lösung beschränkt sich auf einen Wertebereich von  $\theta = -90^\circ \dots 90^\circ$ .

ausführliche Versuche und Messungen gebunden, siehe dazu auch [55]. Für gebräuchliche Industrieroboter wurden bereits Modellbildungen durchgeführt, so z. B. für die Roboter vom Typ MANUTEC r3 [78], *PUMA 560* [10], [60] und COMAU Smart [15]. Die so errechneten und parametrisierten Bewegungsgleichungen können in die folgende Matrixschreibweise gebracht werden.

$$\vec{\tau} = \underline{M}(\vec{q})\vec{\ddot{q}} + \vec{C}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) + \vec{V}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) \quad (2.11)$$

Die durch die Antriebe in den Gelenken wirkenden Kräfte bzw. Momente sind im Vektor  $\vec{\tau}$  enthalten. Die Matrix  $\underline{M}$  in (2.11) ist eine quadratische Matrix mit  $m \times m$  Elementen und wird auch als Trägheitsmatrix bezeichnet. Die Konstante  $m$  ist gleich der Anzahl der Gelenke des Roboters. Der Vektor  $\vec{C}$  ist ein  $m$ -Spaltenvektor und enthält die auf die Gelenke wirkenden Coriolis- und Zentrifugalkräfte bzw. -momente. Die Einflüsse aufgrund der Gewichtskraft repräsentiert der Vektor  $\vec{G}$  und die Reibmomente (bzw. -kräfte) sind in  $\vec{V}$  enthalten. Die Gleichung (2.11) bildet die Grundlage für das Studium des dynamischen Verhaltens eines jeden stationären Roboters.

### 2.3 Antriebskonzepte

Der überwiegende Teil aller Industrieroboter wird durch Elektromotoren angetrieben. Dabei handelt es sich meistens um bürstenlose AC Servomotoren, siehe auch [57]. In geringer Anzahl werden auch hydraulische [39] und pneumatische [22] Antriebskonzepte realisiert.

Werden Elektromotoren verwendet, dann erfolgt die Kraftübertragung zum Gelenk üblicherweise über Getriebe mit hoher Untersetzung ( $k_G \approx 0,01 \dots 0,02$ ), z. B. sog. *Harmonic Drives*. Ist der Motor aufgrund konstruktiver Gegebenheiten nicht direkt am Gelenk angebracht, dann kommen Zahnriemen- oder Stirnradgetriebe zur Anwendung. Bei Parallelkinematiken sind auch häufig Spindelgetriebe im Einsatz, um Linearbewegungen zu erzeugen. Diese und weitere Getriebearten sind ausführlich in [112] beschrieben und dargestellt.

Vereinfacht kann das Getriebe, ohne Berücksichtigung von Loosen, Reibung, etc., als Proportionalglied betrachtet werden, wobei die Getriebeübersetzung  $k_G$  das Verhältnis zwischen Antriebs-  $\dot{q}_M$  und Abtriebsgeschwindigkeit  $\dot{q}$  definiert:

$$\dot{q} = k_G \dot{q}_M \quad (2.12)$$

Die Übertragung vom Motormoment  $\tau_M$  zum Gelenkmoment  $\tau$  erfolgt mit der reziproken Getriebeübersetzung:

$$\tau = \frac{1}{k_G} \tau_M \quad (2.13)$$

Um die auf die Antriebe wirkenden Gewichtskräfte zu minimieren, wird häufig ein sog. Lastausgleich durchgeführt. Vor allem bei seriellen Kinematiken kann dies notwendig sein. Der Lastausgleich basiert auf dem Einbau von Masse-/ Federsystemen in den Gliedern des Manipulators oder auf hydraulischen Systemen. Dadurch erhöht sich allerdings die Trägheit des Roboters.

Die Ansteuerung von Elektromotoren geschieht über sog. Leistungssteller, z. B. auf der Basis von Frequenzumrichtern. Bei hydraulischen Manipulatoren kommen Proportional- oder Servoventile zum Einsatz.

### 2.4 Sensorik

Unverzichtbar für den Betrieb eines Roboters ist dessen Ausrüstung mit geeigneter Sensorik. Diese wird benötigt, um den aktuellen Systemzustand zu erfassen bzw. Umgebungssituationen

zu erkennen. Eine Übersicht über die speziell an Robotern eingesetzten Sensoren bietet [88]. Die Wichtigsten und die, die für diese Arbeit von besonderer Bedeutung sind, sollen an dieser Stelle noch einmal kurz erwähnt werden.

#### 2.4.1 Interne Sensorik

**Position/ Geschwindigkeit** Die interne Sensorik eines Roboters beschränkt sich in der Regel darauf, die Gelenkpositionen und -geschwindigkeiten zu messen. Bei den meisten gängigen Industrierobotern geschieht dies durch sog. Resolver. Dabei handelt es sich um ein kombiniertes inkrementelles/absolutes Messsystem zur Winkelmessung. Die Geschwindigkeit kann durch Differenzieren des Lagemesswertes ermittelt werden. Teilweise kommen auch rein inkrementelle Geber (IGR) zur Anwendung. Beide Varianten sind auch für Linearachsen möglich.

Zur absoluten Positionsmessung eignen sich z. B. Potentiometer oder Absolutkodierer. Die Gelenkgeschwindigkeit kann auch mittels Tachogeneratoren gemessen werden.

**Kraftwandler** Eine weitere Kategorie der internen Sensorik sind Kraftwandler. Obgleich sie meist nur zu Forschungszwecken eingesetzt werden, bieten sich doch für die Zukunft interessante Anwendungsmöglichkeiten. Kraftwandler sind meistens aus Dehnmessstreifen aufgebaut.

Werden die Dehnmessstreifen an den Roboterarmen angebracht, dann lässt sich die Biegekraft messen. Damit kann die Verformung des Manipulatorarmes aufgrund von Belastungen, z. B. Zuladung und Beschleunigung bestimmt werden. Um Positioniergenauigkeiten wegen unterschiedlicher Belastungen zu vermeiden, sind die heutigen Industrieroboter sehr massiv ausgeführt. Somit erzielt man eine hohe Steifigkeit. Daraus folgen aber auch sehr große Massen, die entsprechend hohe Antriebsleistungen notwendig machen. Durch die Messung der Verbiegung könnten die Positionierfehler aufgrund von Belastung korrigiert und somit auch die Masse des Roboters verringert werden. Man spricht dann auch von flexiblen Robotern.

Eine weitere Möglichkeit ist das Anbringen der Dehnmessstreifen an der Gelenkwelle. Es lassen sich dann die Torsionsmomente, also die Verdrehung der Welle messen. Diese können dann zur Verbesserung der Positionsregelung oder zur KMR verwendet werden, siehe dazu auch [103] und [130]. Bei Robotern mit flexiblen Gelenken lässt sich mit Hilfe der gemessenen Gelenkmomente wieder eine Belastungsadaptation durchführen. Sind die Gelenke des Roboters genügend steif, dann können die von außen auf den Roboter einwirkenden Kontaktkräfte und -momente bestimmt und für die Regelung verwendet werden. Darauf wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch etwas genauer eingegangen.

#### 2.4.2 Externe Sensorik

Externe Sensoren dienen dazu, die Umwelt des Roboters zu erfassen. Dazu zählt der Einsatz von Kameras, der in einem gewissen Umfang auch industriell satt findet. Er bietet ein breiteres Feld für Forschungsaktivitäten. Sehr aktuell ist z. B. das sog. *Visual Servoing*, das sich mit dem direkten Integrieren der Bildinformation in die Roboterregelung beschäftigt.

Des Weiteren ist auch die Ausrüstung eines Roboters mit Entfernungssensoren (z. B. Ultraschallsensoren) und *Laser Scannern* vorstellbar.

**Kraft-/ Momentsensoren (KMS)** Am Roboter angebrachte KMS messen von außen auf ihn wirkende Kräfte und Momente. Sie werden, wie schon erwähnt, nur sehr selten eingesetzt.

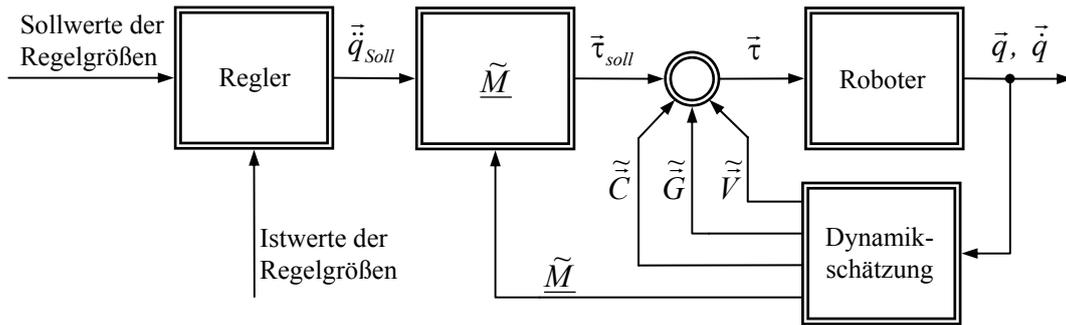


Abbildung 2.1: Modellbasierte Regelung eines Roboters.

Da sich diese Arbeit zu einem großen Teil mit der kraft-/ momentbasierten Steuerung von Robotern beschäftigt, soll als Einzige die Funktionsweise des KMS hier näher erläutert werden.

Für die stationäre Robotik sind sog. 6-Komponenten-KMS von der größten Bedeutung. Der Sensor wird, bis auf wenige Sonderfälle [62], am Roboterflansch montiert und misst die Kräfte und Momente in jeweils allen drei kartesischen Raumrichtungen. Es kann zwischen zwei gängigen Funktionsprinzipien unterschieden werden, [34].

KMS mit hoher Steifigkeit basieren auf vier Verformkörpern, die kreuzförmig angeordnet sind, [100]. An ihnen sind Dehnmessstreifen angebracht, mit denen die Verformung und somit über das *Hookesche Gesetz* auch Kräfte und Momente gemessen werden können. Mit Hilfe der sog. Kalibrierungsmatrix lassen sich die Messwerte der Dehnmessstreifen in die 6 kartesischen Komponenten von Kraft und Moment überführen. Bekannte Hersteller dieser steifen KMS sind die Firmen JR3 [48] und ATI [9], vertrieben in Deutschland durch IPR [47] bzw. SCHUNK [92].

Bei nachgiebigen KMS ist die Verformung aufgrund von einwirkenden Kräften und Momenten größer. Sie wird durch mehrere Feder-elemente realisiert, die zwischen den Montageplatten angebracht sind. Die Messung der Auslenkungen erfolgt optisch durch sog. PSD-Elemente (*Position Sensitive Detector*). Daraus können dann wieder die kartesischen Kräfte und Momente berechnet werden. Ein Beispiel für einen nachgiebigen KMS ist der FTC-Sensor (*Force Torque Compliance Sensor*) von SCHUNK [92], der von der DLR [54] entwickelt wurde.

Neben den kommerziell vertriebenen KMS, werden von verschiedenen Forschungseinrichtungen Speziallösungen gefertigt, wie z. B. ein 2-Komponenten-Kraftsensor, siehe dazu [63].

## 2.5 Regelungskonzepte

Betrachtet man den Roboter als Regelstrecke, dann stellt er nach Gleichung (2.11) ein nicht-lineares, verkoppeltes Mehrgrößensystem dar. Oft ist es notwendig, für den Entwurf und die Parametrierung einer Regelung, die Regelstrecke zu linearisieren und zu entkoppeln. Dazu existieren unterschiedliche Ansätze.

### 2.5.1 Modellbasierte Regelung

Bei der modellbasierten Regelung (siehe auch [21] und [60]) wird der Regler in einen modellbasierten und einen fehlerbasierten Anteil getrennt. Sie benötigt ein möglichst genaues dynamisches Modell des Roboters. Damit können ständig aus den aktuellen Gelenkpositionen  $\vec{q}$  und -geschwindigkeiten  $\vec{q}$  die Schätzwerte  $\tilde{M}$ ,  $\tilde{C}$ ,  $\tilde{G}$  und  $\tilde{V}$  der Parameter von Gleichung

(2.11) berechnet werden. Die Wirkung von Gewicht-, Zentrifugal-, Coriolis- und Reibkräften bzw. -momenten wird durch positives Aufschalten von  $\tilde{C}$ ,  $\tilde{G}$  und  $\tilde{V}$  zur Stellgröße kompensiert.

$$\vec{\tau} = \vec{\tau}_{soll} + \tilde{C} + \tilde{G} + \tilde{V} \quad (2.14)$$

Als Stellgröße werden dabei die Gelenkmomente bzw. -kräfte angesehen. Im Falle, dass die idealen Parameter geschätzt wurden, vereinfacht sich (2.11) zu (2.15).

$$\vec{\tau}_{soll} = \underline{M}(\vec{q})\vec{\ddot{q}} \quad (2.15)$$

Bringt man außerdem die Schätzung der Trägheitsmatrix  $\tilde{M}$  in die Regelung ein

$$\vec{\tau}_{soll} = \tilde{M}\vec{\ddot{q}}_{soll}, \quad (2.16)$$

dann folgt bei idealen Schätzwerten ( $\underline{M}\tilde{M}^{-1} = \underline{I}$ ) die vollständige Entkopplung und Normierung der einzelnen Gelenke.

$$\vec{\ddot{q}}_{soll} = \vec{\ddot{q}} \quad (2.17)$$

Der eigentliche Regler (fehlerbasierter Anteil der Regelung) gibt dann die Gelenkbeschleunigungen als Stellgröße aus. Er kann innerhalb gewisser dynamischer Grenzen frei parametrisiert werden und muss nur die Ungenauigkeiten der Dynamik-Schätzung ausgleichen. Je nach Art der Regelgröße kommen lineare Standardregler zum Einsatz. Modellbasierte Regelungen, wie in Abb. 2.1 dargestellt, werden in der Regel nur an Forschungseinrichtungen verwendet.

### 2.5.2 Kaskadenregelung

Setzt man voraus, dass Elektromotoren als Antriebe für einen Industrieroboter verwendet werden und diese über Getriebe mit den Gelenken verbunden sind, dann liegen die Werte für übliche Getriebeübersetzungen in der Größenordnung von  $k_g = 0,01$ . Betrachtet man die Gleichung (2.13) in entgegengesetzter Richtung (vom Abtrieb zum Antrieb), so werden auch die in (2.11) wirkenden Momente  $\vec{C}$ ,  $\vec{G}$  und  $\vec{V}$  in Richtung Motor mit dem Faktor  $k_g$  übertragen. Am Motor wirkt somit nur noch ein Bruchteil des Störmomentes. Die Übertragung von Massenträgheitsmomenten  $\underline{M}$  durch ein Getriebe geschieht mit der quadratischen Getriebeübersetzung. In diesem Beispiel also mit dem Faktor  $k_g^2 = 10^{-4}$ . Die am Motor durch den Manipulatorarm wirkenden Massenträgheitsmomente sind also relativ klein. Sie liegen in der Größenordnung der Läuferträgheitsmomente der Elektromotoren.

Erfolgt nun die Regelung stufenweise mit steigenden Zeitkonstanten der Regelgröße (z. B. Strom, Geschwindigkeit, Weg), dann spricht man von einer Kaskadenregelung.  $\vec{C}$ ,  $\vec{G}$  und  $\vec{V}$  werden dabei als Störungen betrachtet, die vom Inneren der Kaskade mit hoher Bandbreite ausgeregelt werden. Die Kaskadenregelung ist die übliche Reglerstruktur bei kommerziellen Robotern und wird auch als dezentrale Gelenkregelung bezeichnet [116]. Abb. 2.2 zeigt einen Kaskadenregler mit der Gelenkposition als Regelgröße. Für die einzelnen Kaskaden werden in der Regel lineare Standardregler eingesetzt, [64].

### 2.5.3 Sonstige Regler

Neben den eben beschriebenen zwei Regelungskonzepten, können auch andere Regelalgorithmen bzw. auch ihre Kombination an Robotern eingesetzt werden. Dazu zählen u. A. Folgende:

*Adaptive Regler* passen sich an Änderungen der Regelstrecke an. Bei Robotern variieren die Streckenparameter z. B. stark mit der Endeffektorposition. Außerdem wird das Verhalten

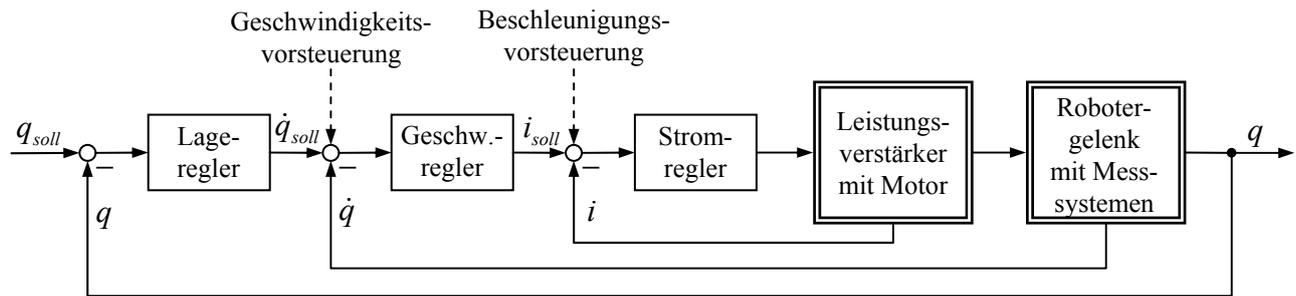


Abbildung 2.2: Kaskadenregelung eines Robotergelenks.

maßgeblich durch die Zuladung bestimmt. Ist der Roboter in direktem Kontakt mit seiner Umgebung, dann gehen auch deren Eigenschaften in die Regelstrecke ein. Für adaptive Regler existieren verschiedenste Ansätze, siehe dazu z. B. [8] und speziell für stationäre Roboter [76], [113].

*Prädiktive Regler* basieren auf der Minimierung eines Gütefunktional, das u. A. die zukünftigen Regelabweichungen enthält. Es ist daher notwendig, den Verlauf der Regelgröße mittels eines Prozessmodells vorherzusagen. Einer der bekanntesten prädiktiven Regelalgorithmen ist der sog. GPC (*Generalized Predictive Control*), [20]. In [102] wird der Einsatz prädiktiver Regelalgorithmen an stationären Robotern untersucht.

*Zustandsregler* beachten neben der Regelabweichung zusätzlich die inneren Zustände der Regelstrecke bei der Berechnung der Stellgröße. Die sog. Zustandsrückführung kann durch direkte Messung (falls möglich) oder durch das Verwenden von Beobachtern erfolgen.

Bei *Fuzzy-Reglern* werden die Eingangssignale zunächst mit Hilfe sog. linguistischer Variablen und Zugehörigkeitsfunktionen fuzzyfiziert. Anschließend erfolgt die Verknüpfung mit sog. Fuzzyoperatoren. Die Stellgrößen ergeben sich nach der Defuzzyfizierung.

Regler, die auf der Basis *neuronaler Netzen* arbeiten, verknüpfen die Eingangssignale mit Hilfe eines Netzes aus Neuronen, um entsprechende Ausgangsgrößen für Stelleingriffe zu erhalten. Jedes Neuron besteht aus einer sog. Aktivierungsfunktion. Die Eingänge der Neuronen sind mit Wichtungsfaktoren versehen, deren Werte durch Trainieren angelernt werden. Mit der Anwendung neuronaler Netze zur Regelung von Industrierobotern beschäftigt sich z. B. [80].

## 2.6 Positionsregelung

Der überwiegende Teil aller Industrieroboter ist positionsgeregt. Die eigentliche Regelung erfolgt dabei hauptsächlich im Gelenkraum. Die Sollwerte der Gelenkpositionen werden durch den sog. Trajektoriengenerator als ruckfreie Bewegung vorgegeben, egal ob es sich um eine Punkt zu Punkt Bewegung, eine Linearbewegung oder eine Kreisbewegung handelt. Durch die Rückführung der Istpositionen der Gelenke wird der Regelkreis geschlossen. Für die Positionsregelung existieren verschiedenste Konzepte, wobei bei Industrierobotern mit elektrischen Antrieben (Elektromotoren) häufig die Kaskadenregelung, wie in Abb. 2.2 dargestellt, verwendet wird. Die unterste Ebene bildet dabei die Regelung der Motorenströme. Üblicherweise kommen dort PI-Regler zum Einsatz. Die Stromregelung ist direkt im Leistungssteller integriert. Die nächste Ebene stellt die Geschwindigkeitsregelung der Gelenke dar. Sehr häufig arbeiten dort wieder PI-Regler. Die Messung der Gelenkgeschwindigkeiten kann dabei z. B.

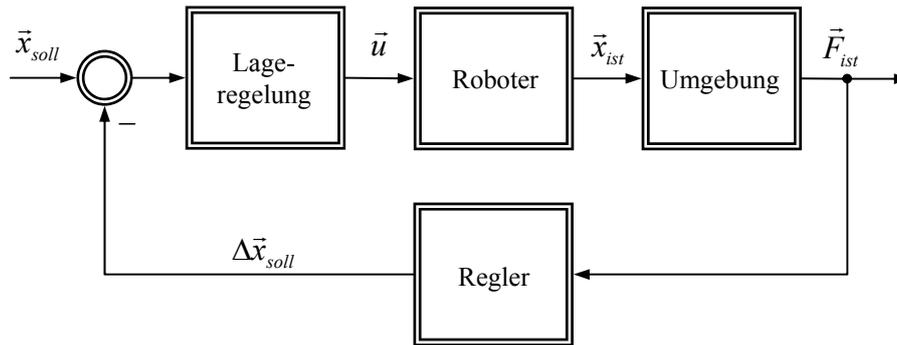


Abbildung 2.3: Signalflussbild der indirekten Kraft-/ Momentregelung.

durch Tachogeneratoren, Resolver oder inkrementelle Drehgeber erfolgen. In vielen Fällen ist die Geschwindigkeitsregelung ebenfalls im Leistungssteller enthalten. Schließlich folgt als äußerste Schleife die Lageregelung, z. B. mit einem P-Regler. Zur Vermeidung von Schleppfehlern sind zusätzlich Geschwindigkeits- und Beschleunigungsvorsteuerung üblich.

Neben der Kaskadenregelung, die bei fast allen kommerziellen Robotersystemen im Einsatz ist, sind auch andere Regelungskonzepte zur Positionsregelung ausführlich untersucht worden. Dazu zählen vor allem die schon beschriebene modellbasierten Regelung, aber auch Ansätze mit Zustandsreglern, adaptiven Reglern, Fuzzy-Reglern und Regelungen, die auf neuronalen Netzen basieren. Diese alternativen Konzepte zur Positionsregelung finden aber bisher keinen industriellen Einsatz.

Neben der Regelung der einzelnen Gelenke existieren auch Ansätze für den kartesischen Raum. In diesem Fall werden letztendlich nur die Stellgrößen in den Gelenkraum transformiert. Der eigentliche Algorithmus arbeitet im kartesischen Raum.

## 2.7 Kraft-/ Momentregelung

Wie eben beschrieben basieren die meisten Regelungen von Robotern auf der Rückführung der aktuellen Gelenkpositionen. Ist der Manipulator jedoch im direkten physischen Kontakt mit seiner Umgebung, dann ist die Lageregelung ungeeignet. Selbst kleinste Positionsänderungen können bei einer sehr steifen Umgebung zu unzulässig hohen Kräften führen. Neben dem Einsatz der schon erwähnten passiven Nachgiebigkeiten zur sog. passiven Kraftregelung [35], kann die Rückführung von Kontaktkräften bzw. -momenten sinnvoll sein. Man spricht dann von Kraft-/ Momentregelung (KMR) oder auch aktiver KMR. Sie lässt sich nach unterschiedlichen Gesichtspunkten klassifizieren. Eine sehr gute Übersicht dazu bieten [119], [128] und [129]. Generell kann zwischen indirekter und direkter KMR unterschieden werden.

### 2.7.1 Indirekte Kraft-/ Momentregelung

Im Gegensatz zur direkten KMR, erfolgt bei der indirekten (impliziten) KMR keine direkte Vorgabe der Sollwerte von Kräften und/oder Momenten. Eine mögliche Struktur der impliziten KMR ist in Abb. 2.3 dargestellt. Dort wird die Sollposition  $\vec{x}_{soll}$  durch  $\Delta\vec{x}_{soll}$  in Abhängigkeit von den Kontaktkräften bzw. -momenten verändert. Diese stellen sich dann entsprechend den Werten von  $\vec{x}_{soll}$  und der Wahl und Parametrierung des Reglers ein. Im Allgemeinen spricht man bei dieser Art der KMR auch von Impedanzregelung, [46]. Die me-

chanische Impedanz  $Z$  bildet dann die Grundlage des Regelgesetzes. Sie ist im Bildbereich durch das Verhältnis zwischen Kraft und Geschwindigkeit definiert<sup>5</sup>.

$$Z(p) = \frac{F(p)}{\dot{x}(p)} \quad (2.18)$$

In der Regel wird mit Hilfe der Impedanz auch die Umgebung für den Kontaktfall modelliert. Dabei ist fast immer der Ansatz eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems ausreichend. Dessen Verhalten wird mit der Masse  $m$ , der Dämpfung  $d$  und der Federkonstante  $k$ , durch die folgende Differenzialgleichung beschrieben:

$$F(t) = m\ddot{x}(t) + d\dot{x}(t) + kx(t) \quad (2.19)$$

Im Bildbereich gilt dann:

$$\frac{F(p)}{x(p)} = mp^2 + dp + k \quad (2.20)$$

Aufgabe der Impedanzregelung ist es nun, eine festgelegte Impedanz zu erzeugen. Diese sog. Zielimpedanz und die Kontaktumgebung bestimmen das Verhalten des Robotersystems. Dazu werden die Istkräfte und -momente über den Impedanzregler zurückgeführt. Für die positionsbasierte Impedanzregelung eines Freiheitsgrades gilt dann das folgende Stellgesetz:

$$\frac{\Delta x_{soll}(p)}{F_{ist}(p)} = \frac{1}{k + dp + mp^2} = \frac{1}{pZ(p)} \quad (2.21)$$

Von der Impedanzregelung lassen sich die Steifigkeits- und die Dämpfungsregelung [117] ableiten. Dabei ist nur die jeweilige Komponente der Impedanz aktiv. Die Gleichung (2.22) zeigt das Stellgesetz der Steifigkeitsregelung,

$$\frac{\Delta x_{soll}(p)}{F_{ist}(p)} = \frac{1}{k}, \quad (2.22)$$

und (2.23) das der Dämpfungsregelung.

$$\frac{\dot{x}_{soll}(p)}{F_{ist}(p)} = \frac{1}{d} \quad (2.23)$$

Bei der Betrachtung mehrerer Freiheitsgrade lassen sich die einzelnen Parameter für Steifigkeit, Dämpfung und Masse in der Steifigkeits-, Dämpfungs- bzw. Massenmatrix ( $\underline{k}$ ,  $\underline{d}$ ,  $\underline{m}$ ) zusammenfassen.

### 2.7.2 Direkte Kraft-/ Momentregelung

Bei der direkten (expliziten) KMR werden aus den Differenzen zwischen Soll- und Istkräften bzw. -momenten direkt die notwendigen Bewegungen des Roboters berechnet. Der daraus resultierende Stelleingriff kann je nach verwendetem Robotersystem auf unterschiedlichen Ebenen erfolgen. Deshalb können Ausgangsgrößen der KMR Gelenkmomente bzw. -kräfte oder auch Sollgeschwindigkeiten oder Sollpositionen sein. Die Abb. 2.4 zeigt das Signalfussbild einer direkten KMR, wobei  $\vec{u}$  der verallgemeinerte Stellgrößenvektor ist.

<sup>5</sup>Mitunter wird für die Impedanz auch  $Z(p) = \frac{F(p)}{x(p)}$  angesetzt.

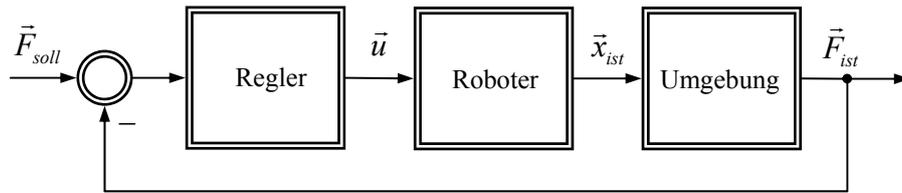


Abbildung 2.4: Signalflussbild der direkten Kraft-/ Momentregelung.

Findet die Steuerung des Roboters auf der Gelenkmomentebene statt, dann werden durch den Regelalgorithmus zunächst die Stellkräfte/ -momente im kartesischen Raum berechnet. Anschließend erfolgt nach Gleichung (3.39) mit Hilfe der transponierten Jacobi-Matrix deren Transformation in den Gelenkraum. Diese Methode der direkten KMR wird in vielen Publikationen betrachtet. Sie ist aber für den Einsatz an Industrierobotern ungeeignet, da dort meist keine Möglichkeit des Zugriffes auf die Gelenkmomente besteht. Des Weiteren wird auf die sonst übliche Struktur der Kaskadenregelung vollständig verzichtet, was Probleme in Bezug auf Störungen und Nichtlinearitäten mit sich bringen kann. Diese müssen allein von der KMR behandelt werden.

Ebenfalls möglich ist die Steuerung des Roboters auf der Ebene der Gelenkgeschwindigkeiten (*Velocity Based Force Control*, z. B. [94]) oder -positionen (*Position Based Force Control*, z. B. [24], [93]). Die Überführung der Stellgrößen in den Gelenkraum geschieht dabei mit Hilfe der inversen Jacobi-Matrix (*Inverse Jacobian Control*) oder durch die Rückwärtstransformation des Manipulators.

Für die KMR industrieller Roboter ist die positionsbasierte Regelung von größter Bedeutung. Untersuchungen an unterschiedlichen Robotersystemen wurden dazu z. B. in [85], [101] und [110] vorgenommen.

Einen Sonderfall der direkten KMR stellt die Admittanzregelung dar. Im Gegensatz zur Impedanzregelung, bei der der vorgegebene Positionssollwert die Kontaktkraft bestimmt, wird bei der Admittanzregelung die Sollkraft vorgegeben, die dann zu einer Positions- bzw. Geschwindigkeitsänderung des Endeffektors führt. Im Regelgesetz ist dann die mechanische Admittanz  $A$  als Kehrwert der Impedanz enthalten:

$$A = \frac{1}{Z} \quad (2.24)$$

### 2.7.3 Hybride Kraft-/ Lageregelung

Nicht immer ist es sinnvoll, in allen 6 kartesischen Freiheitsgraden die Kraft bzw. das Moment zu regeln. Die hybride Kraft-/ Lageregelung [66], [87] (siehe auch Abb. 2.5) unterscheidet zwischen kraft-/ moment- und lagegeregelten Freiheitsgraden, die orthogonal zueinander sind. Mit der  $6 \times 6$ -Selektionsmatrix  $\underline{S}$  werden die kraft-/ momentgeregelten Koordinatenachsen definiert, indem die entsprechenden Elemente auf der Hauptdiagonalen mit 1 besetzt werden. Alle anderen Matrixelemente sind 0. Die lagegeregelten Achsen werden durch die Selektionsmatrix  $\tilde{\underline{S}}$  mit  $\tilde{\underline{S}} = \underline{I} - \underline{S}$  vorgegeben.

Die hybride Kraft-/ Lageregelung bietet einen Ansatz für die Lösung vieler Aufgaben, bei denen der Roboter im Umgebungskontakt ist, wie z. B. das sehr häufig diskutierte „Stift-in-Loch-Problem“, [86]. Deshalb ist dieser Ansatz auch in einem der wenigen kommerziell verfügbaren Produkte auf dem Gebiet der Roboterkraftregelung enthalten. Die Fa. AMATEC

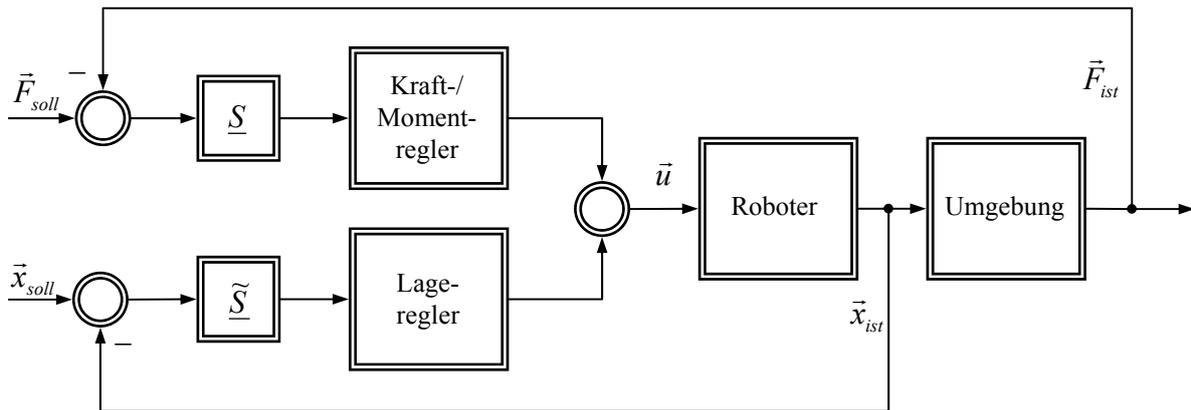


Abbildung 2.5: Signalflussbild der hybriden Kraft-/ Lageregelung.

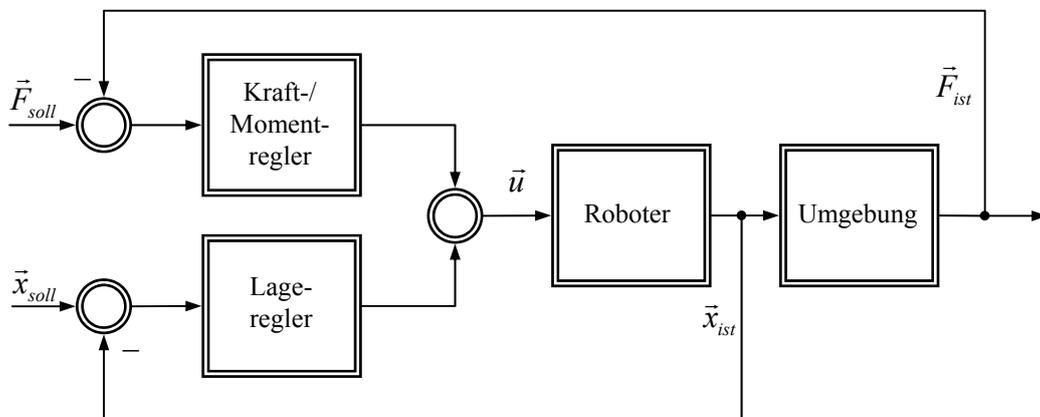


Abbildung 2.6: Signalflussbild der parallelen Kraft-/ Lageregelung.

Robotics GmbH bietet als Tochter des Roboterherstellers KUKA ein Technologiepaket für die KMR namens FTCtrl (*Force Torque Control*) an. Damit können die einzelnen kartesischen Freiheitsgrade zur KMR freigeschaltet und parametrisiert werden. Einige Beispielanwendungen wurden damit in [110] realisiert.

#### 2.7.4 Parallele Kraft-/ Lageregelung

Im Gegensatz zur hybriden findet bei der parallelen Kraft-/ Lageregelung (siehe z. B. [18] und [19]) von Abb. 2.6 keine Aufteilung der Freiheitsgrade nach einer Regelgröße statt. Durch Addition der Stellgrößen von Kraft- und Lageregler überlagern sich beide Regelkreise. Die Wahl der Reglerstrukturen entscheidet über die Prioritätenverteilung zwischen Kraft- und Lageregler. Üblicherweise ist im freien Raum die Regelabweichung des Lageregler null. Bei Umgebungskontakt dominiert der Kraftregler, so dass die gewünschte Kontaktkraft erreicht wird und es zu einer Lageabweichung kommt.

### 3 Kraftgeführte Bewegungen

Bei der Verwendung von Industrierobotern ist es notwendig, Positionen und Orientierungen, die während des Prozesses angefahren werden sollen, zu definieren. Dies kann u. A. durch direkte numerische Eingabe während der Programmierung geschehen (*Off Line* Programmierung, [114]). Die Zielposition und -orientierung wird dann entweder in Form kartesischer Koordinaten oder durch die Gelenkstellungen vorgegeben. Allerdings ist die numerische Eingabe sehr aufwendig, da die Zielpositionen erst vermessen werden müssen. Deshalb werden Zielposition und -orientierung häufig durch Verwendung des Handbediengerätes angelernt, man spricht vom sog. *Teach In* (*On Line* Programmierung, [114]). Üblicherweise hat der Benutzer mit Hilfe des Handbediengerätes folgende 3 Möglichkeiten zur Steuerung des Roboters:

- Verfahren einzelner Gelenke,
- Bewegung des Endeffektors im Basis- oder Weltkoordinatensystem,
- Bewegung des Endeffektors im Werkzeugkoordinatensystem (WKS).

Das Handverfahren des Roboters erfolgt dabei durch entsprechende Tasten am Handbediengerät für positive und negative Bewegungsrichtungen. Diese sind entweder die Bewegungsachsen der einzelnen Gelenke oder die Koordinatenachsen von Basis- oder Werkzeugkoordinatensystem. Im Falle der kartesischen Bewegungssteuerung sind 3 translatorische Bewegungen entlang der Koordinatenachsen zur Änderung der Position und 3 rotatorische Bewegungen um die Koordinatenachsen zum Ändern der Orientierung möglich.

Eine weitere Möglichkeit ist die sensorgeführte Roboterprogrammierung, [37]. Dazu bieten einige Typen von Handbediengeräten standardmäßig oder als zusätzliche Option die Möglichkeit der Bewegungssteuerung mit Hilfe der sog. *Space-Mouse*, [42]. Dieses Eingabegerät basiert auf einem optischen Sensor, [45]. Es ermöglicht ein intuitives Handverfahren des Roboters, was aber dennoch etwas Geschick erfordert. Manche Hersteller von Industrierobotern erlauben außerdem das Anbringen der *Space-Mouse* in der Nähe des Endeffektors am Unterarm des Roboters, [116]. Dies hat einen erhöhten Bedienkomfort beim Handverfahren zur Folge. Eine weitaus intuitivere Form des *Teach In* wäre das direkte Führen des Roboters durch Anfassen des Endeffektors. Dabei ist der Bediener im direkten Kontakt mit dem Roboter und sorgt durch entsprechende Krafteinwirkung für dessen Bewegung. In diesem Falle spricht man auch von kraftgeführter Bewegung (KB).

Im Vergleich zu herkömmlichen Methoden des *Teach In* besitzt das Handführen folgende Vorteile:

- Wie schon kurz erwähnt ist das Handführen weitaus intuitiver als die Steuerung des Roboters per Tastatur oder *Space Mouse*. Deshalb wird das *Teach In* weniger Zeit in Anspruch nehmen und ist daher kostengünstiger. Außerdem ist keine spezielle Qualifizierung des Personals erforderlich. Bei herkömmlichen Methoden des *Teach In* ist eine

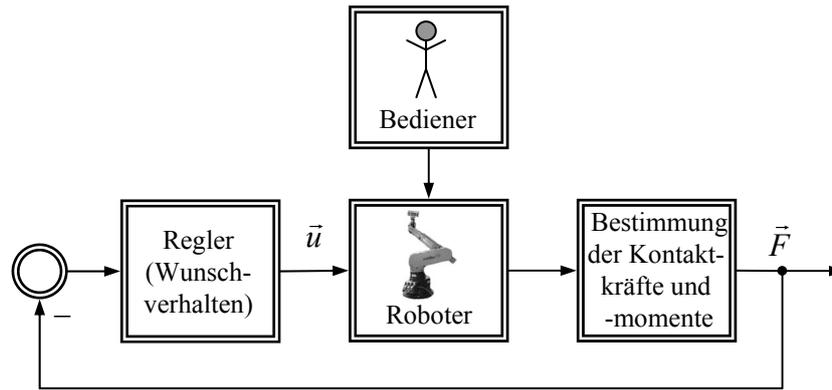


Abbildung 3.1: Grundprinzip beim Kraftführen eines Roboters.

entsprechende Schulung des Bedieners notwendig, die noch dazu abhängig vom verwendeten Robotersystem ist.

- Üblicherweise werden nur Anfangs- und Endpunkt und eventuell einige Stützstellen der Roboterbewegung gespeichert. Benutzt man zur manuellen Steuerung des Roboters eine Tastatur, dann ist es nicht sehr sinnvoll, die gesamte Bewegungsbahn aufzuzeichnen, da deren Verlauf nahezu willkürlich entsteht. Er ist im Wesentlichen abhängig von der Erfahrung und von dem Geschick des Bedieners. Beim Handführen ist dies so nicht der Fall, und es kann durchaus angebracht sein, die Bahn durch eine größere Anzahl von Stützstellen zu speichern. Dadurch können z. B. Hindernisse, die sich auf dem Weg vom Anfangs- zum Endpunkt befinden, gezielt umfahren werden.
- Kommt es während der KB zu einer Kollision des Endeffektors mit seiner Umgebung, dann weicht dieser aufgrund der entstehenden Gegenkräfte von ihr zurück. Denkt man dabei z. B. an eine Fügeaufgabe des Roboters, dann ist ein weiterer Vorteil erkennbar. Die Fügeoperation kann dem Roboter so präzise angelernt werden, dass es während des zyklischen Betriebes zu keiner oder nur geringer Verspannung kommt. Bei Verwendung des Handbediengerätes wäre dies weitaus schwieriger.

Neben der Benutzung kraftgeführter Bewegungen zum komfortablen *Teach In* sind auch weitere Anwendungsfälle möglich. Dazu zählen u. A. folgende:

- Manuelle Handhabungsaufgaben, bei denen der Roboter unterstützende Arbeit leistet, z. B. beim Transport oder der Montage schwerer oder unhandlicher Teile, [50],
- Assistenzaufgaben des Roboters bei verschiedensten Anwendungen, wie z. B. Bohren, Schleifen und Kleben,
- Bewegungssteuerung von Robotern per Phantom (*Master/Slave*) bzw. Teleoperation mit der Möglichkeit der aktiven Kraft-/ Momentrückmeldung vom Zielsystem.

### 3.1 Ansätze zur kraftgeführten Bewegung

Der Grundgedanke aller Ansätze zur KB ist, dass der Roboterarm allen von außen auf ihn einwirkenden Kräften und Momenten ausweicht. Dies entspricht einer Kraft- und/oder Mo-

mentregelung, bei der alle Sollwerte null sind. Die Vorschrift, wie der Manipulator den Kräften und Momenten ausweicht, wird durch die Struktur und Parametrierung der Regelung bestimmt. Sie wird auch als sog. Wunschverhalten (WV) des Roboters bezeichnet. Die verschiedenen Möglichkeiten der Festlegung des WV werden in einem späteren Abschnitt dieser Arbeit behandelt. Das Grundprinzip der kraftgeführten Bewegung eines Roboters ist in Abb. 3.1 dargestellt.

Die unterschiedlichen Ansätze zur KB von stationären Robotern können verschieden gruppiert werden. Eine Möglichkeit ist die Einteilung nach der Platzierung bzw. Art der Kraft-/ Momentsensorik. Dabei kann grob zwischen direkter Messung an den Gelenken des Roboters und der Verwendung eines KMS, der üblicherweise am Roboterflansch montiert ist, unterschieden werden. Beide Varianten haben jeweils diverse Vor- und Nachteile. Ein zweites Merkmal der Einordnung ist die Art der Bewegungssteuerung des Roboters. Diese kann entweder im kartesischen Raum oder im Gelenkraum stattfinden. Die verschiedenen Ansätze werden jetzt genauer betrachtet, wobei sich fast ausschließlich auf stationäre, serielle Manipulatoren beschränkt wird.

### 3.1.1 Kartesischer Ansatz mit Kraft-/ Momentsensor

Ist der Roboter, der zur KB benutzt werden soll, mit einem KMS ausgerüstet, dann stehen je nach verwendetem Sensortyp eine Anzahl kartesischer Messgrößen zur Verfügung. Heute durchaus üblich, wenn auch noch sehr teuer, sind sog. 6D-KMS, die Kräfte und Momente in jeweils allen drei Raumrichtungen erfassen. Somit könnte der Endeffektor in allen 6 Freiheitsgraden ausgerichtet werden. Da die Messung im kartesischen Raum erfolgt, liegt es nahe, auch die Bewegungssteuerung des Roboters dort auszuführen.

Bei allen weiteren Betrachtungen ist zu beachten, dass die gemessenen Kräfte und Momente bereits von den durch die Gewichtskraft hervorgerufen Einflüssen befreit sind. Die sog. Gewichtskraftkompensation wird in einem gesonderten Abschnitt etwas genauer betrachtet. Außerdem wird davon ausgegangen, dass ein 6-Komponenten-KMS (6D-KMS) Verwendung findet. Im Falle eines Sensors mit weniger Messgrößen reduzieren sich die möglichen Bewegungen des Manipulators dementsprechend.

Die Messwerte des KMS sind im Vektor  $\vec{\Gamma}_S$  enthalten:

$$\vec{\Gamma}_S = \begin{bmatrix} \vec{F}_S \\ \vec{M}_S \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_{x_S} \\ F_{y_S} \\ F_{z_S} \\ M_{x_S} \\ M_{y_S} \\ M_{z_S} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

Dabei repräsentieren  $F_{x_S}$ ,  $F_{y_S}$  und  $F_{z_S}$  die Kraftkomponenten in Richtung der Koordinatenachsen des Sensorkoordinatensystems und  $M_{x_S}$ ,  $M_{y_S}$  und  $M_{z_S}$  sind die Drehmomente um die Koordinatenachsen dieses Systems. Das Sensorkoordinatensystem ist vom Hersteller festgelegt und kann nicht verändert werden. Sein Ursprung befindet sich typischerweise im Mittelpunkt des Sensors. Oft interessieren jedoch die Kräfte und Momente im Werkzeugmittelpunkt (TCP). Vielfach bieten kommerzielle Messsysteme bereits die Umrechnung von Kräften und Momenten zwischen verschiedenen Koordinatensystemen an, bzw. ist diese leicht zu implementieren. Die Kraft-/ Momenttransformation vom Sensorkoordinatensystem ( $\vec{F}_S$ ,  $\vec{M}_S$ ) zum

WKS ( $\vec{F}_T$ ,  $\vec{M}_T$ ) berechnet sich wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \vec{F}_T \\ \vec{M}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} {}^S \underline{R}_T & \underline{0} \\ {}^S \underline{P}_T^\times \cdot {}^S \underline{R}_T & {}^S \underline{R}_T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \vec{F}_S \\ \vec{M}_S \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} F_{x_T} \\ F_{y_T} \\ F_{z_T} \\ M_{x_T} \\ M_{y_T} \\ M_{z_T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & 0 & 0 & 0 \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & 0 & 0 & 0 \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & 0 & 0 & 0 \\ -zr_{21} + yr_{31} & -zr_{22} + yr_{32} & -zr_{23} + yr_{33} & r_{11} & r_{12} & r_{13} \\ zr_{11} - xr_{31} & zr_{12} - xr_{32} & zr_{13} - xr_{33} & r_{21} & r_{22} & r_{23} \\ -yr_{11} + xr_{21} & -yr_{12} + xr_{22} & -yr_{13} + xr_{23} & r_{31} & r_{32} & r_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{x_S} \\ F_{y_S} \\ F_{z_S} \\ M_{x_S} \\ M_{y_S} \\ M_{z_S} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Dabei repräsentiert die  $3 \times 3$  Matrix  ${}^S \underline{R}_T$  die Rotation des WKS gegenüber dem Koordinatensystem des KMS mit den Elementen  $r_{11} \dots r_{33}$ . Für die Matrix  ${}^S \underline{P}_T^\times$  gilt, dass

$${}^S \underline{P}_T^\times \cdot {}^S \underline{R}_T \cdot \vec{F}_S = {}^S \vec{P}_T \times ({}^S \underline{R}_T \cdot \vec{F}_S) \quad (3.3)$$

ist, wobei der Vektor  ${}^S \vec{P}_T$  mit den Elementen  $x$ ,  $y$  und  $z$  die Verschiebung des WKS bezüglich des Sensorkoordinatensystems beschreibt.  ${}^S \underline{P}_T^\times$  ist dann:

$${}^S \underline{P}_T^\times = \begin{bmatrix} 0 & -z & y \\ z & 0 & -x \\ -y & x & 0 \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

Die Lage des WKS gegenüber dem Roboterflansch ist entsprechend der Anwendung zu wählen und richtet sich u. A. nach dem am Flansch angebrachten Einrichtungen. Bei den meisten kommerziellen Robotersystemen besteht die Möglichkeit, den Manipulator im Basiskoordinatensystem (BKS) und im WKS zu verfahren. Dabei bleibt bei reinen Drehbewegungen die Lage dessen Ursprungs, bezogen auf das BKS, konstant. Dies ist auch bei der Wahl des *TCP* im Falle der KB zu beachten.

Der in (3.2) berechnete Vektor der Kräfte und Momente im WKS kann nun zur Steuerung des Roboters verwendet werden. Dabei führen gemessene Kräfte  $\vec{F}_T$  zu entsprechenden translatorischen Bewegungen des WKS. Für die einzelnen Bewegungskomponenten des *TCP* bezogen auf das BKS gilt Folgendes:

$$\dot{p}_x = \mathcal{F}(F_{x_T}, t) \begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix}, \quad \dot{p}_y = \mathcal{F}(F_{y_T}, t) \begin{bmatrix} s_x \\ s_y \\ s_z \end{bmatrix}, \quad \dot{p}_z = \mathcal{F}(F_{z_T}, t) \begin{bmatrix} a_x \\ a_y \\ a_z \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Die Funktion  $\mathcal{F}$  steht für das gewünschte Bewegungsverhalten entlang des jeweiligen kartesischen Freiheitsgrades. Sie ist im Allgemeinen von der Zeit  $t$  abhängig. Üblicherweise bilden Differenzialgleichungen die Grundlage für die Wahl von  $\mathcal{F}$ . Fasst man die drei Gleichungen in (3.5) zusammen, so erhält man die komplette translatorische Bewegung des WKS im BKS (3.6).

$$\dot{\vec{p}} = \dot{p}_x + \dot{p}_y + \dot{p}_z = \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x \\ n_y & s_y & a_y \\ n_z & s_z & a_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{F}(F_{x_T}, t) \\ \mathcal{F}(F_{y_T}, t) \\ \mathcal{F}(F_{z_T}, t) \end{bmatrix} = \underline{R} \cdot \vec{\mathcal{F}}(\vec{F}_T, t) \quad (3.6)$$

Ebenso ist es möglich, das translatorische WV im BKS vorzugeben. Dazu muss der Kraftvektor  $\vec{F}_T$  in dieses transformiert werden. Es entsteht der Vektor  $\vec{F}$ .

$$\vec{F} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \end{bmatrix} = \underline{R} \cdot \vec{F}_T \quad (3.7)$$

Aus den Kraftkomponenten im BKS und dem WV ergeben sich wieder die translatorischen Bewegungen des Endeffektors.

$$\dot{p}_x = \mathcal{F}(F_x, t), \quad \dot{p}_y = \mathcal{F}(F_y, t), \quad \dot{p}_z = \mathcal{F}(F_z, t) \quad (3.8)$$

$$\dot{\vec{p}} = \begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}(F_x, t) \\ \mathcal{F}(F_y, t) \\ \mathcal{F}(F_z, t) \end{bmatrix} = \vec{\mathcal{F}}(\vec{F}, t) \quad (3.9)$$

Sind die Strukturen und Parameter des vorgegebenen Bewegungsverhaltens in einem Koordinatensystem vollkommen identisch, dann hat auch das daraus resultierende WV im jeweils anderen Koordinatensystem die gleiche Struktur und Parametrierung. In diesem Falle ist es also egal, ob die Berechnung im WKS oder BKS erfolgt.

Analog zu (3.5) und (3.8) folgt aus den gemessenen Momenten  $\vec{M}_T$  die Drehung des WKS um seine eigenen Koordinatenachsen. Die Rotationen werden durch die Rotationsgeschwindigkeiten  $\omega_{x_T}$ ,  $\omega_{y_T}$  und  $\omega_{z_T}$  bzw. durch differenziell kleine Winkeländerungen  $\delta\psi_T$ ,  $\delta\theta_T$  und  $\delta\phi_T$  beschrieben.

$$\omega_{x_T} = \mathcal{F}(M_{x_T}, t), \quad \omega_{y_T} = \mathcal{F}(M_{y_T}, t), \quad \omega_{z_T} = \mathcal{F}(M_{z_T}, t) \quad (3.10)$$

$$\vec{\omega}_T = \begin{bmatrix} \omega_{x_T} \\ \omega_{y_T} \\ \omega_{z_T} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}(M_{x_T}, t) \\ \mathcal{F}(M_{y_T}, t) \\ \mathcal{F}(M_{z_T}, t) \end{bmatrix} = \vec{\mathcal{F}}(\vec{M}_T, t) \quad (3.11)$$

Bildet man nun für die Drehungen um die Koordinatenachsen  $x_T$ ,  $y_T$  und  $z_T$  die drei Elementarrotationsmatrizen  $ROT(x, \psi_T)$ ,  $ROT(y, \theta_T)$ ,  $ROT(z, \phi_T)$  und approximiert die darin enthaltenen Sinus- und Kosinusfunktionen, so erhält man die Rotationsmatrizen  $ROT(x, \delta\psi_T)$ ,  $ROT(y, \delta\theta_T)$  und  $ROT(z, \delta\phi_T)$  in (3.12), siehe auch [67].

$$\begin{aligned} ROT(x, \psi_T) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\psi_T & -S\psi_T \\ 0 & S\psi_T & C\psi_T \end{bmatrix} & ROT(x, \delta\psi_T) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -\delta\psi_T \\ 0 & \delta\psi_T & 1 \end{bmatrix} \\ ROT(y, \theta_T) &= \begin{bmatrix} C\theta_T & 0 & S\theta_T \\ 0 & 1 & 0 \\ -S\theta_T & 0 & C\theta_T \end{bmatrix} & ROT(y, \delta\theta_T) &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & \delta\theta_T \\ 0 & 1 & 0 \\ -\delta\theta_T & 0 & 1 \end{bmatrix} \\ ROT(z, \phi_T) &= \begin{bmatrix} C\phi_T & -S\phi_T & 0 \\ S\phi_T & C\phi_T & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & ROT(z, \delta\phi_T) &= \begin{bmatrix} 1 & -\delta\phi_T & 0 \\ \delta\phi_T & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.12)$$

Dies hat den Vorteil, dass beim anschließenden Zusammenfassen der Elementarrotationen zu einer Gesamtrotationsmatrix, diese von der Reihenfolge der Drehungen unabhängig ist, [67].

Dabei werden Multiplikation von mehreren Winkeländerungen mit null genähert. Es gilt:

$$ROT(x, \delta\psi_T) \cdot ROT(y, \delta\theta_T) \cdot ROT(z, \delta\phi_T) = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\phi_T & \delta\theta_T \\ \delta\phi_T & 1 & -\delta\psi_T \\ -\delta\theta_T & \delta\psi_T & 1 \end{bmatrix} = \delta\underline{R}_T \quad (3.13)$$

Die neue Orientierung des Endeffektors ergibt sich nun durch Multiplikation von  $\underline{R}$  mit  $\delta\underline{R}_T$ :

$$\underline{R}_{neu} = \underline{R} \cdot \delta\underline{R}_T \quad (3.14)$$

Ersetzt man die differenziell kleinen Drehwinkel durch entsprechende Rotationsgeschwindigkeiten, dann erhält man die zeitliche Ableitung der Rotationsmatrix  $\underline{\dot{R}}$ :

$$\underline{\dot{R}} = \underline{R} \cdot \underline{\dot{R}}_T = \underline{R} \cdot \begin{bmatrix} 0 & -\omega_{zT} & \omega_{yT} \\ \omega_{zT} & 0 & -\omega_{xT} \\ -\omega_{yT} & \omega_{xT} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.15)$$

Wie auch schon bei den translatorischen Bewegungen aufgrund von Krafteinwirkungen, ist es auch bei den Rotationen möglich, das gewünschte Bewegungsverhalten statt im WKS im BKS vorzugeben. Dabei erfolgt die Drehung des Endeffektors jedoch nicht um das eigentliche BKS, da sich dieses meist am Fuß des Roboters befindet. Vielmehr wird dessen Ursprung zum *TCP* verschoben, wobei die Orientierung nicht verändert wird. Die Momente in  $\vec{M}_T$  sind zunächst in die Orientierung des BKS zu bringen. Es ergibt sich der Momentvektor  $\vec{M}$ .

$$\vec{M} = \underline{R} \cdot \vec{M}_T \quad (3.16)$$

Analog zu (3.10) und (3.11) gilt für das WV der rotatorischen Bewegungen des Endeffektors im BKS:

$$\omega_x = \mathcal{F}(M_x, t), \quad \omega_y = \mathcal{F}(M_y, t), \quad \omega_z = \mathcal{F}(M_z, t) \quad (3.17)$$

$$\vec{\omega} = \begin{bmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}(M_x, t) \\ \mathcal{F}(M_y, t) \\ \mathcal{F}(M_z, t) \end{bmatrix} = \vec{\mathcal{F}}(\vec{M}, t) \quad (3.18)$$

Die Drehung des WKS um die (verschobenen) Achsen des BKS wird durch die Drehwinkel  $\delta\psi$ ,  $\delta\theta$  und  $\delta\phi$  beschrieben. Wie schon bei der Gleichung (3.13) gezeigt, lässt sich die Rotationsmatrix  $\underline{R}_B$  mit

$$\delta\underline{R}_B = ROT(x, \delta\psi) \cdot ROT(y, \delta\theta) \cdot ROT(z, \delta\phi) = \begin{bmatrix} 1 & -\delta\phi & \delta\theta \\ \delta\psi & 1 & -\delta\psi \\ -\delta\theta & \delta\phi & 1 \end{bmatrix} \quad (3.19)$$

berechnen, wobei die Reihenfolge der Multiplikationen wiederum egal ist. Da die Rotationen im Gegensatz zu (3.14) um die (verschobenen) Achsen des BKS erfolgen, ergibt sich die neue Orientierung des Endeffektors diesmal durch Multiplikation von rechts nach links:

$$\underline{R}_{neu} = \delta\underline{R}_B \cdot \underline{R} \quad (3.20)$$

Die Zeitableitung der Rotationsmatrix ist dann ähnlich zu (3.14):

$$\underline{\dot{R}} = \underline{\dot{R}}_B \cdot \underline{R} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega_z & \omega_y \\ \omega_z & 0 & -\omega_x \\ -\omega_y & \omega_x & 0 \end{bmatrix} \cdot \underline{R} \quad (3.21)$$

Wie auch schon bei der translatorischen Bewegung ist es unerheblich, ob das WV der Rotation im WKS oder BKS vorgegeben wird, falls Struktur und Parameter der jeweils 3 Teilverhalten identisch sind.

Aus den Gleichungen (3.6) und (3.15) bzw. (3.9) und (3.21) kann die Zeitableitung der Vorwärtstransformation gebildet werden.

$${}^0\dot{\underline{A}}_T = \begin{bmatrix} \dot{\underline{R}} & \dot{\underline{p}} \\ \underline{0} & 0 \end{bmatrix} \quad (3.22)$$

Nun ist es möglich, durch Integration ständig die aktuelle Position und Orientierung des WKS in Form der Transformationsmatrix  ${}^0\underline{A}_T$  zu berechnen. Mit Hilfe der Rückwärtstransformation können daraus die aktuellen Sollwerte der Gelenkpositionen ermittelt werden. Da die Orientierungsangabe in Form einer Rotationsmatrix unübersichtlich ist, besteht außerdem die Möglichkeit, eine gebräuchlichere Form der Orientierungsrepräsentation für Anzeigewecke zu berechnen, wie z. B. *Yaw-Pitch-Roll* nach Gleichung (2.5).

### 3.1.2 Gelenkraumansatz mit Kraft-/ Momentsensor

Eine andere Philosophie der Bewegungssteuerung des Roboters bildet die Grundlage des gelenkraumbasierten Ansatzes zur KB. Betrachtet man die im vorherigen Abschnitt vorgestellte Methode, dann wird deutlich, dass die kinematische Struktur des Roboters keinen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Endeffektors hat. Durch die Berechnung der inversen Kinematik wird diese kompensiert. Dabei ist es egal, ob ein 6-Gelenk-Knickarmroboter, ein SCARA-Roboter, eine Parallelkinematik oder ein redundanter Roboter verwendet wird. Grob betrachtet könnte man annehmen, dass diese Eigenschaft ein wesentlicher Vorteil des kartesischen Ansatzes ist. Dem gegenüber steht aber eine individuelle Erwartungshaltung des Bedieners an das Roboterverhalten. Dabei spielt die Kinematik eine entscheidende Rolle. Mit ihr assoziiert der Benutzer ein entsprechendes mechanisches Verhalten, hervorgerufen durch die visuelle Information, die er beim Betrachten erhält. Er wird z. B. mit einem Portalroboter andere Bewegungseigenschaften verknüpfen als mit einem 6-Gelenk-Knickarmroboter.

Jeder Roboter besteht aus einer Anzahl von Gliedern, die mittels Gelenken verbunden sind. Bei Gelenken mit einem Freiheitsgrad kann zwischen translatorischen und rotatorischen Gelenken unterschieden werden. Erlaubt man mehr als einen Freiheitsgrad, dann ist eine feinere Unterteilung möglich (z. B. Kugelgelenk, Kardangelenk). Auch Mischformen sind dann denkbar. Die Auswahl der Gelenkarten und deren Reihenfolge bestimmt im Wesentlichen die kinematische Struktur des Roboters. Möchte man diese auch bei der KB wieder finden, dann ist es nahe liegend, den Manipulator im Gelenkraum zu steuern. Die Messung der von außen auf den Roboter wirkenden Kräfte und Momente erfolgt dabei wie im Abschnitt 3.1.1 mit einem am Flansch angebrachten KMS.

Zentraler Punkt des neuen Ansatzes ist die Transformation von kartesischen Kräften und Momenten in entsprechende Gelenkmomente bzw. -kräfte. Dazu wird die Jacobi-Matrix  $\underline{J}$  des Roboters benötigt. Sie ist abhängig von den aktuellen Werten der Gelenkwinkel bzw.

-positionen im Vektor  $\vec{q}$ :

$$\vec{q} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ q_m \end{bmatrix} \quad (3.23)$$

Die vollständige Jacobi-Matrix besitzt 6 Zeilen. Sie stehen für die 6 kartesischen Freiheitsgrade des WKS, das mit dem Vektor von Position und Orientierung  $\vec{P}$  aus Gleichung (2.10) beschrieben wird. Die Anzahl der Spalten der Jacobi-Matrix ist gleich der Anzahl der Gelenke des Roboters  $m$ .

$$\underline{J}(\vec{q}) = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & \dots & \dots & \dots & J_{1m} \\ J_{21} & J_{22} & \dots & \dots & \dots & J_{2m} \\ J_{31} & J_{32} & \dots & \dots & \dots & J_{3m} \\ J_{41} & J_{42} & \dots & \dots & \dots & J_{4m} \\ J_{51} & J_{52} & \dots & \dots & \dots & J_{5m} \\ J_{61} & J_{62} & \dots & \dots & \dots & J_{6m} \end{bmatrix} \quad (3.24)$$

Die Jacobi-Matrix stellt zunächst den Zusammenhang zwischen Geschwindigkeiten im Gelenkraum und kartesischen Geschwindigkeiten her. Verallgemeinert gilt:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \\ \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{bmatrix} = \underline{J}(\vec{q}) \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

Die translatorischen Geschwindigkeiten des Endeffektors ( $TCP$ ) in Bezug auf das BKS werden durch  $\dot{p}_x$ ,  $\dot{p}_y$  und  $\dot{p}_z$  repräsentiert. Die Bedeutung der rotatorischen Geschwindigkeiten  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\theta}$  und  $\dot{\psi}$  kann erst im weiteren Verlauf dieses Abschnittes definiert werden.

Zur Berechnung der Jacobi-Matrix existieren verschiedene Möglichkeiten. Je nach Berechnungsmethode können sich die Ergebnisse voneinander unterscheiden. Diese Tatsache ist auch bei der KB zu beachten. Deshalb werden an dieser Stelle einige Varianten die Jacobi-Matrix eines Roboters zu berechnen aufgezeigt und diskutiert.

**Geometrische Jacobi-Matrix** Die Berechnung der geometrischen Jacobi-Matrix  $\underline{J}_G$  erfolgt anhand der geometrischen Beziehungen zwischen den einzelnen Gliedern des Roboters. Diese sind durch die Teiltransformationsmatrizen der Vorwärtstransformation  ${}^{i-1}\underline{A}_i$  ( $i = 1, \dots, m$ ) gegeben, siehe auch Gleichung (2.3). Die detaillierte Herleitung wird in der einschlägigen Literatur oft beschrieben (z. B. [96]), so dass an dieser Stelle nur die daraus resultierende Vorschrift zum Ermitteln der geometrischen Jacobi-Matrix  $\underline{J}_G$  vorgestellt wird.

Die Berechnung von  $\underline{J}_G$  erfolgt spaltenweise, wobei jeweils zwischen einem prismatischen oder einem rotatorischen Gelenk unterschieden wird. Handelt es sich bei  $i$ -ten Spalte, also dem  $i$ -ten Gelenk, um ein Schubgelenk, dann gilt für diese:

$$\vec{J}_i = \begin{bmatrix} \vec{z}_{i-1} \\ \vec{0} \end{bmatrix} \quad (3.26)$$

Im Gegensatz dazu berechnet sich die entsprechende Spalte der Jacobi-Matrix für ein Drehgelenk wie folgt:

$$\vec{J}_i = \begin{bmatrix} \vec{z}_{i-1} \times (\vec{p} - \vec{p}_{i-1}) \\ \vec{z}_{i-1} \end{bmatrix} \quad (3.27)$$

Der Ausdruck  $(\vec{p} - \vec{p}_i)$  repräsentiert den Vektor vom Ursprung des Koordinatensystems  $i$  zum  $TCP$  und  $0\vec{1}$  ist ein Spaltenvektor mit  $0\vec{1} = [0 \ 0 \ 1]^T$ . In (3.26) und (3.27) ist  $\vec{z}_i$  der Einheitsvektor des Koordinatensystems  $i$  und kann durch Selektion aus der Transformationsmatrix  ${}^{i-1}\underline{A}_i$  gewonnen werden, vgl. Abschnitt 2.1.1 *Denavit-Hartenberg* Notation.

$$\vec{z}_i = \underline{R}_i \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (3.28)$$

Die geometrische Jacobi-Matrix setzt sich nun wie folgt zusammen:

$$\underline{J}_G = [ \vec{J}_1 \ \vec{J}_2 \ \dots \ \dots \ \dots \ \vec{J}_m ] \quad (3.29)$$

Die analytische Berechnung von  $\underline{J}_G$  kann sehr aufwendig sein, da die Ausdrücke mit wachsender Anzahl der Gelenke sehr groß werden können. Eine numerische Berechnung lässt sich in einer Hochsprache sehr leicht realisieren. Allerdings kann die Implementierung bei manchen Steuerungen durchaus problematisch sein, falls z. B. die Programmierung von Schleifen nicht zugelassen ist. Die geometrische Jacobi-Matrix hat den Vorteil, dass der nach Gleichung (3.25) berechnete Vektor der Geschwindigkeiten des Endeffektors die rotatorischen Komponenten ( $\omega_x$ ,  $\omega_y$  und  $\omega_z$ ) um die in den  $TCP$  verschobenen Achsen des BKS enthält. Die Ausdrücke  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\theta}$  und  $\dot{\psi}$  entsprechen hier somit direkt den Rotationsgeschwindigkeiten, so dass diese sich ohne Umwege am einfachsten mit Hilfe der geometrischen Jacobi-Matrix berechnen lassen.

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{p}_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \underline{J}_G \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

**Analytische Jacobi-Matrix** Eine weitere Möglichkeit zur Berechnung der Jacobi-Matrix ist die durch Differenzieren. Dabei wird der Positions- und Orientierungsvektor  $\vec{P}$  von (2.10) nach dem Vektor der Gelenkwinkel  $\vec{q}$  abgeleitet und es entsteht die analytische Jacobi-Matrix  $\underline{J}_A$ .

$$\underline{J}_A(\vec{q}) = \frac{d\vec{P}}{d\vec{q}} \quad (3.31)$$

Daraus ergeben sich die Elemente der Jacobi-Matrix wie folgt:

$$\underline{J}_A(\vec{q}) = \begin{bmatrix} \frac{\delta p_x}{\delta q_1} & \frac{\delta p_x}{\delta q_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\delta p_x}{\delta q_m} \\ \frac{\delta p_y}{\delta q_1} & \frac{\delta p_y}{\delta q_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\delta p_y}{\delta q_m} \\ \frac{\delta p_z}{\delta q_1} & \frac{\delta p_z}{\delta q_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\delta p_z}{\delta q_m} \\ \frac{\delta \phi}{\delta q_1} & \frac{\delta \phi}{\delta q_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\delta \phi}{\delta q_m} \\ \frac{\delta \theta}{\delta q_1} & \frac{\delta \theta}{\delta q_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\delta \theta}{\delta q_m} \\ \frac{\delta \psi}{\delta q_1} & \frac{\delta \psi}{\delta q_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\delta \psi}{\delta q_m} \\ \frac{\delta \psi}{\delta q_1} & \frac{\delta \psi}{\delta q_2} & \dots & \dots & \dots & \frac{\delta \psi}{\delta q_m} \end{bmatrix} \quad (3.32)$$

Auch bei der analytischen Jacobi-Matrix gilt wieder Gleichung (3.25). Es ist aber zu beachten, dass die Elemente  $\dot{\phi}$ ,  $\dot{\theta}$  und  $\dot{\psi}$  jetzt eine andere Bedeutung haben. Sie stehen für die Zeitableitungen der Orientierungswinkel. Sie sind also abhängig von der gewählten Art der Orientierungsrepräsentation, z. B. *Yaw-Pitch-Roll* oder *Euler-Winkel*.

$$\frac{d\vec{P}}{dt} = \underline{J}_A(\vec{q}) \frac{d\vec{q}}{dt} \quad (3.33)$$

Die analytische Berechnung von  $\underline{J}_A$  gestaltet sich unkompliziert, obwohl mitunter große mathematische Ausdrücke entstehen können. Die Positionsvariablen  $p_x$ ,  $p_y$  und  $p_z$  bestehen in der Regel nur aus Sinus- und Kosinusfunktionen der Gelenkwinkel (bei Drehgelenken) und können so einfach nach diesen differenziert werden. Bei der Ableitung der Orientierungswinkel  $\phi$ ,  $\theta$  und  $\psi$  müssen Arkussinus- oder Arkuskosinus- und die Vier-Quadranten-Arkustangensfunktion differenziert werden, siehe auch Gleichungen (2.5) und (2.9). Da letzter sehr selten vorkommt, soll die Ableitung hier erwähnt sein:

$$\frac{d\{\arctan2[y(h), x(h)]\}}{dh} = \frac{1}{y(h)^2 + x(h)^2} \left[ \frac{dy(h)}{dh} x(h) - \frac{dx(h)}{dh} y(h) \right] \quad (3.34)$$

Die detaillierte Herleitung ist im Anhang A.4 zu finden. Bei der Implementierung von (3.34) sind die entsprechenden Grenzfälle zu beachten.

Vergleicht man die geometrische mit der analytischen Jacobi-Matrix, dann stellt man fest, dass die Zeilen 1 bis 3 identisch sind. Die Zeilen 4-6 können sich unterscheiden. Bei der analytischen Jacobi-Matrix sind sie zudem abhängig von der Orientierungsrepräsentation in  $\vec{P}$ .

Neben der Überführung von Gelenkgeschwindigkeiten in kartesische Geschwindigkeiten, ermöglicht es die Jacobi-Matrix außerdem, die auf den Endeffektor des Roboters einwirkenden Kräfte und Momente in entsprechende Gelenkmomente bzw. -kräfte umzurechnen. Dieser Zusammenhang wird zuerst mit Hilfe der geometrischen Jacobi-Matrix  $\underline{J}_G$  wie folgt hergeleitet:

Zunächst ermittelt man die sog. virtuelle mechanische Arbeit des Manipulators jeweils im kartesischen Raum  $W_{kart}$  und im Gelenkraum  $W_{glnk}$ :

$$W_{kart} = \vec{\Gamma}^T \cdot \Delta\vec{P}_\alpha = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_y \\ \Delta\alpha_x \\ \Delta\alpha_y \\ \Delta\alpha_z \end{bmatrix}, \quad W_{glnk} = \vec{\tau}^T \cdot \Delta\vec{q} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \tau_m \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta q_1 \\ \Delta q_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \Delta q_m \end{bmatrix} \quad (3.35)$$

Die virtuelle mechanische Arbeit setzt sich zusammen aus den Teilarbeiten der einzelnen Bewegungsrichtungen. Der Vektor  $\vec{\Gamma}$  enthält die kartesischen Kräfte und Momente bezogen auf die Rotationsachsen und  $\vec{\tau}$  ist der Vektor der Gelenkmomente bzw. -kräfte. Da  $W_{kart}$  und  $W_{glnk}$ , ohne Berücksichtigung von Verlusten, gleich sein müssen, folgt aus (3.35) die Gleichung (3.36).

$$\vec{\Gamma}^T \cdot \Delta\vec{P}_\alpha = \vec{\tau}^T \cdot \Delta\vec{q} \quad (3.36)$$

Setzt man voraus, dass sowohl die Änderungen der kartesischen Koordinaten als auch die Änderungen der Gelenkstellungen differenziell klein sind, dann gilt auch:

$$\vec{\Gamma}^T \cdot d\vec{P}_\alpha = \vec{\tau}^T \cdot d\vec{q} \quad (3.37)$$

Jetzt kann  $d\vec{P}_\alpha$  in (3.37) durch  $\underline{J}_G \cdot d\vec{q}$  ersetzt und  $d\vec{q}$  anschließend eliminiert werden. Es ergibt sich folgender Zusammenhang zwischen Kräften und Momenten im kartesischen und im Gelenkraum:

$$\vec{\Gamma}^T \cdot \underline{J}_G = \vec{\tau}^T \quad (3.38)$$

bzw.

$$\underline{J}_G^T \cdot \vec{\Gamma} = \vec{\tau} \quad (3.39)$$

Schreibt man die Gleichung (3.39) ausführlich, dann erhält man (3.40), wobei  $m$  wieder gleich die Anzahl der Gelenke des Manipulators ist.

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{21} & J_{31} & J_{41} & J_{51} & J_{61} \\ J_{12} & J_{22} & J_{32} & J_{42} & J_{52} & J_{62} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ J_{1m} & J_{2m} & J_{3m} & J_{4m} & J_{5m} & J_{6m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ \tau_m \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

Mit Hilfe der aktuellen (geometrischen) Jacobi-Matrix ist es also möglich, aus den auf den Endeffektor des Roboters einwirkenden Kräften und Momenten die resultierenden Gelenkmomente bzw. -kräfte zu berechnen. Handelt es sich bei dem jeweiligen Robotergelenk um ein rotatorisches Gelenk, dann ist das entsprechende Element in  $\vec{\tau}_q$  ein Drehmoment, im Falle einer Linearachse erhält man eine Kraft. Es ist dabei zu beachten, dass die Jacobi-Matrix nur für einen einzigen Punkt am Manipulator gilt, in allen hier behandelten Fällen ist das der *TCP*. Da die Jacobi-Matrix eine Funktion der Gelenkwinkel ist, muss sie ständig neu berechnet werden.

Um die aktuell von außen wirkenden Gelenkmomente oder -kräfte ermitteln zu können, sind zunächst die im WKS gemessenen Kräfte  $\vec{F}_T$  und Momente  $\vec{M}_T$  mit Hilfe der Gleichungen (3.7) und (3.16) in das BKS zu überführen. Eine komplette Transformation im eigentlichen Sinne findet jedoch nicht statt, da Kraft- und Momentenvektor lediglich gedreht werden und aus Kräften keine zusätzlichen Drehmomente entstehen. Es wird also nur die Orientierung des *TCP* und nicht dessen Position bei der Berechnung verwendet. Fasst man (3.7) und (3.16) zusammen, dann erhält man (3.41), wobei  $\vec{\Gamma}$  die auf den Endeffektor wirkenden Kräfte- und Momente bezogen auf das BKS enthält.

$$\vec{\Gamma} = \begin{bmatrix} \underline{R} & \underline{0} \\ \underline{0} & \underline{R} \end{bmatrix} \cdot \vec{\Gamma}_T \quad (3.41)$$

Jetzt können mit Hilfe von (3.40) die Gelenkmomente und -kräfte berechnet werden.

Beim kartesischen Algorithmus zur KB basiert die Roboterbewegung auf Änderungen der kartesischen Koordinaten des WKS. Der Gelenkraumansatz basiert auf Gelenkgeschwindigkeiten. Diese sind abhängig von den eben berechneten Gelenkmomenten bzw. -kräften. Analog zu (3.5) und (3.10) bzw. (3.8) und (3.17) folgt für die Gelenkgeschwindigkeiten des Manipulators:

$$\dot{\vec{q}} = \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \\ \vdots \\ \dot{q}_m \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{F}(\tau_1, t) \\ \mathcal{F}(\tau_2, t) \\ \vdots \\ \mathcal{F}(\tau_m, t) \end{bmatrix} = \vec{\mathcal{F}}(\vec{\tau}, t) \quad (3.42)$$

Durch ständige Integration der berechneten Gelenkgeschwindigkeiten lassen sich die aktuellen Sollwerte der Gelenkwinkel bzw. -positionen ermitteln. Diese können z. B. direkt mit den Lageregeln der Gelenke verknüpft werden.

**Verwendung analytischer Jacobi-Matrizen** Soll zur KB im Gelenkraum statt der geometrischen eine analytische Jacobi-Matrix verwendet werden, dann ist ein zusätzlicher Rechenschritt notwendig. Wie schon gezeigt ist die analytische Jacobi-Matrix  $\underline{J}_A$  abhängig von der gewählten Art der Orientierungsrepräsentation. Bei der Transformation von Gelenk- in kartesische Geschwindigkeiten nach Gleichung (3.33), wurden statt der Rotationsgeschwindigkeiten im BKS die Zeitableitungen der Orientierungswinkel berechnet. Dies muss auch bei der Transformation der Drehmomente berücksichtigt werden. Der Ansatz über die virtuelle Arbeit nach (3.35) beinhaltet die Winkeländerungen in Bezug auf das BKS. Also waren auch die transformierten Momente um dessen Achsen gerichtet. Bei der Darstellung der Orientierung mit Hilfe von 3 Verdrehwinkeln ist die Reihenfolge der einzelnen Rotationen entscheidend. Außerdem finden die Folgedrehungen häufig um das neue Koordinatensystem statt. Somit setzt sich die virtuelle Arbeit im kartesischen Raum nun aus den Änderungen der Orientierungswinkel und den Momenten um die Drehachsen der Orientierungsrepräsentation zusammen.

$$W_{kart} = \vec{\Gamma}_{\phi\theta\psi}^T \cdot \Delta\vec{P} = \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_\phi \\ M_\theta \\ M_\psi \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} \Delta p_x \\ \Delta p_y \\ \Delta p_z \\ \Delta\phi \\ \Delta\theta \\ \Delta\psi \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

Daraus ergibt sich analog zu Gleichung (3.39) für die Transformation von kartesischen Kräften und Momenten in Gelenkmomente (bzw. -kräfte):

$$\underline{J}_A^T \cdot \vec{\Gamma}_{\phi\theta\psi} = \vec{\tau} \quad (3.44)$$

Der Vektor  $\vec{\Gamma}_{\phi\theta\psi}$  enthält nun, neben den Kräften im BKS, die Drehmomente entsprechend der gewählten Orientierungsangabe  $M_\phi$ ,  $M_\theta$  und  $M_\psi$ .

$$\vec{\Gamma}_{\phi\theta\psi} = \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M}_{\phi\theta\psi} \end{bmatrix} \quad (3.45)$$

Durch Rotation von  $\vec{M}$  und Selektion einzelner Elemente kann der Momentenvektor  $\vec{M}_{\phi\theta\psi}$  leicht berechnet werden. Dies soll für 2 gebräuchliche und schon vorgestellte Varianten der Orientierungsrepräsentation hier gezeigt werden<sup>6</sup>.

**Momentenvektor für Roll-Pitch-Yaw System** Beim *Roll-Pitch-Yaw System* erfolgen die Drehungen nacheinander um z-, y'- und x''-Achse. Für die Momente im Vektor  $\vec{M}_{\phi\theta\psi}$  gilt demnach:

1. Drehmoment um die z-Achse des BKS,  $M_\phi$ ,
2. Drehmoment um die y-Achse des neuen Koordinatensystems (y'-Achse),  $M_\theta$ ,

<sup>6</sup>Zur Vereinfachung gelten wieder folgende Abkürzungen:  $\sin(\alpha) = S\alpha$ ,  $\cos(\alpha) = C\alpha$ .

3. Drehmoment um die x-Achse des neuen Koordinatensystems ( $x''$ -Achse),  $M_\psi$ .

Das Moment  $M_\phi$  ist bereits in  $\vec{M}$  enthalten und lässt sich daraus extrahieren:

$$M_\phi = [ 0 \ 0 \ 1 ] \cdot \vec{M} = M_z \quad (3.46)$$

Führt man eine Rotation von  $\vec{M}$  um die z-Achse durch, dann enthält der Ergebnisvektor das Moment  $M_\theta$ :

$$M_\theta = [ 0 \ 1 \ 0 ] \cdot ROT(z, \phi)^T \cdot \vec{M} = -S\phi M_x + C\phi M_y \quad (3.47)$$

Schließlich lässt sich  $M_\psi$  durch die aufeinander folgenden Rotationen um die z- und die  $y'$ -Achse ermitteln:

$$\begin{aligned} M_\psi &= [ 1 \ 0 \ 0 ] \cdot [ ROT(z, \phi) \cdot ROT(y, \theta) ]^T \cdot \vec{M} \\ &= C\phi C\theta M_x + S\phi C\theta M_y - S\theta M_z \end{aligned} \quad (3.48)$$

Fasst man die Gleichungen (3.46), (3.47) und (3.48) zusammen, dann folgt für den Drehmomentvektor  $\vec{M}_{\phi\theta\psi}$ :

$$\vec{M}_{\phi\theta\psi} = \begin{bmatrix} M_\phi \\ M_\theta \\ M_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -S\phi & C\phi & 0 \\ C\phi C\theta & S\phi C\theta & -S\theta \end{bmatrix} \cdot \vec{M} \quad (3.49)$$

**Momentvektor für ZY'Z''-Euler-Winkel** Ähnlich wie für das *Roll-Pitch-Yaw System*, lässt sich der Momentvektor  $\vec{M}_{\phi\theta\psi}$  für das ZY'Z''-System berechnen. Er setzt sich aus den folgenden Elementen zusammen:

1. Drehmoment um die z-Achse des BKS,  $M_\phi$ ,
2. Drehmoment um die  $y'$ -Achse des neuen Koordinatensystems ( $y'$ -Achse),  $M_\theta$ ,
3. Drehmoment um die z-Achse des neuen Koordinatensystems ( $z''$ -Achse),  $M_\psi$ .

Da die ersten 2 Drehungen gleich denen im  $zy'x''$ -System sind, sind auch die Momente  $M_\phi$  und  $M_\theta$  identisch mit den Drehmomenten von (3.46) bzw. (3.47).  $M_\psi$  ergibt sich nach der Drehung von  $\vec{M}$  um die z- und um die  $y'$ -Achse und anschließendem Selektieren des z-Elementes ähnlich wie in (3.48):

$$\begin{aligned} M_\psi &= [ 0 \ 0 \ 1 ] \cdot [ ROT(z, \phi) \cdot ROT(y, \theta) ]^T \cdot \vec{M} \\ &= C\phi S\theta M_x + S\phi S\theta M_y + C\theta M_z \end{aligned} \quad (3.50)$$

Analog zu Gleichung (3.49) ist dann:

$$\vec{M}_{\phi\theta\psi} = \begin{bmatrix} M_\phi \\ M_\theta \\ M_\psi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -S\phi & C\phi & 0 \\ C\phi S\theta & S\phi S\theta & C\theta \end{bmatrix} \cdot \vec{M} \quad (3.51)$$

Anhand zweier gebräuchlicher Arten der Orientierungsrepräsentation mittels Verdrehwinkeln wurde demonstriert, wie der Momentvektor  $\vec{M}$  anzupassen ist, um die Gelenkmomente mit Hilfe einer analytischen Jacobi-Matrix berechnen zu können. Die gleiche Vorgehensweise muss auch bei der Transformation von Geschwindigkeiten angewendet werden, siehe dazu auch [96].

In den beiden hier beschriebenen Fällen wurden Orientierungsrepräsentationen verwendet, die ihre Folgerotationen auf das schon gedrehte Koordinatensystem beziehen. Beim xyz-System, wo alle Drehungen im BKS stattfinden, könnte man auf den ersten Blick meinen, dass eine Anpassung der Momente (oder auch der Geschwindigkeiten) nicht notwendig ist, und direkt der Vektor  $\vec{M}$  mit Hilfe von  $\underline{J}_A$  in den Gelenkraum transformiert werden kann. Dieser erste Eindruck ist falsch, da natürlich die Reihenfolge der Drehungen auch im xyz-System eingehalten werden muss. Rein intuitiv lässt sich zunächst keine Lösung finden, wie  $\vec{M}_{\phi\theta\psi}$  zu berechnen ist. Abhilfe schafft die Tatsache von Gleichung (2.7). Drei aufeinander folgende Rotationen im Ursprungs koordinatensystem ergeben das gleiche Resultat wie diese Rotationen in umgekehrter Reihenfolge um die gedrehten Achsen ( $R_{xyz} = R_{zy'z''}$ ). Somit kann jede Orientierungsangabe so gewandelt werden, dass sie sich auf bereits gedrehte Achsen bezieht. Die Berechnung des entsprechenden Momentenvektors  $\vec{M}_{\phi\theta\psi}$  ist dann nach dem bereits beschriebenen Algorithmus möglich.

### 3.1.3 Momentmessung in den Gelenken

Möchte man auf den am Roboterflansch befestigten KMS verzichten, so würde es auch möglich sein, Moment- bzw. Kraftmessungen direkt in den Gelenken des Roboters durchzuführen. Dies kann z. B. durch spezielle auf Dehnmessstreifen basierende Sensoren geschehen. Ein Beispiel dafür ist das sog. *DLR Sensor Drive*, was im *DLR Light Weight Robot* benutzt wird [43], [44]. Beim *DLR Light Weight Robot* handelt es sich um einen sehr weit entwickelten Knickarmroboter für den Einsatz bei besonderen Forschungsaufgaben und Umgebungen, wie z. B. in der Raumfahrt. Seine Ausrüstung mit Sensorik übertrifft die heute verwendeter Industrieroboter bei weitem und ist somit nicht standardmäßig verfügbar.

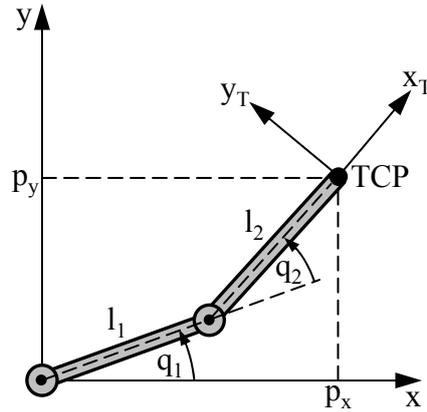
Erfolgt die Momentmessung direkt in den Gelenken, dann bietet sich natürlich auch die Bewegungssteuerung des Manipulators im Gelenkraum an. Im Gegensatz zu dem im Abschnitt 3.1.2 vorgestellten Algorithmus sind allerdings keine zusätzlichen Transformationen notwendig. Ein sehr großer Vorteil dieser Methode ist die Eigenschaft, dass die messbaren Einwirkungen sich nicht auf den Endeffektor des Roboters beschränken, sondern alle am Manipulator angreifenden Kräfte und Momente registriert werden. Das hat für die Anwendung bei KB folgende Auswirkung: Der Bediener hat die Möglichkeit, an jeder Stelle des Roboters Kräfteinwirkungen vorzunehmen, um ihn zu führen. Diese können daher gezielter sein als bei der Verwendung eines KMS, bei dem es durchaus etwas Übung erfordern kann, um einen Roboter in allen Bewegungsrichtungen zu steuern. Diese Tatsache kann besonders bei redundanten Manipulatoren von großer Bedeutung sein.

Die Bewegungssteuerung des Roboters im kartesischen Raum, auf der Grundlage von Kraft-/ Momentmessungen in den Gelenken, wäre auch denkbar. Dazu müssen die Gelenkmomente bzw. -kräfte  $\vec{\tau}$  in kartesische Kräfte und Momente  $\vec{\Gamma}$  transformiert werden. Abgeleitet von Gleichung (3.39) erfolgt dies durch (3.52).

$$\vec{\Gamma} = \underline{J}^{T^{-1}} \cdot \vec{\tau} \quad (3.52)$$

Allerdings ist dazu die Inverse der transponierten Jacobi-Matrix notwendig, deren Berechnung in Echtzeit durchaus problematisch sein kann. Außerdem bringt  $\underline{J}^{T^{-1}}$  Singularitätsprobleme mit sich und es ist fraglich, ob eine durch Kräfteinwirkung an den Gliedern des Roboters erzeugte kartesische Bewegung, so von dem Bediener erwartet würde und von ihm sinnvoll gesteuert werden kann.

Ein Nachteil der Gelenkmomentsensoren ist, dass sie die Steifigkeit und somit die Positioniergenauigkeit des Roboters mitunter reduzieren. Außerdem ist die Ausrüstung eines

Abbildung 3.2: *Planar Two Link Manipulator*.

$i$	$\Theta_i$	$d_i$	$a_i$	$\alpha_i$
1	$q_1$	0	$l_1$	0
2	$q_2$	0	$l_2$	0

Tabelle 3.1: DH-Parameter des *Planar Two Link Manipulators*.

Roboters mit den Gelenkmomentsensoren, wie schon erwähnt, sehr aufwendig. Deshalb soll dieser Ansatz zur KB an dieser Stelle nicht weiter untersucht werden.

### 3.2 Beispiel *Planar Two Link Manipulator*

Zunächst soll an einem einfachen Beispiel der Unterschied zwischen dem kartesischen Algorithmus zur KB und dem neuen, gelenkraumbasierten Ansatz verdeutlicht werden. Als Beispielroboter wurde der sog. *Planar Two Link Manipulator* gewählt, siehe auch Abbildung 3.2. Er besteht aus zwei Gliedern, verbunden mit rotatorischen Gelenken. Konstruktionsbedingt kann sich der Endeffektor nur in einer Ebene (x-y-Ebene) bewegen. Nach den *Denavit-Hartenberg* Parametern von Tabelle 3.1 ergeben sich die beiden DH-Transformationsmatrizen von (3.53)<sup>7</sup>.

$${}^0\underline{A}_1 = \begin{bmatrix} C1 & -S1 & 0 & l_1 C1 \\ S1 & C1 & 0 & l_1 S1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad {}^1\underline{A}_2 = \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & l_2 C2 \\ S2 & C2 & 0 & l_2 S2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.53)$$

Durch Multiplikation von  ${}^0\underline{A}_1$  und  ${}^1\underline{A}_2$  erhält man die Vorwärtstransformation des *Planar Two Link Manipulators* in Form der homogenen Transformationsmatrix  ${}^0\underline{A}_2$ .

$${}^0\underline{A}_2 = {}^0\underline{A}_1 {}^1\underline{A}_2 = \begin{bmatrix} C12 & -S12 & 0 & l_1 C1 + l_2 C12 \\ S12 & C12 & 0 & l_1 S1 + l_2 S12 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.54)$$

<sup>7</sup>Zur Vereinfachung gelten folgende Abkürzungen:  $\sin(q_1) = S1$ ,  $\cos(q_1) = C1$ ,  $\sin(q_2) = S2$ ,  $\cos(q_2) = C2$ ,  $\sin(q_1 + q_2) = S12$ ,  $\cos(q_1 + q_2) = C12$ , usw.

In diesem einfachen Beispiel soll die Messung der Kräfte  $\vec{F}_T$  und Momente  $\vec{M}_T$  direkt am Roboterflansch erfolgen, so dass Flansch-, Sensor- und Werkzeugkoordinatensystem identisch sind. Somit gilt für die Transformation vom BKS zum WKS aus Gleichung (2.1), dass

$${}^0\underline{A}_T = {}^0\underline{A}_2 = \begin{bmatrix} \underline{R} & \vec{p} \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} \quad (3.55)$$

ist. Außerdem sind die Kräfte und Momente im Messvektor gleich denen im WKS.

$$\vec{\Gamma}_T = \begin{bmatrix} \vec{F}_T \\ \vec{M}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{F}_S \\ \vec{M}_S \end{bmatrix} = \vec{\Gamma}_S \quad (3.56)$$

In diesem Beispiel soll für die Orientierungsrepräsentation im Vektor  $\underline{P}$  nach (2.10) das *Yaw-Pitch-Roll System* gewählt werden. Es gilt die Rotationsmatrix von Gleichung (2.4). Im Falle des *Planar Two Link Manipulators* ist das Element  $a_z$  in  $\underline{R}$  gleich 1. Daraus folgt für die Winkel *Yaw* und *Pitch*  $\psi = 0$ ,  $\theta = 0$ . Durch Einsetzen in (2.4) erhält man:

$$\underline{R}_{xyz}(\psi = 0, \theta = 0, \phi) = \begin{bmatrix} C\phi & -S\phi & 0 \\ S\phi & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.57)$$

Aus (3.54) und (3.57) folgt für den Orientierungswinkel *Roll*  $\phi = q_1 + q_2$ . Fasst man die aktuelle Position  $\vec{p}$  und die Verdrehwinkel der Orientierungsrepräsentation im Vektor  $\vec{P}$  zusammen, so erhält man:

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 C1 + l_2 C12 \\ l_1 S1 + l_2 S12 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_1 + q_2 \end{bmatrix} \quad (3.58)$$

Anhand des Vektors  $\vec{P}$  sind die Eigenschaften des *Planar Two Link Manipulators* zu erkennen. Da  $p_z = 0$  ist, hat dieser Roboter nur einen zweidimensionalen Arbeitsraum. Auch ist eine Orientierungsänderung des Endeffektors nur durch Drehung um die  $z$ -Achse möglich ( $\psi = 0$ ,  $\theta = 0$ ). Im Vektor  $\vec{P}$ , der die kartesischen Koordinaten des Endeffektors enthält, lassen sich die Werte für  $p_x$ ,  $p_y$  und  $\phi$  durch Verändern von  $q_1$  und  $q_2$  beeinflussen. Da der Roboter nur 2 Gelenke besitzt, können nur 2 der 3 verbliebenen, kartesischen Koordinaten unabhängig voneinander verändert werden.

### 3.2.1 Kartesischer Ansatz zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des *Planar Two Link Manipulators*

Zunächst soll der kartesische Ansatz zur KB genauer betrachtet werden. Dabei bewegt sich der *Planar Two Link Manipulator* genau in die Richtung des auf ihn einwirkenden Kraftvektors. Es handelt sich also um eine geradlinige Bewegung des Endeffektors. Folgendes Beispiel wurde zur Verdeutlichung der Wirkungsweise gewählt:

- Die Anfangsposition des *Planar Two Link Manipulators* ist gegeben durch die 2 Gelenkwinkel mit  $q_1 = 45^\circ$  und  $q_2 = -45^\circ$ ,
- Beide Glieder des Roboters haben die Länge von  $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$ ,

- Auf den Endeffektor wirkt eine Kraft in y-Richtung des BKS von 1 N.

Da alle Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge zur Demonstration des kinematischen Roboterverhaltens nicht nötig sind, wird vereinfacht angenommen, dass eine auf den Endeffektor einwirkende Kraft eine ihr geschwindigkeitsproportionale Bewegung in gleicher Richtung zur Folge hat. Analog dazu würde sich durch von außen einwirkende Momente eine entsprechende Orientierungsänderung ergeben, welche aber aufgrund von nur zwei Bewegungsmöglichkeiten im Gelenkraum unberücksichtigt bleibt. Dadurch vereinfacht sich das sog. WV der Gleichungen (3.8) und (3.17) zu

$$\dot{p}_x = k_x F_x, \quad \dot{p}_y = k_y F_y, \quad \dot{p}_z = \dot{\psi} = \dot{\theta} = 0, \quad (3.59)$$

wobei die Parameter  $k_x$  und  $k_y$  Konstanten sind.

Durch Einsetzen der Startwerte der Gelenkwinkel und der Armlängen des Roboters in (3.54) erhält man die kartesische Startposition von  $p_x \approx 1,707 \text{ m}$  und  $p_y \approx 0,707 \text{ m}$ . Die einwirkende y-Kraft wird zu einer stetigen Erhöhung der y-Koordinaten  $p_y$  führen, wohingegen  $p_x$  konstant bleibt. Interessant für den späteren Vergleich mit dem Ansatz der kraftgeführten Bewegung im Gelenkraum ist der Verlauf der Gelenkwinkel. Eine Möglichkeit ist deren Berechnung über die inverse Kinematik des Roboters. Der zweite Weg ist die Transformation der kartesischen Bewegung des Endeffektors in Bewegungen der Gelenkachsen durch Simulation mit genügend kleiner Tastzeit. Als Grundlage dafür dient die Gleichung (3.25). Die geometrische und die analytische Jacobi-Matrix des *Planar Two Link Manipulators* sind im Falle der Orientierungsrepräsentation mittels *Yaw-Pitch-Roll* identisch. Aus diesem Grunde wird  $\underline{J}$  durch differenzieren nach Gleichung (3.31) berechnet. Der Vektor der Gelenkwinkel ist dabei  $\vec{q} = [q_1 \quad q_2]^T$ .

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \frac{\delta p_x}{\delta q_1} & \frac{\delta p_x}{\delta q_2} \\ \frac{\delta p_y}{\delta q_1} & \frac{\delta p_y}{\delta q_2} \\ \frac{\delta p_z}{\delta q_1} & \frac{\delta p_z}{\delta q_2} \\ \frac{\delta \psi}{\delta q_1} & \frac{\delta \psi}{\delta q_2} \\ \frac{\delta \theta}{\delta q_1} & \frac{\delta \theta}{\delta q_2} \\ \frac{\delta \phi}{\delta q_1} & \frac{\delta \phi}{\delta q_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 S1 - l_2 S12 & -l_2 S12 \\ l_1 C1 + l_2 C12 & l_2 C12 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.60)$$

Um aus gegebenen kartesischen Geschwindigkeiten die dazugehörigen Gelenkgeschwindigkeiten berechnen zu können, müsste die Jacobi-Matrix von quadratischer Form sein. Dies ist beim *Planar Two Link Manipulator* nicht der Fall, da 2 Gelenken 6 kartesische Freiheitsgrade gegenüber stehen. Sollen  $p_x$  und  $p_y$  unabhängig voneinander gewählt werden können, dann ist  $\phi$  immer indirekt vorgegeben. Außerdem sind  $p_z$ ,  $\psi$  und  $\theta$  immer null. Somit kann (3.25) auch in reduzierter Form geschrieben werden:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \end{bmatrix} = \underline{J}^* \vec{q} \quad (3.61)$$

$\underline{J}^*$  in (3.61) hat nun die folgende quadratische Form:

$$\underline{J}^* = \begin{bmatrix} -l_1 S1 - l_2 S12 & -l_2 S12 \\ l_1 C1 + l_2 C12 & l_2 C12 \end{bmatrix} \quad (3.62)$$

Jetzt lassen sich die Gelenkgeschwindigkeiten aus den kartesischen Geschwindigkeiten durch Invertieren von  $\underline{J}^*$  berechnen.

$$\vec{q} = \underline{J}^{*-1} \begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \end{bmatrix} \quad (3.63)$$

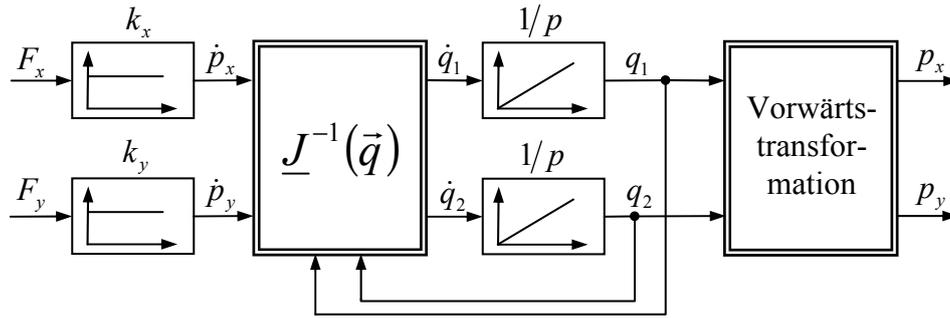


Abbildung 3.3: Signalflussbild für die Simulation des kartesischen Ansatzes zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des *Planar Two Link Manipulators*.

Ermittelt man nun zyklisch, aus der durch  $F_y$  hervorgerufenen Geschwindigkeit und der aktuellen inversen reduzierten Jacobi-Matrix, die dazugehörigen Gelenkgeschwindigkeiten, und simuliert man die Änderung der Gelenkwinkel mit genügend kleiner Taktzeit (siehe auch Abb. 3.3), so erhält man ohne Berechnung der inversen Kinematik den Zeitverlauf der Gelenkwinkel von Abb. 3.5. Die KB mit dem kartesischen Ansatz ist nur möglich, falls der Gelenkwinkel  $q_2$  verschieden von null ist. Ist  $q_2 = 0$ , dann befindet sich der Manipulator in einer Singularität. Das bedeutet, es existiert keine Kombination von Gelenkgeschwindigkeiten, um eine kartesische Bewegung des Endeffektors in jede beliebige Richtung zu erzeugen. Ob sich ein Roboter in einer singulären Lage befindet, lässt sich auch an dessen aktueller Jacobi-Matrix  $\underline{J}(\vec{q})$  erkennen. Ist deren Determinante  $\det(\underline{J})$  gleich Null, dann liegt eine Singularität vor. Aus (3.62) folgt für die Determinante der reduzierten Jacobi-Matrix des *Planar Two Link Manipulators*:

$$\det(\underline{J}^*) = l_1 l_2 (S12C1 - C12S1) = l_1 l_2 S2 \quad (3.64)$$

Wie aus (3.64) zu erkennen, existieren neben  $q_2 = 0$  weitere Singularitäten. Bezogen auf den sinnvollen Verfahrbereich von Gelenk 2, befinden sich diese bei  $q_2 = \pm 180^\circ$ . Geht die Determinante von  $\underline{J}^*$  in der Nähe einer Singularität gegen null (in diesem Beispiel bei  $q_2 = 0$ , siehe auch Abb. 3.5), dann kann  $\underline{J}^*$  in (3.63) nicht mehr invertiert werden, da durch die Division durch einen Betrag nahe oder gleich null unzulässig hohe Gelenkgeschwindigkeiten entstehen würden. Aus diesem Grunde bricht die KB an diesem Punkt ab. Einmal in der Nähe einer Singularität angekommen, gibt es nun keine Möglichkeit, mit Hilfe des kartesischen Ansatzes zur KB, diesen Bereich wieder zu verlassen. Dies bedeutet auch, dass der Arbeitsbereich des Gelenks 2 auf den Bereich zwischen 0 und  $180^\circ$  bzw. zwischen 0 und  $-180^\circ$  beschränkt bleiben muss, abhängig davon in welcher Position des Manipulators der Algorithmus zur KB gestartet wurde.

### 3.2.2 Ansatz im Gelenkraum zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des *Planar Two Link Manipulators*

Nach einem anderen Prinzip funktioniert der gelenkraumbasierte Ansatz zur KB. Zunächst wird mit Hilfe von Gleichung (3.39) bzw. (3.44) aus den auf den Endeffektor einwirkenden Kräften und Momenten der Vektor der Gelenkmomente berechnet. Da die Kräfte bei der Simulation bereits im BKS vorliegen, ist deren Transformation in dieses, wie nach Gleichung (3.41), nicht notwendig. Wie schon erwähnt besteht beim *Planar Two Link Manipulator* kein

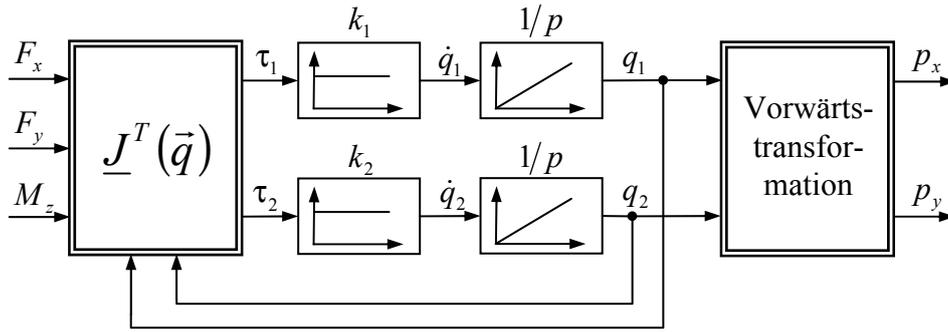


Abbildung 3.4: Signalflussbild für die Simulation des Ansatzes im Gelenkraum zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des *Planar Two Link Manipulators*.

Unterschied zwischen geometrischer und analytischer Jacobi-Matrix, somit muss auch keine Drehmomentanpassung erfolgen.

Setzt man (3.60) in (3.39) ein, dann erhält man für die Gelenkmomente  $\tau_1$  und  $\tau_2$  des *Planar Two Link Manipulators* folgende Gleichung:

$$\vec{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} & l_1 C_1 + l_2 C_{12} & 0 & 0 & 0 & 1 \\ -l_2 S_{12} & l_2 C_{12} & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (3.65)$$

Da die Elemente in den Spalten 3, 4 und 5 der transponierten Jacobi-Matrix in (3.65) null sind, folgt für die Gelenkmomente auch:

$$\vec{\tau} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_1 S_1 - l_2 S_{12} & l_1 C_1 + l_2 C_{12} & 1 \\ -l_2 S_{12} & l_2 C_{12} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M_z \end{bmatrix} \quad (3.66)$$

Zur Demonstration der Wirkungsweise des gelenkraumbasierten Ansatzes zur KB gelten die gleichen Versuchsbedingungen wie schon für den kartesischen Algorithmus ( $q_1 = 45^\circ$ ,  $q_2 = -45^\circ$ ,  $l_1 = l_2 = 1 \text{ m}$ ,  $F_y = 1 \text{ N}$ ). Wieder werden alle Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge vernachlässigt, so dass den Gelenkmomenten proportionale Gelenkgeschwindigkeiten folgen. Somit lässt sich das WV des Roboters im Gelenkraum von (3.42) durch folgende 2 Beziehungen beschreiben:

$$\dot{q}_1 = k_1 \tau_1, \quad \dot{q}_2 = k_2 \tau_2 \quad (3.67)$$

Die Proportionalitätsfaktoren zwischen Gelenkmomenten- und -geschwindigkeiten wurden so bestimmt, dass, verglichen mit dem Versuch zum kartesischen Ansatz und bezogen auf den gleichen Zeitraum, identische kartesische Wege zurückgelegt wurden. Mit Hilfe von (3.66) werden nun zyklisch die aus den kartesischen Kräften und Momenten resultierenden Drehmomente um die Gelenkachsen berechnet (siehe auch Abb. 3.4).

Der Verlauf der Gelenkwinkel nach dem Gelenkraumansatz ist ebenfalls in Abb. 3.5 dargestellt. Diese Werte unterscheiden sich deutlich von denen des kartesischen Algorithmus.

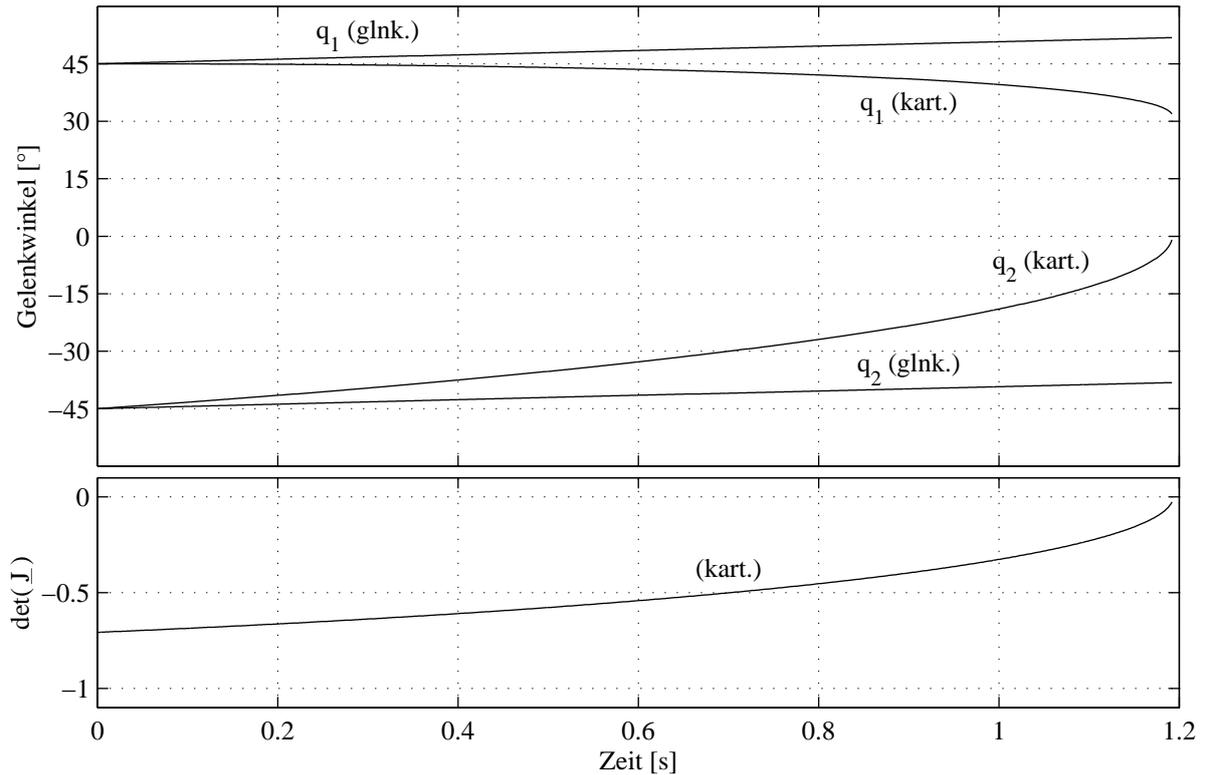


Abbildung 3.5: Gelenkwinkel bei der kraftgeführten Bewegung des *Planar Two Link Manipulators*.

Betrachtet man die Bahn des Endeffektors im kartesischen Raum, so wird der Unterschied noch deutlicher. Die Abb. 3.6 zeigt die Stellung des Manipulators vor und nach der KB für den schon beschriebenen Versuch bei beiden Methoden. Außerdem sind die zwei Bewegungsbahnen dargestellt. Wie durch den kartesischen Algorithmus vorgegeben, ändert sich bei dessen Anwendung nur die y-Koordinate des Endeffektors. In diesem Beispiel wird bei  $q_2 = 0$  eine singuläre Position erreicht und die Bewegung bricht ab. Im Gegensatz dazu ändern sich bei der Steuerung im Gelenkraum x und y-Koordinate, so dass der Endeffektor eine völlig andere Bahn zurücklegt.

Das somit erreichte Verhalten des Roboters, als Reaktion auf den Endeffektor einwirkender Kräfte und Momente, entspricht weitaus mehr den menschlichen Erwartungen. Dies wird am besten deutlich, wenn man sich den *Planar Two Link Manipulator* als einfaches mechanisches System ohne Antriebselemente vorstellt.

Mit einem zweiten Versuch soll nun gezeigt werden, dass es bei Verwendung des Ansatzes im Gelenkraum ohne Probleme möglich ist, Singularitäten zu überfahren. Die Systemkonfiguration ist identisch mit der des Versuches 1. Zusätzlich zu der in y-Richtung auf den Endeffektor wirkenden Kraft von  $1\text{ N}$  greift noch eine Kraft von  $1\text{ N}$  in negativer x-Richtung an. Die daraus resultierende Bewegungsbahn des Endeffektors, sowie verschiedene Zwischenstellungen sind in Abb. 3.7 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Konfigurationenraumgrenze bei  $q_2 = 0$ , also eine Singularität, ohne Probleme überfahren wird.

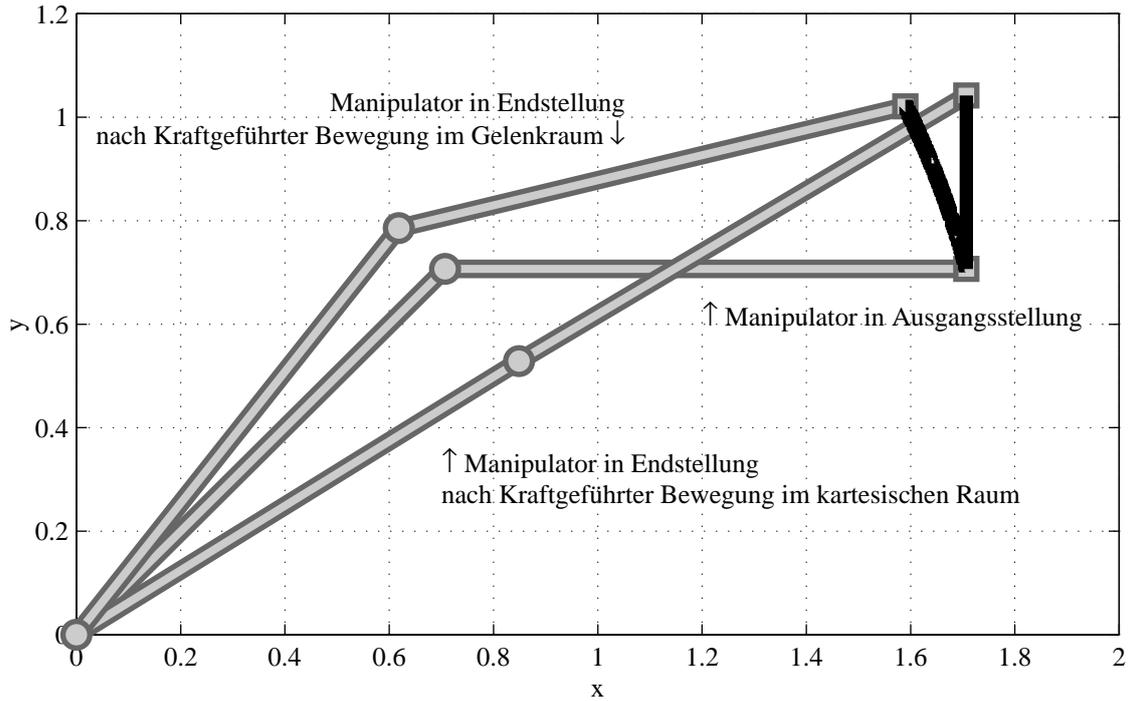


Abbildung 3.6: Bewegungsbahn des *Planar Two Link Manipulators* bei der kraftgeführten Bewegung.

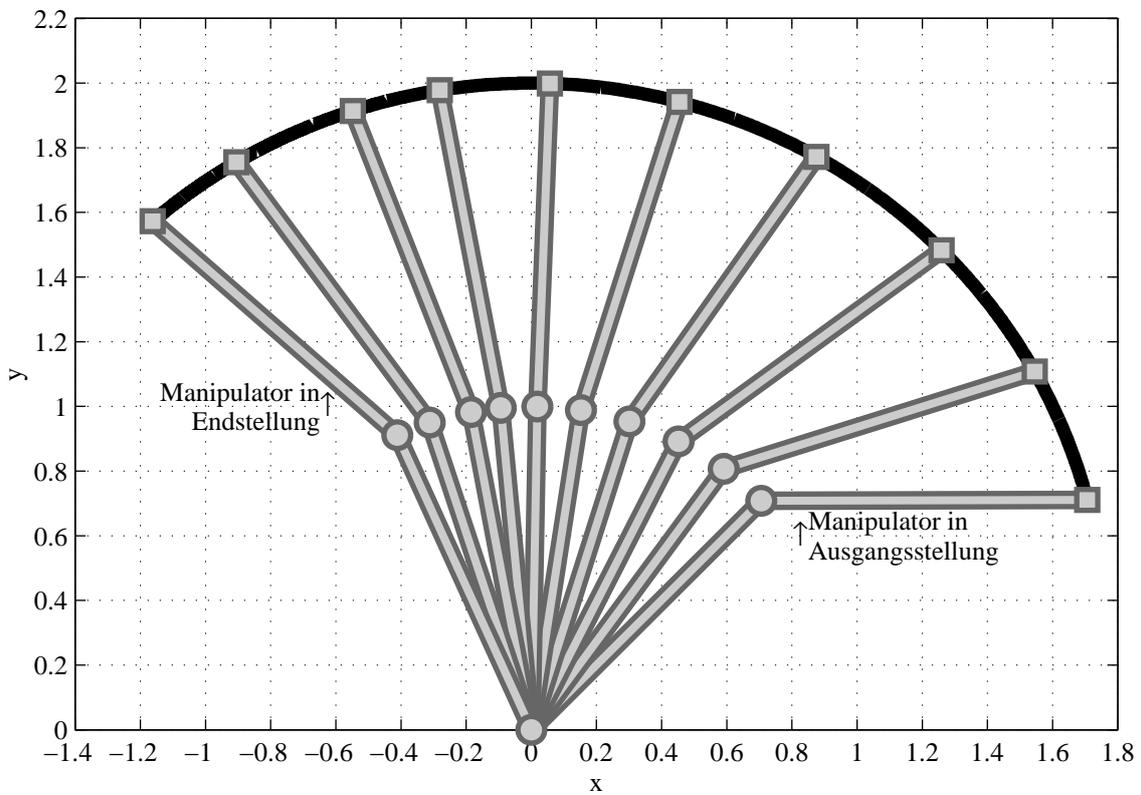


Abbildung 3.7: Bewegungsbahn des *Planar Two Link Manipulators* bei der kraftgeführten Bewegung über eine singuläre Position.

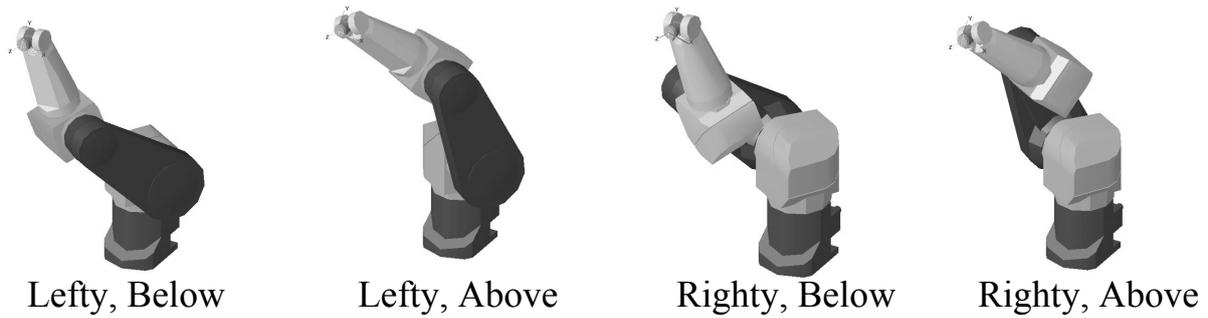


Abbildung 3.8: Beispiel unterschiedlicher Gelenkkonfigurationen für eine Position eines 6-Gelenk-Knickarmroboters.

### 3.3 Weitere kinematische Beispiele

Die Grundzüge des Ansatzes zur KB im Gelenkraum wurden am *Planar Two Link Manipulator* aufgezeigt. Im Folgenden sollen die kinematischen Eigenschaften dieses speziellen Algorithmus anhand weiterer Beispiele verdeutlicht werden, [30]. Dabei wird immer davon ausgegangen, dass die auf den Endeffektor einwirkenden Kräfte und Momente als Messwerte im kartesischen Raum zur Verfügung stehen.

#### 3.3.1 6-Gelenk-Knickarmroboter

Viele der seriellen Manipulatoren im industriellen Einsatz sind 6-Gelenk-Knickarmroboter. Sie bestehen aus 6 rotatorischen Gelenken. Bei der kinematischen Kette hat sich fast ausschließlich eine einzige Struktur durchgesetzt. Sie hat z. B. die Eigenschaft, dass sich die Drehachsen der Gelenke 4, 5 und 6 in einem Punkt schneiden. Durch diese sog. Zentralhand ist die inverse Kinematik relativ einfach analytisch lösbar. Durch die geeignete Anordnung der 6 Gelenke wird sichergestellt, dass auch im kartesischen Raum 6 Freiheitsgrade vorhanden sind. Somit können sowohl räumliche Position und Orientierung des Endeffektors unabhängig voneinander vorgegeben werden. Für eine in kartesischen Koordinaten gegebenen Position (und Orientierung) existieren im Allgemeinen 8 Möglichkeiten des Vektors der Gelenkwinkel diese anzufahren, wobei einige durch Beschränkungen in den Gelenken entfallen können. Die sog. Konfigurationsparameter legen fest, welche Kombination von Gelenkwinkeln benutzt wird. Sie sind z. B. bei den Robotern der PUMA- und STÄUBLI-Reihen mit *Arm*, *Elbow* und *Flip* bezeichnet und können jeweils 2 Werte (*Lefty*, *Righty*; *Below*, *Above*; *Noflip*, *Flip*) annehmen, siehe auch Abb. 3.8<sup>8</sup>.

Die Tatsache, dass 6 kartesischen Freiheitsgraden 6 Messwerte des KMS gegenüber stehen, scheint für den Einsatz des kartesischen Ansatzes zur KB zu sprechen, wie er im Abschnitt 3.1.1 beschrieben wurde. Dabei ist jedem Messsignal eine entsprechende kartesische Bewegung zugeordnet, mit der Position und Orientierung des Endeffektors unabhängig verändert werden können.

Wie schon erwähnt, ist es nicht möglich, jeden Punkt innerhalb des Arbeitsraumes mit jeder beliebigen Wahl der Konfigurationsparameter anzufahren, weil der Verfahrbereich der einzelnen Gelenke meist kleiner als  $360^\circ$  ist. Jedoch kann zwischen den 8 Konfigurationsräumen nicht mittels einer Linearbewegung gewechselt werden, da diese durch Singularitäten

<sup>8</sup>Der Konfigurationsparameter *Flip* repräsentiert die Stellung des Gelenks 5. Es gilt folgende Definition:  $Flip = -sgn(q_5)$ .

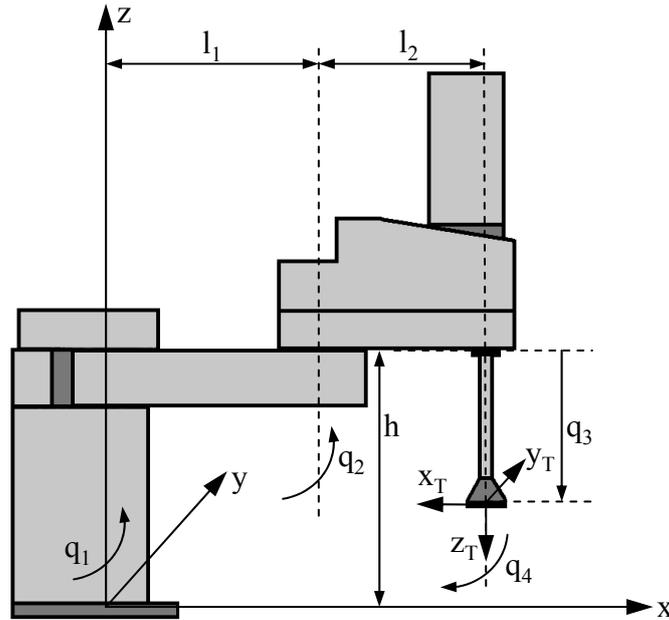


Abbildung 3.9: SCARA-Kinematik.

getrennt sind. Das heißt, die kartesische KB bleibt immer auf den aktuell gültigen Konfigurationenraum beschränkt. Dies führt zur Einschränkung des Arbeitsraumes. Bei dem Versuch, den Manipulator in die Nähe einer Singularität zu führen, treten trotz kleiner kartesischer Geschwindigkeiten sehr hohe Gelenkgeschwindigkeiten auf. In der Regel führen diese, aufgrund zu großer Schleppfehler zwischen Soll- und Istwerten der Gelenkwinkel, zur Notabschaltung des Roboters. Selbst wenn es seitens des Roboters möglich ist, alle relevanten Arbeitspositionen mit einer einzigen Konfiguration anzufahren, so können technische Gegebenheiten das zeitweise Benutzen einer anderen Konfiguration erfordern.

### 3.3.2 SCARA-Roboter

Neben den 6-Gelenk-Knickarmrobotern sind auch SCARA-Roboter (*Selectively Compliant Arm for Robotic Assembly*) im industriellen Einsatz weit verbreitet. Sie werden vor allem für sog. *Pick und Place* Aufgaben verwendet. Die SCARA-Kinematik, siehe auch Abb. 3.9, besteht aus 3 rotatorischen Gelenken und einem Schubgelenk. Die ersten beiden Gelenke ( $q_1$ ,  $q_2$ ) und Glieder sind wie beim *Planar Two Link Manipulator* angeordnet. Es schließt sich das prismatische Gelenk  $q_3$  an, das den Endeffektor entlang der  $z$ -Achse des Weltkoordinatensystems bewegt. Am Ende der kinematischen Kette befindet sich ein rotatorisches Handgelenk ( $q_4$ ). Die Vorwärtstransformation des SCARA-Roboters ergibt sich dann wie folgt:

$${}^0\mathbf{A}_4 = \begin{bmatrix} C(q_1 + q_2 - q_4) & S(q_1 + q_2 - q_4) & 0 & l_1 C1 + l_2 C12 \\ S(q_1 + q_2 - q_4) & -C(q_1 + q_2 - q_4) & 0 & l_1 S1 + l_2 S12 \\ 0 & 0 & -1 & h - q_3 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.68)$$

Daraus kann der Vektor  $\vec{P}$  von Position und Orientierung des Endeffektors für eine beliebige Orientierungsrepräsentation berechnet werden. Für *Yaw-Pitch-Roll* gilt z. B.:

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 C1 + l_2 C12 \\ l_1 S1 + l_2 S12 \\ h - q_3 \\ 0 \\ 180^\circ \\ q_1 + q_2 - q_4 \end{bmatrix} \quad (3.69)$$

Die zur KB im Gelenkraum notwendige Jacobi-Matrix kann sowohl in ihrer geometrischen Form oder analytisch, passend zur Orientierungsrepräsentation berechnet werden. An dieser Stelle wurde die geometrische Jacobi-Matrix gewählt. Damit kann später auch auf die sonst notwendige Anpassung der kartesischen Momente verzichtet werden. Für die geometrische Jacobi-Matrix  $\underline{J}_G$  ergibt sich:

$$\underline{J}_G = \begin{bmatrix} -l_1 S1 - l_2 S12 & -l_2 S12 & 0 & 0 & 0 \\ l_1 C1 + l_2 C12 & l_2 C12 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.70)$$

Wird davon ausgegangen, dass die auf den Endeffektor einwirkenden Kräfte und Momente bereits in der Orientierung des BKS vorliegen, so können die Gelenkmomente  $\tau_1, \tau_2, \tau_4$  und die Gelenkkraft  $\tau_3$  nach Gleichung (3.39) berechnet werden.

$$\vec{\Gamma} = \begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \\ \tau_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (-l_1 S1 - l_2 S12)F_x + (l_1 C1 + l_2 C12)F_y + M_z \\ -l_2 S12 F_x + l_2 C12 F_y + M_z \\ -F_z \\ -M_z \end{bmatrix} \quad (3.71)$$

Anhand von (3.71) kann man erkennen, mit welchen Einwirkungen auf den Endeffektor sich die gewünschten Gelenkbewegungen erzielen lassen. So bewegt sich das Gelenk Nr. 3 nur bei einer Krafteinwirkung entlang der z-Achse des BKS. Die Momente  $M_x$  und  $M_y$  haben keine Wirkung.

### 3.3.3 Kartesische Roboter

Kartesische Roboter bestehen aus 3 prismatischen Gelenken. Häufig sind sie, wie in Abb. 3.10 dargestellt, in der Bauform des sog. Portalroboters beim Be- und Entladen im Einsatz. In der Regel ist jeder der 3 Linearachsen eine Positionskoordinate zugeordnet. Die Orientierung des Endeffektors ist nicht veränderbar. Je nach Definition der Koordinatensysteme kann die Vorwärtstransformation eines Portalroboters mit *Yaw-Pitch-Roll* Orientierungswinkeln z. B. wie folgt aussehen:

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} q_1 \\ q_2 \\ h - q_3 \\ 0 \\ 180^\circ \\ 0 \end{bmatrix} \quad (3.72)$$

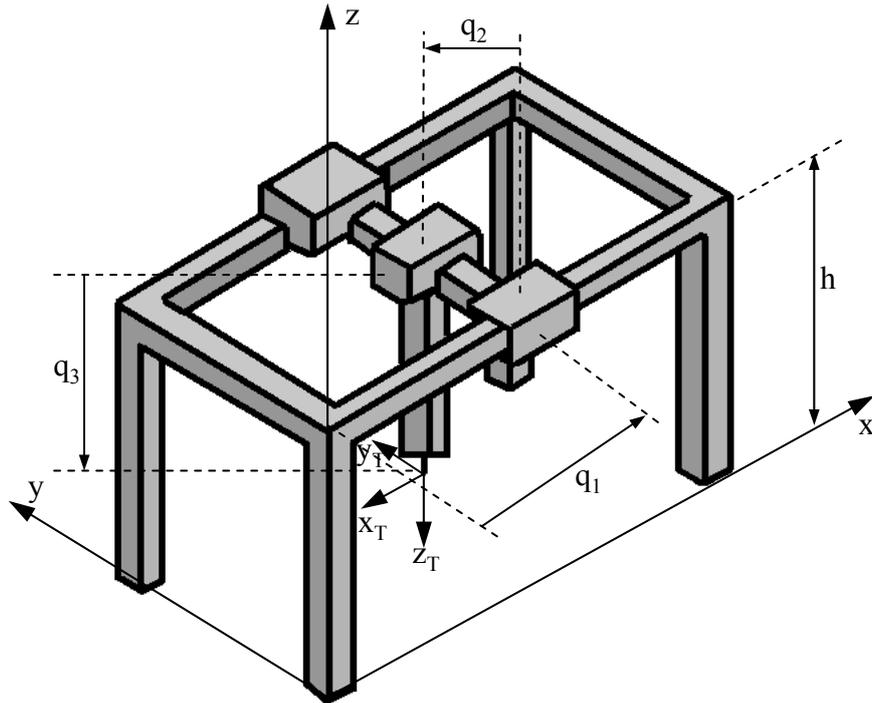


Abbildung 3.10: Kartesischer Manipulator in Form eines Portalroboters.

Da die Orientierungswinkel konstant sind, ist es unerheblich, ob für die KB im Gelenkraum die geometrische oder die analytische Jacobi-Matrix berechnet wird. Für  $\underline{J}$  gilt:

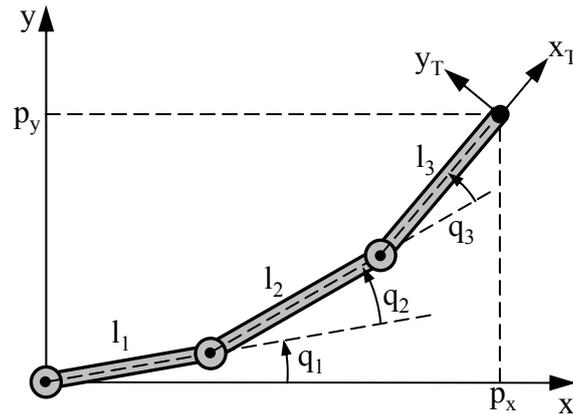
$$\underline{J} = \underline{J}_G = \underline{J}_A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (3.73)$$

Bei der Berechnung der Gelenkkräfte mit Hilfe von Gleichung (3.39) oder (3.44) liefern die Drehmomente in  $\vec{\Gamma}$  bzw.  $\vec{\Gamma}_{\phi\theta\psi}$  keinen Anteil zu diesen, da die letzten 3 Zeilen von  $\underline{J}$  nur Nullen enthalten. Somit resultiert die Bewegung des Manipulators nur aus den auf den Endeffektor einwirkenden Kräften.

Vergleicht man den kartesischen Ansatz zur KB mit dem neuen Gelenkraumansatz am Beispiel eines kartesischen Roboters, dann stellt dieser einen Sonderfall dar. Beide Algorithmen verhalten sich identisch. Die Wunschverhalten der 3 Gelenke entsprechen denen der 3 kartesischen Bewegungsrichtungen  $x$ ,  $y$  und  $z$ . Der Vorteil der Toleranz gegenüber Singularitäten wird nicht wirksam, da ein kartesischer Roboter keine singulären Lagen aufweist.

### 3.3.4 Redundante Manipulatoren

Redundante Manipulatoren ([70]) sind Roboter, die mehr Bewegungsmöglichkeiten haben als zur Erfüllung ihrer Aufgabe notwendig sind. Im Allgemeinen ist dies bei einer Gelenkzahl von  $m > 6$  der Fall. Für den 2D-Arbeitsraum (planare Manipulatoren) gilt  $m > 3$ . Redundante Roboter finden Anwendung, wenn u. A. folgende Vorteile von Bedeutung sind:

Abbildung 3.11: *Planar Three Link Manipulator*.

- Umfahren bzw. Umfassen von Hindernissen,
- Vermeidung von Singularitäten,
- Reduzierung der einzelnen Gelenkbewegungen mit dem Ziel, die Antriebe zu schonen,
- Erzielung höherer kartesischer Geschwindigkeiten des *TCP* durch gleichzeitiges Verfahren mit mehreren Gelenken,
- Robustheit des Manipulators gegenüber dem Ausfall einzelner Gelenke, z. B. bei fehler-toleranten Systemen in der Raumfahrt.

Die Berechnung der inversen Kinematik ist weitaus komplexer als bei nicht-redundanten Robotern und liefert in der Regel unendlich viele Lösungen, die durch entsprechende Randbedingungen einzuschränken sind. Die Berechnung des inversen kinematischen Problems (IKP) für einen redundanten Roboter mit 9 Gelenken sowie dessen Bewegungssteuerung ist z. B. in [72] dargestellt. Denkt man an das *Teach In* von Positionen und Orientierungen, dann gestaltet sich auch die Steuerung des Roboters mit dem Handbediengerät kompliziert, zumindest im Falle der Steuerung in kartesischen Koordinaten. Ein weiteres Beispiel für einen redundanten Roboter ist der *DLR Light Weight Robot* mit 7 Gelenken, [2]. Für ihn wurde eine spezielle Methode des *Teach In* entwickelt [91].

Intuitiver als mit dem Handbediengerät wäre allerdings wieder das Handführen. Mit der Bewegungssteuerung im Gelenkraum ließe sich außerdem auf ein aufwendiges Konfigurationsmanagement oder auf das Feststellen einzelner Gelenke weitestgehend verzichten. Zunächst stellt sich aber die Frage, welche Auswirkung die Tatsache hat, dass bei einem redundanten Roboter den im Allgemeinen 6 Messwerten des KMS eine höhere Anzahl an Gelenken gegenüber steht.

Ermittelt man die Jacobi-Matrix eines redundanten Roboters, dann hat diese mehr Spalten als Zeilen. Dies hat jedoch keinen Einfluss auf die Berechnung der Gelenkmomente bzw. -kräfte nach Gleichung (3.39) bzw. (3.44), da ja nur  $\underline{J}^T$  benötigt wird. Bei redundanten Robotern kann allerdings nicht jede beliebige Kombination von Gelenkmomenten erzeugt werden.

Die Wirkungsweise der KB im Gelenkraum mit einem redundanten Roboter soll im Folgenden demonstriert werden. Dafür wird, wie schon im Abschnitt 3.2, ein relativ einfaches Beispiel gewählt. Der in Abb. 3.11 dargestellte *Planar Three Link Manipulator* ist ähnlich dem *Planar*

*Two Link Manipulator*, nur dass er aus 3 Gliedern und Gelenken besteht ( $\vec{q} = [q_1 \ q_2 \ q_3]^T$ ). Interessiert in einer Ebene nur die Position und nicht die Orientierung, dann stellt der *Planar Three Link Manipulator* einen redundanten Roboter dar. Dessen Vorwärtstransformation ist ähnlich der des *Planar Two Link Manipulators* von Gleichung (3.58):

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ p_z \\ \psi \\ \theta \\ \phi \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} l_1 C1 + l_2 C12 + l_3 C123 \\ l_1 S1 + l_2 S12 + l_3 S123 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ q_{123} \end{bmatrix} \quad (3.74)$$

Weil als kartesische Freiheitsgrade nur x und y-Position gewertet werden, reduziert sich  $\vec{P}$  auf einen Vektor mit den 2 Elementen  $p_x$  und  $p_y$ . Die Jacobi-Matrix  $\underline{J}$  hat dann die Dimension  $2 \times 3$ :

$$\begin{aligned} \underline{J} &= \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -l_1 S1 - l_2 S12 - l_3 S123 & -l_2 S12 - l_3 S123 & -l_3 S123 \\ l_1 C1 + l_2 C12 + l_3 C123 & l_2 C12 + l_3 C123 & l_3 C123 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (3.75)$$

Für die Berechnung der Gelenkmomente zur KB im Gelenkraum gilt dann:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \\ \tau_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{21} \\ J_{12} & J_{22} \\ J_{13} & J_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \end{bmatrix} \quad (3.76)$$

Durch geschicktes Einwirken des Bedieners am Endeffektor, kann nun eine zeitliche Abfolge von Gelenkmomenten erzeugt werden, die den *Planar Three Link Manipulator* zur gewünschten Zielposition bringt. Die Bewegungssteuerung geschieht dabei rein intuitiv.

Möchte man am *Planar Three Link Manipulator* die KB für den kartesischen Raum realisieren, dann stehen bei der Rückwärtstransformation den hier berücksichtigten 2 kartesischen Freiheitsgraden 3 Gelenkwinkel gegenüber. Somit kann das IKP nur nach dem Einführen einer zusätzlichen Randbedingung eindeutig gelöst werden. Dies kann im einfachsten Fall das konkrete Festlegen eines einzelnen Gelenkwinkels sein, dann gilt die Rückwärtstransformation des *Planar Two Link Manipulators* oder wie für redundante Roboter üblich, das Einführen eines entsprechenden Gütekriteriums. Für das zu minimierende Gütefunktional können z. B. die Gelenkwinkeländerungen, benötigte Energie oder der Abstand zu singulären Lagen gewählt werden. Das damit erreichbare Bewegungsverhalten hat allerdings gewisse Einschränkungen und muss nicht den Erwartungen des Bedieners entsprechen.

### 3.3.5 Parallele Roboter

Bei parallelen Robotern ist der Endeffektor durch mehrere kinematische Ketten mit der Roboterbasis verbunden. Diese bestehen in der Regel sowohl aus passiven als auch aus aktiven Gelenken. Sie bieten z. Z. ein breites Feld für Forschungsaktivitäten, [68]. Anwendungen liegen z. B. auf dem Gebiet der Werkzeugmaschinen beim Fräsen.

Im Gegensatz zu seriellen Kinematiken haben Parallelkinematiken die Eigenschaft, dass deren inverses kinematisches Problem (IKP) üblicherweise sehr einfach, analytisch lösbar ist. Aus der gewünschten Position und Orientierung der Endeffektorplattform können die Lagen

der kinematischen Ketten und somit die Sollposition der angetriebenen Gelenke mit Hilfe geometrischer Beziehungen berechnet werden. Allerdings ist die Vorwärtstransformation (direktes kinematisches Problem, DKP) eines parallelen Roboters in der Regel nicht analytisch, sondern nur durch Iterationsverfahren lösbar.

Diese Tatsache hat auch Auswirkungen auf die Überführung von Gelenk- in kartesische Geschwindigkeiten oder umgekehrt. War es bei einem seriellen Roboter sehr einfach, die Jacobi-Matrix  $\underline{J}(\vec{q})$ , z. B. nach Gleichung (3.32) durch Differenzieren der Endeffektorpose, zu berechnen und damit aus vorgegebenen Gelenkgeschwindigkeiten die kartesischen Geschwindigkeiten des Endeffektors zu ermitteln, so spielt bei einer Parallelkinematik die inverse Jacobi-Matrix eine wesentlich größere Rolle. Sie wird z. T. auch als Jacobi-Matrix des IKP bezeichnet und kann durch Differentiation der Rückwärtstransformation berechnet werden.

$$\underline{J}_{IKP} = \underline{J}^{-1}(\vec{P}) = \frac{d\vec{q}(\vec{P})}{d\vec{P}} \quad (3.77)$$

$$\underline{J}^{-1}(\vec{P}) = \begin{bmatrix} \frac{\delta q_1}{\delta p_x} & \frac{\delta q_1}{\delta p_y} & \frac{\delta q_1}{\delta p_z} & \frac{\delta q_1}{\delta \phi} & \frac{\delta q_1}{\delta \theta} & \frac{\delta q_1}{\delta \psi} \\ \frac{\delta q_2}{\delta p_x} & \frac{\delta q_2}{\delta p_y} & \frac{\delta q_2}{\delta p_z} & \frac{\delta q_2}{\delta \phi} & \frac{\delta q_2}{\delta \theta} & \frac{\delta q_2}{\delta \psi} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \frac{\delta q_m}{\delta p_x} & \frac{\delta q_m}{\delta p_y} & \frac{\delta q_m}{\delta p_z} & \frac{\delta q_m}{\delta \phi} & \frac{\delta q_m}{\delta \theta} & \frac{\delta q_m}{\delta \psi} \end{bmatrix} \quad (3.78)$$

Mit ihr können im kartesischen Raum vorgegebene Geschwindigkeiten  $\vec{P}$  in dafür notwendige Gelenkgeschwindigkeiten  $\vec{q}$  überführt werden.

$$\vec{q} = \underline{J}^{-1}(\vec{P})\vec{P} \quad (3.79)$$

Neben den von seriellen Manipulatoren schon bekannten Singularitäten, bei denen die Determinante der Jacobi-Matrix zu null wird und Freiheitsgrade verloren gehen, sind für parallele Roboter Singularitäten von sehr großer Bedeutung, bei denen zusätzliche Freiheitsgrade entstehen. An diesen nimmt die Determinante der Jacobi-Matrix des IKP  $\underline{J}^{-1}(\vec{P})$  den Wert 0 an. Die Singularitäten des IKP müssen unbedingt verhindert werden, da sie zu unvorhersehbaren Bewegungen des Endeffektors führen können, ohne dass sich dabei die Antriebsgelenke bewegen müssen.

Da es wesentlich einfacher ist, für einen parallelen Roboter dessen inverse Jacobi-Matrix zu berechnen als die Jacobi-Matrix des DKP, lassen sich auch unkompliziert Gelenkkräfte bzw. -momente in entsprechende kartesische Kräfte und Momente überführen. Analog zu (3.39) gilt dann:

$$\vec{\Delta} = \underline{J}^{-T}(\vec{P})\vec{\tau} \quad (3.80)$$

Die Transformation kartesischer Kräfte und Momente in entsprechende Gelenkmomente bzw. -kräfte nach Gleichung (3.39) bildete die Grundlage des Algorithmus zur KB im Gelenkraum. Sie ist im Gegensatz zu einem seriellen Roboter für eine Parallelkinematik wesentlich schwieriger zu realisieren. Deshalb bietet sich hier eher das Handführen im kartesischen Raum an. Der große Vorteil der KB im Gelenkraum, die Robustheit gegenüber singulären Lagen, kommt bei einem parallelen Manipulator nicht sehr stark zum tragen, da dort die Singularitäten des IKP wesentlich problematischer sind.

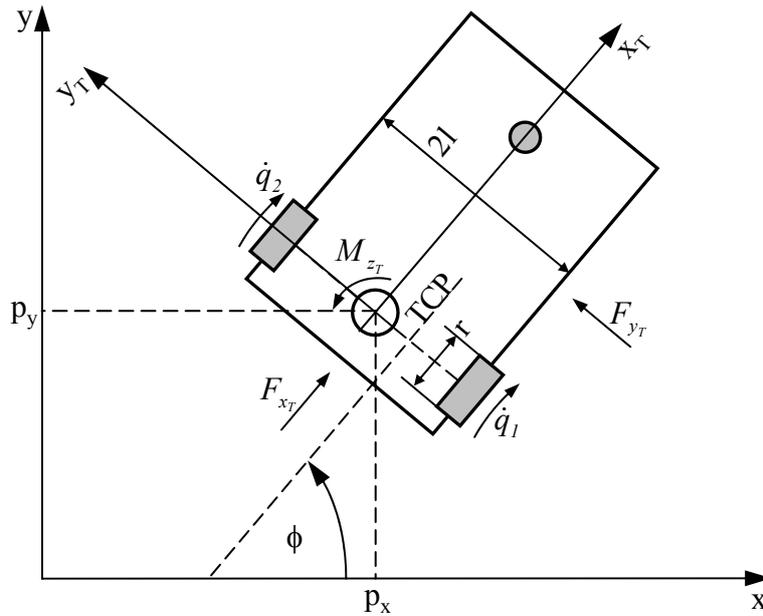


Abbildung 3.12: Mobiler Roboter mit zwei getrennt angetriebenen Rädern (*Differential Drive Robot*).

### 3.3.6 Mobile Roboter

Nach der Betrachtung unterschiedlicher Kinematiken stationärer Roboter soll nun abschließend kurz auf die Möglichkeit der KB im Gelenkraum bei mobilen Robotern eingegangen werden. Es ist zu erwarten, dass mobile Roboter in Zukunft eine wichtige Rolle in vielen Bereichen des täglichen Lebens [65] und auch der industriellen Produktion spielen werden. Aus diesem Grund finden auf dem Gebiet der sog. Assistenzroboter z. Z. umfangreich Forschungsaktivitäten statt. So wird z. B. in [89] ein mobiler Produktionsassistent vorgestellt und [61] beschreibt einen Algorithmus zur Verbesserung der Sicherheit beim Führen einer mobilen Plattform.

Die KB mobiler Roboter gestaltet sich ähnlich wie die stationärer Systeme. Sie soll am Beispiel einer mobilen Plattform mit zwei getrennt angetriebenen Rädern (*Differential Drive Robot*), siehe Abb. 3.12, demonstriert werden.

Wie in der stationären Robotik können auch Position und Orientierung eines mobilen Roboters durch eine homogene Transformationsmatrix beschrieben werden, vgl. (2.1). Bewegt sich eine mobile Plattform in nur einer Ebene, dann vereinfacht sich die Transformationsmatrix zu:

$$\underline{A} = \begin{bmatrix} \underline{R} & \vec{p} \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\phi & S\phi & 0 & p_x \\ -S\phi & C\phi & 0 & p_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.81)$$

Position und Orientierung können dann auch mit der Position  $p_x$  und  $p_y$  und dem Verdrehwinkel  $\phi$  im Vektor  $\vec{P}$  angegeben werden.

$$\vec{P} = \begin{bmatrix} p_x \\ p_y \\ \phi \end{bmatrix} \quad (3.82)$$

Im Gegensatz zu stationären Robotern versteht man unter der Vorwärtstransformation eines mobilen Roboters meist die Überführung der Gelenkgeschwindigkeiten in kartesische Geschwindigkeiten. Die Vorwärtstransformation der relativ einfachen Kinematik des *Differential Drive Robot* wird u. A. in [98] beschrieben. Mit den Geschwindigkeiten der beiden Antriebsräder  $\dot{q}_1$  und  $\dot{q}_2$ , dem Radabstand  $2l$  und dem Raddurchmesser  $r$  gilt für die Geschwindigkeiten im Roboterkoordinatensystem:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{y}_T \\ \dot{\phi}_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r\dot{q}_1}{2} + \frac{r\dot{q}_2}{2} \\ 0 \\ \frac{r\dot{q}_1}{2l} - \frac{r\dot{q}_2}{2l} \end{bmatrix} \quad (3.83)$$

Die translatorischen und Orientierungsgeschwindigkeiten können jeweils mit Hilfe der inversen Rotationsmatrix von (3.81) in Geschwindigkeiten des Roboters im BKS transformiert werden. Reduziert für den *Differential Drive Robot* ergeben sich diese wie folgt:

$$\begin{bmatrix} \dot{p}_x \\ \dot{p}_y \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C\phi & -S\phi & 0 \\ S\phi & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{y}_T \\ \dot{\phi}_T \end{bmatrix} \quad (3.84)$$

Für die KB sind allerdings nur die Geschwindigkeiten im Roboterkoordinatensystem von Bedeutung. Betrachtet man die Gleichung (3.83), dann kann diese auch in die folgende Schreibweise gebracht werden,

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_T \\ \dot{y}_T \\ \dot{\phi}_T \end{bmatrix} = \underline{J} \begin{bmatrix} \dot{q}_1 \\ \dot{q}_2 \end{bmatrix}, \quad (3.85)$$

wobei jetzt die Jacobi-Matrix  $\underline{J}$  den Zusammenhang zwischen Rad- und kartesischen Geschwindigkeiten herstellt.

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & \frac{r}{2} \\ 0 & 0 \\ \frac{r}{2l} & -\frac{r}{2l} \end{bmatrix} \quad (3.86)$$

Genau wie bei stationären Robotern können außerdem mit Hilfe des Lösungsansatzes über die virtuelle mechanische Arbeit, auf den Roboter am *TCP* einwirkende Kräfte und Momente in Gelenkmomente bzw. -kräfte überführt werden, siehe dazu Gleichung (3.39). Für das gewählte Beispielsystem, des *Differential Drive Robots* mit 3 kartesischen Freiheitsgraden, gilt bezogen auf das Roboterkoordinatensystem der Zusammenhang von (3.87) zur Berechnung der Radmomente  $\tau_1$  und  $\tau_2$ .

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \underline{J}^T \begin{bmatrix} F_{xT} \\ F_{yT} \\ M_{zT} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{r}{2} & 0 & \frac{r}{2l} \\ 0 & 0 & -\frac{r}{2l} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_{xT} \\ F_{yT} \\ M_{zT} \end{bmatrix} \quad (3.87)$$

Nach Gleichung 3.87 führt eine Kraft in x-Richtung des Roboterkoordinatensystems zu gleichen Radmomenten, die im Fall identischen dynamischen Verhaltens auch die gleichen Bewegungen zur Folge haben. Kräfte in y-Richtung haben keine Wirkung. Das Moment  $M_{zT}$ , mit dem intuitiv eine Drehung des Roboters erzeugt werden soll, resultiert nach der Transformation in den Gelenkraum in Radmomenten mit entgegen gesetzter Drehrichtung.

Somit kann der Ansatz zur KB im Gelenkraum auch zur intuitiven Bewegungsteuerung mobiler Roboter sinnvoll sein. Dies gilt vor allem für Roboter mit Rädern. Schreitende Roboter können mit diesem Ansatz allerdings nicht durch den Raum geführt werden. Für sie kann unter Umständen die kartesische Bewegungsteuerung in Frage kommen.

### 3.4 Wunschverhalten des Manipulators

Bei der KB muss der Manipulator auf Einwirkungen von außen entsprechend reagieren. Welche Charakteristik dieses Verhalten hat bzw. haben soll, wird in diesem Abschnitt genauer untersucht. Bisher wurden weder die Dynamik des Roboterarmes, noch der Einfluss der Regelungen berücksichtigt. Außerdem wurde für das Wunschverhalten (WV) vereinfacht angenommen, dass Kräfte bzw. Momente entsprechend dazu proportionale Geschwindigkeiten zur Folge haben, wobei alle Beschleunigungs- oder Verzögerungsvorgänge unendlich schnell stattfinden. Ohne diese Vereinfachungen setzt sich das Bewegungsverhalten des Manipulators zusammen aus:

- Der Roboterdynamik,
- Der Robotersteuerung und -regelung,
- Dem WV der KB.

#### 3.4.1 Dynamik des Robotersystems

Im Abschnitt 2.2 wurde das dynamische Verhalten eines stationären Roboters durch die Gleichung (2.11) beschrieben. Dieses ist vor allem für die Dimensionierung der Regelkreise wichtig (siehe dazu auch 2.5). In der Regel sind kommerzielle Robotersysteme mit einer Robotersteuerung ausgerüstet, die die Regelkreise bereits enthält. Nur in sehr seltenen Fällen, wie z. B. an Forschungseinrichtungen, wird der Anwender diese selbst realisieren. Das hat zur Folge, dass die Struktur des verwendeten Robotersystems maßgeblich das dynamische Verhalten des Roboters bestimmt und deshalb auch im WV der KB berücksichtigt werden muss. Dabei kann die Bewegungssteuerung auf unterschiedlichen Ebenen geschehen, die im Folgenden aufgezählt und beschrieben werden, siehe auch [120].

**Bewegungssteuerung auf der Ebene der Antriebsmomente** Grundsätzlich basiert die Bewegung eines Roboter gelenks auf einem entsprechenden Antriebsmoment bei einem rotatorischen Gelenk bzw. einer Antriebskraft bei einem Schubgelenk. Im Falle der Verwendung von Elektromotoren als Antriebe ist das Moment proportional zum Strom. Mit Hilfe eines Stromregelkreises lässt sich also das gewünschte Antriebsmoment vorgeben. Die Stromregelungen sind der Regel direkt in den Leistungsbaugruppen zur Ansteuerung der Elektromotoren enthalten. Bei kommerziellen Robotern besteht meist keine Möglichkeit zur Vorgabe der Sollströme durch den Benutzer, ohne Eingriffe am Steuerungssystem vorzunehmen.

**Bewegungssteuerung auf der Ebene der Gelenkgeschwindigkeiten** Üblicherweise sind neben den schon erwähnten Stromreglern in den Leistungsbaugruppen von Industrierobotern zusätzlich der Gelenkgeschwindigkeitsregler enthalten. Somit ist das Eingangssignal eines sog. Achsverstärkers der Sollwert der Gelenkgeschwindigkeit. Da die Achsverstärker in der Regel fest mit der Robotersteuerung verbunden sind, lassen sich die Gelenkgeschwindigkeiten nicht direkt vorgeben. Soll diese Möglichkeit vorhanden sein, dann muss das vorhandene Steuerungssystem ersetzt werden, was häufig in Forschungseinrichtungen praktiziert wird. Im Gegensatz der Schaffung des Zuganges zu den Motorenströmen ist diese Variante relativ unkompliziert, da die Leistungsbaugruppen in ihrer ursprünglichen Form bestehen bleiben können und nur die eigentliche Steuerung ersetzt wird. Im industriellen Einsatz ist diese Form der Bewegungssteuerung allerdings nicht anzutreffen.

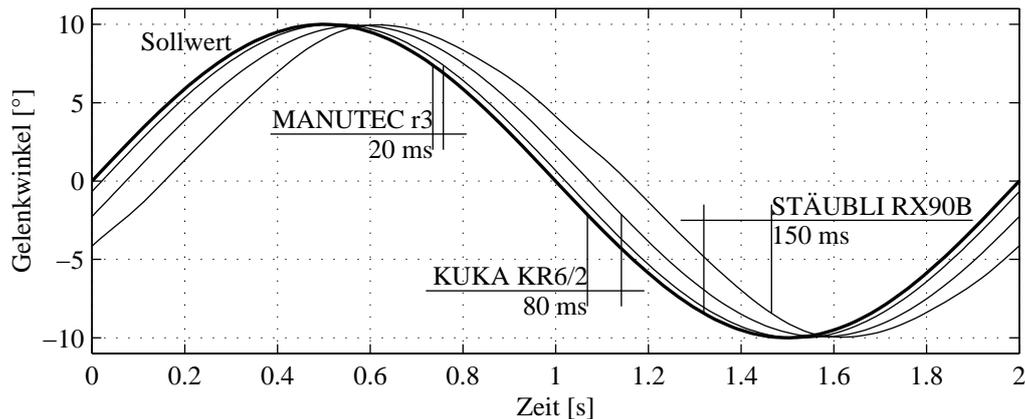


Abbildung 3.13: Bewegungsverhalten von Robotersystemen mit verschiedenen Möglichkeiten der Bewegungssteuerung.

**Bewegungssteuerung auf der Ebene der Gelenkposition** Die Robotersteuerung generiert bei einem Industrieroboter üblicherweise die Sollwerte der Gelenkgeschwindigkeiten für die Achsverstärker. Sie enthält also die Lageregelkreise der einzelnen Gelenke. Diese sind in der *Firmware* der Robotersteuerung implementiert. Der Benutzer hat meist keine Möglichkeit zum Ändern ihrer Parameter oder gar ihrer Struktur. Ob und in welcher Form die Sollwerte der Gelenkpositionen direkt vorgegeben werden können ist abhängig von dem verwendeten Steuerungssystem, also vom Hersteller. Gegebenenfalls kann auch entsprechende Zusatzsoftware installiert werden, die dann diese Funktionalität zur Verfügung stellt. Ein Beispiel dafür sind die Roboter der Fa. KUKA. Dort gewährt das sog. RSI (Robot Sensor Interface) direkten Echtzeitzugriff auf die Lageregelkreise, [51]. Eine ähnliche Funktionalität liefert z. B. auch das *ALTER Kommando* der Roboterprogrammiersprache V+ (ADEPT und STÄUBLI), [106]. Es ist nach der Installation der *Enhanced Trajectory Control License* verfügbar, die allerdings nicht im Standardumfang enthalten ist.

**Bewegungssteuerung auf der Ebene des Trajektoriengenerators** Häufig besteht die einzige Möglichkeit zur Bewegungssteuerung eines Industrieroboters in der Vorgabe einer Zielposition. Diese wird dann z. B. durch Gelenk- oder Linearinterpolation angefahren. Teilweise sind auch Sonderformen wie z. B. Kreis- und Helixinterpolation vorhanden. Die Zielposition kann entweder in Gelenk- oder in kartesischen Koordinaten angegeben werden. Aus Start- und Zielposition erzeugt der Trajektoriengenerator dann den Zeitverlauf der Bewegungsgrößen. Die geschieht in der Regel so, dass sog. ruckfreie Bewegungen entstehen, d. h. der Beschleunigungsverlauf ist stetig, z. B. rampenförmig. Der Benutzer kann lediglich noch einige Parameter, wie maximale Geschwindigkeit, maximale Beschleunigung und Beschleunigungsprofil wählen.

Ein einfaches Experiment soll die Wirkungen der unterschiedlichen Eingriffspunkte zur Bewegungssteuerung zeigen. Bei drei verschiedenen Robotersystemen mit ähnlichen Tragfähigkeiten wurde der Sollwinkel des Gelenks 1 in Form einer Sinusschwingung mit einer Amplitude von  $10^\circ$  und einer Periodendauer von  $2\text{ s}$  vorgegeben. Die daraus resultierenden Verläufe der Istpositionen wurden aufgezeichnet und sind in Abb. 3.13 dargestellt. Folgende Robotersysteme mit unterschiedlichen Möglichkeiten der Bewegungssteuerung wurden gewählt:

1. Bei dem Industrieroboter STÄUBLI RX90B erzeugt der Trajektoriengenerator den Verlauf der Sollwinkel entsprechend der vorgegebenen Zielposition. Um eine kontinuierliche Bewegung zu erhalten, kann der Modus der sog. „verschliffenen Bewegung“ benutzt werden.
2. Durch das RSI (Robot Sensor Interface) besteht bei den Robotern der Fa. KUKA (hier KR6/2 mit Robotersteuerung KRC2) die Möglichkeit, unter Umgehung des Trajektoriengenerators, Sollwertänderungen direkt auf die Lageregelkreise aufzuschalten.
3. Die direkte Vorgabe der Gelenkgeschwindigkeiten für die Achsverstärker erlaubt der MANUTEC r3 Roboter. Er wurde mit einer speziellen, auf einem Signalprozessor basierenden, Robotersteuerung ausgerüstet.

Alle drei Robotersysteme werden im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch für verschiedenste Experimente verwendet und an diesen Stellen entsprechend näher beschrieben.

Aus dem Diagramm von Abb. 3.13 wird ersichtlich, dass bei dem Robotersystem 1 die größte Verschiebung zwischen Soll- und Istwinkel auftritt. Sie beträgt ca. 150 ms. Dies ist auf den im System aktiven Trajektoriengenerator zurückzuführen. Nur noch ca. 80 ms sind die beiden Winkelverläufe bei dem Robotersystem 2 gegeneinander verschoben, da dort direkt der Lagesollwert beeinflusst werden kann. Allerdings können Reglerstruktur und -parameter nicht verändert werden. Am besten folgt der Istwert dem Sollwert bei dem Robotersystem 3. Dort kann der Lageregler frei programmiert werden und liefert als Ausgangssignal den Sollwert der Gelenkgeschwindigkeit.

Für die meisten Anwendungsfälle sind diese Unterschiede im Bewegungsverhalten unerheblich. Im Falle der KMR oder speziell auch bei der KB von Robotern müssen sie aber unbedingt berücksichtigt werden.

Genauere Informationen über das dynamische Verhalten eines Systems, als beispielsweise Abb. 3.13 zeigt, enthält der Frequenzgang. Dieser ist als Amplituden- und Phasengang für die eben verwendeten 3 Robotersysteme in Abb. 3.14 dargestellt. Die Amplitude der Sinusschwingung beträgt dabei  $1^\circ$ . Daraus ist zu erkennen, dass das Robotersystem 3 (MANUTEC) die größte Bandbreite hat. Die  $-3dB$ -Frequenz liegt bei rund  $32\text{ s}^{-1}$  und die  $-90^\circ$ -Frequenz bei ca.  $38\text{ s}^{-1}$ . Im Vergleich dazu ist der  $-3dB$ -Amplitudenabfall bei den Robotersystemen 1 und 2 schon bei  $\omega \approx 17\text{ s}^{-1}$  erreicht. Außerdem ergeben sich für das KUKA-System eine  $-90^\circ$ -Frequenz von ca.  $17\text{ s}^{-1}$  und für den STÄUBLI-Roboter von sogar nur  $10\text{ s}^{-1}$ . Dies ist vor allem auf den Trajektoriengenerator zurückzuführen, der die Wirkung einer Totzeit hat.

### 3.4.2 Wahl der Struktur des Wunschverhaltens

Wie schon erwähnt ist das bisher verwendete WV für reale Anwendungen ungeeignet. Denkt man an die Definition der mechanischen Impedanz als Feder-Masse-Dämpfer-System und überträgt diese auf das Roboterverhalten im freien Raum, dann bietet sich als Basis des WV die Dynamik eines Masse-Dämpfer-Systems an. In [85] wurde dessen Einsatz für den kartesischen Raum vorgeschlagen. Dieser Ansatz ist auch bei der KB im Gelenkraum sinnvoll [125], [121]. Gemäß der Differenzialgleichung von (3.88) und dem Signalflussbild von Abb. 3.15 wird aus dem auf ein Roboter gelenk wirkenden Drehmoment  $\tau$  der Sollwerte des Gelenkwinkles  $q_{soll}$  bestimmt.

$$\tau = m \frac{d^2 q_{soll}}{dt^2} + d \frac{dq_{soll}}{dt} \quad (3.88)$$

Handelt es sich statt eines Drehgelenks um ein Schubgelenk, dann stellt  $\tau$  die auf das Gelenk

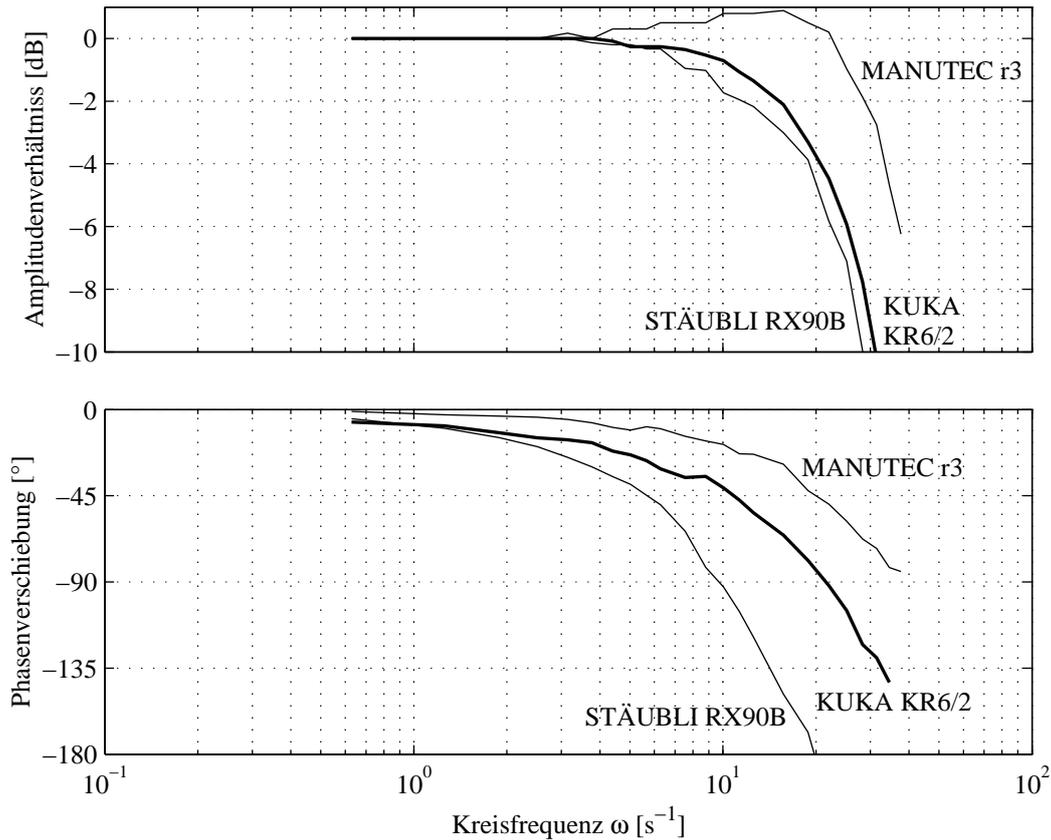


Abbildung 3.14: Frequenzgang der Position des Gelenks 1 verschiedener Robotersysteme.

einwirkende Kraft und  $q_{soll}$  die translatorische Sollposition des Gelenks dar. Der Parameter  $m$  repräsentiert das Massenträgheitsmoment des WV (bzw. die Masse bei einem Schubgelenk) und  $d$  stellt die virtuelle Dämpfung dar.

### 3.4.3 Parametrierung des Wunschverhaltens

Ausgehend von der Grundstruktur des WV (Masse-Dämpfer-System), soll nun ein geeigneter Weg zur Bestimmung der Parameter  $m$  und  $d$  gefunden werden. Dabei sind folgende Aspekte zu berücksichtigen:

- Die Parametrierung WV muss so erfolgen, dass sich das Handführen des Roboters für den Bediener komfortabel anfühlt,
- Die Sicherheit des Menschen, der sich mit dem Roboter in Interaktion befindet, hat höchste Priorität, d. h. die Stabilität des gesamten Systems muss garantiert werden. Es dürfen keine für den Bediener gefährlichen Reaktionen des Manipulators auftreten,
- Die Parameter  $m$  und  $d$  müssen zur Dynamik des Roboters und der Dynamik der relevanten Regelkreise passen.

Transformiert man zunächst die Differenzialgleichung des WV von (3.88) in den kontinuierlichen Bildbereich, dann ergibt sich für das Übertragungsverhalten zwischen Sollposition

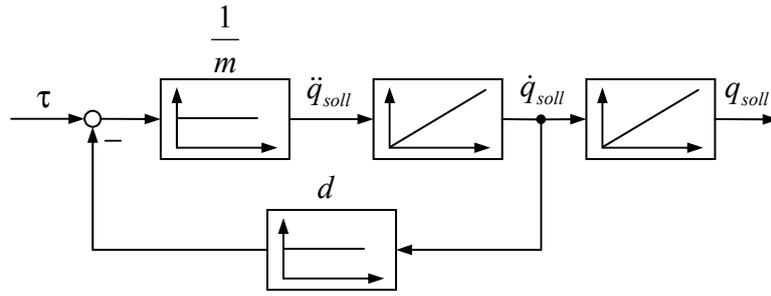


Abbildung 3.15: Signalflussbild des Masse-Dämpfer-Wunschverhaltens.

(Ausgang) und Gelenkmoment (Eingang) IT1-Verhalten.

$$G_{wunsch}(p) = \frac{q_{soll}(p)}{\tau(p)} = \frac{1}{p(mp + d)} \quad (3.89)$$

Besser für das Finden von Werten für die Parameter  $m$  und  $d$  ist allerdings das Übertragungsverhalten zwischen Gelenkmoment und Sollgeschwindigkeit.

$$\frac{q_{soll}(p)p}{\tau(p)} = \frac{\dot{q}_{soll}}{\tau(p)} = \frac{1}{mp + d} \quad (3.90)$$

Nach der Division durch  $d$  lässt sich (3.90) in die Normalform eines PT1-Übertragungsgliedes mit der Verstärkung  $\frac{1}{d}$  und der Zeitkonstante  $\frac{m}{d}$  bringen.

$$\frac{\dot{q}_{soll}}{\tau(p)} = \frac{\frac{1}{d}}{1 + \frac{m}{d}p} \quad (3.91)$$

Diese Darstellungsform ist zur Parametrierung des WV eines Gelenks am besten geeignet. Der Faktor  $\frac{1}{d}$  kann auch als Geschwindigkeitsverstärkung angesehen werden. Er bestimmt den Endwert der Gelenkgeschwindigkeit bei Einwirkung eines konstanten Drehmomentes bzw. einer Kraft. Die Zeitkonstante  $\frac{m}{d}$  legt die Dynamik des Übergangsvorganges, also des Beschleunigungs- und Verzögerungsverhaltens fest.

Anders als bei den kartesischen Ansätzen zur KB sind die Eingangssignale des WV (Momente und Kräfte) bei dem Ansatz im Gelenkraum von der Kinematik des Manipulators abhängig. Diese Tatsache macht die Parametrierung im Gelenkraum etwas komplizierter.

Zunächst müssen die Maximalwerte der Kräfte und Momente  $\vec{\Gamma}_{max}$  ermittelt werden, die durch den Benutzer auf den Endeffektor wirken. Mit Hilfe von Gleichung (3.39) können daraus die maximalen Werte der Gelenkmomente bzw. -kräfte  $\vec{\tau}_{max}$  berechnet werden. Da die Maximalwertermittlung durch die Jacobi-Matrix relativ schwierig ist, genügt häufig auch eine grobe Abschätzung von  $\vec{\tau}_{max}$ . Jedem Robotergelenk wird dann die maximale Gelenkgeschwindigkeit  $\dot{q}_{max}$  zugeordnet. Jetzt lässt sich der Dämpfungsparameter des WV nach Gleichung (3.92) berechnen:

$$d = \frac{\tau_{max}}{\dot{q}_{max}} \quad (3.92)$$

Die Wahl des Massenträgheitsmomentes  $m$  bestimmt nun die Zeitkonstante des WV. Diese repräsentiert bei dem verwendeten PT1-Glied direkt die Bandbreite. Sie wird auch als  $-3dB$  Frequenz  $\omega_{-3dB}$  bezeichnet und gibt an, bei welcher Frequenz einer sinusförmigen Anregung

die Amplitude des Ausgangssignals um  $3dB$  im Vergleich zum ungedämpften Signal abgesenkt wird.

$$-3 = 20 \lg |G(j\omega_{-3dB})| \quad (3.93)$$

Für das PT1-Übertragungssystem gilt:

$$\omega_{-3dB} = \frac{d}{m} \quad (3.94)$$

Die Bandbreite des WV muss aus Stabilitätsgründen in jedem Fall kleiner sein als die des entsprechenden Robotergelenks:

$$|G_{wunsch}(j\omega_{-3dB})| < |G_{gelenk}(j\omega_{-3dB})| \quad (3.95)$$

#### 3.4.4 Weitere Funktionen im Wunschverhalten

Das WV in Form eines Masse-Dämpfer-Systems bildet die Grundlage der KB eines Roboters. Für den praktischen Einsatz sind verschiedene Erweiterungen notwendig bzw. möglich.

**Ansprechschwelle** Ändert sich bei der KB die Orientierung des Endeffektors, dann müssen ständig die dadurch gemessenen Gewichtskräfte und -momente kompensiert werden (siehe dazu auch Abschnitt 3.5.1). Aufgrund von Ungenauigkeiten bei der Bestimmung von Masse und Schwerpunkt des Endeffektors kann die Gewichtskraftkompensation nie völlig fehlerfrei erfolgen. Dadurch können Kontaktkräfte und -momente gemessen werden, obwohl sich der Manipulator im freien Raum befindet. Dies führt dann zu einer ungewollten Bewegung des Roboters. Das sog. Driften kann durch die zusätzliche Implementierung einer Ansprechschwelle oder Totzone verhindert werden.

Die Ansprechschwelle stellt eine statische Nichtlinearität dar. Als Eingangssignal dient das berechnete Gelenkmoment infolge der Kontaktkräfte. Der Ausgang stellt das Eingangssignal für das WV dar. Ein mögliches Übertragungsverhalten ist in Abb. 3.16 dargestellt. Ist der Betrag des Gelenkmomentes kleiner als ein zuvor festgelegter Schwellwert, dann hat das WV als Eingangssignal den Wert 0 und es erfolgt somit keine weitere Bewegung des Roboters.

**Begrenzung der Gelenkgeschwindigkeiten** Der Bedienerschutz während der Interaktion zwischen Mensch und Roboter ist in jedem Falle sicherzustellen. Dafür müssen Maßnahmen ergriffen werden, die unabhängig von dem Algorithmus zur KB sind. Darauf wird im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch näher eingegangen werden. Es ist allerdings sinnvoll, kritische Situation gar nicht erst entstehen zu lassen, und so das Ansprechen von Sicherungsmechanismen zu vermeiden. Dies kann im einfachsten Fall durch die Limitierung der Gelenkgeschwindigkeiten im WV erreicht werden. Dazu wird der erste Integrator des Masse-Dämpfer-Systems durch einen Integrator mit Begrenzung ersetzt. Bei der Implementierung ist zu beachten, dass auch tatsächlich dessen innerer Wert begrenzt wird, um sog. *Wind-Up-Effekte* zu vermeiden.

Eine zweite Möglichkeit der Realisierung wäre das Ersetzen der linearen Geschwindigkeitsrückführung im IT1-WV durch eine Nichtlinearität. Dies kann z. B. durch geschwindigkeitsabhängige Variation des Dämpfungsparameters oder z. B. durch quadratische Rückführung der Gelenkgeschwindigkeit erfolgen.

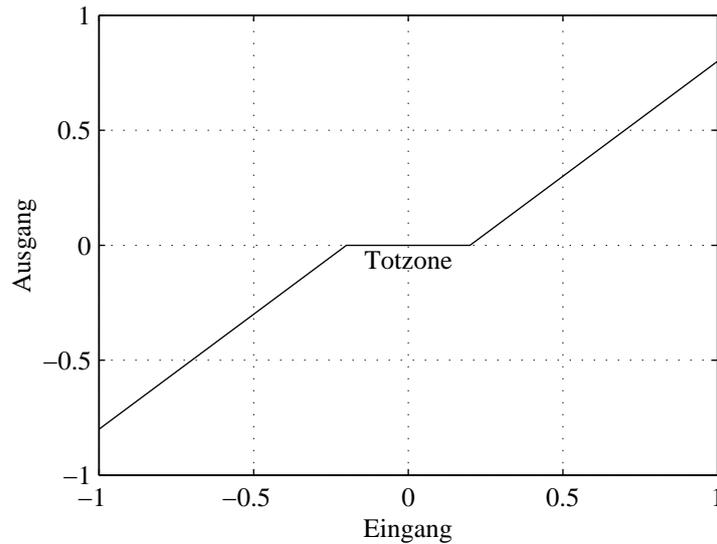


Abbildung 3.16: Mögliches Übertragungsverhalten zur Verhinderung ungewollter Drift (Ansprechschwelle).

**Federkonstante** Führt man im Signalflussbild von Abb. 3.15 zusätzlich den Gelenkpositionssollwert  $q_{soll}$  über die Federkonstante  $k$  zurück, wie in Abb. 3.17 dargestellt, dann entspricht das WV dem eines Feder-Masse-Dämpfer-Systems mit der folgenden Differentialgleichung:

$$\tau = m \frac{d^2 q_{soll}}{dt^2} + d \frac{dq_{soll}}{dt} + k q_{soll} \tag{3.96}$$

Dies hat zur Folge, dass der Manipulator immer in seine Nullposition zurückkehrt, falls keine äußeren Kräfte und Momente auf ihn einwirken. Die Nullposition kann je nach Implementierung z. B. die aktuelle Position zum Zeitpunkt des Starts der KB sein. Mit zunehmender Entfernung zur Nullposition nimmt die notwendige Krafteinwirkung für eine Positionsänderung zu. Für das reine *Teach In* ist der Einsatz des Feder-Masse-Dämpfer-Systems nicht sinnvoll, [3]. Dennoch lassen sich einige Anwendungsmöglichkeiten finden. Dazu zählen z. B.:

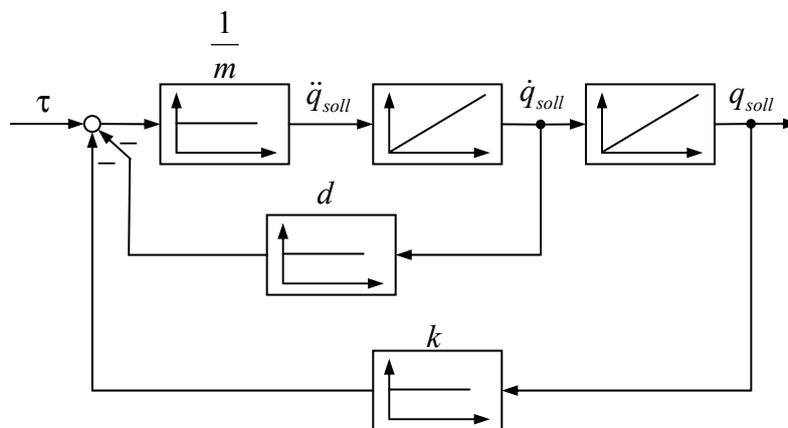


Abbildung 3.17: Signalflussbild des Feder-Masse-Dämpfer-Wunschverhaltens.

- Assistenzaufgaben des Roboters, z. B. Bohren oder Kleben – Das Werkzeug ist dabei am Roboter montiert und wird durch den Bediener geführt. Nach dem Fertigstellen des Arbeitsschrittes kehrt das Werkzeug durch die Federwirkung im WV an seine Ausgangsposition zurück,
- Beim *Teach In* kann der Zugang zu bestimmten Bereichen im Arbeitsraum durch „lokale Federn“ erschwert oder verhindert werden. Anders als bei einer harten Begrenzung stoppt die Bewegung des Manipulators nicht abrupt, sondern wird durch die Federwirkung sanft gebremst. Dem Bediener werden somit die „verbotenen Bereiche“ im Arbeitsraum intuitiv vermittelt. Die Realisierung muss sich dabei nicht auf eine Federkonstante beschränken. Die Krafterückwirkung kann auch abhängig von der Position des Endeffektors, ähnlich wie bei Potenzialfeldern, definiert werden. Diese Funktionalität wird in einem späteren Abschnitt noch eingehender vorgestellt.

**Anschläge der Gelenke** Üblicherweise ist der Arbeitsbereich eines Robotergelenks beschränkt. Endlosachsen kommen nur sehr selten vor. Diese Grenzen müssen bei der Implementierung des WV berücksichtigt werden. Folgende Funktionen sind dabei zu realisieren:

- Der Integrator für die Gelenkposition  $q_{soll}$  in Abb. 3.15 ist auf den maximalen Arbeitsbereich zu begrenzen,
- Im Falle der Verletzung einer Beschränkung ist zusätzlich der Integrator der Gelenkgeschwindigkeit auf den Wert 0 zu setzen, um *Wind-Up-Effekte* zu verhindern.

Diese Maßnahmen führen dazu, dass die Roboterbewegung an den Gelenkansschlägen plötzlich stoppt. Allerdings ist eine ruckartige Bewegungsänderung sehr unkomfortabel. Ein sanftes Abbremsen des Roboters schon vor dem Anschlag wäre wünschenswert. Zwei einfache Realisierungsmöglichkeiten sollen hier erwähnt werden.

Der erste Ansatz basiert auf der schon beschriebenen Federwirkung. Diese wird im Bereich nahe der Arbeitsraumbegrenzung des Gelenks aktiviert. Neben einer wegproportionalen Federkraft sind ebenso wieder nichtlineare Verläufe denkbar. Der Einsatz der virtuellen Federn hat allerdings folgenden Nachteil: Der Roboter kann nicht ohne Kraftereinwirkung innerhalb des Grenzbereiches verweilen. Dies reduziert den Arbeitsraum des Manipulators. Zwei Beispiele für die Federkraft in Abhängigkeit von der Gelenkposition zeigt die Abb. 3.18a.

Die zweite Möglichkeit zur Begrenzung der Gelenkpositionen ist die Erhöhung der Dämpfung  $d$  im WV in der Nähe des Anschlages. Dadurch verringert sich der Verstärkungsfaktor zwischen Gelenkmoment (bzw. -kraft) und der Gelenkgeschwindigkeit (Geschwindigkeitsverstärkung, Gleichung 3.91). Der Roboter bewegt sich bei gleich bleibender Kraftereinwirkung entsprechend langsamer. Ähnlich wie schon bei dem Einsatz der virtuellen Feder sind unterschiedliche Dämpfungsverläufe vorstellbar, siehe auch Abb. 3.18b. Auch Kombinationen von Federn und Dämpfern sind vorstellbar.

**Deaktivierung einzelner Gelenke** Je nach Parametrierung der WV kann es manchmal sinnvoll sein, die Bewegung einzelner Gelenke zu sperren. Zum Beispiel ist es für die Grobpositionierung eines 6-Gelenk-Knickarmroboters nicht notwendig, die Gelenke 4, 5 und 6 zu steuern. Besonders wichtig kann die Deaktivierung bei einem redundanten Manipulator sein, da sich dort niemals alle Gelenke unabhängig von einander steuern lassen. Die Bewegungssperre erreicht man durch einfaches Nullsetzen (Auftrennen) des Eingangs  $\tau$  beim WV, siehe auch Abb. 3.15.

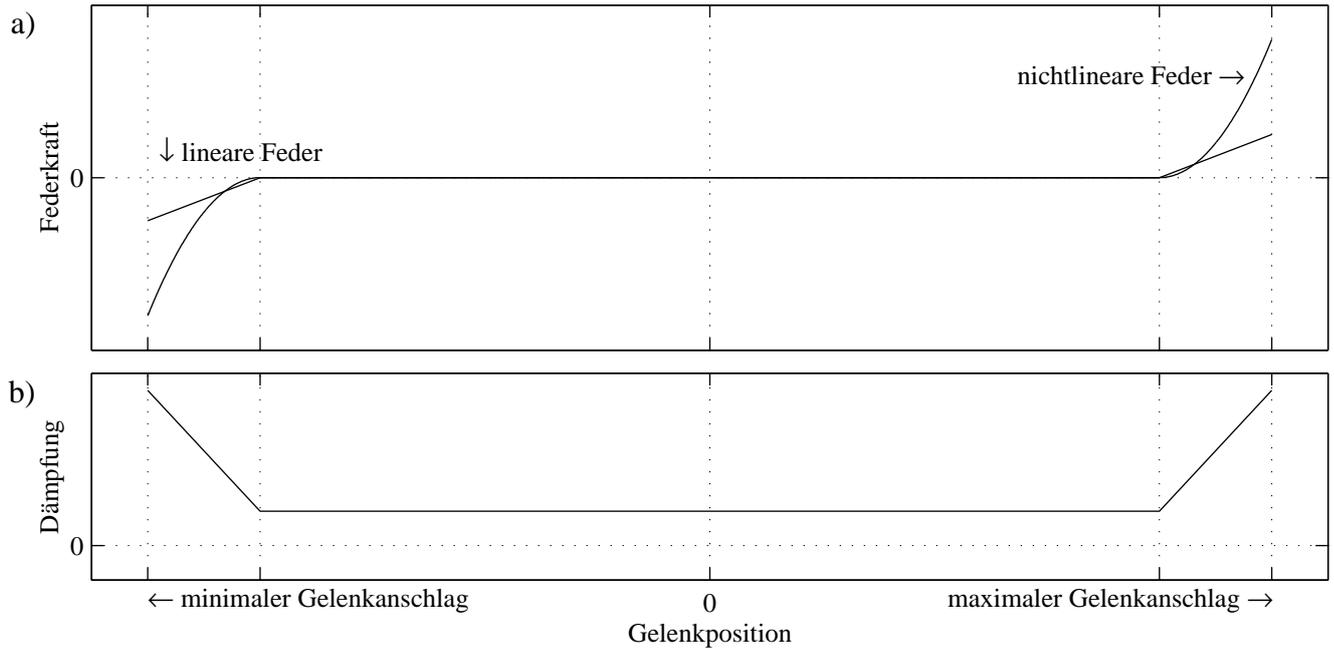


Abbildung 3.18: Möglicher Verlauf der Federkraft bzw. der Dämpfung des Wunschverhaltens zum Realisieren von Gelenkansschlägen.

**Virtuelle Arbeitsraumbeschränkungen** Eine interessante Funktionalität mit einem breiten Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten ist die Begrenzung des Arbeitsraumes. Diese kann sowohl im kartesischen Raum als auch im Gelenkraum erfolgen. Dabei können ausgewählte Regionen des Arbeitsbereiches für den Roboter während der KB gesperrt werden. Besonders anschaulich lässt sich dies anhand kartesischer Koordinaten beschreiben.

Die Idee der virtuellen Arbeitsraumbeschränkung basiert auf der Veränderung des WV in der Nähe der verbotenen Bereiche. Nutzt man die Funktionalität des Handführens für das komfortable *Teach In*, dann soll der Benutzer die festgelegten Arbeitsraumbegrenzungen anhand des Roboterhalten spüren und daraufhin seine Bedienhandlungen korrigieren. Dadurch können Hindernisse während des *Teach In* intuitiv umfahren werden. Das kann besonders dann sehr hilfreich sein, wenn diese erst zu einem späteren Zeitpunkt vorhanden sind. Verwendet man das Handführen zum Anlernen eines kompletten Bewegungspfades des Endeffektors, dann steht ebenfalls eine effektive Kollisionsvermeidung zur Verfügung. Die notwendigen Daten für die virtuelle Arbeitsraumbegrenzung lassen sich z. B. aus den CAD-Daten der kompletten Anlage entnehmen und auch automatisiert aufbereiten.

Für die Realisierung ist eine Vielzahl von Varianten denkbar. Wie schon bei den Gelenkansschlägen kann z. B. die Dämpfung im WV erhöht oder eine Federwirkung aktiviert werden. Diese bietet sich besonders dann an, wenn Bewegungssteuerung und Arbeitsraumbeschränkung im gleichen Koordinatensystem erfolgen, z. B. in Gelenkkoordinaten. Für Mischformen wäre eine entsprechende Transformation von Dämpfungs- bzw. Steifigkeitsmatrix notwendig. Dies hätte zur Folge, dass die Matrizen des WV ( $\underline{d}$  und evtl.  $\underline{k}$ ) dann von ihrer sonst üblichen diagonalen Form abweichen würden. Die Gleichungen (3.97) und (3.98) stellen den Zusammenhang zwischen Dämpfungs- bzw. Steifigkeitsmatrizen im Gelenkraum (glnk) und kartesischen Raum (kart), unter Verwendung der aktuellen Jacobi-Matrix  $\underline{J}$  des Roboters, her. Sie ergeben sich durch Gleichsetzen der entsprechenden Kraft-/ Momentvektoren nach

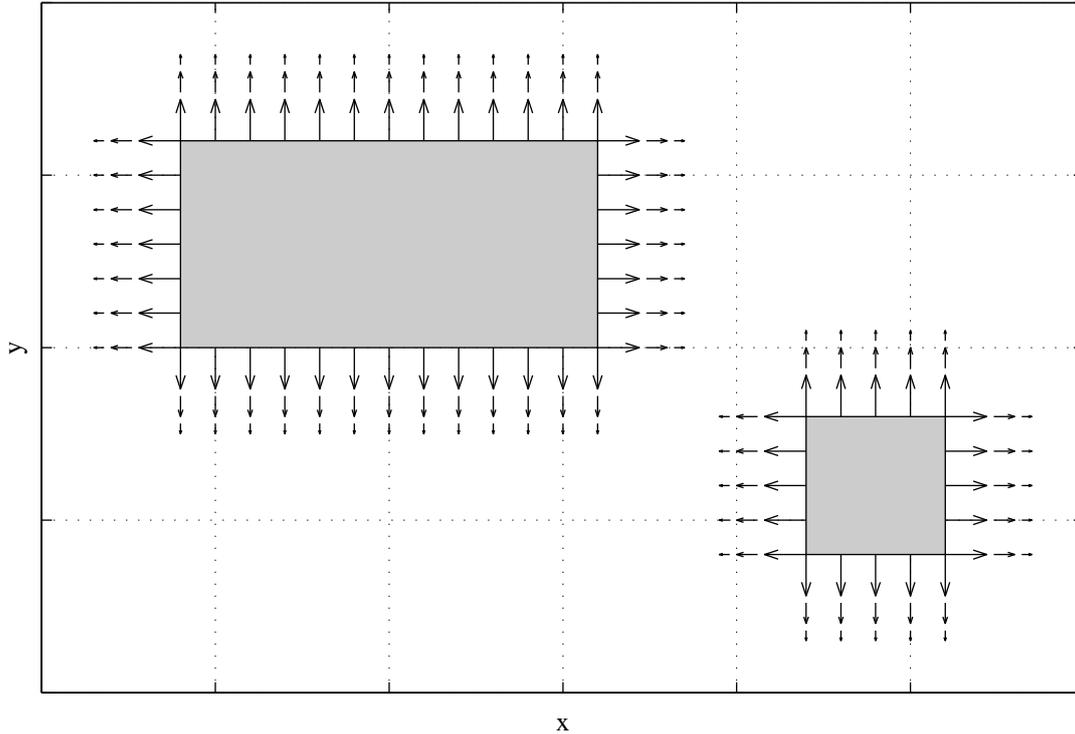


Abbildung 3.19: Beispiel der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung mittels eines Kraft-Potenzialfeldes.

Gleichung (3.39):

$$\underline{d}_{glnk} = \underline{J}^T \underline{d}_{kart} \underline{J} \quad (3.97)$$

$$\underline{k}_{glnk} = \underline{J}^T \underline{k}_{kart} \underline{J} \quad (3.98)$$

Zur Vollständigkeit soll an dieser Stelle noch die Transformation der Massenträgheitsmatrix  $\underline{m}$  erwähnt werden. Nach dem Gleichsetzen der durch die Massen bedingten Kräfte und Momente zwischen Gelenkraum und kartesischen Raum erhält man (3.99).

$$\underline{m}_{glnk} \vec{q} = \underline{J}^T \underline{m}_{kart} \underline{J} \vec{q} + \underline{J}^T \underline{m}_{kart} \underline{J} \vec{q} \quad (3.99)$$

Bei geringen Geschwindigkeiten sind sowohl  $\vec{q}$  als auch  $\underline{J}$  klein, so dass näherungsweise gilt:

$$\underline{m}_{glnk} \approx \underline{J}^T \underline{m}_{kart} \underline{J} \quad (3.100)$$

Eine sehr anschauliche Methode der Arbeitsraumbegrenzung beim Handführen ist die Wirkung von virtuellen Kräften und/oder Momenten auf den Endeffektor. Diese wirken in der Nähe eines Hindernisses oder einer gesperrten Region scheinbar auf den Roboter ein und haben dann gemäß dem WV eine entsprechende Gegenbewegung zur Folge. Dabei ist es zunächst egal, ob für die KB der Gelenkraumansatz oder der kartesischer Ansatz benutzt wird. Hindernisse wirken somit abstoßend auf den Manipulator. Die Abstoßungskraft kann z. B. mit Hilfe eines Potenzialfeldes realisiert werden, [52]. Der Betrag der Kraft und deren Richtung sind abhängig von der aktuellen Endeffektorposition. Der Kraftvektor zeigt in der Regel vom Hindernis weg und sein Betrag nimmt mit geringer werdendem Abstand zu. Der Ansatz über Potenzialfelder wird auch für die Pfadplanung in der stationären und der mobilen Robotik [98] verwendet.

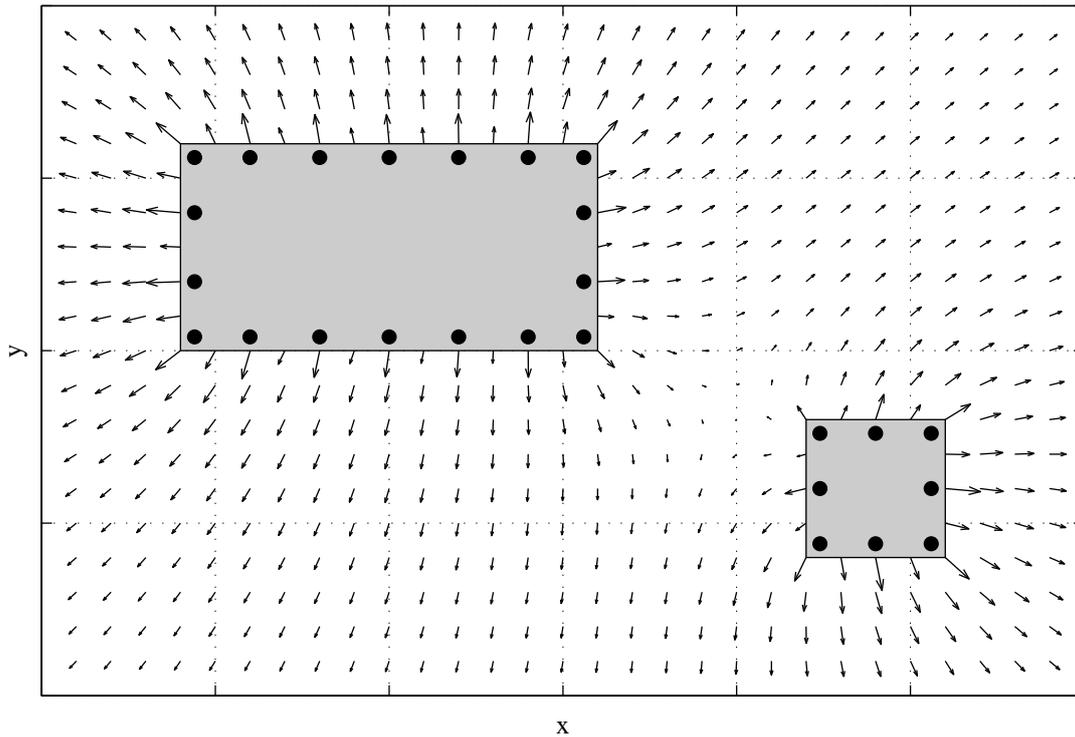


Abbildung 3.20: Beispiel der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung mittels eines Kraft-Potenzialfeldes erzeugt durch Ersatzladungen.

Das Kraft-Potenzialfeld kann auf die unterschiedlichsten Weisen erzeugt werden. Es bieten sich z. B. Hyperbel- oder Exponentialfunktionen an. Die Gleichung (3.101) zeigt für den eindimensionalen Fall eine Möglichkeit zum Erzeugen der virtuellen Kraft  $F_v$  mit Hilfe einer Hyperbelfunktion:

$$F_v = F_{max} \frac{c}{a + c} \quad (3.101)$$

Dabei ist  $a$  in (3.101) der Abstand zwischen Endeffektor und Hindernis,  $F_{max}$  ist die maximale Kraft im Kontaktfall und die Abklingkonstante  $c$  gibt den Verlauf der virtuellen Kraft vor.

Die Abb. 3.19 zeigt als Beispiel den zweidimensionalen Arbeitsraum eines Roboters (z. B. *Planar Two Link Manipulator*). In ihn wurden 2 Hindernisse integriert, mit denen eine Kollision beim Handführen intuitiv verhindert werden soll. Befindet sich der Endeffektor in der Nähe eines Hindernisses, dann wirkt auf ihn eine Kraft, die ihn davon wegführt. Diese virtuellen Kräfte sind in der Abb. 3.19 als Vektorfeld dargestellt. Bei der Realisierung muss zunächst analysiert werden, gegenüber welcher Hinderniskante sich der Endeffektor befindet. Nach dem Bestimmen des Abstandes kann z. B. mit Hilfe einer Hyperbelfunktion der Betrag der Abstoßungskraft berechnet werden. Die Richtung des Kraftvektors wird wieder anhand dessen Lage gegenüber dem Objekt festgelegt. Diese Methode hat den Vorteil, dass die Kraftvektoren stets senkrecht zur Objektkante bzw. Oberfläche verlaufen. Nachteilig ist, dass das so erzeugte Potenzialfeld Unstetigkeiten aufweist. Außerdem ist der Algorithmus relativ unübersichtlich, da viele Fallunterscheidungen notwendig sind.

Eine sehr elegante Methode zum Erzeugen des Kraft-Potenzialfeldes hat ihre Basis in der Feldtheorie der Elektrotechnik, siehe dazu z. B. [56]. Um eine elektrische Punktladung  $Q_1$  bildet sich ein elektrostatisches Feld aus. Im freien Raum, bei konstanter Permeabilität  $\epsilon$ , gilt

im Abstand  $a$  um die Punktladung für den Betrag der Feldstärke

$$E = \frac{Q_1}{4\pi\epsilon a^2}. \quad (3.102)$$

Bringt man in dieses Feld die punktförmige Probeladung  $Q_2$  mit dem Abstandsvektor  $\vec{r}$  ein, dann wirkt darauf die Kraft  $\vec{F}_{12}$ .

$$\vec{F}_{12} = -\frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{Q_1 Q_2}{|\vec{r}|^2} \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} = -E(\vec{r}) Q_2 \frac{\vec{r}}{|\vec{r}|} \quad (3.103)$$

Sind mehrere Punktladungen vorhanden, dann gilt das Superpositionsprinzip. Die auf die Probeladung einwirkende Kraft setzt sich nun aus der Summe aller Teilkräfte zusammen. Für  $n$  Punktladungen berechnet sich die Kraft  $\vec{F}_{12}$  wie folgt:

$$\vec{F}_{12} = -\frac{1}{4\pi\epsilon} \sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{1i}}{|\vec{r}_i|^2} \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} \right) Q_2 \quad (3.104)$$

Dieser Ansatz wird auch zur mathematischen Generierung von Feldern um Elektroden komplexer Bauformen benutzt, z. B. für die Simulation. Man spricht dabei dann von sog. Ersatzladungen. Diese werden so im Raum platziert, dass näherungsweise das gewünschte elektrische Feld entsteht.

Übertragen auf die Generierung eines Kraft-Potenzialfeldes für die KB bedeutet dies, dass der Endeffektor die Probeladung darstellt und eine Anzahl von Punktladungen entsprechend den Hindernissen platziert werden müssen. Da es keine Beziehung mehr zu reellen physikalischen Größen gibt, entfällt die Permeabilität  $\epsilon$  und die Ladung des Endeffektors  $Q_2$  wird mit 1 angesetzt. Die Gleichung (3.104) lässt sich nun zur Berechnung der virtuellen Kraft  $\vec{F}_V$ , wirkend auf den Endeffektor, überführen.

$$\vec{F}_V = -\sum_{i=1}^n \left( \frac{Q_{Fi}}{|\vec{r}_i|^2} \frac{\vec{r}_i}{|\vec{r}_i|} \right) \quad (3.105)$$

Die Werte von  $Q_{Fi}$  der einzelnen Punktladungen sind vergleichbar mit der elektrischen Ladung, haben aber die Einheit  $[Nm^2]$ . Da der Ausgangspunkt bei der Erzeugung des Kraft-Potenzialfeldes das elektrostatische Feld war, ist die Kraftwirkung umgekehrt proportional zum Quadrat des Abstandes. Dieser Zusammenhang ist aber nicht zwingend. Es kann durchaus günstig sein, eine andere Beziehung zu realisieren, z. B. eine einfache Hyperbelfunktion. Deshalb ist die Gleichung des virtuellen Kraft-Vektorfeldes in (3.106) noch einmal verallgemeinert dargestellt, wobei  $\vec{p}$  die kartesische Position des Endeffektors ist, die Vektoren  $\vec{e}_i$  die Lage der Punktladungen enthalten und  $\mathcal{F}_i$  die individuellen Potenzialfunktionen der einzelnen Ladungen repräsentiert.

$$\vec{F}_V = \sum_{i=1}^n \left( \mathcal{F}_i(|\vec{p} - \vec{e}_i|) \frac{\vec{p} - \vec{e}_i}{|\vec{p} - \vec{e}_i|} \right) \quad (3.106)$$

Die Abb. 3.20 zeigt analog zu Abb. 3.19 einen zweidimensionalen Arbeitsraum mit 2 Hindernissen. In der Nähe der Kanten der beiden Körper wurden mehrere Punktladungen platziert. Jeder ist eine Hyperbelfunktion als Potenzialfunktion zugeordnet, die den Zusammenhang zwischen dem Abstand und dem Kraftanteil herstellt. Das daraus resultierende Kraft-Potenzialfeld ist ebenfalls in Abb. 3.20 dargestellt. Es weist im Gegensatz zu Abb. 3.19 keine Unstetigkeiten auf. Allerdings ist es über den gesamten Arbeitsraum wirksam und kann so zu ungewünschten Bewegungen führen. Dieser Nachteil könnte durch die Wahl einer anderen Potenzialfunktion behoben werden.

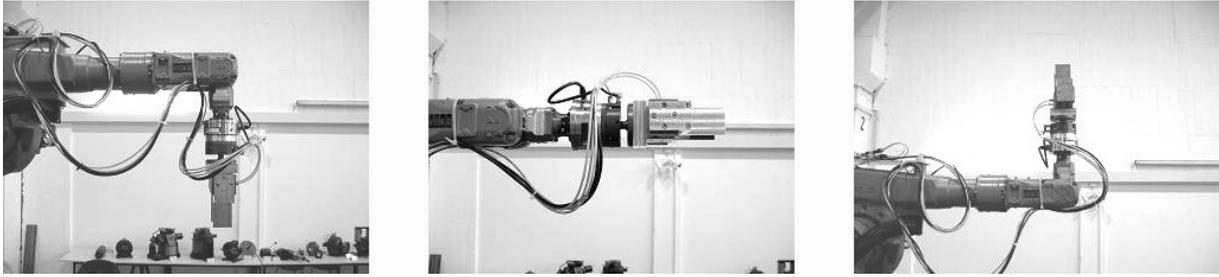


Abbildung 3.21: Orientierungen des Endeffektors zur Bestimmung von Gewichtskraft und Schwerpunkt am Beispiel eines KUKA KR6/2 Roboters.

### 3.5 Implementierung der kraftgeführten Bewegung bei Verwendung eines Kraft-/ Momentsensors

In diesem Abschnitt soll anhand verschiedener kommerziell verfügbarer Robotersysteme die praktische Verwendung des neuen Ansatzes zur KB im Gelenkraum demonstriert werden. Für Versuche standen mehrere 6-Gelenk-Knickarmroboter zur Verfügung, die neben SCARA-Robotern sehr häufig eingesetzt werden. Alle Roboter sind mit einem 6-Komponenten-KMS ausgestattet, der am Roboterflansch montiert ist.

Da an den Sensoren Greifer oder Werkzeuge angebracht sind, ist es in jedem Fall notwendig, eine sog. Gewichtskraftkompensation durchzuführen. Es ist nicht ausreichend, den Sensor zu Beginn der Messungen zu tarieren, da sich die Orientierung des Werkzeuges oder Greifers während der KB ändern kann. Ist dies der Fall, dann werden entsprechende Gewichtskräfte und -momente gemessen.

#### 3.5.1 Kompensation von Gewichtskräften und -momenten

Um bei jeder Messung mit einem KMS die in den Messwerten enthaltenen Gewichtskräfte und -momente entfernen zu können, müssen der Schwerpunkt (Massenmittelpunkt)  $\vec{c}$  und die Gewichtskraft  $f_g$  des am Sensor angebrachten Werkzeuges bekannt sein. Für deren Bestimmung gibt es unterschiedliche Methoden.

Ist die Geometrie des am KMS monierten Objektes einfach und dessen Dichte homogen, dann ist eine analytische Berechnung anhand entsprechender Tabellen möglich. Häufig ist dies nicht der Fall. Der Greifer oder das Werkzeuge hat eine komplexe Geometrie und besteht aus unterschiedlichen Werkstoffen. In diesen Fällen ist es nahe liegend,  $\vec{c}$  und  $f_g$  mit Hilfe von Manipulator und KMS zu ermitteln.

Eine einfache Möglichkeit besteht darin, mit dem Endeffektor nacheinander wenigstens 3 geeignete Orientierungen (siehe z. B. Abb. 3.21) anzufahren und in diesen jeweils die Kräfte und Momente zu messen. Daraus können, wie in [85] ausführlich beschrieben, die Gewichtskraft  $f_g$  und der Schwerpunkt  $\vec{c}$  berechnet werden. Die im Sensorkoordinatensystem wirkenden Gewichtskräfte lassen sich aus  $f_g$ , der aktuellen Orientierung des Endeffektors  $\underline{R}$  und der Rotation vom Sensor- zum Werkzeugkoordinatensystem  ${}^S\underline{R}_T$  ermitteln:

$$\vec{F}_g = ({}^S\underline{R}_T)^T \cdot \underline{R}^T \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ f_g \end{bmatrix} \quad (3.107)$$

Ist die Lage des Schwerpunktes durch den Vektor  $\vec{c}$  in Bezug auf das Sensorkoordinatensystem angegeben, dann ergeben sich die auf den Sensor wirkenden Gewichtsmomente aus dem Kreuzprodukt von Gewichtskraftvektor und Schwerpunktvektor:

$$\vec{M}_g = \vec{c} \times \vec{F}_g \quad (3.108)$$

Mit Hilfe der Gleichungen (3.107) und (3.108) lassen sich zu jedem Messzeitpunkt die im Sensorkoordinatensystem wirkenden Gewichtskräfte und -momente ermitteln und von den Sensorrohdaten  $\vec{\Gamma}_{SR}$  eliminieren.

$$\vec{\Gamma}_S = \vec{\Gamma}_{SR} - \begin{bmatrix} \vec{F}_g \\ \vec{M}_g \end{bmatrix} \quad (3.109)$$

Die Tarierung des KMS ist somit ebenfalls in jeder beliebigen Orientierung möglich.

### 3.5.2 Kraftgeführte Bewegung am Beispiel des Industrieroboters STÄUBLI RX90B

Das erste Robotersystem, an dem der neue Algorithmus zur KB praktisch demonstriert werden soll, besteht aus einem 6-Gelenk-Knickarmroboter der Firma STÄUBLI vom Typ RX90B, [123]. STÄUBLI produziert die Nachfolgemodelle der Fa. UNIMATION, die die sehr bekannte Reihe der PUMA-Roboter herstellte, welche vielfach in Forschungseinrichtungen benutzt wurden und auch noch werden, [17], [49]. Bis zum Jahr 2004 verkaufte STÄUBLI seine Roboter mit der Steuerung CS7B. Diese stammt von der Firma ADEPT, die ebenfalls Industrieroboter herstellt, wobei Adept im Bereich SCARA-Roboter sehr verbreitet ist.

Die Robotersteuerung CS7B basiert auf dem MOTOROLA-Prozessor 68030. Die Grundlage dieses Systems bildet der VME-Bus, der die Verbindung zwischen CPU und der Ansteuerbaugruppe für die Achsverstärker herstellt. Auf den freien Steckplätzen des VME-Busses können weitere Baugruppen installiert werden, wie z. B. Bildverarbeitungssysteme, Ein- /Ausgabebaugruppen und Einschübe für Feldbussysteme (z. B. Profibus). Außerdem ist für den VME-Bus das sog. *Adept Force Board* verfügbar. Diese Baugruppe ermöglicht es, einen 6D-KMS der Firma JR3 anzuschließen, [48]. Die Sensoren von JR3 haben eine hohe Steifigkeit und werden für unterschiedliche Messbereiche angeboten. Der hier verwendete Sensor vom Typ 100M40A-I63 hat einen Messbereich von 200 N bzw. 20 Nm. Verfügbar sind auch sog. 12D-Sensoren, die zusätzlich die translatorischen und rotatorischen Beschleunigungen messen. Damit ist es z. B. möglich, Beschleunigungskräfte und -momente zu kompensieren, [33]. Neben dem *Adept Force Board* können die JR3-Sensoren auch an PCI-Karten für PCs angeschlossen werden.

Der Vorteil dieses Systems ist die Integration der Kraft-/ Momentsensorik durch das Programmpaket *Adept Force*, [105]. Nach dessen Installation stehen im Betriebssystem der Robotersteuerung (*V+ Operating System*) entsprechende Befehle zur Verfügung. Diese sind neben der Abfrage des KMS, Kommandos zur Transformation und Filterung der Messwerte. Selbst ein Algorithmus zur KMR ist in *Adept Force* bereits integriert, siehe auch [85]. Die Programmierung des Roboters erfolgt mit einer Hochsprache, die ebenfalls den Namen V+ trägt, [106].

**Orientierungsangabe in V+** Im Gegensatz zur häufig verwendeten Form der Orientierungsrepräsentation durch das *Yaw-Pitch-Roll System* (bzw. auch *Roll-Pitch-Yaw*), wird die Orientierung in V+ mit Hilfe der *ZY'Z"-Euler-Winkel* angegeben. Diese wurden bereits im

Abschnitt 2.1.2 beschrieben. Um Verwechslungen zu vermeiden, ist zu beachten, dass die *Euler-Winkel* in V+ ebenfalls mit *Yaw*, *Pitch* und *Roll* bezeichnet werden.

Der Vektor von Position und Orientierung  $\vec{P}$  aus Gleichung (2.10) kann aus der homogenen Transformationsmatrix  ${}^0\underline{A}_T$  von (2.1) und Gleichung (2.9) bestimmt werden. Die Vorwärtstransformation des STÄUBLI-Roboters  ${}^0\underline{A}_T$  lässt sich z. B. nach der Methode von *Denavit-Hartenberg* [25] berechnen und wurde für ähnliche 6-Gelenk-Knickarmroboter bereits öfters publiziert [97]. Dabei wurde das WKS so gewählt, dass es dem Urzustand des Manipulators entspricht, also identisch mit dem Flanschkoordinatensystem ist. Die Definition der Koordinatensysteme und die komplette Vorwärtstransformation des STÄUBLI RX90B befinden sich im Anhang A.1 dieser Arbeit.

**Jacobi-Matrix für STÄUBLI RX90B** Für den neuen Algorithmus zur KB im Gelenkraum muss ständig die aktuelle Jacobi-Matrix  $\underline{J}$  bekannt sein. Weil die Roboterprogrammiersprache V+ alle gängigen Elemente einer Hochsprache enthält, ist sowohl die Realisierung der geometrischen als auch der analytischen Jacobi-Matrix möglich.

Da der STÄUBLI RX90B Roboter nur rotatorische Gelenke hat, lässt sich die geometrische Jacobi-Matrix  $\underline{J}_G$  mit Hilfe von Gleichung (3.27) und der Vorwärtstransformation von A.1 berechnen.

Die Berechnung der analytischen Jacobi-Matrix  $\underline{J}_A$  erfolgt auf Basis der Orientierungsrepräsentation von V+. Die einzelnen Elemente im Vektor  $\vec{P}$  lassen sich aus der Transformationsmatrix  ${}^0\underline{A}_T$  des STÄUBLI RX90B und den Gleichungen von (2.9) ermitteln. Anschließend muss  $\vec{P}$  nach allen 6 Gelenkwinkeln differenziert werden, siehe auch (3.31). In [121] wurde die komplette analytische Jacobi-Matrix für den STÄUBLI RX90B Roboter veröffentlicht. Sie ist wie die Vorwärtstransformation ebenfalls im Anhang aufgeführt. Nach der Abfrage der Gelenkwinkel können nun in V+ zyklisch die Matrixelemente aktualisiert werden.

Im Roboterprogramm erfolgt ständig die Abfrage des KMS. Dessen Messwerte werden zunächst gemäß Gleichung (3.109) von den Einflüssen der Gewichtskraft befreit. Anschließend erfolgt die Transformation dieser Kräfte und Momente in das WKS, siehe dazu auch (3.2). Dazu stellt *Adept Force* bereits entsprechende V+ Funktionen zur Verfügung. Im nächsten Schritt sind die Kräfte und Momente vom WKS mit Hilfe von Gleichung (3.41) in die Orientierung des BKS zu bringen. Es entsteht der Vektor  $\vec{\Gamma}$ .

Wurde die geometrische Jacobi-Matrix gewählt, dann hat dies den Vorteil, dass nun die kartesischen Kräfte und Momente in  $\vec{\Gamma}$  direkt mittels (3.39) in äquivalente Gelenkmomente umgerechnet werden können. Diese sind nun im Vektor  $\vec{\tau}$  enthalten.

Bei Verwendung der analytischen Jacobi-Matrix ist noch ein Zwischenschritt notwendig. Die Momente in  $\vec{\Gamma}$  müssen mit Hilfe von Gleichung (3.110) an die zy'z"-Orientierungsrepräsentation angepasst werden, siehe auch (3.51), bevor durch (3.44) die Transformation in den Gelenkraum erfolgen kann.

$$\vec{\Gamma}_{\phi\theta\psi} = \begin{bmatrix} \vec{F} \\ \vec{M}_{\phi\theta\psi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -S\phi & C\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C\phi S\theta & S\phi S\theta & C\theta \end{bmatrix} \cdot \vec{\Gamma} \quad (3.110)$$

**Wunschverhalten** Als WV für die Implementierung der KB in das STÄUBLI-Robotersystem, wurde für jedes der 6 Gelenke Masse-Dämpfer-Verhalten mit der folgenden Übertra-

i	1	2	3	4	5	6
Masse $m_i [Nms^2(grad)^{-1}]$	2,0	4,0	1,0	0,5	0,2	0,1
Dämpfung $d_i [Nms(grad)^{-1}]$	4,0	8,0	2,0	1,0	0,4	0,2

Tabelle 3.2: Parameter des Wunschverhaltens zur kraftgeführten Bewegung des STÄUBLI RX90 Roboters.

gungsfunktion gewählt:

$$\frac{q_i(p)}{\tau_i(p)} = \frac{1}{p(m_i p + d_i)} \quad (3.111)$$

Für die Parameter Massenträgheitsmoment  $m_i$  und Dämpfung  $d_i$  wurden die Parameter von Tabelle 3.2 verwendet. Nach Gleichung (3.94) ergibt sich daraus für das WV eines jeden Gelenks eine Bandbreite von  $\omega_{-3dB} = 2 \text{ s}^{-1}$ . Es wurde gefordert, dass diese kleiner ist als die Bandbreite des Roboters. Im Abschnitt 3.4.1 wurde das Bewegungsverhalten verschiedener Robotersysteme mit den dazugehörigen Frequenzgängen vorgestellt. Darunter befand sich auch das hier verwendete STÄUBLI-Robotersystem. Es hatte eine Bandbreite von  $\omega_{-3dB} = 10 \text{ s}^{-1}$  und liegt somit wesentlich über der des WV.

Das V+ Betriebssystem der Robotersteuerung arbeitet im sog. *Multitasking*. Dabei ist der Systemzyklus von 16 ms in Zeitscheiben von je 1 ms unterteilt. Jedem *Task* ist für jede Zeitscheibe eine Priorität zugeordnet. Gemäß diesen Prioritäten setzt sich die Reihenfolge der Abarbeitung zusammen. Einige *Tasks* werden vom Betriebssystem belegt, z. B. vom Trajektoriengenerator mit sehr hoher Priorität, siehe dazu auch [85]. In einem vom Anwender frei programmierbaren Prozess soll der Algorithmus zur KB implementiert werden. Durch das Multitaskingbetriebssystem kann nicht genau vorhergesagt werden, in welchen Zeitabständen ein Prozess ausgeführt wird. Dies muss bei der programmtechnischen Umsetzung von Gleichung (3.111) berücksichtigt werden. Dazu wird (3.111) vom kontinuierlichen in den zeitdiskreten Bildbereich überführt. Durch Z-Transformation erhält man

$$\frac{q_i(z^{-1})}{\tau_i(z^{-1})} = \frac{b_{1i}z^{-1} + b_{2i}z^{-2}}{1 + a_{1i}z^{-1} + a_{2i}z^{-2}} \quad (3.112)$$

mit der Abtastzeit  $Ta$ :

$$\begin{aligned} b_{1i} &= \frac{Ta}{d_i} \left( 1 + e^{-\frac{d_i Ta}{m_i}} \right) - \frac{m_i}{d_i^2} & b_{2i} &= -\frac{Ta}{d_i} e^{-\frac{d_i Ta}{m_i}} + \frac{m_i}{d_i^2} \left( 1 - e^{-\frac{d_i Ta}{m_i}} \right) \\ a_{1i} &= -e^{-\frac{d_i Ta}{m_i}} - 1 & a_{2i} &= e^{-\frac{d_i Ta}{m_i}} \end{aligned} \quad (3.113)$$

Das Übertragungsverhalten im Z-Bereich von (3.112) kann in die folgende Differenzengleichung gewandelt werden, wobei der aktuelle Gelenkwinkel  $q_i(k)$  bereits separiert wurde:

$$q_i(k) = b_{1i}\tau_i(k-1) + b_{2i}\tau_i(k-2) - a_{1i}q_i(k-1) - a_{2i}q_i(k-2) \quad (3.114)$$

Wie schon erwähnt ist aufgrund der Steuerungsarchitektur die Abtastzeit  $Ta$  nicht konstant. Deshalb müssen die Koeffizienten in (3.113) ständig durch Ermittlung von  $Ta$  aktualisiert werden.

**Bewegungssteuerung in V+** Die Bewegungssteuerung des Roboters soll nach dem neuen Ansatz zur KB im Gelenkraum erfolgen. Dazu stellt das WV die Sollwerte der Gelenkwinkel bereit. Wie bei fast allen kommerziellen Industrierobotersystemen, gibt es auch in der

Standardkonfiguration der STÄUBLI-Robotersteuerung keine Möglichkeit, die Gelenkwinkelsollwerte des WV direkt an die Lageregler der Gelenke weiterzuleiten.

Die Programmiersprache V+ enthält einen Befehl zum Anfahren einer durch die 6 Gelenkwinkel vorgegebenen Position. Dieser wird auch zur Implementierung der KB benutzt. Nachteilig dabei ist, dass der Bewegungsbefehl zunächst an den Trajektoriengenerator der Robotersteuerung geleitet wird, der die Sollwerte für die Achsregler der Gelenke erzeugt. Im hier verwendeten Fall führt der Trajektoriengenerator eine sog. Gelenkinterpolation bzw. Punkt zu Punkt Bewegung durch. Die Sollwertvorgabe erfolgt dabei so, dass ruckfrei Bewegungen entstehen, d. h. in der Regel ist der Zeitverlauf der Winkelbeschleunigung eines jeden Gelenks rampenförmig. Für die Winkelgeschwindigkeiten folgen dann quadratische und für die Winkelsollwerte kubische Zeitverläufe. Die Bewegungsgrößen der Gelenke werden durch den Trajektoriengenerator so erzeugt, dass bei einer Bewegung alle Gelenke zum gleichen Zeitpunkt zum Stillstand kommen. Die Maximalwerte für Beschleunigung, Verzögerung und Geschwindigkeit können vom Benutzer individuell parametrisiert werden. Außerdem lassen sich mit Hilfe unterschiedlicher Profile die Anstiege in den Zeitverläufen der Beschleunigung einstellen. Ein Grenzfall sind dabei rechteckförmige Winkelbeschleunigungen. Daraus folgen dann zeitlineare Geschwindigkeits- und quadratische Gelenkwinkelverläufe.

Zusätzlich kann bei der Generierung der Bewegungsgrößen zwischen Einzelbewegung und überschleunigter Bewegung unterschieden werden. Dies ist beim Aufruf mehrerer Bewegungsbefehle in Folge von Bedeutung. Im Falle der Einzelbewegung kommt die Bewegung des Manipulators an jedem Zielpunkt zum Stillstand, bevor die nachfolgende vorgegebene Position angefahren wird. Bei der verschliffenen Bewegung wird jeweils die übernächste Zielposition vom Trajektoriengenerator berücksichtigt. Es entsteht eine kontinuierliche Bewegung, wobei der erste Zielpunkt nicht exakt erreicht wird.

Bei allen positionsgeregelten Anwendungen von Industrierobotern ist der Trajektoriengenerator unverzichtbar. Deutliche Nachteile entstehen aber bei der KMR. Dabei treten Verzögerungen bei der Roboterbewegung auf, die sich als Zeitkonstanten und Totzeiten im Regelkreis widerspiegeln. Bei der KB kann dadurch z. B. ein ungewünschtes Nachlaufen entstehen, was im schlimmsten Falle zur Instabilität führen kann. Um dies zu minimieren, wurden die Maximalwerte für Beschleunigung und Geschwindigkeit auf 100% gesetzt. Die Zeitverläufe der Winkelbeschleunigungen sind dabei rechteckförmig. Außerdem wurde der Modus der verschliffenen Bewegung gewählt. Diese Maßnahmen sowie die Tatsache, dass die bei der KB auftretenden Gelenkgeschwindigkeiten im Vergleich zu den maximal möglichen Geschwindigkeiten des Roboters gering sind, führen dazu, dass die Verzögerungen die durch den Trajektoriengenerator entstehen, vom Bediener nicht übermäßig gespürt werden.

**Implementierung** Der Algorithmus zur KB wurde nun mit Hilfe der Programmiersprache V+ in die Robotersteuerung CS7B implementiert und kann in 2 freien Prozessen des Betriebssystems ausgeführt werden. Die Programmstruktur ist in Abb. 3.22 dargestellt.

Da der Bediener im direkten Kontakt mit dem Roboterarm ist, muss dessen Sicherheit bei der Programmierung besonders berücksichtigt werden. Ein kritischer Punkt ist dabei, dass die Parameter für Geschwindigkeit und Beschleunigung des Trajektoriengenerators auf die jeweiligen Maximalwerte gesetzt wurden, um eine flüssige Bewegung zu gewährleisten. Diese übersteigen aber die Grenzwerte der entsprechenden Richtlinien für den Handbetrieb bei weitem. Die Robotersteuerung befindet sich also prinzipiell im Automatikbetrieb. Deshalb sind die durch das WV erzeugten Gelenkwinkelsollwerte ständig auf Plausibilität zu überprüfen, bevor sie an den Trajektoriengenerator weitergeleitet werden. Dadurch wird verhindert, dass

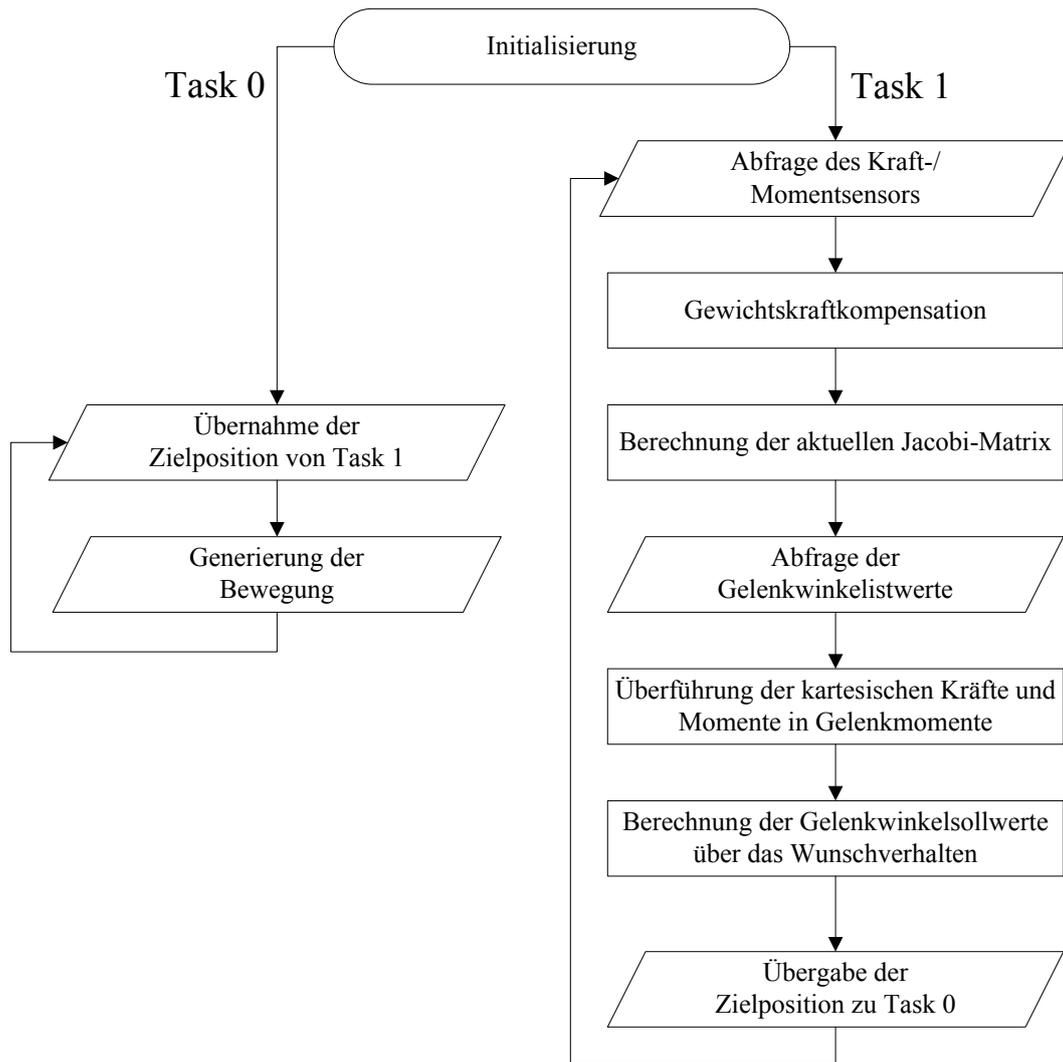


Abbildung 3.22: Programmablaufplan zur kraftgeführten Bewegung des STÄUBLI-Roboters.

Bewegungsbefehle ausgeführt werden, die bestimmte Wege überschreiten und somit zu unzulässig hohen Verfahrensgeschwindigkeiten führen. Um die Sicherheit des Bedieners weiter zu erhöhen, werden zusätzlich die Istwerte der Gelenkwinkel bzw. deren Änderungen überwacht. Dies geschieht in einem gesonderten Prozess des Betriebssystems. Beim Überschreiten der entsprechenden Grenzwerte (Winkelgeschwindigkeiten) wird der Nothalt des Roboters ausgelöst. Schließlich verfügt das Robotersystem noch über eine mechanische Schutzeinrichtung in Form eines pneumatischen Kollisionsschutzes. Dieser ist mit der Not-Aus-Kette der Robotersteuerung verbunden und stoppt die Bewegung des Manipulators beim Überschreiten vorher eingestellter Kraft- und Momentengrenzwerte sofort. Alle diese Maßnahmen garantieren weitestgehend die Sicherheit des Benutzers für den Laborbetrieb. Mit den sicherheitstechnischen Gesichtspunkten bei der KB im industriellen Einsatz beschäftigt sich ein gesonderter Abschnitt im weiteren Verlauf dieser Arbeit noch etwas genauer.

**Versuche** Jetzt sollen die Funktionsweise und die Leistungsfähigkeit des Ansatzes zur KB im Gelenkraum demonstriert werden. Nach dem Starten der in das STÄUBLI-Robotersystem

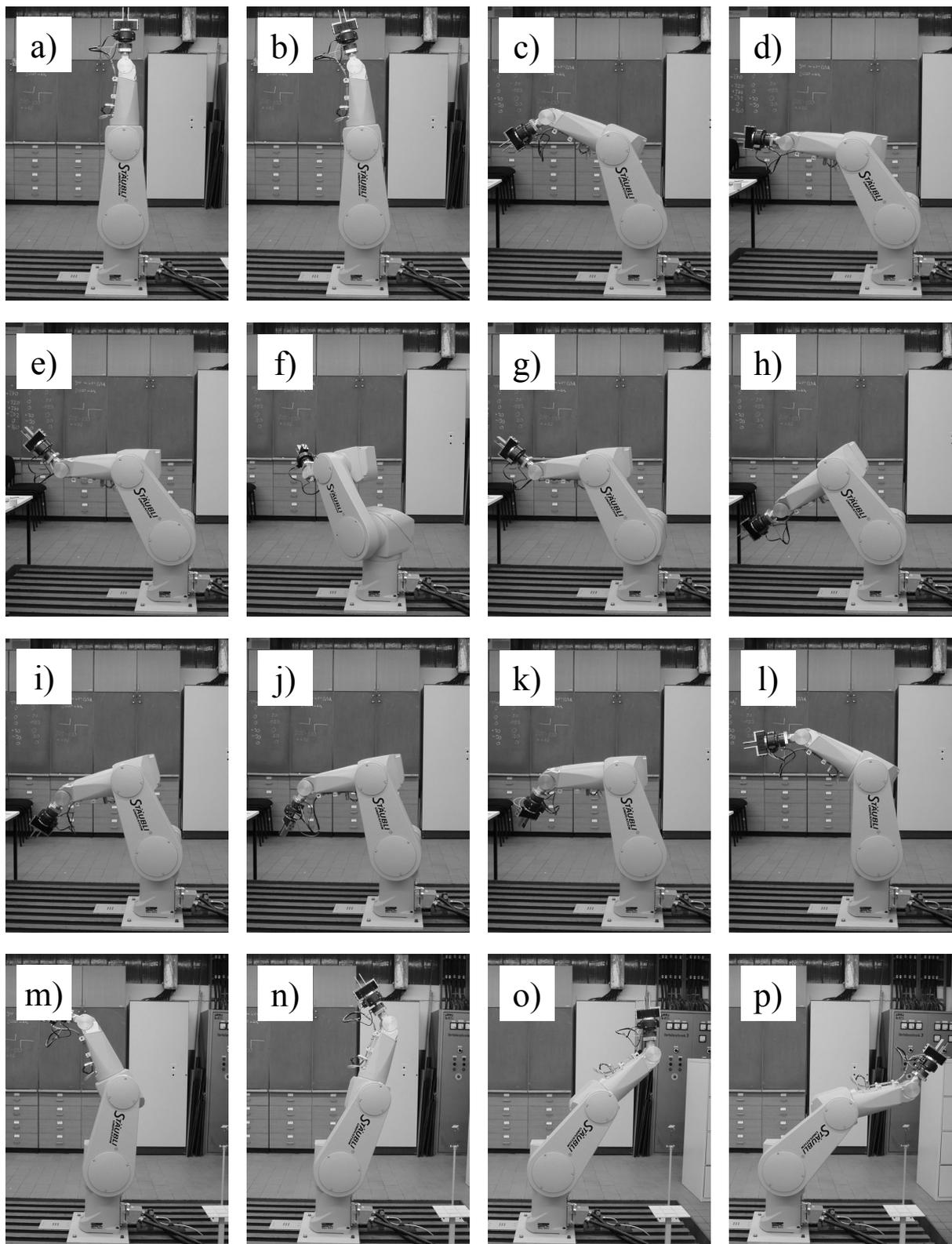


Abbildung 3.23: Ausgewählte Positionen beim Handführen des STÄUBLI-Roboters.

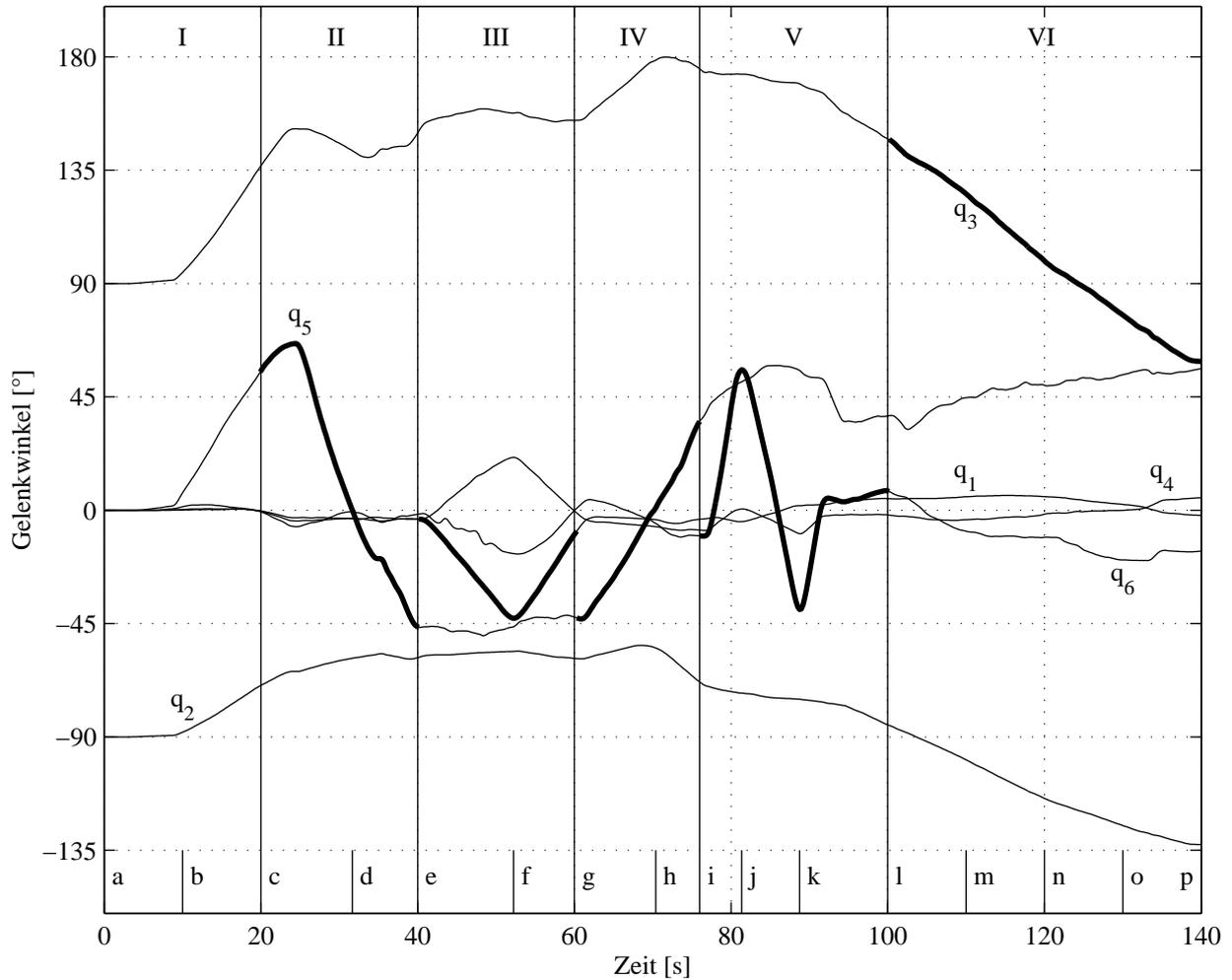


Abbildung 3.24: Gelenkwinkel in den einzelnen Bewegungsabschnitten beim Handführen des STÄUBLI-Roboters.

implementierten Programmteile führt ein Bediener den Manipulator per Hand. Die Roboterbahn ist dabei so gewählt, dass verschiedene charakteristische Bereiche durchfahren werden.

Die KB beginnt in der sog. *Home Position* des Roboters. Diese ist durch den Hersteller definiert und liegt bei  $\vec{q} = [0 \quad -90^\circ \quad 90^\circ \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$  (siehe auch Abb. 3.23a). Die *Home Position* stellt eine singuläre Lage dar. Dabei treten 2 Singularitäten gleichzeitig auf.

1. Der Manipulatorarm (Ober- und Unterarm) ist vollständig ausgestreckt, da der Gelenkwinkel  $q_3 = 90^\circ$  ist. Dies bedeutet, der Endeffektor kann nicht mehr in allen Richtungen weiter verfahren werden. Der Roboter befindet sich in einer Singularität in der Form einer Arbeitsraumgrenze.
2. Da der Gelenkwinkel  $q_5$  in der *Home Position* den Wert 0 hat, liegen die Drehachsen der Gelenke 4 und 6 auf einer Linie. Dadurch geht ein Freiheitsgrad des Manipulators verloren. Es handelt sich um eine Singularität innerhalb des Arbeitsraumes.

Aus dieser Mehrfachsingularität wird der Roboter zunächst durch den Bediener herausgeführt (Abb. 3.23b und c, Abb. 3.24 Bereich I). Der dabei entstehende Verlauf der Gelenkwinkel ist

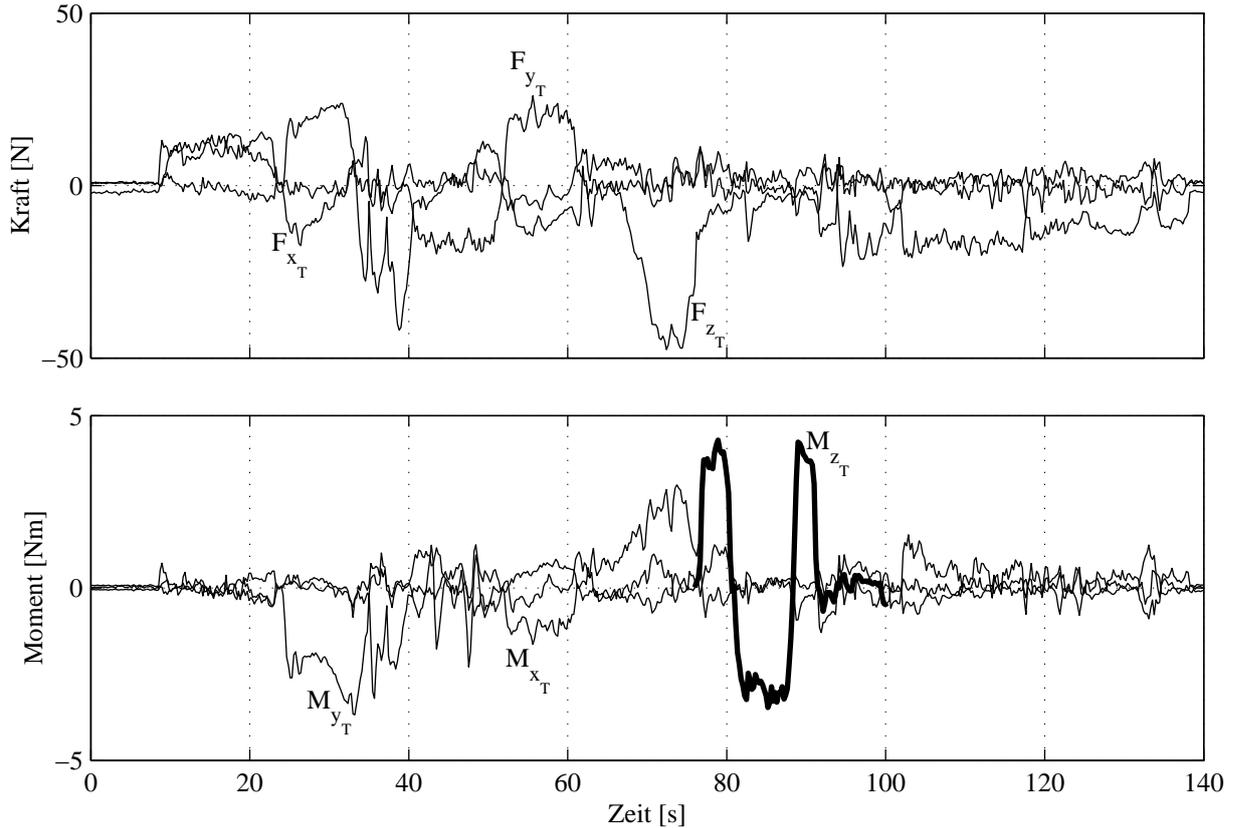


Abbildung 3.25: Messwerte des KMS beim Handführen des STÄUBLI-Roboters.

in Abb. 3.24 dargestellt. Er ist das Resultat der Gelenkmomente von Abb. 3.27 und dem gewählten WV. Die Gelenkmomente ergeben sich aus den auf den Endeffektor des Roboters einwirkenden Kräften und Momenten, die in Abb. 3.25 im Sensorkoordinatensystem dargestellt sind. Zur besseren Erklärung einiger Bewegungsvorgänge wurden sie zusätzlich in die Orientierung des BKS gebracht (Abb. 3.26).

Der II. Bewegungsabschnitt beginnt bei  $t = 20$  s. Dort hat der Roboter die Stellung von Abb. 3.23c und die Achse 5 einen Winkel von  $q_5 \approx 45^\circ$ . Es soll nun das Überfahren einer Singularität innerhalb des Arbeitsraumes demonstriert werden. Diese liegt bei  $q_5 = 0$ . Der Bediener wirkt auf den Endeffektor so ein, dass aus den Messwerten des KMS ein negatives Moment um die Gelenkachse 5 berechnet wird. Dies führt dann zu einer entsprechenden Bewegung dieses Gelenks. Schließlich wird bei  $t = 30$  s die Singularität überwunden (Abb. 3.23d), ohne dass Erhöhungen der Gelenkgeschwindigkeiten auftreten. Nach  $t = 40$  s geht der Bewegungsabschnitt II in III über (Abb. 3.23e).

Hier erfolgt eine Drehung um die Gelenkachse 1. Maßgeblich für diese Bewegung ist die durch den Bediener hervorgerufene Kraft in y-Richtung des BKS. Deren Verlauf nimmt im Bereich zwischen  $t = 40$  s und  $t = 52$  s deutlich negative Werte von  $F_y \approx -15$  N an. Daraus folgt eine Bewegung der Roboterachse 1 bis auf  $q_1 \approx -45^\circ$  (Abb. 3.23f). Die Gegenbewegung zurück auf  $q_1 = 0$  (Abb. 3.23g) geschieht zwischen  $t = 52$  s und  $t = 60$  s in etwas geringerer Zeit, ausgelöst durch einen höheren Betrag der Kraft von  $F_y \approx 20$  N. Aufgrund des durch das Handgelenk entstandenen Hebels bewegt sich zusätzlich zur Achse 1 auch das Gelenk 4.

Im Bewegungsabschnitt IV wird noch einmal die innerhalb des Arbeitsbereiches liegende

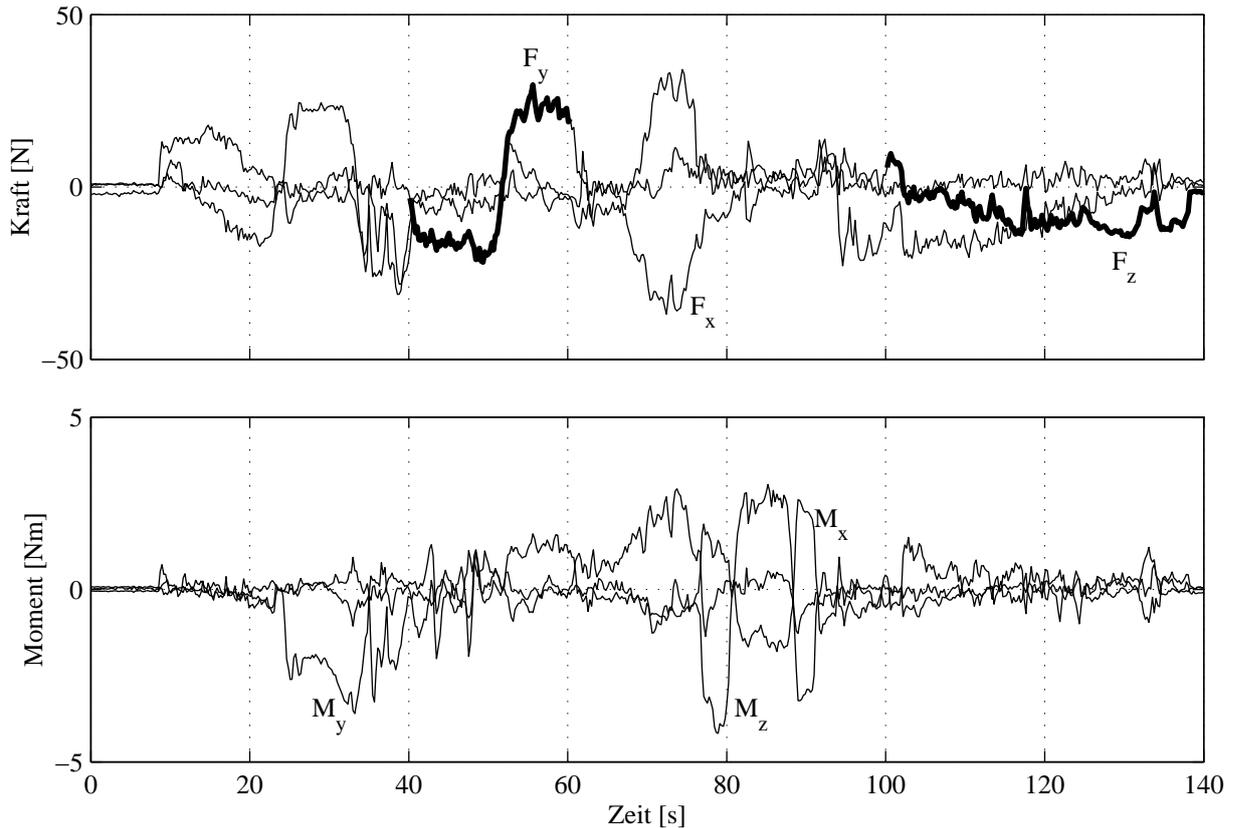


Abbildung 3.26: In die Orientierung des BKS gebrachte Messwerte des KMS beim Handführen des STÄUBLI-Roboters.

Singularität bei  $q_5 = 0$  problemlos durchfahren (Abbildungen 3.23g bis i).

Als Nächstes soll eine Orientierungsänderung erfolgen. Das Gelenk 6 wird sowohl in positiver als auch in negativer Drehrichtung bewegt (Abbildungen 3.23i bis l und Abb. 3.24). Dazu wirkt auf den Endeffektor ein entsprechendes Drehmoment, welches um die z-Achse des Werkzeug- bzw. Sensorkoordinatensystems gerichtet ist. Die z-Achse ist identisch mit der Drehachse von Gelenk 6. Somit sind auch die Zeitverläufe der Momente  $M_z$  (Abb. 3.25) und  $\tau_6$  (Abb. 3.27) gleich.

Im letzten Bewegungsabschnitt (Abbildungen 3.23l bis p) erfolgt das Überfahren der den Arbeitsraum begrenzenden Singularität bei  $q_3 = 90^\circ$ . Da die Gelenkachsen 2 und 3 parallel zueinander liegen, ändert sich zusätzlich auch der Gelenkwinkel  $q_2$ .

Damit sind die Versuche zur KB am STÄUBLI-Robotersystem beendet. Der Manipulatorarm wurde durch den Bediener erfolgreich durch den Arbeitsbereich geführt, [125]. Singularitäten konnten ohne Probleme überwunden werden. Das gleichzeitige Ändern von Position und Orientierung des Endeffektors war ebenfalls ohne Einschränkungen möglich.

### 3.5.3 Kraftgeführte Bewegung am Beispiel des Industrieroboters MANUTEC r3

Nach der erfolgreichen Implementierung des Algorithmus zur KB im Gelenkraum in das STÄUBLI-Robotersystem, soll nun dessen Test an einem weiteren 6-Gelenk-Knickarmroboter erfolgen. Dafür stand ein Roboter vom Typ MANUTEC r3 zur Verfügung. Die Roboter der

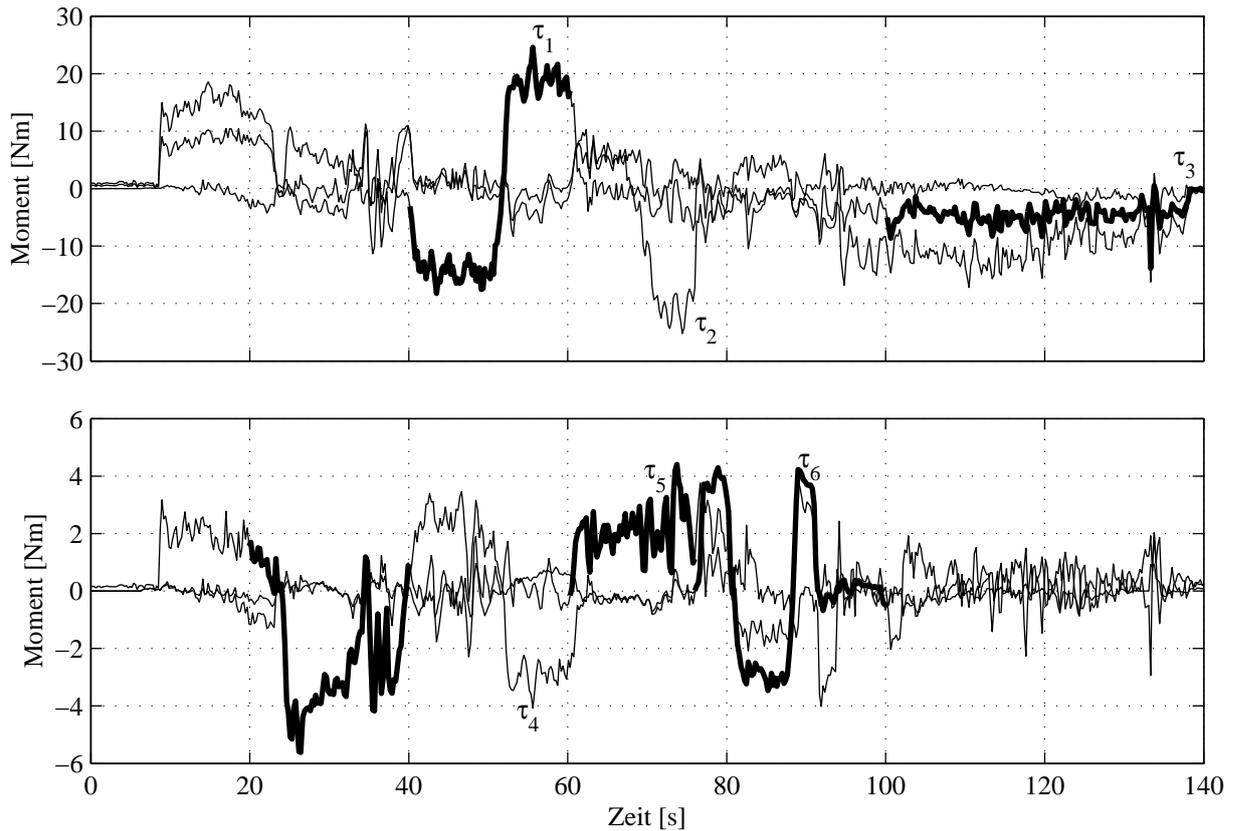


Abbildung 3.27: Berechnete Gelenkmomente beim Handführen des STÄUBLI-Roboters.

MANUTEC-Serie (r2, r3, und r15) sind sehr verbreitet und trotz ihres Alters noch in vielen Forschungseinrichtungen anzutreffen. Zahlreiche Untersuchungen, insbesondere auf dem Gebiet der KMR, fanden unter Verwendung dieser Manipulatoren statt. Das hat auch zur Folge, dass zu den MANUTEC-Robotern sehr viele interessante Publikationen existieren. Besonders zu beachten sind z. B. Untersuchungen zur Roboterdynamik [78] und [107]. Auch im industriellen Einsatz spielen die MANUTEC-Roboter noch eine Rolle. So wird seit einigen Jahren durch die Fa. *manutec VaWe Robotersystem GmbH* eine überarbeitete Version des r15 produziert und vertrieben [36]. Außerdem erfolgt auch die Aufarbeitung gebrauchter Exemplare.

Selbstverständlich kann das ursprüngliche Steuerungssystem des MANUTEC-Roboters nicht mehr für die aktuelle Forschung verwendet werden und musste darum durch eine neue Robotersteuerung ersetzt werden, [124].

**Das neue Steuerungssystem für den MANUTEC r3 Roboter** Um den zur Verfügung stehenden MANUTEC r3 Roboter für Forschungsaufgaben auf dem Gebiet der KMR verwenden zu können, wurden vom originalen Steuerschrank nur die Achsverstärker und die Stromversorgung beibehalten. Die Achsverstärker enthalten für jede der 6 Achsen den Leistungsverstärker, den Motorstromregler und den Drehzahlregler. Von außen kann somit der Sollwert der Gelenkgeschwindigkeit in Form einer analogen Spannung vorgegeben werden. Die Messung der Gelenkpositionen und -geschwindigkeiten erfolgt über optische, inkrementelle Geber (IGR). Zusätzlich enthält jedes Gelenk zu Kalibrierungszwecken einen Geber für die

Referenzposition. Die Kontaktkräfte und Momente werden mit einem 6-Komponenten-KMS der Firma SCHUNK [92] gemessen, der am Roboterflansch angebracht ist. Dieser stellt zusammen mit dem zugehörigen *Stand Alone Controller* die Messwerte in Form analoge Signale oder über eine serielle Verbindung (RS232) für die Weiterverarbeitung zur Verfügung. Außerdem ist der Roboterarm ausgerüstet mit einem pneumatischen Kollisionsschutz und einem 2-Finger-Parallelgreifer.

Als Basis des neuen Steuerungssystems wurde die WIN-DDC-Mikrocontroller-Steuerung ausgewählt. Sie wurde an der Technischen Universität Chemnitz entwickelt. Kern der Steuerung ist ein Digital-Signal-Prozessor der Firma *Analog Devices* ADSP 2181. Die Robotersteuerung besitzt Ein- und Ausgänge für digitale und analoge Signale sowie Schnittstellen zum Anschluss inkrementeller Geber. Die Programmierung erfolgt mit einem Standard-Windows-PC mit der Programmiersprache WIN-DDC, [74]. Sie basiert auf Modulen, die regelungstechnische Grundfunktionen enthalten, und ist somit besonders für die schnelle Implementierung regelungstechnischer Applikationen geeignet, [73]. Das so programmierte Anwenderprogramm kann sowohl auf dem PC simuliert, als auch über eine serielle Verbindung zur Steuerung gesendet werden, wo dann dessen Abarbeitung in Echtzeit erfolgt. Über die serielle Schnittstelle können dann auch Variablen in der Steuerung visualisiert und beeinflusst werden. Die komplette Struktur des Robotersystems bestehend aus MANUTEC r3 Roboter, SCHUNK-KMS und WIN-DDC-Mikrocontroller-Steuerung ist in Abb. 3.28 dargestellt.

**Bewegungssteuerung** Die im Absatz 3.5.2 beschriebene Art der Bewegungssteuerung am Beispiel des STÄUBLI-Robotersystems ist für den Einsatz zur KB nicht sehr gut geeignet, da der Trajektoriengenerator zusätzliche Verzögerungen einbringt. Dies konnte nur durch entsprechend hohe Werte der Parameter für Beschleunigung und Geschwindigkeit teilweise behoben werden.

Mit einem „offenen“ Steuerungssystem erweitern sich die Möglichkeiten der Bewegungssteuerung erheblich (siehe auch 3.4.1). Erfolgt durch die Robotersteuerung die Vorgabe der Sollwerte der Gelenkgeschwindigkeiten für die Achsverstärker, dann können in der Steuerung die Lageregelkreise frei implementiert werden.

Für den Fall der KB kann es ausreichend sein, zur Lageregelung der einzelnen Gelenke simple P-Regler zu benutzen. Diese können zusätzlich um eine Geschwindigkeitsvorsteuerung erweitert werden. Die Abb. 3.29 zeigt das Signalflussbild eines solchen Lagereglers für eine einzelne Achse. Das Eingangssignal  $u$  für den Achsverstärker, was die Sollgeschwindigkeit des Gelenks vorgibt, setzt sich somit aus der Lageabweichung  $q_{soll} - q_{ist}$  und der vom WV bereitgestellten Sollgeschwindigkeit  $\dot{q}_{soll}$  zusammen, wobei  $k_R$  und  $k_V$  die Reglerparameter sind.

$$u = k_R(q_{soll} - q_{ist}) + k_V\dot{q}_{soll} \quad (3.115)$$

**Kraft-/ Momenttransformation** Auch für die Implementierung der KB im Gelenkraum in das MANUTEC-Robotersystem muss ständig die aktuelle Jacobi-Matrix des Manipulators zur Verfügung stehen, um die Gelenkmomente berechnen zu können. Wie schon im vorangegangenen Beispiel können sowohl die analytische als auch die geometrische Jacobi-Matrix umgesetzt werden, wobei letztendlich die geometrische Form favorisiert wurde. Da sich die Programmiersprache Win-DDC an regelungstechnischen Signalflussbildern orientiert, die dann zyklisch abgearbeitet werden, sind keine Programmschleifen möglich. Trotz dieser Tatsache verbraucht die Implementierung von  $\underline{J}_G$  weniger Speicherplatz als  $\underline{J}_A$ . Bei der analytischen Jacobi-Matrix sind vor allen die in den Ableitungen der Orientierungswinkel ent-



Abbildung 3.28: Struktur des MANUTEC r3 Robotersystems.

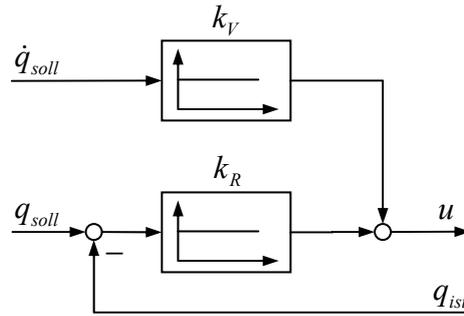


Abbildung 3.29: P-Lageregelkreis mit Vorsteuerung für ein einzelnes Robotergelenk.

haltenen Wurzel- und Arkustanges-Funktionen steuerungsbedingt recht aufwendig realisiert. Außerdem ist die Anzahl der notwendigen Rechenoperationen (Additionen, Multiplikationen) wesentlich höher. Die geometrische Jacobi-Matrix  $\underline{J}_G$  berechnet sich nun nach (3.27) und den im Anhang A.2 aufgeführten Matrizen der Vorwärtstransformation des MANUTEC r3 Roboters.

$\underline{J}_G$  kann direkt zur Berechnung der Gelenkmomente in Folge von Kontaktkräften und -momenten verwendet werden, siehe (3.39).

**Implementierung** Der zu implementierende Algorithmus entspricht dem des STÄUBLI-Robotersystems von Abb. 3.22. Außerdem müssen noch die Lageregler der einzelnen Gelenke mit Hilfe von Win-DDC umgesetzt werden. Die Programmabarbeitung geschieht in der Robotersteuerung mit einer Zykluszeit von 5 ms. Für den Bedienschutz wurden zusätzlich die folgenden Sicherheitsmechanismen in das Programm integriert:

- Begrenzung der Ansteuerspannungen für die Achsverstärker (Sollwerte der Gelenkgeschwindigkeiten),
- Überwachung der Gelenkgeschwindigkeiten,
- Überwachung der Regelabweichungen der Gelenkwinkel (Schleppfehler),
- Überwachung der Messwerte des KMS,
- Begrenzung des Arbeitsraumes (optional).

Wird die Verletzung eines sicherheitsrelevanten Grenzwertes von der Robotersteuerung detektiert, dann erfolgt die Wegnahme des Freigabesignales der Achsverstärker.

**Versuche** Die Versuche gestalteten sich ähnlich denen von Abschnitt 3.5.2. Deshalb soll auf eine ausführliche Beschreibung und weitere Zeitverläufe von Kräften, Momenten und Gelenkwinkeln an dieser Stelle verzichtet werden. Zu bemerken ist lediglich, dass im Vergleich zum STÄUBLI-Robotersystem eine höhere subjektive Bewegungsgüte erzielt wird. Das Verhalten des Manipulators beim Kraftführen fühlt sich „weicher“ an. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit dem „offenen“ Steuerungssystem des MANUTEC-Roboters der direkte Zugriff auf die Sollwerte der Gelenkgeschwindigkeiten möglich ist. Damit treten keine, durch den Trajektoriengenerator der STÄUBLI-Robotersteuerung bedingten, Verzögerungszeiten mehr auf. Diese sind bei der KB am STÄUBLI-Roboter vom Bediener durchaus leicht zu spüren.

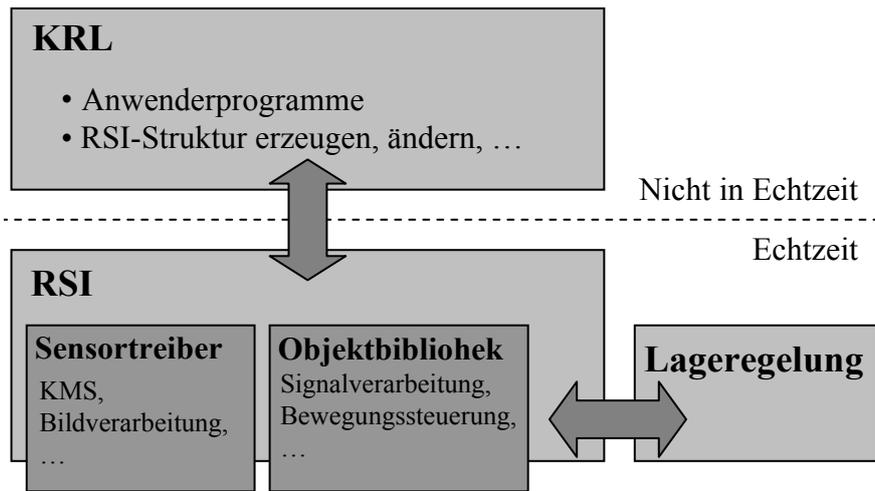
### 3.5.4 Kraftgeführte Bewegung mit weiteren Industrierobotern

In den vorangegangenen beiden Absätzen wurde die Implementierung der KB mittels KMS sowohl für einen Industrieroboter mit Standardsteuerung, als auch mit einer sog. offenen Robotersteuerung durchgeführt. Dabei wurde deutlich, dass die Realisierung mittels einer Laborsteuerung wesentlich transparenter möglich ist. Dies führte auch zu einem, zumindest subjektiv, höherwertigeren Bewegungsverhalten des Manipulators. Am Beispiel der STÄUBLI-Robotersteuerung traten die Nachteile der geschlossenen Bewegungsgenerierung deutlich hervor. Sie konnten nur durch trickreiche Gegenmaßnahmen gemildert werden. Besonders soll an dieser Stelle noch einmal auf die eingeschränkte Echtzeitfähigkeit hingewiesen werden. Im Gegensatz zur Win-DDC-Mikrocontroller-Steuerung war es nicht möglich, eine äquidistante zyklische Abarbeitung des Algorithmus zur KB zu garantieren.

Ob die Voraussetzungen für die erfolgreiche Implementierung des in dieser Arbeit vorgestellten Algorithmus von anderen kommerziellen Robotersystemen erfüllt werden, hängt im Wesentlichen von der Struktur der jeweiligen Roboterprogrammiersprache ab. Oftmals bietet diese nur wenige Freiheiten bei der Programmierung. Für gebräuchliche Anwendungen, z. B. Handhabungsaufgaben, spielt dieser Fakt keine Rolle oder ist sogar von positiver Bedeutung. Denkt man z. B. an den bahntreuen Wiederanlauf der Roboterbewegung nach einem Nothalt zur Vermeidung von Kollisionen, dann wären Eingriffsmöglichkeiten auf den unteren Ebenen der Bewegungsgenerierung nur schädlich. Ebenso kann es beim Ausführen vieler nebenläufiger Prozesse zu unvorhersehbaren Zuständen kommen, die einen sicheren Roboterbetrieb gefährden.

Ein weiteres Kriterium für die erfolgreiche Realisierung der KB ist die Integration des KMS in das Steuerungssystem. Dies war in den beiden hier demonstrierten Varianten problemlos möglich, lässt sich aber nicht für alle Robotersteuerungen verallgemeinern. KMS, die ihre Messwerte in analoger Form liefern, lassen sich in der Regel an jede Robotersteuerung anschließen. Entweder sind analoge Eingänge standardmäßig vorhanden oder die Steuerung lässt sich optional erweitern. Die meisten Robotersteuerungen verfügen auch über eine serielle RS232 Schnittstelle, an die entsprechend ausgerüstet KMS angeschlossen werden können. Problematisch kann dabei aber die relativ geringe Datenübertragungsrate sein, die zu einer geringen Taktzeit führt. Der nachgiebige KMS der Fa. SCHUNK (FTC) [92] besitzt neben RS232 eine *CAN-Bus/DeviceNet*-Schnittstelle mit entsprechend großer Übertragungsbandbreite. Obwohl einige Robotersteuerungen mit einem *CAN-Bus/DeviceNet*-Anschluss ausgestattet sind bzw. erweitert werden können, muss zur KMS-Integration ein passender Treiber programmiert werden. Die KMS der Firma JR3 [48] übertragen die Messwerte über eine RS485-Verbindung. Ihr Anschluss an eine Robotersteuerung ist im Prinzip nur mit Hilfe spezieller Baugruppen möglich. Ganz gleich auf welchem Wege der KMS physisch mit der Robotersteuerung verbunden wird, müssen als Nächstes noch die Messwerte zu Bewegungen des Roboters verarbeitet werden.

Die verschiedenen Ebenen der Bewegungssteuerung eines Roboters wurden bereits im Abschnitt 3.4.1 beschrieben. Erwähnung fand dort u. A. auch das *Robot Sensor Interface* (RSI) von KUKA, das den direkten Zugriff auf die Lageregelkreise gestattet. Es bietet interessante Programmiermöglichkeiten für sensorgeführte Roboterbewegungen und soll deshalb an dieser Stelle kurz betrachtet werden. Zur Verfügung standen dafür 2 KUKA KR6/2 Roboter mit jeweils einer Tragfähigkeit von 6 kg am Flansch und zusätzlich 10 kg am Unterarm. Sie sind ausgerüstet mit einem steifen KMS vom Typ FT Delta (Messbereich 660 N/60 Nm) der Fa. SCHUNK bzw. einem nachgiebigen KMS FTC 50-80V [Messbereich 150; 300 N( $F_x$ ,  $F_y$ ;  $F_z$ )/7; 15 Nm( $M_x$ ,  $M_y$ ;  $M_z$ )] ebenfalls von SCHUNK.

Abbildung 3.30: Arbeitsweise *Robot Sensor Interface*.

**Die RSI-Funktionalität der Robotersysteme von KUKA** Üblicherweise werden die Anweisungen innerhalb eines Roboterprogramms sequentiell abgearbeitet. Für die Implementierung sensorgeführter Bewegungen kann diese Eigenschaft von Nachteil sein, wenn eine einmal gestartete Bewegung erst komplett beendet werden muss, bevor der nächste Sensormesswert verarbeitet werden kann. Bei der Realisierung der KB am STÄUBLI-Robotersystem (siehe Abschnitt 3.5.2) wurde versucht, diesen Nachteil durch die Möglichkeit der verschliffenen Bewegungen zu kompensieren.

Eine komplett andere Herangehensweise bietet das RSI. Es kann in Form eines Softwarepaketes, als zusätzliche Option zu den KUKA-Robotersteuerungen, bezogen werden. Nach erfolgreicher Installation erweitert sich der Befehlsvorrat der Roboterprogrammiersprache von KUKA (KRL, *Kuka Robot Language*) um sog. RSI-Anweisungen. Mit ihnen können RSI-Objekte angelegt, miteinander verknüpft, parametrisiert und gelöscht werden. Die RSI-Objekte werden durch verschiedene, allgemeine und anwendungsspezifische Objektbibliotheken bereitgestellt. Einige wichtige Beispiele für RSI-Objekte sind im Folgenden aufgelistet:

- Datenobjekte liefern z. B. die aktuellen Gelenkwinkel, die kartesischen Koordinaten des Endeffektors, den Status der analogen und digitalen Eingänge sowie die Messwerte weiterer externer Sensorik, wie z. B. die eines KMS,
- Signalverarbeitende Objekte führen z. B. komplette Koordinatentransformationen aus oder stellen einfache regelungstechnische Grundfunktionen, wie Proportionalglieder, Integratoren, Summationsstellen, usw., zur Verfügung,
- Steuerungsobjekte bieten die Möglichkeit, Einfluss auf die Roboterpositionen (kartesisch oder achsspezifisch) zu nehmen oder digitale und analoge Ausgänge zu steuern.

Jedes RSI-Objekt besitzt eine bestimmte Anzahl von Ein- und/oder Ausgängen. Durch spezielle RSI-Befehle können die Objekte miteinander verknüpft werden, so dass eine komplette Regelungsstruktur entsteht. Sie wird dann parallel zum normalen KRL-Anwenderprogramm, im Interpolationstakt der Robotersteuerung, zyklisch aller  $12ms$  abgearbeitet. Im Gegensatz zu den KRL-Befehlen geschieht dies in Echtzeit.

Zentraler Bestandteil einer jeden mit RSI realisierten sensorgeführten Bewegung ist das Objekt zum Beeinflussen der Roboterpositionen. Dies geschieht durch das Aufschalten eines kartesischen oder achsspezifischen Positionsoffsets, parallel zu der durch das Anwenderprogramm vorgegebenen Roboterposition. Der Offset wird, unter Umgehung des Trajektoriengenerators, direkt auf der Ebene der Lageregelkreise aufgeschaltet. Im Falle der kartesischen Vorgabe ist vorher die Rücktransformation in Gelenkkoordinaten notwendig. Die Abb. 3.30 zeigt schematisch die Arbeitsweise des RSI.

Im Abschnitt 3.4.1 wurde bereits der dynamische Vorteil, der durch das Umgehen des Trajektoriengenerators entsteht, anhand des entsprechenden Frequenzganges aufgezeigt. Von großer Bedeutung ist außerdem die Tatsache, dass alle Sicherheitsmechanismen, wie Arbeitsraumüberwachung, betriebsartabhängige Geschwindigkeitsbegrenzung, Schleppfehler- und Motorstromüberwachung weiterhin aktiv sind. Somit bietet sich das KUKA-Robotersystem mit RSI-Option besonders für die Implementierung der KB an.

Sensortreiber stehen für die gängigsten KMS zur Verfügung. Dazu zählen die Sensoren von SCHUNK (steif und nachgiebig), JR3 und die eindimensionalen Kraftmesszellen von HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH).

Die erfolgreiche Realisierung der KB im Gelenkraum wird allerdings durch erhebliche Einschränkungen bei der RSI-Programmierung verhindert. Mit RSI ist es nahezu unmöglich, die unbedingt notwendige Jacobi-Matrix zu berechnen, sei es in ihrer geometrischen oder analytischen Form. Dies ist vor allem bedingt dadurch, dass keine Objekte existieren, die einzelne trigonometrische Funktionen berechnen. Außerdem ist die maximale Anzahl von erzeugbaren RSI-Objekten begrenzt, so dass selbst mittels Näherung keine Berechnung von  $\underline{J}$  möglich ist. Wünschenswert wäre ein spezielles RSI-Objekt, das die komplette Transformation von kartesischen Kräften und Momenten in Gelenkmomente realisiert. Dessen Implementierung kann aber nur durch den Hersteller selbst erfolgen. Deshalb kann z. Z. die KB nur im kartesischen Raum oder für einzelne Gelenke realisiert werden.

Für die direkte Programmierung des RSI sind spezielle Kenntnisse erforderlich. Da aber auch der Endanwender in der Lage sein soll, sensorgeführte Bewegungen mit dem KMS zu realisieren, ist ein speziell dafür zugeschnittenes Technologiepaket verfügbar. Dieses trägt die Bezeichnung FTCtrl (*Force Torque Control*). FTCtrl arbeitet auf der Basis des RSI. In einer Funktionsbibliothek sind vorgefertigte Algorithmen zur KMR hinterlegt. Diese können zur Laufzeit des Roboterprogramms mit einigen wenigen Befehlen aktiviert werden. Die Anwenderspezifischen Einstellungen und Parameter sind in einer sog. Initialisierungsdatei abgelegt und werden von dort ausgelesen. Diese wird vorher von einem Windows-Programm (FTCtrlConfig) mit entsprechenden Dialogen erzeugt. Die Realisierung von Roboterprogrammen zur KMR mit Hilfe von FTCtrl ist sehr effektiv. Im Fehlerfall ist die Analyse durch die geringe Anzahl an Einstell- und Parametriermöglichkeiten sehr einfach. Weiterhin hat FTCtrl den Vorteil, dass entsprechende Sicherheitsmechanismen, wie Überwachung auf Sensorüberlast oder Begrenzung des Arbeitsbereiches während der Regelung bereits integriert sind und im Gegensatz zur RSI-Expertenprogrammierung nicht erst programmiert werden müssen.

Durch die RSI/FTCtrl-Anwenderprogrammierung und die RSI-Expertenprogrammierung bietet das KUKA-Robotersystem zwei interessante Möglichkeiten für die Implementierung der KB, zumindest für den kartesischen Raum. Sie sollen im Folgenden kurz untersucht werden.

**Implementierung der kraftgeführten Bewegung in RSI-Anwenderprogrammierung (FTCtrl)** Nach geringer Einarbeitungszeit ist die Realisierung von Kraft-/ Momentregelalgorithmen mit FTCtrl sehr effizient und komfortabel möglich. Ausführlich wird dies in

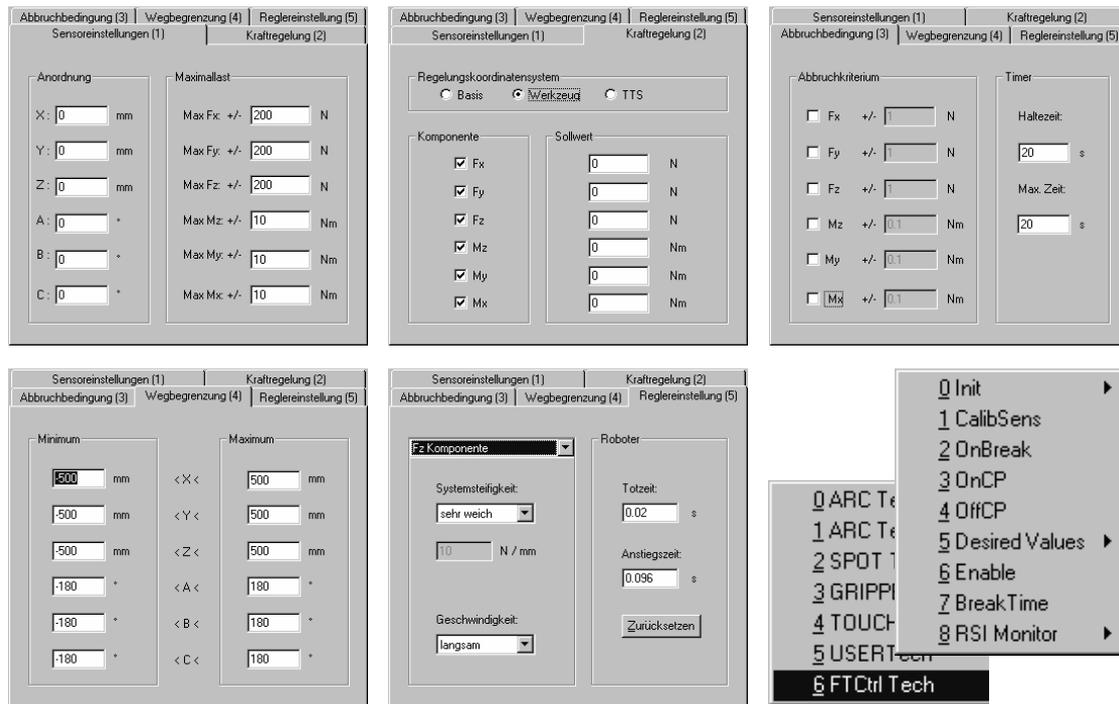


Abbildung 3.31: Einstellungen in FTCtrl zur kraftgeführten Bewegung im kartesischen Raum.

[110] beschrieben, wobei auch verschiedenste Beispielanwendungen umgesetzt wurden. Für die Implementierung der KB im kartesischen Raum sind nur einige wenige Zeilen Quelltext notwendig. Die Abb. 3.31 zeigt Funktionen von FTCtrl im Technologiemenü der KUKA-Bedienoberfläche und die einzelnen Arbeitsblätter des Programms FTCtrlConfig zum erstellen der Konfigurationsdatei. Anhand der Registerkarte 2 sind die Einstellungen der KMR zu sehen. Die Kontaktkräfte bzw. Momente der 6 kartesischen Freiheitsgrade werden zu null geregelt. Es spielt dabei keine Rolle, ob die Regelung im BKS oder im WKS erfolgt. Des Weiteren ist die Registerkarte Nr. 5 von Bedeutung. Dort erfolgt die Parametrierung der Regler für die einzelnen Freiheitsgrade. Dies geschieht durch die Vorgabe der Systemsteifigkeit (Federkonstante der Umgebung) und der Geschwindigkeit des Reglers mit Hilfe linguistischer Variablen. Werden z. B. für die Systemsteifigkeit „sehr steif“ und für die Geschwindigkeit „langsam“ selektiert, dann ist der Roboter nur mit sehr hohem Kraftaufwand zu bewegen. Im Gegensatz dazu führen die Einstellungen „sehr weich“ bzw. „schnell“ bereits bei geringen Krafteinwirkungen zu einer Bewegung des Endeffektors. Dies kann in ungünstigen Fällen zu einer instabilen Regelung führen, was dann den Nothalt des Roboters wegen Überlast, Schleppfehlerüberschreitung, etc. zur Folge hat. Letztendlich wurden die Einstellungen „sehr weich / langsam“ für die Kraftfreiheitsgrade und „sehr weich / mittel“ für die Momentfreiheitsgrade ausgewählt. Sie garantieren eine gerade noch stabile Regelung bei der höchst möglichen Geschwindigkeitsverstärkungen  $d^{-1}$ .

Trotz der verwendeten Einstellungen ist das System bei der KB sehr schwergängig. Das Handführen fühlt sich somit unkomfortabel an. Da keine genauen Informationen über Struktur und Parameter der in FTCtrl realisierten Regler vorliegen, kann die Dynamik der KB nur experimentell ermittelt werden. Durch das Aufschalten definierter Kräfte und Momente auf den Endeffektor und die daraus resultierende Reaktion des Roboters lassen sich die Parameter des vorliegenden WV näherungsweise bestimmen.

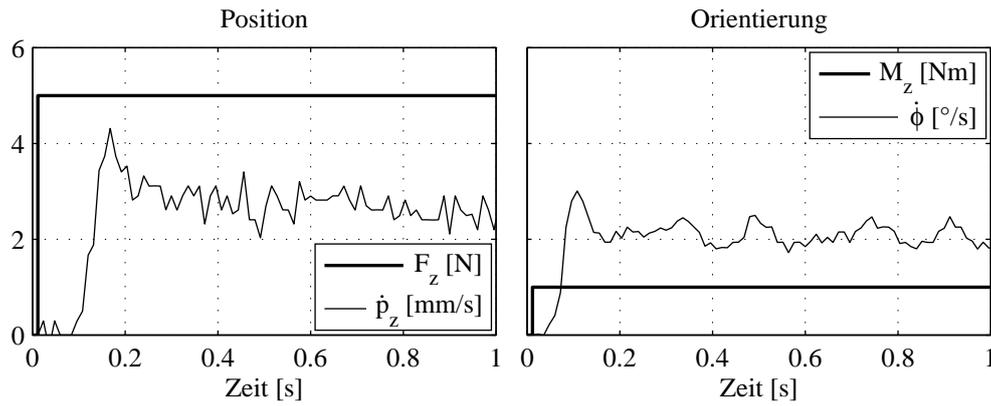


Abbildung 3.32: Verhalten des durch FTCtrl gesteuerten Roboters bei einwirkender Kraft bzw. einwirkendem Moment.

Die Berechnung der Geschwindigkeitsverstärkung im stationären Fall, d. h. bei gleichförmiger Bewegung des Endeffektors, erfolgt nach den Gleichungen (3.116) bzw. (3.117) für kraft- und momentgeregelte Freiheitsgrade.

$$d_x^{-1} = \frac{\Delta p_x}{\Delta t \Delta F_x}, \quad d_y^{-1} = \frac{\Delta p_y}{\Delta t \Delta F_y}, \quad d_z^{-1} = \frac{\Delta p_z}{\Delta t \Delta F_z} \quad (3.116)$$

$$d_\psi^{-1} = \frac{\Delta \psi}{\Delta M_\psi \Delta t}, \quad d_\theta^{-1} = \frac{\Delta \theta}{\Delta t \Delta M_\theta}, \quad d_\phi^{-1} = \frac{\Delta \psi}{\Delta t \Delta M_\phi} \quad (3.117)$$

Für die hier verwendeten Einstellungen konnten die folgenden Werte ermittelt werden:

$$d_x^{-1} = d_y^{-1} = d_z^{-1} = 0,53 \frac{mm}{sN}, \quad d_\psi^{-1} = d_\theta^{-1} = d_\phi^{-1} = 2,08 \frac{grad}{sNm}$$

Aus entsprechenden Übergangsvorgängen, aufgenommen im freien Raum, kann die Dynamik des offenen Kraft-/ Momentregelkreises bestimmt werden. Identifiziert man dabei zwischen der Kraftregelabweichung und der Geschwindigkeit PT1-Verhalten, dann entspricht das Bewegungsverhalten des Endeffektors dem des schon vielfach verwendeten Masse-Dämpfer-Systems.

Die Abb. 3.32 zeigt jeweils den Verlauf einer ausgewählte Komponente für Position und Orientierung der Endeffektorgeschwindigkeit, als Reaktion auf eine sprunghafte Änderung des Kraft- bzw. Momentwertes. Aufgrund des Wendepunktes und des Überschwingens ist zu erkennen, dass es sich bei diesem Übertragungsverhalten nicht um ein PT1-Glied handelt. Somit liegen bei den mit FTCtrl realisierten WV der kartesischen Freiheitsgrade keine reinen Masse-Dämpfer-Systeme vor.

### Implementierung der kraftgeführten Bewegung in RSI-Expertenprogrammierung

Der direkte Zugriff auf die RSI-Funktionen bietet im Gegensatz zu FTCtrl individuelle Programmiermöglichkeiten mit all ihren Vor- und Nachteilen. So muss z. B. der Sensorschutz extra implementiert werden. Auch die Fehlersuche kann sich als sehr schwierig erweisen. Im Vergleich zu FTCtrl lassen sich bei der KMR bessere Ergebnisse hinsichtlich Schnelligkeit und Regelgüte erzielen. Umfangreiche Untersuchungen wurden dazu in [101] durchgeführt.

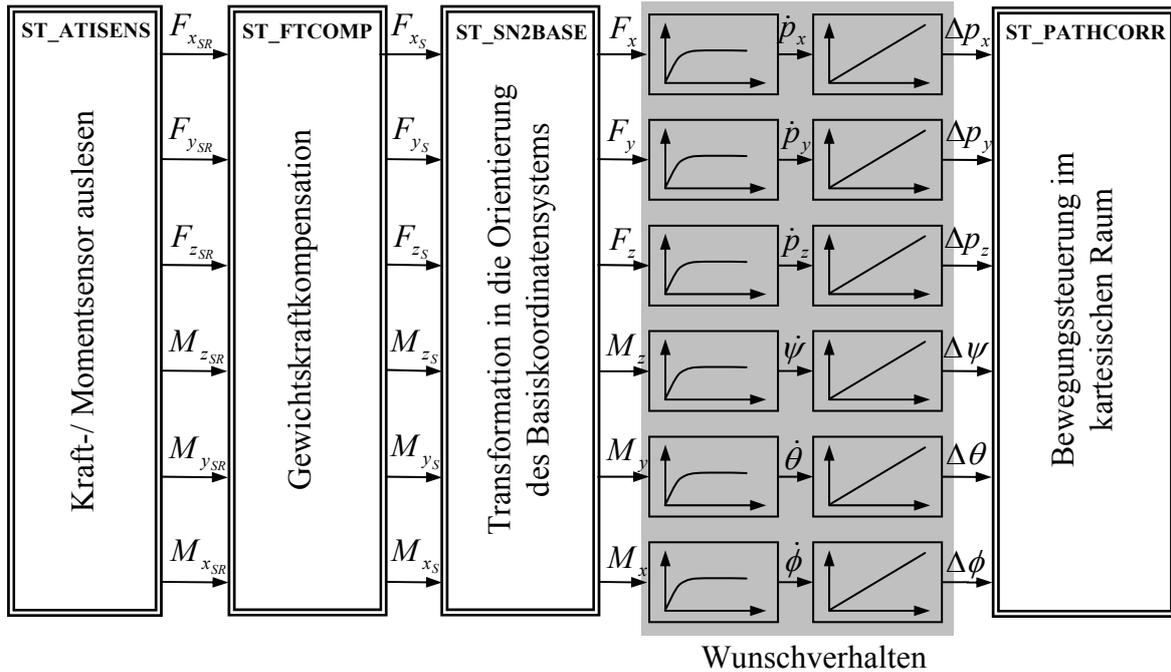


Abbildung 3.33: Struktur der RSI-Anwendung zur kraftgeführten Bewegung im kartesischen Raum.

Die Abb. 3.33 zeigt die Struktur eines RSI-Programms zur KB im kartesischen Raum. Die Messwerte des KMS werden zunächst von den Anteilen der Gewichtskraft des Werkzeuges befreit. Danach erfolgt dessen Transformation in die Orientierung des BKS. Dort erfolgt über das WV die Bewegungssteuerung des Roboters in kartesischen Koordinaten. Dazu transformiert das RSI-Objekt *ST\_PATHCORR* die Sollwerte der Positions- und Orientierungsänderungen des Endeffektors in den Gelenkraum. Die notwendigen Gelenkwinkeländerungen werden direkt auf die Achslagereger geschaltet. Für das WV wurden 6 kartesische Masse-Dämpfer-Systeme angesetzt, die im Einzelnen durch die Reihenschaltung eines PT1-Gliedes und eines Integrators realisiert wurden. Die Parametrierung erfolgte durch Verstärkung (Geschwindigkeitsverstärkung) und Zeitkonstante des PT1-Gliedes mit folgenden Werten:

$$d_x^{-1} = d_y^{-1} = d_z^{-1} = 5 \frac{mm}{sN}, \quad T_x = T_y = T_z = 0,25 \text{ s}$$

kart. Freiheitsgrad	Masse $m$	Dämpfung $d$
$p_x$	50 kg	200 kgs <sup>-1</sup>
$p_y$	50 kg	200 kgs <sup>-1</sup>
$p_z$	50 kg	200 kgs <sup>-1</sup>
$\psi$	2,86 kgm	11,46 kgms <sup>-1</sup>
$\theta$	2,86 kgm	11,46 kgms <sup>-1</sup>
$\phi$	2,86 kgm	11,46 kgms <sup>-1</sup>

Tabelle 3.3: Parameter des Wunschverhaltens zur kraftgeführten Bewegung eines KR6/2 Roboters mittels RSI-Expertenprogrammierung.

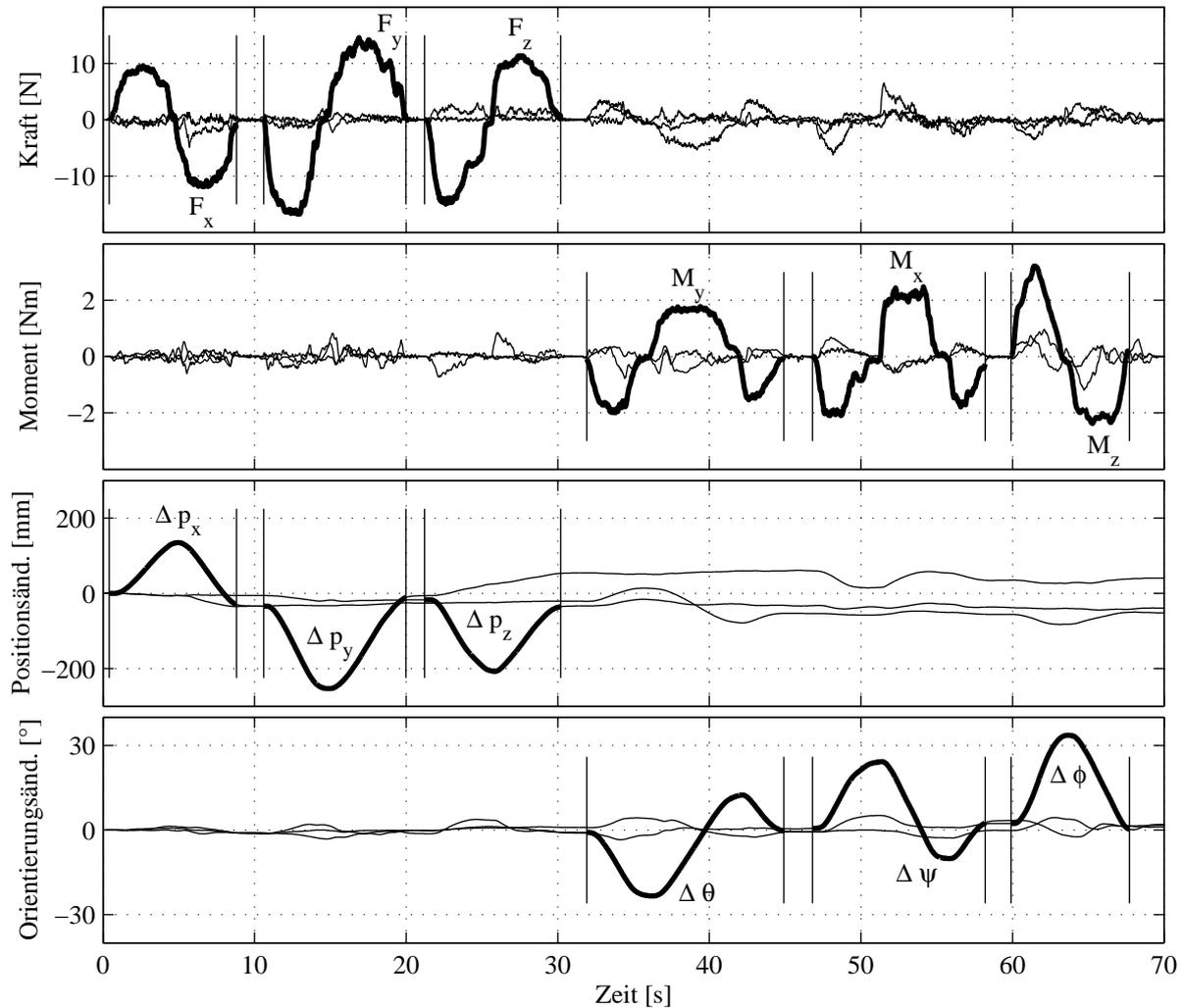


Abbildung 3.34: Verlauf der kartesischen Größen beim Kraftführen des KUKA-Roboters mittels RSI-Expertenprogrammierung.

$$d_{\psi}^{-1} = d_{\theta}^{-1} = d_{\phi}^{-1} = 5 \frac{\text{grad}}{\text{sNm}}, \quad T_{\psi} = T_{\theta} = T_{\phi} = 0,25 \text{ s}$$

Mit diesen Parametern erreicht man ein angenehm leichtgängiges Verhalten des Roboters beim Handführen. Bei Versuchen verhielt sich das System jederzeit stabil. In der Tabelle 3.3 sind die entsprechenden Werte für Masse und Dämpfung aufgelistet.

Der mittels RSI-Expertenprogrammierung realisierte Algorithmus zur KB im kartesischen Raum wurde wieder durch einen Bediener getestet. Unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten sind diese Versuche unbedenklich, da die Robotersteuerung im sog. T1-Betrieb ist. In diesem verfährt der Manipulator nur mit reduzierter Geschwindigkeit. Die Robotersteuerung überprüft ständig die durch das RSI aufgeschalteten Positionsänderungen und stoppt im Fehlerfall die Antriebe. Während der gesamten Programmabarbeitung muss der Operator zudem den Zustimmungstaster am Handbediengerät betätigen.

Der Bediener versucht nun für einen begrenzten Zeitraum jeden einzelnen kartesischen Freiheitsgrad zu aktivieren, indem er mit entsprechender Kraft bzw. Moment auf den Endeffektor einwirkt. Die Bewegung soll dabei sowohl in positiver als auch in negativer Richtung erfol-

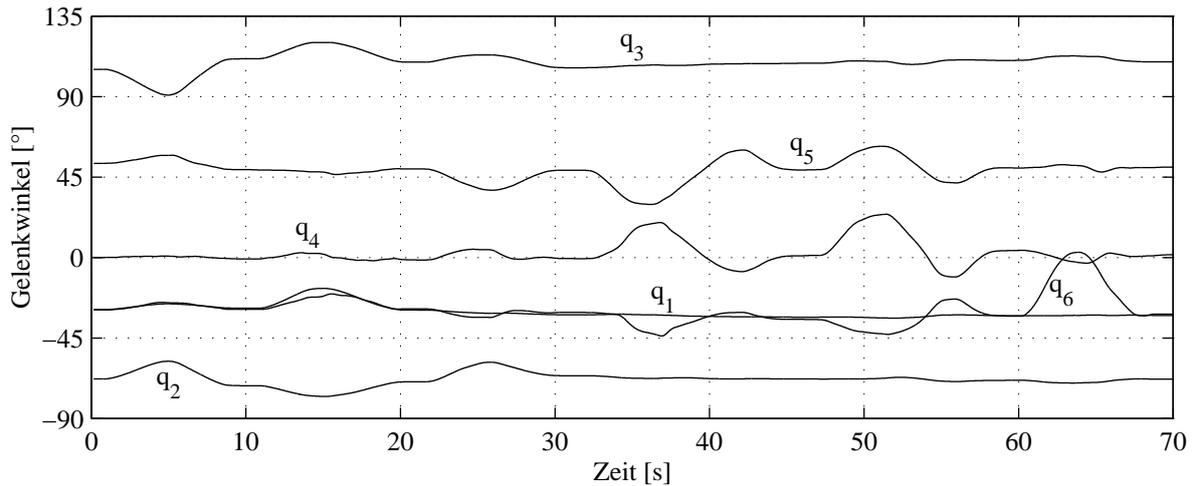


Abbildung 3.35: Verlauf der Gelenkwinkel beim Kraftführen des KUKA-Roboters mit RSI.

gen. Die auf den KMS einwirkenden Kräfte und Momente bezogen auf die Orientierung des BKS sind in der Abb. 3.34 dargestellt. Diese zeigt ebenfalls die daraus folgende Reaktion des Roboters in Form der Positions- und Orientierungswinkeländerungen des Endeffektors.

Anhand der separierten Abschnitte ist sehr gut zu erkennen, dass beim Einwirken einer Kraft bzw. eines Momentes auf einen einzelnen kartesischen Freiheitsgrad, auch nur dieser seine Koordinate ändert. Dazu ist jedoch eine Kombination von Gelenkgeschwindigkeiten notwendig. Den dazugehörigen Verlauf der Gelenkwinkel zeigt die Abb. 3.35.

Bei dem hier durchgeführten Versuch der KB im kartesischen Raum waren Sensor, Werkzeug und Flanschkoordinatensystem identisch. Zusätzliche Variationen ergeben sich durch Veränderung der Lage des *TCP*. So ist es z. B. auch möglich die Kraft-/ Momentmessung weiterhin im Flansch durchzuführen, bei der kartesischen Bewegungssteuerung aber einen anderen *TCP* zu wählen. Mitunter kann es für den Benutzer sehr schwer sein, die gewünschte Endeffektorbahn zu erzeugen, da er unter Umständen mit dem Roboter ein anderes Bewegungsverhalten assoziiert. Je nach Lage des *TCP* können einwirkende Kräfte zu zusätzlichen, ungewollten Momenten führen, die dann Orientierungsänderungen zur Folge haben. Ebenso kann ein Drehmoment eine nicht beabsichtigte translatorische Bewegung nach sich ziehen, wenn die vom Bediener erwartete Lage des *TCP* nicht gegeben ist. Außerdem können beim Erzeugen der gewünschten kartesischen Bewegung, besonders in der Nähe von Singularitäten, sehr hohe Gelenkgeschwindigkeiten entstehen.

Zusammenfassend kann an dieser Stelle bemerkt werden, dass das KUKA-Robotersystem in der RSI-Expertenprogrammierung eine geeignete Plattform für die Implementierung industrietauglicher Kraft-/ Momentregelungen, besonders hinsichtlich Dynamik und Sicherheit, bietet. Lediglich die fehlenden Programmiermöglichkeiten in Bezug auf die Jacobi-Matrix, verhinderten die erfolgreiche Realisierung der KB im Gelenkraum mit diesem Robotersystem. Deshalb wurde es lediglich zur Demonstration und Untersuchung des kartesischen Algorithmus benutzt.

### 3.6 Spezielle Funktionen und Anwendungen zur kraftgeführten Bewegung und ihre Implementierung

Im bisherigen Verlauf dieser Arbeit wurden die Grundlagen zur KB mittels KMS und die Implementierung der Grundalgorithmen ausführlich betrachtet. Dabei wurde von dem Hauptanwendungsfall des *Teach In* ausgegangen. Durch die sensorbasierte Programmierung erhält der Bediener ein komfortables Werkzeug zur Unterstützung bei der Erstellung des Roboterprogramms. Auf spezielle Sonderfunktionen und weitere Anwendungsgebiete wurde bisher nicht näher eingegangen. Anhand von 2 ausgewählten Beispielen soll deshalb an dieser Stelle auf weitere Einsatzmöglichkeiten und Forschungsaktivitäten hingewiesen werden.

#### 3.6.1 Virtuelle Begrenzung des Arbeitsraumes

Eine interessante Sonderfunktionalität während der KB ist die virtuelle Begrenzung des Arbeitsraumes. Deren theoretische Betrachtung erfolgte bereits im Abschnitt 3.4. Am Beispiel des STÄUBLI-Robotersystems soll diese nun implementiert und getestet werden.

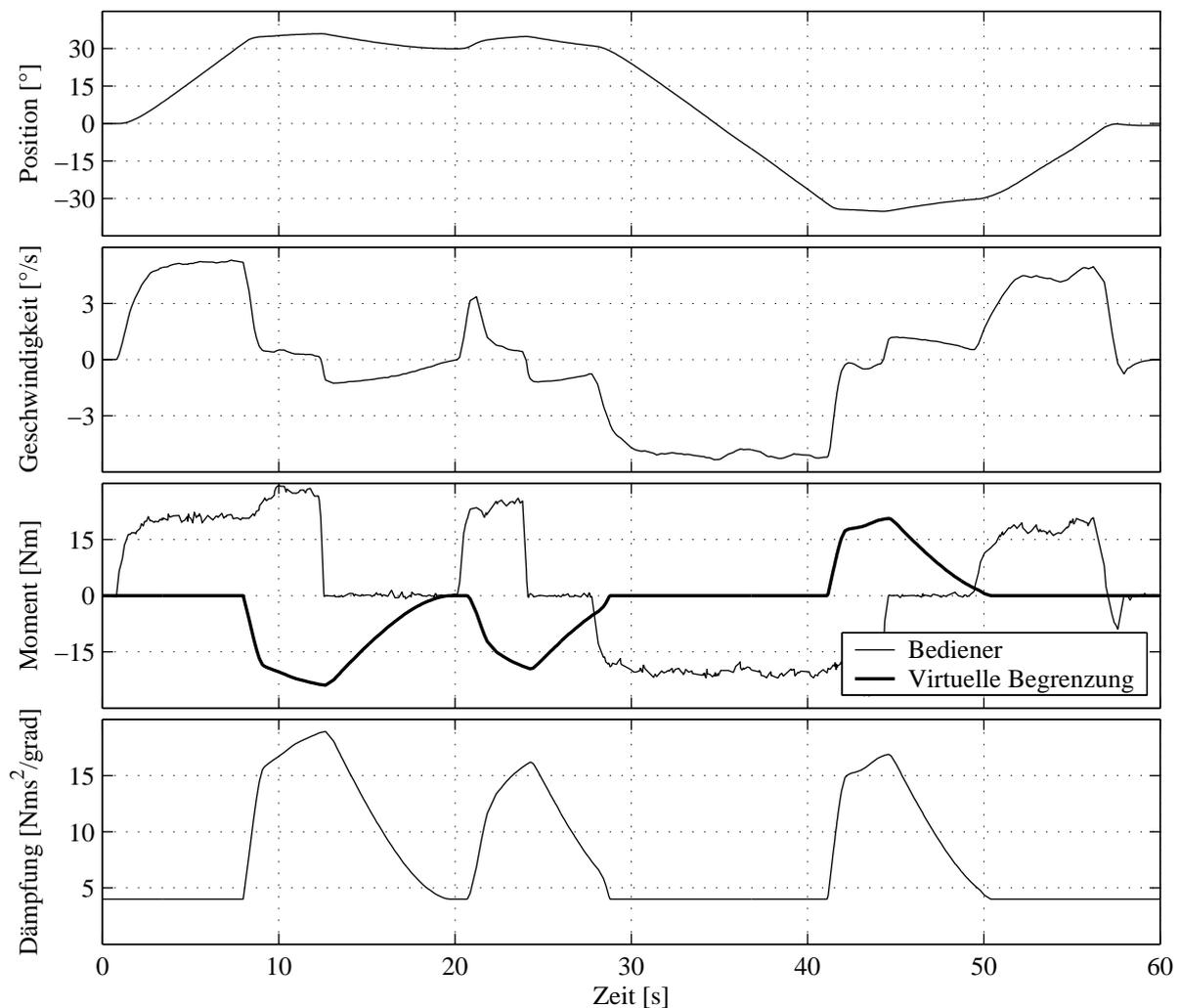


Abbildung 3.36: Verhalten des Roboters bei der kraftgeführten Bewegung mit zusätzlicher virtueller Gelenkbegrenzung.

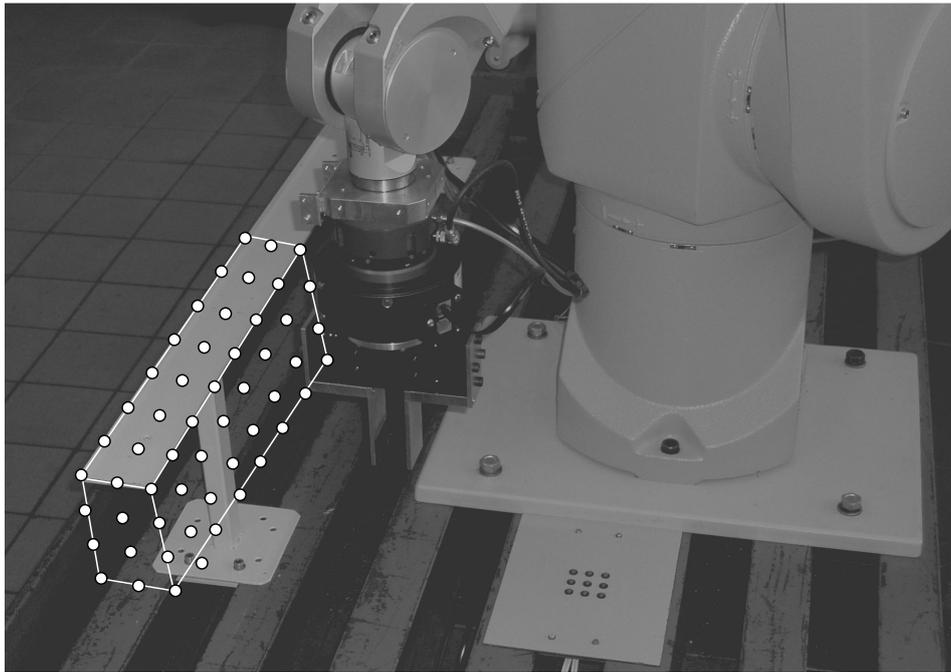


Abbildung 3.37: Beispiel der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung durch Punktladungen.

Die virtuelle Arbeitsraumbegrenzung dient zum intuitiven Vermeiden bestimmter Regionen innerhalb des Arbeitsraumes des Roboters. Sie kann sowohl im Gelenkraum, als auch im kartesischen Raum erfolgen.

Zunächst soll die Realisierung eines weichen Gelenkanschlages vorgestellt werden. Ausgewählt wurde dazu das Gelenk 1 des STÄUBLI-Roboters, dessen Arbeitsbereich auf  $q_1 = -30 \dots 30^\circ$  eingeschränkt werden soll. Wird beim Handführen diese Grenze überschritten, dann ändert sich die Struktur des WV von dem eines Masse-Dämpfer-Systems zu einem Feder-Masse-Dämpfer-System. Die Federkraft wirkt dann der Bewegungsrichtung entgegen. Um eine unerwartete und starke Gegenreaktion des Roboters zu vermeiden, wird zusätzlich die Dämpfung erhöht. Die so realisierte virtuelle Gelenkbegrenzung stellt keine harte Grenze dar. Sie kann durchaus vom Bediener überfahren werden. Im stationären Fall, wenn keine äußeren Kräfte und Momente am Endeffektor wirken, bewegt sich der Manipulator aber stets aus der Begrenzung heraus.

In der Abb. 3.36 sind die Zeitverläufe ausgewählter Größen, während des Handführens mit virtueller Gelenkbegrenzung, dargestellt. Zunächst wird das Gelenk 1, durch Krafteinwirkung auf den Endeffektor, von seiner Startposition in Richtung der positiven Grenze bei  $30^\circ$  bewegt. Nach ca.  $8s$  wird diese überfahren. Die Dämpfung im WV steigt deutlich an und es wirkt zusätzlich ein Gegenmoment durch die aktivierte Feder an der Begrenzung. Für den Bediener ist es nun sehr schwer das Gelenk weiter in positiver Richtung zu bewegen. Bleibt die Krafteinwirkung von außen aus, dann bewegt sich der Roboter langsam aus der Begrenzung heraus. Nach dem erneuten Versuch, die positive Begrenzung zu überwinden, wird das Gelenk 1 dann auf die negative Grenze zu bewegt, an welcher das gleiche Verhalten auftritt.

Als Nächstes erfolgt die Einschränkung im kartesischen Raum. Dazu wirkt in der Nähe eines Hindernisses auf den Endeffektor eine abstoßende Kraft. Diese wird durch eine Menge von

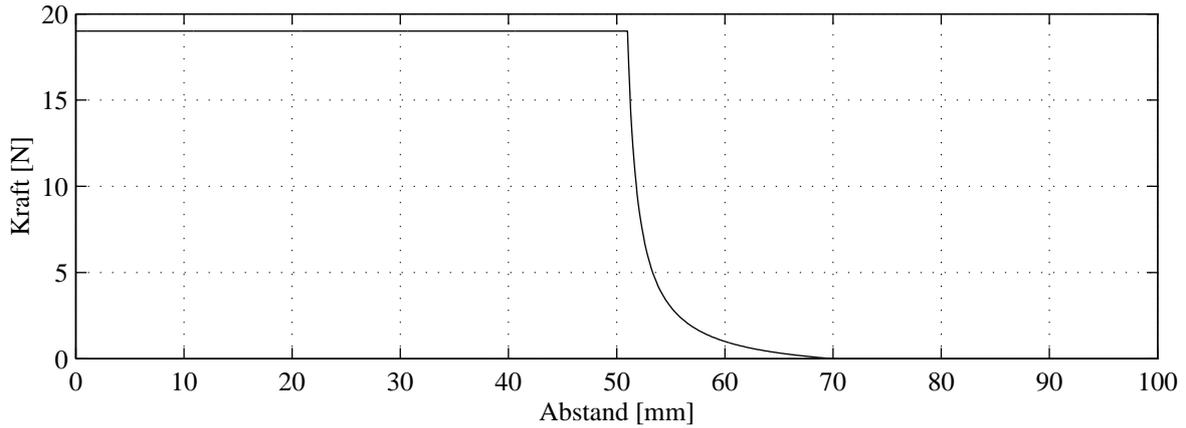


Abbildung 3.38: Beispiel des Verlaufes des Kraftpotenzials einer Punktladung.

virtuellen Punktladungen erzeugt. In der Regel werden diese an der Oberfläche des Objektes platziert. Die Lage der Punktladungen ist für eine Beispielumgebung in Abb. 3.37 dargestellt. Ausgehend von jeder einzelnen Ladung, wirkt jeweils eine Kraft auf den Endeffektor. Deren Betrag ist abhängig von dem Abstand zwischen Ladung und *TCP*. Den hier verwendeten Verlauf der Potenzialfunktion zeigt Abb. 3.38. Die Summe aller Teilkräfte ergibt dann die vom Hindernis abstoßende Kraft. Die Wahl und Parametrierung der Potenzialfunktion beeinflusst auch die notwendige Dichte und Lage der Punktladungen. Integriert in das WV des Manipulators, wird nun ständig die von den programmierten Hindernissen auf den Endeffektor wirkende Kraft berechnet.

Für die KB innerhalb der Beispielumgebung sind der Weg des Endeffektors und die wirkenden Kraftvektoren in dem Diagramm von Abb. 3.39 dargestellt. In diesem Fall erfolgt das Handführen im kartesischen Raum mit nur 3 Freiheitsgraden. Die Orientierung des Greifers bleibt konstant. Für die Orientierungsänderung müsste zusätzlich ein virtuelles Momentfeld von der Umgebung erzeugt werden. Mit dem realisierten Algorithmus war es möglich, den Roboter sicher in der Nähe des Hindernisses zu bewegen. Die Gefahr einer Kollision mit der Umgebung, ausgelöst durch falsche Bedienhandlungen des Operators, wird mit Hilfe des Kraft-Potenzialfeldes erheblich reduziert. Die Gegenreaktion des Manipulators ist intuitiv vom Bediener nachvollziehbar.

Analog zur KB im kartesischen Raum, ist auch die Bewegungssteuerung im Gelenkraum möglich. Diese resultiert dann in einem anderen Verhalten des Roboters in der Nähe von Hindernissen. Krafteinwirkungen auf den Endeffektor können z. B. zu gleichzeitigen Positions- und Orientierungsänderungen führen.

Die hier vorgestellte Methode der virtuellen Arbeitsraumeinschränkung mittels Kraft-Potenzialfeldern kann auch als aktive Begrenzung angesehen werden. Die Hindernisse sind in der Lage, eigenständig eine Bewegung des Endeffektors hervorzurufen. Ist dies nicht so gewünscht, dann bietet sich analog dazu auch die passive Begrenzung des Arbeitsraumes an. Dazu sind um die Hindernisse virtuelle, skalare Dämpfungsfelder wirksam. Neben der Dämpfung  $D_{wunsch}$  ist in der Nähe eines Objektes zusätzlich die Dämpfung  $D_v$  wirksam.

$$D = D_{wunsch} + D_v(\vec{p}) \quad (3.118)$$

Beide hemmen die Bewegung des Endeffektors. Anders als bei dem virtuellen Kraftfeld bewegt sich der Roboter aber nicht aus den verbotenen Gebieten heraus. Ebenso sind Kombinationen

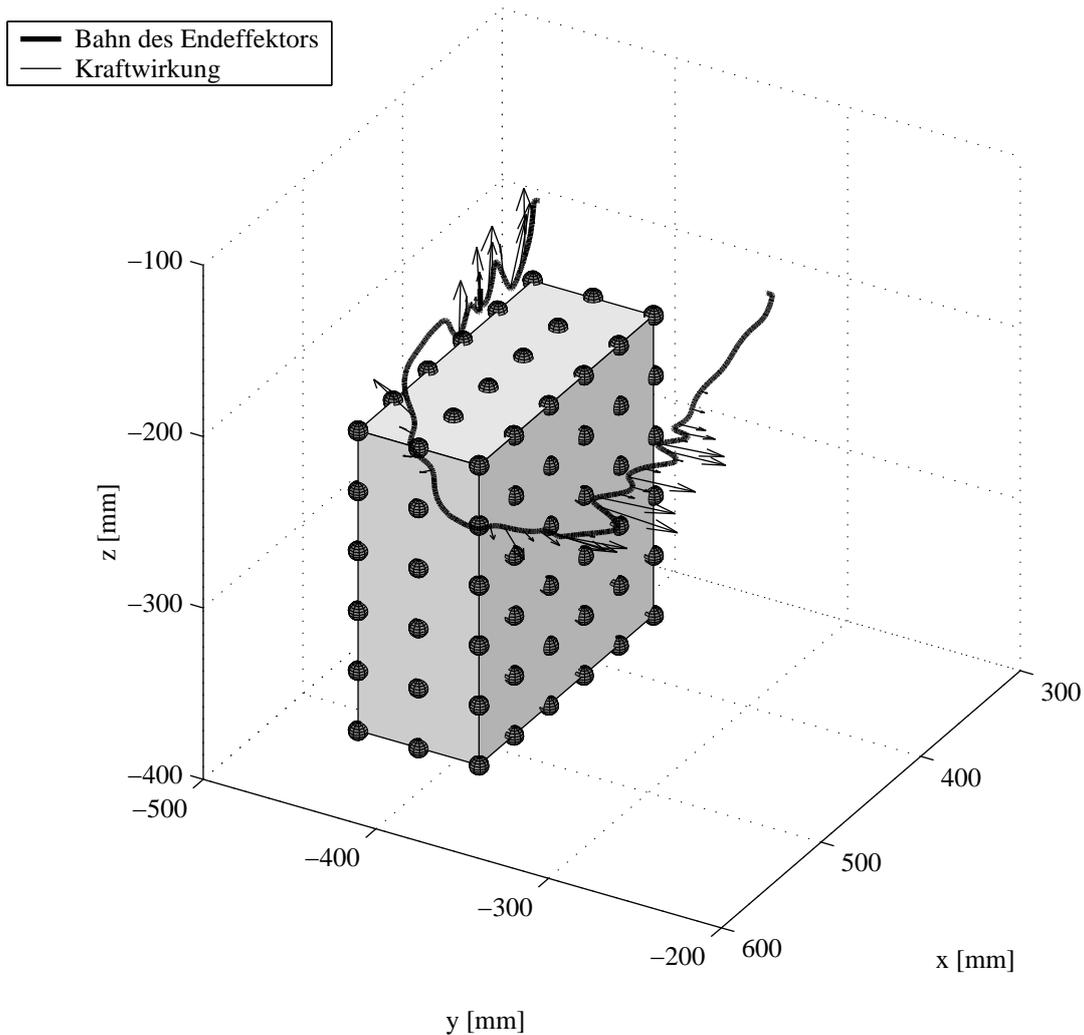


Abbildung 3.39: Beispiel der Kraftwirkung auf den Endeffektor in der Nähe des Hindernisses.

von aktiver und passiver Arbeitsraumbegrenzung denkbar.

### 3.6.2 Teleoperation

Ein sehr aktuelles Gebiet in der Robotik ist die sog. Telerobotik oder Teleoperation. Sie ist gekennzeichnet durch die räumliche Trennung von Roboter und Bediener. Der Grundgedanke ist die Fernsteuerung des Roboters durch den Menschen. Ursprünglich gedacht für den Einsatz in gesundheitsgefährdenden Umgebungen, z. B. in Chemie- oder Atomanlagen, ergeben sich schnell weitere Anwendungsgebiete der Telerobotik, wie z. B. in der Medizin oder in der Raumfahrt. Die Idee der Teleoperation ist nicht auf stationäre Roboter beschränkt, sondern lässt sich auch auf die mobile Robotik übertragen. Allerdings findet die Teleoperation mit mobilen Robotern im Rahmen dieser Arbeit keine weitere Berücksichtigung.

Basis der Telerobotik ist die Fernsteuerung des *Slave*-Roboters durch den *Master*. Der *Master* kann dabei verschiedene Formen annehmen, u. A.:

- Handbediengerät (Steuerung per Tastatur),
- Joystick (auch mit Kraftrückwirkung),

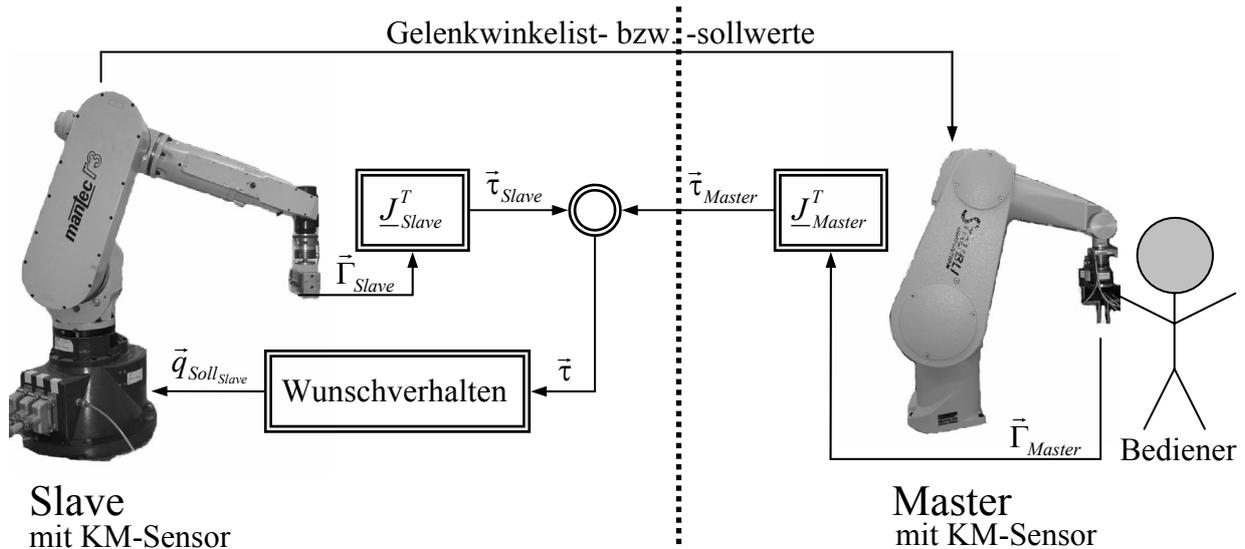


Abbildung 3.40: Vorschlag für die Struktur eines Telerobotiksystems auf Basis der kraftgeführten Bewegung im Gelenkraum.

- *Space Mouse* [41], [45],
- Miniaturroboter (Phantom),
- Spezielle Eingabegeräte mit Krafrückwirkung (*Haptic Interface*),
- Handgeführter Industrieroboter.

In vielen Fällen wird die Teleoperation durch die visuelle Rückkopplung des Slavezustandes (Fernsehbild) unterstützt. Wie schon an der Liste der Eingabegeräte zu erkennen ist, ist auch die Rückkopplung von Kräften und Momenten möglich und für einige Einsatzfälle sogar zwingend erforderlich.

Für den Aufbau eines Telerobotiksystems existieren verschiedenste Strukturen. Eine gute Übersicht dazu bietet [41]. Möchte man die Idee der KB im Gelenkraum auf das Gebiet der Teleoperation übertragen, dann bietet sich dafür z. B. die in Abb. 3.40 vorgeschlagene Struktur eines Telerobotiksystems an. Es besteht aus 2 Manipulatoren mit gleicher kinematischer Struktur. Beide Roboter sind jeweils mit einem 6-Komponenten KMS ausgerüstet. Der Bediener wirkt am Endeffektor des *Master* ein. Die Messwerte der Kräfte und Momente  $\vec{\Gamma}_{Master}$  (bezogen auf die Orientierung des Weltkoordinatensystems) werden mit Hilfe der aktuellen Jacobi-Matrix des *Masters*  $\underline{J}_{Master}$  in entsprechende Gelenkmomente  $\vec{\tau}_{Master}$  transformiert. Gleiches gilt für die Messwerte des KMS am *Slave*-Roboter, wobei dort gemessene Kräfte und Momente durch eventuellen Umgebungskontakt entstehen.

$$\vec{\tau}_{Master} = \underline{J}_{Master}^T \vec{\Gamma}_{Master} \quad \vec{\tau}_{Slave} = \underline{J}_{Slave}^T \vec{\Gamma}_{Slave} \quad (3.119)$$

Die so berechneten Gelenkmomente des *Masters* werden zum *Slave* übertragen und zu dessen Werten addiert. Es entsteht der Vektor  $\vec{\tau}$ .

$$\vec{\tau} = \vec{\tau}_{Master} + \vec{\tau}_{Slave} \quad (3.120)$$

Sind die Abmessungen von *Master*- und *Slave*-Manipulator verschieden, dann ist eventuell eine Anpassung der Mastermomente an den *Slave* mit Hilfe der diagonalen Skalierungsmatrix  $\underline{k}_{Skal}$  erforderlich.

$$\vec{\tau} = \underline{k}_{Skal} \vec{\tau}_{Master} + \vec{\tau}_{Slave} \quad (3.121)$$

Aus dem Vektor  $\vec{\tau}$  werden nun wie gewohnt, mit Hilfe des WV, die Gelenkwinkelsollwerte generiert und zunächst zur Bewegungssteuerung des *Slave*-Roboters benutzt. Der *Master* soll seine Gelenkpositionen analog zum *Slave* ändern. Dazu können entweder die Soll- oder die Istwerte der Gelenkpositionen des *Masters* zum *Slave* übertragen werden.

Die hier vorgeschlagene Struktur eines Telerobotiksystems wurde mit Hilfe zweier, in dieser Arbeit schon verwendeter Robotersysteme erfolgreich realisiert und getestet. Dabei handelt es sich um das STÄUBLI-Robotersystem (*Master*) und das MANUTEC-Robotersystem (*Slave*). Die Datenübertragung erfolgt über *Ethernet* per TCP/IP-Protokoll. Mit Hilfe des *Masters* wird es dem Bediener ermöglicht, den *Slave*-Roboter gezielt fernzusteuern. Die Steuerung geschieht im Gelenkraum mit all den schon erwähnten Eigenschaften, wie z. B. der Robustheit gegenüber Singularitäten. Der Bediener bekommt von dem *Master* eine aktive Rückmeldung über die Kraft-/ Momentenwirkungen am Endeffektor des *Slaves*. Damit können z. B. Montageaufgaben per Teleoperation durchgeführt werden. Der Operator nimmt ebenfalls die Kollision des *Slaves* mit einem Hindernis wahr. Analog zu Abb. 3.40 sind weitere Strukturen für ein Telerobotiksystem denkbar, z. B. könnten auch zunächst die kartesischen Kräfte und Momente übertragen werden.

Problematisch auf dem Gebiet der Teleoperation sind stets die Laufzeiten bei der Datenübertragung. Schon bei dem hier realisierten Versuchsstand traten, hervorgerufen durch ungünstige Hardwarevoraussetzungen, Reaktionszeiten bis zu mehreren 100 *ms* auf. Diese sind vom Bediener deutlich zu spüren und können im ungünstigsten Fall zur Instabilität des gesamten Systems führen. Denkt man an die Anwendung der Telerobotik in der Raumfahrt, dann liegen die Übertragungszeiten zur Fernsteuerung eines Roboters in einer typischen Erdumlaufbahn bei mehreren Sekunden, [41]. Erfolgt die Datenübertragung über das Internet, dann können meist gar keine definierten Laufzeiten garantiert werden. Wichtig ist es daher, Maßnahmen zu entwickeln, um den Einfluss der Signalstrecke zu reduzieren. Dazu zählt die sog. Prädiktion, die einen großen Teil der Forschungsaktivitäten auf dem Gebiet der Teleoperation ausmacht. Sie beschäftigt sich mit der Vorhersage zukünftiger Systemzustände und der Verwendung dieser bei der Regelung und Steuerung, siehe dazu z. B. [5] und [41]. Vereinfacht, übertragen auf das hier schon verwendete Telerobotiksystem, könnte dies z. B. bedeuten, dass die Kraft-/ Momentmesswerte des *Masters* unverzüglich zu dessen Bewegungssteuerung verwendet werden und erst später der Abgleich mit dem *Slave*-System erfolgt.

### 3.7 Sicherheitsaspekte

Bei jeglichen Arbeiten mit Robotern ist die Sicherheit von Personen und Einrichtungen in besonderem Maße zu beachten, da Fehlfunktionen zu unkalkulierbaren Gefahren führen können.

Die Traglasten von 6-Gelenk-Knickarmrobotern der größten Klasse liegen bei bis zu 600 *kg*. Ein Beispiel dafür ist der Schwerlastroboter der Fa. KUKA vom Typ KR 500/1, [58]. Er hat bei einer Traglast von 500 *kg* ein Eigengewicht von über 2,3 *t*. Die installierte Motorleistung dieses Roboters beträgt 41 *kW*. Aus diesen Daten ist zu erkennen, dass es bei einem Unfall zwischen Roboter und Mensch zu schweren oder gar tödlichen Verletzungen kommen kann. Dies gilt auch für Industrieroboter mit niedrigen Traglasten von z. B. nur 3 *kg*, [38]. Sie verfügen immer noch über genug Leistung, um im Fehlerfall erhebliche Schäden zu verursachen, besonders

dann wenn am Roboterflansch scharfkantige Werkzeuge angebracht sind.

Aus diesem Grunde existieren für den Einsatz von Industrierobotern entsprechende Sicherheitsvorschriften. Diese sind vor allem in den Normen DIN EN 775 [26], DIN EN 954 [28] und DIN EN 999 [29] hinterlegt. Im Automatikbetrieb ist der Manipulator üblicherweise nur hinter einer trennenden Schutzeinrichtung, wie einem Sicherheitszaun, in Bewegung. Die Schutztür ist verriegelt und würde beim Öffnen sofort den Nothalt des Roboters auslösen. Soll auf einen Sicherheitszaun verzichtet werden, dann sind auch optoelektronische Schutzmaßnahmen denkbar, die den Arbeitsbereich des Roboters überwachen. Dazu zählen z. B. sog. Lichtvorhänge.

Bei der Programmierung des Roboters kann jedoch nicht darauf verzichtet werden, dass Menschen in den Arbeitsbereich des Manipulatorarmes kommen. Für das exakte *Teach In*, z. B. mittels des Handbediengerätes, muss der Programmierer in unmittelbarer Nähe des Endeffektors sein. Dies geschieht im sog. Hand- oder Einrichtbetrieb der Robotersteuerung. Die maximale Geschwindigkeit des Endeffektors beim Verfahren in kartesischen Koordinaten ist dabei entsprechend gültiger Normen auf  $250 \text{ mm/s}$  beschränkt. Bei der Bewegungssteuerung in Gelenkkordinaten liegt die Beschränkung bei 10% der Nenngeschwindigkeit des Gelenks. Außerdem muss der Bediener ständig den am Handbediengerät befindlichen Zustimmungstaster (auch Totmanschalter) betätigen. Im Falle einer Fehlreaktion des Roboters kann die Bewegung dann sofort gestoppt werden.

Durch das Ziel die Produktionsprozesse immer mehr zu optimieren, wird sich in Zukunft die strikte Trennung zwischen Mensch und Roboter nicht mehr aufrechterhalten lassen, [40]. Es hat sich gezeigt, dass rein automatische Fertigungsabläufe häufig sehr unflexibel sind und auf den Menschen dabei nicht verzichtet werden kann. Es wird also darauf ankommen, die Arbeit zwischen Mensch und Roboter hinsichtlich Qualität und Kosten optimal aufzuteilen und beide vollständig im Produktionsprozess zusammenzuführen. Neben dem industriellen Einsatz werden zukünftig Roboter auch in anderen Bereichen Einzug halten, so z. B. im Haushalt [65] oder bei der Krankenpflege. Auch im Unterhaltungssektor sind Roboter denkbar. Ein Beispiel dafür ist der *RoboCoaster* der Fa. KUKA, [53].

Eine Möglichkeit der Interaktion zwischen Mensch und Roboter sind sog. Cobots (*collaborative robot*), [81], [82]. Darunter versteht man Handhabungsgeräte ohne oder nur mit geringer Eigenleistung, die entsprechend ergonomisch konstruiert wurden. Sie sollen den Menschen vor allem beim Transport schwerer oder unhandlicher Objekte unterstützen. Cobots existieren z. B. in der kinematischen Form von Portalrobotern oder auch als mobile Geräte. Sie werden u. A. in der Automobilindustrie, z. B. bei der Tür- und Cockpitmontage eingesetzt, [1]. Aufgrund der geringen Eigenleistung von Cobots im Vergleich zu Industrierobotern gewährleisten sie eine sichere Zusammenarbeit mit dem Menschen.

Die direkte Interaktion zwischen Mensch und Roboter, wie sie auch bei der KB geschieht, ist vor allem auch aus sicherheitstechnischen Gesichtspunkten noch in ihrem Anfangstadium. Trotz einiger Pilotprojekte, wie z. B. die Montage von Getrieben [90] oder die Pipelinefertigung [11], existieren noch keine allgemein verbindlichen Sicherheitsstandards. Eine Lösung ist die der Fa. Reis Robotics, die für Forschungsprojekte einen sog. *Safety Controller* in ihre Robotersteuerung integriert hat, [99]. Dieser überwacht ständig das Roboterverhalten und löst im Gefahrenfall den Nothalt aus. Er ist in sicherer, zweikanaliger Technik ausgeführt. In [99] wird die umfangreiche Funktionalität des *Safety Controllers* vorgestellt. Dazu zählt u. A. die sog. *Safe Production*, die es dem Bedienpersonal erlaubt, sich während des Automatikbetriebs

bes in unmittelbarer Nähe des Roboters aufzuhalten, z. B. zur Prozessüberwachung. Dabei wird durch den *Safety Controller* sichergestellt, dass der Maximalwert von  $50 \text{ mm/s}$  für die Endeffektorgeschwindigkeit nicht überschritten wird. Der Aufenthalt im Arbeitsbereich des Roboters ist dann ohne Zustimmungstaster möglich.

Neben der Benutzersicherheit stationärer Roboter spielen mobile Systeme bei aktuellen Forschungsaktivitäten eine besondere Rolle. Mobile Plattformen können z. B. als Produktionsassistenten in der Automobilfertigung ihren Einsatz finden. Für sie sind spezielle Sicherheitskonzepte notwendig, siehe dazu z. B. [104].

Das Handführen eines Roboters, wie es in dieser Arbeit beschrieben wird, ist mit den derzeit auf dem Markt befindlichen Robotersystemen unter sicherheitstechnischen Gesichtspunkten nur schwer in Einklang zu bringen.

Ein Möglichkeit wäre das Ausnutzen der Betriebsart „Hand“ mit ihrer reduzierten Endeffektorgeschwindigkeit, sofern dies das Steuerungssystem zulässt. Dabei müsste allerdings ständig der Zustimmungstaster betätigt werden, was sehr unergonomisch ist und den eigentlichen Sinn der KB aufhebt. Vielfach wird aber das Ausführen der Programme zum Handführen nur im Automatikbetrieb möglich sein. Für den Laborbetrieb wurden darin zusätzliche Sicherheitsfunktionen implementiert, siehe auch Abschnitt 3.5.2 und 3.5.3. Diese Funktionen garantieren für den Benutzer weitestgehende Sicherheit, sind aber für den industriellen Einsatz ungeeignet, da sie nicht in sicherer Technik ausgeführt sind. Eine den Sicherheitsnormen konforme Implementierung der KB ist in bestehende Robotersteuerungen nur in Zusammenarbeit mit dem jeweiligen Hersteller möglich. Inwieweit Robotersysteme für den personensicheren Betrieb, wie z. B. [99], auf dem kommerziellen Markt Einzug halten, bleibt abzuwarten und wird letztendlich von der Nachfrage nach solchen Systemen abhängen.

### 3.8 Zusammenfassung

Dieses Kapitel beschäftigte sich eingehend mit der KB von Robotern unter Verwendung von Kraft-/ Momentsensorik. Besonders im Vordergrund stand dabei das komfortable *Teach In* von Positionen und Orientierungen des Endeffektors, obgleich auch weitere Anwendungsfälle Erwähnung fanden.

Zunächst wurden verschiedene Ansätze zur KB vorgestellt und hinsichtlich der Art der Bewegungssteuerung bzw. Platzierung der Kraft-/ Momentsensorik klassifiziert. Besonders wichtig für die weiteren Untersuchungen war dabei die Unterscheidung zwischen kartesischem und Gelenkraum basiertem Ansatz zur KB.

Nach der Auswahl einer einfachen Kinematik, dem *Planar Two Link Manipulator*, erfolgte die Übertragung beider Ansätze auf dieses System. Anhand des *Planar Two Link Manipulators* konnten die kinematischen Unterschiede zwischen Bewegungssteuerung im kartesischen Raum und im Gelenkraum mit entsprechenden Beispielen demonstriert werden.

Danach wurde der Ansatz zur KB im Gelenkraum auf weitere Kinematiken angewandt. Diese reichten von 6-Gelenk-Knickarmrobotern, über redundante und parallele Manipulatoren, bis hin zu mobilen Robotern. Die Eigenschaften und Vorteile im Vergleich zum kartesischen Algorithmus wurden auch an diesen Stellen wieder gezeigt. Zusammenfassend sind sie in der Tabelle 3.4 aufgezählt und belegen klar die Benutzerfreundlichkeit der KB im Gelenkraum.

Nachdem sich die Untersuchungen zunächst auf die Kinematik der Roboterbewegung beschränkten, erfolgte anschließend die Betrachtung der Dynamik der KB. Diese ist sowohl abhängig von der Dynamik des Robotersystems, als auch von der Wahl des WV des Roboters.

	Kartesischer Ansatz	Gelenkraumansatz
Verhalten des Roboters ist abhängig von dessen Kinematik	Nein	Ja
Toleranz gegenüber Singularitäten	Nein	Ja
Erreichbarer Arbeitsraum	Zum Teil eingeschränkt	Voll
Einsetzbarkeit bei redundanten Manipulatoren	Eingeschränkt	Ja
Einsetzbarkeit bei parallelen Manipulatoren	Ja	Nicht sinnvoll
Trennung von Positions- und Orientierungsänderung des Endeffektors	Ja	Nein
Relevanz der Lage des <i>TCP</i>	Ja	Nein
Aufwendigkeit des Algorithmus	Inverse Kinematik	Jacobi-Matrix

Tabelle 3.4: Vergleich zwischen kartesischem Ansatz und Gelenkraumansatz zur kraftgeführten Bewegung.

Das WV kann in Struktur und Parametrierung in weiten Grenzen vom Benutzer vorgegeben werden. Vorschläge dafür wurden in diesem Abschnitt ausführlich diskutiert. Dabei steht das WV in Form von Masse-Dämpfer-Systemen im Vordergrund. Zusätzlich wurden nützliche Sonderfunktionen, wie z. B. Gelenkanschlüsse und virtuelle Arbeitsraumbegrenzungen vorgestellt.

Anknüpfend an die Theorie zur KB wurde diese im nächsten Abschnitt in verschiedene zur Verfügung stehende Robotersysteme implementiert und getestet. Anhand entsprechender Versuche des Handführens wurden die speziellen Eigenschaften des Gelenkraumansatzes verdeutlicht. Außerdem bestimmt die Wahl des Robotersystems wesentlich die Möglichkeiten der Bewegungssteuerung. Diese wurden mit Hilfe der Beispielsysteme vorgestellt und sind von wesentlicher Bedeutung für die Realisierung der KB bzw. der KMR von Industrierobotern im Allgemeinen.

Im nächsten Abschnitt wurde dann die Sonderfunktionalität der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung in ihre Implementierung beschrieben und erfolgreich getestet. Sie stellt eine interessante Erweiterung der KB, insbesondere für das *Teach In*, dar und bietet Spielraum für weitere Forschungsaktivitäten. Eine weitere Anwendungsmöglichkeit des Handführens ist die sog. Teleoperation, die ebenfalls kurz vorgestellt wurde.

---

Problematisch bei jeglicher Zusammenarbeit zwischen Mensch und Roboter ist der Aspekt der Bediener-sicherheit. Dieses Problem konnte in der vorliegenden Arbeit nur unzureichend gelöst werden. Zwar wurden entsprechende Funktionalitäten bei der Implementierung erstellt, jedoch stellen diese keine ausreichende Lösung für den industriellen Einsatz gemäß einschlägiger Normen dar, so dass auf diesem Gebiet weitere Arbeiten unbedingt notwendig erscheinen.

## 4 Kraftgeführte Bewegungen ohne zusätzliche Sensorik

Alle bisher beschriebenen und z. T. auch praktisch umgesetzten Ansätze zur KB basierten auf der Verwendung von KMS. Diese Elemente sind z. Z. noch sehr teuer. Besonders bei Robotersystemen mit geringen Traglasten und somit auch relativ geringem Preis ist dann das Kostenverhältnis zwischen Roboter und KMS sehr ungünstig. Bei Manipulatoren mit höheren Traglasten sind die Kosten des KMS bezogen auf das gesamte Robotersystem eher vernachlässigbar klein.

Ogleich für den Einsatz beim Kraftführen ihre hohe Genauigkeit nicht notwendig ist und sich im Falle des standardmäßigen Einsatzes bei Industrierobotern der Preis entsprechender Sensoren sicher verringern würde, wäre es wünschenswert, ohne externe Sensorik auszukommen.

Das Thema der sog. sensorarmen bzw. kraftsensorlosen Robotersteuerung für Operationen mit Umgebungskontakt wird in verschiedenen Arbeiten behandelt, so z. B. in [23] und [75]. Eine schon vielfach diskutierte Messmethode ist die indirekte Messung der Gelenkmomente mit Hilfe der Ströme der Antriebsmotoren in den einzelnen Gelenken [12]. Diese können von den Achsverstärkern ohne zusätzlichen Aufwand bereitgestellt werden. Bei der Auswertung der Motorenströme ist eine umfangreiche Signalverarbeitung notwendig. Die aktuell berechneten Gelenkmomente könnten direkt zur Steuerung des Roboters im Gelenkraum verwendet werden.

Ob dieser Ansatz zur Verwendung bei der KB geeignet ist und welche einzelnen Schritte dafür notwendig sind, soll in diesem Abschnitt genauer untersucht werden, [126].

### 4.1 Sensorlose Bestimmung von Kontaktkräften und -momenten

#### 4.1.1 Theoretische Betrachtungen

Wie schon im Abschnitt 2.3 erwähnt, werden die meisten Industrieroboter durch sog. bürstenlose AC Servomotoren angetrieben. Dabei handelt es sich um eine Synchronmaschine mit permanent erregtem Anker. Das hat den Vorteil, dass auf Schleiferkontakte verzichtet werden kann und der Antrieb somit wartungsfrei ist. Die Ständerwicklungen sind an einen Wechselrichter angeschlossen. Dieser regelt die Ströme der einzelnen Wicklungen in Abhängigkeit von der Lage des Rotors. Die Rotorlage wird durch den sog. Polradlagegeber gemessen und an den Wechselrichter übertragen. Im Prinzip wird der Synchronmotor als Gleichstrommaschine mit elektronischer Kommutierung betrieben. Man spricht daher auch von einem Elektronikmotor [111].

Der Wechselrichter und die dazugehörige Stromregelung sind üblicherweise zusammen mit dem Geschwindigkeitsregler auf einer Baugruppe, dem sog. Achsverstärker ausgeführt. Über den Sollwert der Gelenkgeschwindigkeit und die Rückführung von Rotorposition und -geschwindigkeit stellt sich dann die Ansteuerfrequenz des Synchronmotors ein. Die Abb. 4.1

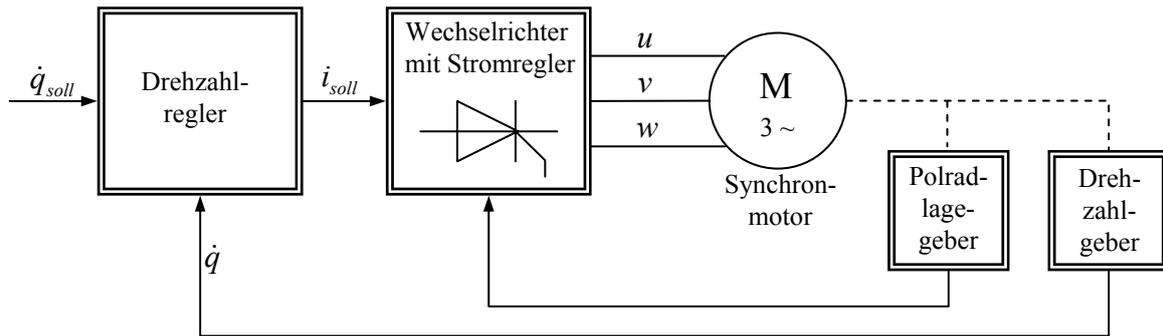


Abbildung 4.1: Funktionsweise des Elektronikmotors.

zeigt den prinzipiellen Aufbau und die Funktionsweise des Elektronikmotors. Sowohl für den Stromregler, als auch für den Drehzahlregler, werden standardmäßig PI-Regler verwendet.

Aus den eben beschriebenen Gründen kann der Antrieb des Roboters als permanent erregter Gleichstrommotor betrachtet werden. Vernachlässigt man Reibungs- und Ummagnetisierungsverluste und geht man davon aus, dass keine Feldschwächung aufgrund der Ankerrückwirkung erfolgt, dann besteht ein linearer Zusammenhang zwischen Strom  $i$  und Motormoment  $\tau_M$ , [69]. Er wird durch die Momentkonstante  $k_M$  beschrieben.

$$\tau_M = k_M i \quad (4.1)$$

Der Wechselrichter schaltet die Ständerwicklungen in Abhängigkeit von der Rotorlage. In der Regel stellt er auch den Mittelwert des Stromes  $i$  als Messgröße, z. B. in Form einer Analogspannung, zur Verfügung. Die Zeitkonstante der Stromregelstrecke wird im Wesentlichen durch Ankerkreiswiderstand und -induktivität bestimmt. In deren Größenordnung liegt folglich auch die Zeitkonstante des geschlossenen Stromregelkreises. Sie alle sind im Vergleich zu den mechanischen Zeitkonstanten des Roboterarmes sehr klein. Durch die PI-Struktur des Stromreglers tritt außerdem keine bleibende Regelabweichung zwischen Stromist- und Stromsollwert auf. Aus diesen Gründen kann statt des Istwertes  $i$ , auch der Sollwert des Motorstromes  $i_{soll}$  für die Berechnung des Motormomentes benutzt werden. Aus (4.1) folgt dann (4.2):

$$\tau_M = k_M i_{soll} \quad (4.2)$$

Das Messsignal des Sollstromes ist weniger stark gestört als das des Iststromes und muss deshalb nicht so sehr gefiltert werden. Dennoch ist eine Tiefpassfilterung von  $i_{soll}$  für die Weiterverarbeitung unerlässlich.

Das Motormoment wird über ein Getriebe zur Gelenkachse übertragen und führt dort zu einem entsprechenden Gelenkmoment  $\tau$ . Die Getriebeübersetzung  $k_G$  stellt dabei den Übertragungsfaktor dar. Vereinfacht, ohne die Berücksichtigung von Reibung, Losen, etc. gilt:

$$\tau = \frac{1}{k_G} \tau_M \quad (4.3)$$

Fasst man die Gleichungen (4.2) bzw. (4.1) und (4.3) für alle Gelenke zusammen ( $i = 1 \dots m$ ),

$$\tau_i = \frac{k_{M_i}}{k_{G_i}} i_i = k_{MG_i} i_i, \quad (4.4)$$

dann gilt für einen Roboter die folgende Vektorschreibweise:

$$\vec{\tau} = \underline{K}_{MG} \vec{i} = \begin{bmatrix} k_{MG_1} & 0 & \dots & \dots & \dots & 0 \\ 0 & k_{MG_2} & \dots & \dots & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \dots & \dots & k_{MG_m} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_1 \\ i_2 \\ \vdots \\ \vdots \\ \vdots \\ i_m \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

Erweitert man die dynamische Grundgleichung des Roboters von (2.11) um die durch Einwirkung von außen resultierenden Gelenkmomente bzw. -kräfte, so erhält man (4.6):

$$\vec{\tau} = \underline{M}(\vec{q}) \vec{\ddot{q}} + \vec{C}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) + \vec{V}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) + \vec{\tau}_K \quad (4.6)$$

Die Kontaktmomente im Gelenkraum können durch die kartesischen Kontaktkräfte und -momente unter Verwendung der Beziehung von (3.39) ersetzt werden:

$$\vec{\tau} = \underline{M}(\vec{q}) \vec{\ddot{q}} + \vec{C}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) + \vec{G}(\vec{q}) + \vec{V}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) + \underline{J}_G^T \vec{\Gamma}_K \quad (4.7)$$

Durch Gleichsetzen von (4.5) und (4.7) lassen sich die kartesischen Kontaktkräfte und -momente am Endeffektor wie folgt berechnen:

$$\vec{\Gamma}_K = \underline{J}_G^{T^{-1}} \left[ \underline{K}_{MG} \vec{i} - \underline{M}(\vec{q}) \vec{\ddot{q}} - \vec{C}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) - \vec{G}(\vec{q}) - \vec{V}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) \right] \quad (4.8)$$

Bei der Anwendung von Gleichung (4.8) ist unbedingt zu beachten, dass sich die berechneten Kräfte und Momente immer auf das Werkzeugkoordinatensystem beziehen. Bei Krafteinwirkung innerhalb der kinematischen Kette des Manipulators werden demzufolge die Werte des Vektors  $\vec{\Gamma}_K$  so berechnet, dass diese die gleichen Motorenströme hervorrufen würden.

Die Berechnung der inversen Matrix von  $\underline{J}_G^T$  in (4.8) führt zu Singularitätsproblemen. Bei der Verwendung eines am Roboterflansch montierten KMS zur KB wurden diese durch den Gelenkraumansatz behoben. Daher soll auch bei der KB ohne zusätzliche Sensorik die Bewegungssteuerung des Roboters wieder im Gelenkraum erfolgen. Demnach lassen sich die Kontaktmomente (bzw. -kräfte) im Gelenkraum aus den Motorenströmen nach Gleichung (4.9) bestimmen.

$$\vec{\tau}_K = \underline{K}_{MG} \vec{i} - \underline{M}(\vec{q}) \vec{\ddot{q}} - \vec{C}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) - \vec{G}(\vec{q}) - \vec{V}(\vec{q}, \vec{\dot{q}}) \quad (4.9)$$

Einen anderen Blickwinkel liefert die Abb. 4.2. In ihr ist das Signalflussbild einer kompletten Achse mit dazugehöriger Kaskadenregelung dargestellt. Für den Strom- und Geschwindigkeitsregler wurden PI-Strukturen angesetzt. Der Lageregler weist P-Verhalten auf. Wirken externe Kräfte und/oder Momente auf den Manipulator ein, dann resultieren diese in dem Moment  $\tau_K$  des jeweiligen Gelenks. Um eine daraus folgende Bewegung der Achse zu verhindern, muss ein

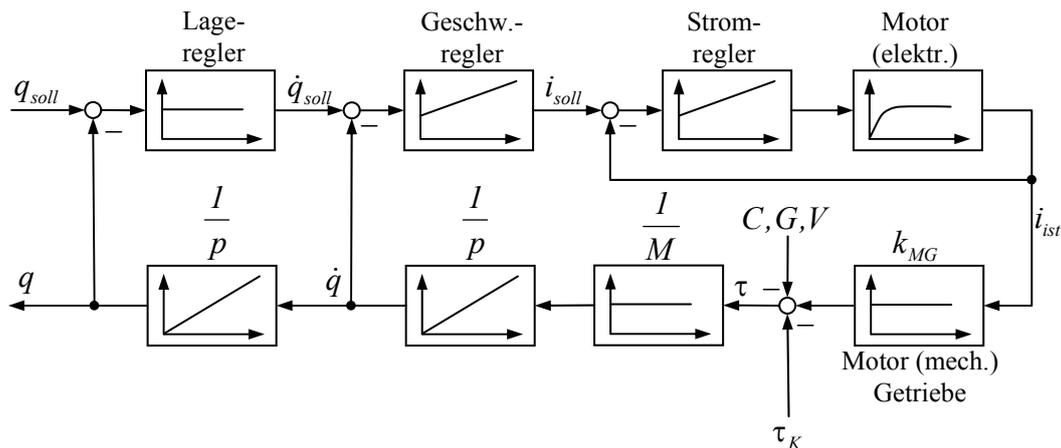


Abbildung 4.2: Signalflussbild des geschlossenen Regelkreises eines kompletten Gelenks.

entsprechendes Gegenmoment erzeugt werden. Dies geschieht letztendlich durch den Stromregler, unter Vorgabe des Sollstromes  $i_{soll}$  vom Geschwindigkeitsregler, der die Bewegung in Folge des Kontaktmomentes  $\tau_K$  zu verhindern versucht. Bedingt durch die Struktur der kompletten Kaskadenregelung, tritt im Falle eines statischen Kontaktmomentes keine bleibende Regelabweichung auf. Als Folge der hohen Dynamik von Strom- und Geschwindigkeitsregler wird auch die kurzzeitige Abweichung vom Lagesollwert  $q_{soll}$  kaum messbar sein.

#### 4.1.2 Verifizierung an einem realen Robotersystem

Bei der Berechnung der Kontaktmomente nach Gleichung (4.9) werden ständig die aktuellen Einflüsse der Gravitations-, Coriolis-, Zentrifugal- und Reibungskräfte benötigt. Des Weiteren muss die Matrix der Massenträgheiten stets bekannt sein. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die Messwerte des Stromes von einem starken Rauschen überlagert werden. Dies gilt auch für den Stromsollwert. Aus diesen Gründen ist es unbedingt erforderlich, die theoretischen Überlegungen an einem realen Robotersystem zu überprüfen. Dafür eignet sich besonders das schon im Abschnitt 3.5.3 verwendete System, basierend auf dem Roboter vom Typ MANUTEC r3. Er wurde mit einer sog. offenen Robotersteuerung ausgerüstet. In Abb. 3.28 wurde deren Struktur bereits dargestellt. Zusätzlich dazu liefern die Achsverstärker die aktuellen Motorenströme sowie deren Sollwerte in Form analoger Spannungen. Diese können dann von der Robotersteuerung verarbeitet werden. Die Verwendung des MANUTEC r3 Roboters hat außerdem den Vorteil, dass für diesen bereits umfangreiche Untersuchungen in Richtung Modellbildung durchgeführt und auch publiziert wurden, siehe dazu auch [77], [78] und [107].

**Messwertgewinnung und -vorverarbeitung** Wie eben erwähnt stellen die Achsverstärker die Soll- und Istwerte der Motorenströme in Form einer Spannung im Bereich  $\pm 8 V$ , bezogen auf den jeweiligen Maximalwert (siehe auch Tabelle 4.1), zur Verfügung. Die Messsignale weisen aufgrund von Störungen und ständig notwendiger Stelleingriffe eine erhebliche Streuung auf. Deshalb ist eine Vorverarbeitung der Messsignale unbedingt nötig. Im vorliegenden Fall wurden die Stromsollwerte mit Hilfe diskreter Tiefpassfilter erster Ordnung geglättet.

Deren Zeitkonstante betrug  $T_F = 40 \text{ ms}$  bei einer Tastzeit von  $T_a = 5 \text{ ms}$ .

$$i(z) = G_F(z^{-1}) i_{\text{soll}}(z) \quad \text{mit} \quad G_F(z^{-1}) = \frac{e^{-\frac{T_a}{T_F}} z^{-1}}{1 - e^{-\frac{T_a}{T_F}} z^{-1}} \quad (4.10)$$

**Robotermodelle** Die Daten für das notwendige, dynamische Modell des Roboters MANUTECH r3 wurden aus entsprechenden Publikationen der DLR ([78], [107]), sowie den Produktunterlagen entnommen. Das sog. *DFVLR Modell Nr. 1* enthält Informationen über die einzelnen Teilkörper des Roboters, wie Massenträgheitsmomente und Schwerpunktlagen. Außerdem liefert es die Werte der maximalen Motormomente und die Getriebeübersetzungen. Im *DFVLR Modell Nr. 2 des Industrieroboters MANUTECH r3* sind die Parameter der Differenzialgleichung (2.11), die das Bewegungsverhalten des Manipulators beschreibt, für die Gelenke 1, 2 und 3 enthalten. Die restlichen Achsen werden als unbeweglich, mit einem Gelenkwinkel von jeweils Null, angenommen. Als weitere Einschränkung liefert das Modell keine Informationen über die Reibung. Die Modellbildung am MANUTECH r3 Roboter wurde seitens der DLR weiter geführt, besonders hinsichtlich Reibung, nicht idealisierter Getriebe und Verhalten der Achsverstärker. Ein Übersicht dazu liefert [32].

**Reibung** Besonders problematisch bei der Auswertung der Motorenströme sind die Reibmomente in den Gelenken. Neben der geschwindigkeitsproportionalen Reibung treten zusätzlich nichtlineare Anteile in Form von *Coulombscher*-Reibung und Haftreibung auf, die zudem noch positions-, last-, temperatur- und altersabhängig sind. Aus diesem Grund ist es sehr schwer, für die Reibmomente ein zuverlässiges Modell zu erstellen, um deren Anteile aus den Motorenströmen zu eliminieren.

Bedingt durch die Struktur des geschlossenen Strom- und Lageregelkreises, ist es im Falle des Stillstandes des Roboters unmöglich, den Anteil der Reibmomente von den Kontaktmomenten zu trennen. Betrachtet man ein einzelnes Gelenk, dann kann der Integrator des Geschwindigkeitsreglers einen beliebigen Wert innerhalb des Bereiches der *Coulombschen*- bzw. Haftreibung annehmen, sofern durch den daraus folgenden Stromsollwert noch keine Gelenkbewegung hervorgerufen wird. Er entsteht z. B. zufällig durch die vorausgegangene Bewegung. Eine Möglichkeit, diesen Effekt zu minimieren, wäre die Überlagerung der Sollgeschwindigkeit mit einem periodischen Signal. Dieses sog. Dithersignal führt zu einer ständigen Bewegung des Gelenks und reduziert somit die Einflüsse der Haftreibung. Nachteilig wirkt sich diese Maßnahme allerdings hinsichtlich Positioniergenauigkeit und Bedienkomfort während der KB aus. Ebenfalls denkbar wäre eine Art Tarierung beim Übergang von dem Zustand der Bewegung in den Stillstand, was aber die Möglichkeiten der genauen Bestimmung von Kontaktkräften und -momenten sehr einschränkt. Da bei dem zur Verfügung stehenden, sowie auch bei den meisten kommerziellen Robotersystemen, keine weiteren Zugriffsmöglichkeiten auf Strom- und Lageregelkreise bestehen, sollen weitere Maßnahmen bezüglich der Reibungsproblematik an dieser Stelle nicht weiter diskutiert werden.

**Versuche im stationären Fall** Für die ersten Untersuchungen hinsichtlich der Qualität der aus den Motorenströmen geschätzten Kontaktkräfte und -momente soll zunächst das *DFVLR Modell Nr. 2 des Industrieroboters Manutec r3* [78] verwendet werden, welches nur die Veränderung der Gelenkwinkel  $q_1$ ,  $q_2$  und  $q_3$  erlaubt ( $q_4 = q_5 = q_6 = 0$ ). Der Manipulator wird in unterschiedliche Positionen gebracht. An denen wirkt ein Bediener auf den Endeffektor ein. Er erzeugt dabei einen zufälligen Verlauf von Kontaktkräften und -momenten. Diese werden durch

Gelenk	1	2	3	4	5	6
Maximalstrom [A]	25	25	25	5	5	2,2
Motorkonstante [ $NmA^{-1}$ ]	0,320	0,320	0,320	0,376	0,405	0,296
Getriebeübersetzung $k_G^{-1}$	105	210	60	99	79,2	99
Maximale Geschwindigkeit [ $^\circ s^{-1}$ ]	172	86	298	195	246	212
Maximales Motormoment [ $Nm$ ]	8	8	8	1	1	0,4
Auflösung der Winkelgeber $10^{-3}[^\circ]$	1,4	0,7	2,5	1,5	1,9	1,5
Inkrement pro Grad	700	1400	400	660	528	660

Tabelle 4.1: Ausgewählte Gelenkparameter des MANUTEC r3 Roboters.

den am Flansch des Roboters montierten KMS gemessen und gewichtskraftkompensiert. Anschließend erfolgt die Transformation in die Orientierung des Basiskoordinatensystems (siehe Gleichung 3.41) und dann mit Hilfe der aktuellen Jacobi-Matrix in den Gelenkraum (siehe Gleichung 3.39 bzw. 3.44). Zur Unterscheidung liegen die Gelenkmomente, hervorgerufen durch den Umgebungskontakt des Endeffektors und von dem KMS gemessen, nun im Vektor  $\vec{\tau}_{KMS}$ . Für den MANUTEC-Roboter gilt demnach:

$$\vec{\tau}_{KMS} = \begin{bmatrix} \tau_{1_{KMS}} \\ \tau_{2_{KMS}} \\ \tau_{3_{KMS}} \\ \tau_{4_{KMS}} \\ \tau_{5_{KMS}} \\ \tau_{6_{KMS}} \end{bmatrix} \quad (4.11)$$

Für die Bestimmung der Kontaktmomente aus den Motorenströmen wird die Gleichung (4.9) herangezogen. Da sich zum Versuchszeitpunkt der Manipulator im Stillstand befindet, können die Coriolis- und Zentrifugalmomente und auch die Beschleunigungsmomente zu Null gesetzt werden. Gleiches gilt für die Reibmomente, sofern vor dem Versuch eine Tarierung der *Coulomb*- und Haftreibung stattfindet. Somit reduziert sich (4.9) zu (4.12).

$$\vec{\tau}_K = \underline{K}_{MG} \vec{q} - \vec{G}(\vec{q}) \quad (4.12)$$

Die Parameter zur Berechnung der Diagonalelemente der Matrix  $\underline{K}_{GM}$  für den MANUTEC r3 Roboter sind in der Tabelle 4.1 angegeben. Der Vektor der Gewichtsmomente  $\vec{G}$  für die ersten 3 Gelenke kann aus [78], mit den schon erwähnten Einschränkungen, entnommen werden,

$$\vec{G}_{123} = \vec{G}_{123}(\vec{q}_{123}) = \vec{G}_{123} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ q_3 \\ q_4 = 0 \\ q_5 = 0 \\ q_6 = 0 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ G_2 \\ G_3 \end{bmatrix}, \quad (4.13)$$

	Wert	Beschreibung
$ML$	$0 \dots 15 \text{ kg}$	Lastmasse
$MH$	$60,3 \text{ kg}$	Masse des Armes ab Gelenk 3 (ohne Lastmasse)
$M2$	$56,5 \text{ kg}$	Masse des Armes zwischen Gelenk 2 und Gelenk 3
$HH3$	$0,98 \text{ m}$	Abstand zwischen Gelenk 3 und dem Massenmittelpunkt der Last
$DH3$	$0,202 \text{ m}$	Abstand zwischen Gelenk 3 und dem Massenmittelpunkt des Unterarmes entlang der $z_3$ -Achse
$H23$	$0,5 \text{ m}$	Abstand zwischen Gelenk 2 und Gelenk 3 entlang der $z_2$ -Achse
$D23$	$0,205 \text{ m}$	Abstand zwischen Gelenk 2 und dem Massenmittelpunkt von Arm 2 entlang der $z_2$ -Achse
$M5$	$5 \text{ kg}$	Masse der Hand des Roboters (ab Gelenk 5, ohne Lastmasse)
$H5L$	$0,2 \text{ m} + x$	Abstand zwischen Gelenk 5 und dem Massenmittelpunkt der Hand und der Last

Tabelle 4.2: Parameter zur Berechnung der Gravitationsmomente in den Gelenken des Roboters MANUTEK r3.

wobei sich dessen Elemente wie folgt berechnen<sup>9</sup>:

$$G_2 = -g \begin{pmatrix} S3C2(ML \cdot HH3 + MH \cdot DH3) \\ +S2C3(ML \cdot HH3 + MH \cdot DH3) \\ +S2(ML \cdot H23 + MH \cdot H23 + M2 \cdot D23) \end{pmatrix} \quad (4.14)$$

$$G_3 = -g \cdot S23(ML \cdot HH3 + MH \cdot DH3) \quad (4.15)$$

Die Bedeutung der Parameter in den Gleichungen (4.14) und (4.15) und deren Werte sind in der Tabelle 4.2 aufgelistet. Nun ist es mit Hilfe von Gleichung (4.12) möglich, aus den aktuellen Strömen eine Schätzung der Kontaktmomente zu berechnen und diese mit den Messwerten des KMS zu vergleichen.

Für die zwei Positionen A und B ( $\vec{q}_{123_A} = [0 \ 0 \ 90^\circ]^T$ ,  $\vec{q}_{123_B} = [-30^\circ \ 45^\circ \ 30^\circ]^T$ ) ist dies in Abbildung 4.3 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die aus den Motorenströmen geschätzten Kontaktmomente recht gut mit denen des KMS übereinstimmen. Die Unterschiede lassen sich durch folgende Ursachen erklären:

- Statische Fehler aufgrund nicht berücksichtigter *Coulomb*- und Haftreibung, z. T. beobachtbar an den Gelenken 1 und 2,
- Signalverzögerungen zwischen KMS-Messung und Schätzung, hervorgerufen durch die unbedingt notwendige Tiefpassfilterung der Stromsignale und die Reaktionszeiten der Geschwindigkeitsregler,
- Sonstige Abweichungen durch Modellungenauigkeiten.

Die bisher erzielten Ergebnisse lassen darauf schließen, dass die Schätzwerte der Kontaktmomente der Achsen 1, 2 und 3 zur KB des Roboters benutzt werden können. Deshalb sollen nun auch die restlichen Gelenke daraufhin untersucht werden.

<sup>9</sup>Zur Vereinfachung gelten wieder folgende Abkürzungen:  $\sin(q_2) = S2$ ,  $\cos(q_2) = C2$ ,  $\sin(q_3) = S3$ ,  $\cos(q_3) = C3$ ,  $\sin(q_2 + q_3) = S23$ ,  $\cos(q_2 + q_3) = C23$ , usw.

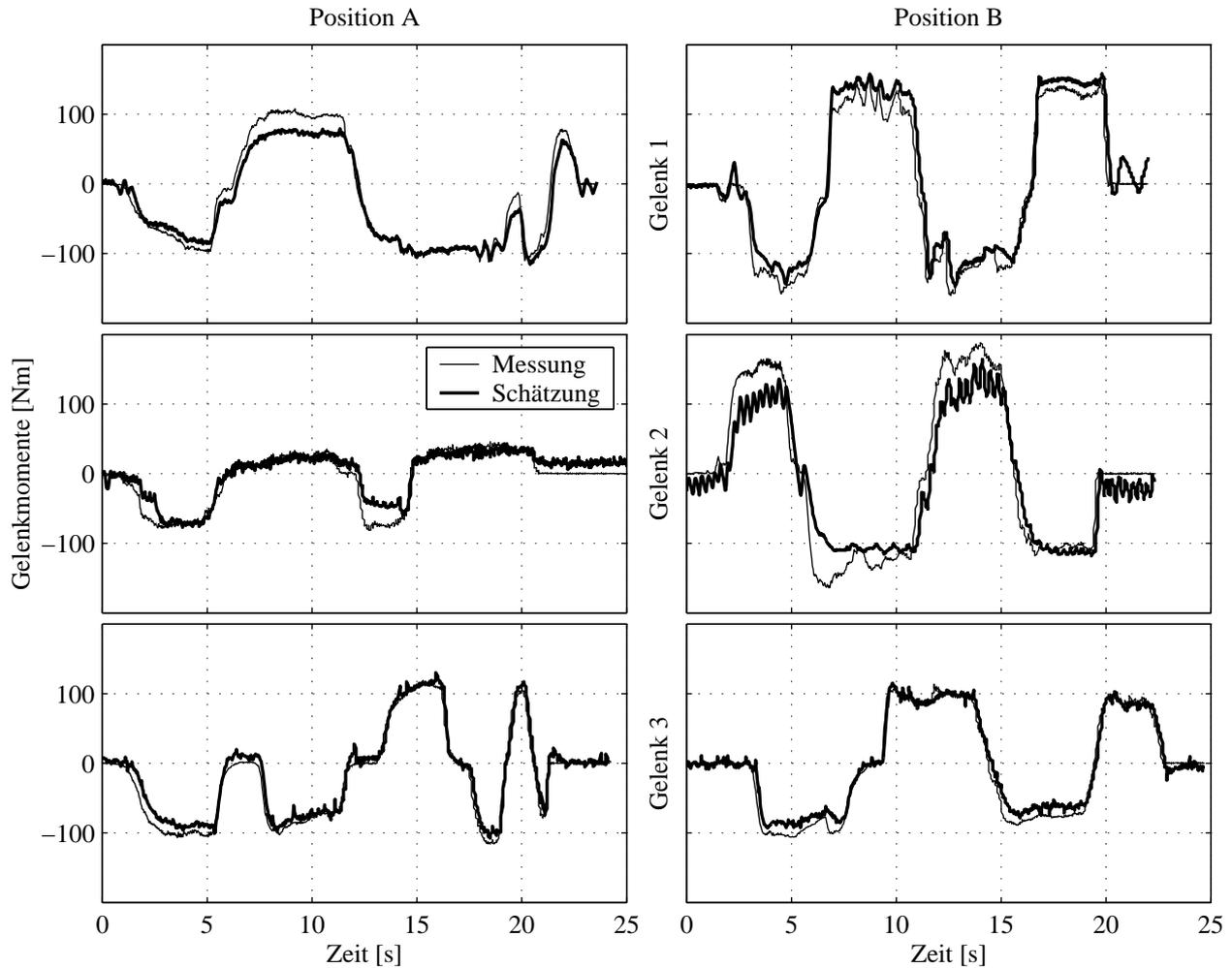


Abbildung 4.3: Vergleich der Momente an den Gelenken 1, 2 und 3 aufgrund des Umgebungskontaktes gemessen durch den KMS und geschätzt aus den Motorenströmen.

Bei der Unterarmachse (Gelenk 4) wurde auf eine aufwendige Modellbildung zur Kompensation des Gewichtsmoments verzichtet, die aber, falls nötig, nachgeholt werden könnte. Es werden also nur die Getriebeübersetzung und die Motorkonstante verwendet. Der Versuch wurde in der durch den Gelenkwinkelvektor  $\vec{q}_C = [0 \ 0 \ 90^\circ \ 0 \ 0 \ 0]^T$  gegebenen Position C durchgeführt. Das Resultat ist in Abb. 4.4 zu sehen. Aufgrund der sehr hohen Streuung des Strommesssignals bei Gelenk 4 war es erforderlich, die Filterzeitkonstante von (4.10) gegenüber den restlichen Gelenken zu erhöhen. Dies äußert sich in einer deutlichen Verschiebung zwischen den beiden Kurven. Die Momentschätzung eilt den aus den Messwerten des KMS berechneten Kontaktmomenten hinterher. Wieder tritt zeitweise ein Offset, hervorgerufen durch *Coulomb*- und Haftreibung, auf. Zusätzlich ist eine niederfrequente Schwingung zu beobachten. Das Gelenk 4 weist von allen die ungünstigsten Eigenschaften auf. Eine mögliche Erklärung dafür ist dessen sehr hohe Abnutzung an dem verwendeten Roboter.

Setzt man für die Hand des Roboters und die daran montierte Einrichtung (Greifer, Werkzeug) eine symmetrische Massenverteilung an, so dass der Massenmittelpunkt auf der Drehachse des Gelenks 6 liegt, dann ist die Kompensation des Gewichtsmomentes für das Gelenk

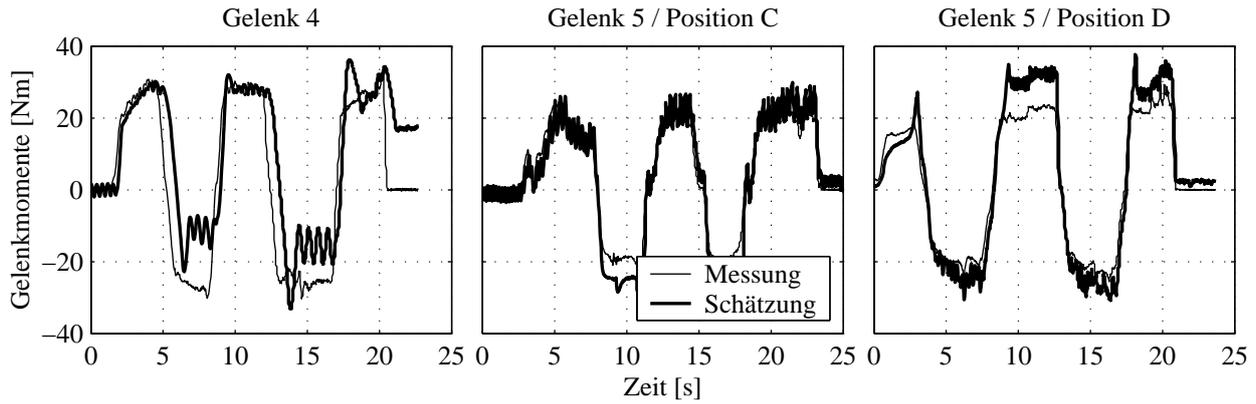


Abbildung 4.4: Vergleich der Momente an den Gelenken 4 und 5 aufgrund des Umgebungskontaktes gemessen durch den KMS und geschätzt aus den Motorenströmen.

5 besonders einfach. Für  $G_5$  gilt dann:

$$G_5 = -g(M_5 + ML)H_5L [(S_2C_3C_4C_5 - C_2S_3S_5)] \quad (4.16)$$

Die Werte und die Bedeutung der Parameter von Gleichung (4.16) sind ebenfalls in der Tabelle 4.2 aufgelistet. Der Verifizierung für das Gelenk 5 wurde wieder an zwei unterschiedlichen Roboterpositionen  $\vec{q}_C$  und  $\vec{q}_D = [0 \ 0 \ 90^\circ \ 0 \ -90 \ 0]^T$  durchgeführt. Die Abb. 4.4 zeigt die Versuchsergebnisse. Wiederum ist eine sehr gute Übereinstimmung zwischen den Messwerten des KMS und den Momentwerten der sensorlosen Schätzung festzustellen.

**Coriolis- und Zentrifugalkräfte** Ist der Manipulatorarm in Bewegung, dann treten Coriolis- und Zentrifugalkräfte auf. Diese führen zu entsprechenden Gelenkmomenten, enthalten im Vektor  $\vec{C}$  der Gleichung (4.9). Möchte man die Kontaktkräfte und -momente während der Bewegung aus den Motorenströmen berechnen, dann wäre theoretisch die Kompensation der Coriolis- und Zentrifugalmomente notwendig. Diese sind roboterspezifisch und abhängig von der aktuellen Position, den Gelenkgeschwindigkeiten und der bewegten Last. Im schon mehrfach benutzten *DFVLR Modell Nr. 2 des Industrieroboters MANUTEC r3* [78] ist auch die Berechnungsvorschrift des Vektors  $\vec{C}$  enthalten. Sie ist weitaus komplexer als die zur Berechnung der Gravitationsmomente und setzt genaue Kenntnisse über den Aufbau der einzelnen Glieder des Roboters voraus, u. A. deren Massenträgheitstensoren.

Die durch die Coriolis- und Zentrifugalkräfte hervorgerufenen Gelenkmomente, nehmen mit steigenden Gelenkgeschwindigkeiten sehr hohe Werte an. Für die Gelenke 1, 2 und 3 des MANUTEC r3 Roboters ist dies mit Hilfe von [78] in Abb. 4.5 dargestellt. Dabei wurden die Gelenkgeschwindigkeiten im Bereich von 0 bis 100% ihrer Maximalgeschwindigkeit variiert. Für den gesamten Arbeitsraum der Gelenke wurden dann die Coriolis- bzw. Zentrifugalmomente berechnet und deren Maximalwerte im Diagramm aufgezeichnet. Die Simulation wurde mit der maximalen Lastmasse von  $15\text{kg}$  durchgeführt. Es ist zu erkennen, dass bei maximalen Gelenkgeschwindigkeiten im ungünstigsten Falle die Werte der Coriolis- und Zentrifugalmomente in den Bereich der maximalen Antriebsmomente kommen können. Möchte man bei solch hohen Geschwindigkeiten die Kontaktkräfte und -momente aus den Motorenströmen bestimmen, dann ist die Kompensation von  $\vec{C}$  unumgänglich. Dies wird u. A. auch bei der modellbasierten Regelung durchgeführt (siehe Abschnitt 2.5.1).

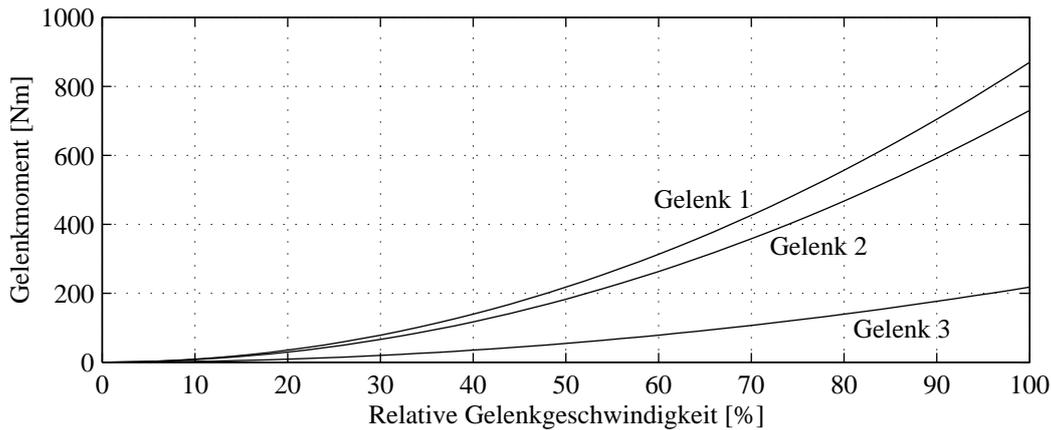


Abbildung 4.5: Maximalwerte der Gelenkmomente hervorgerufen durch Zentrifugal- und Corioliskräfte bei unterschiedlichen Gelenkgeschwindigkeiten.

Bei der KB ist aus Sicherheitsgründen die Verfahrensgeschwindigkeit begrenzt. Da der Bediener im direkten Kontakt mit dem Manipulatorarm ist, ist selbst der für den normalen Handbetrieb übliche Wert, von 10% der Nenngeschwindigkeit eines Gelenks, noch relativ hoch. Ein sinnvoller Grenzwert für die Geschwindigkeit der Hauptgelenke könnte z. B. bei  $10^\circ/s$  liegen. In diesem Falle können die maximalen Coriolis- bzw. Zentrifugalmomente von ca.  $3,0 Nm$ ,  $1,9 Nm$  und  $1,1 Nm$  für die Gelenke 1, 2 und 3 entstehen. Diese Werte sind im Bereich der Modellgenauigkeit, z. B. der Gravitations- und Reibmomente. Für die Modellgenauigkeiten müssen bei der Realisierung der KB entsprechende Vorkehrungen getroffen werden. Aus diesem Grunde wird auf die relativ aufwendige Kompensation von  $\vec{C}$  verzichtet und die Coriolis- und Zentrifugalkräfte für niedrige Gelenkgeschwindigkeiten mit Null genähert.

**Beschleunigungsmomente** Um den Roboterarm zu beschleunigen bzw. zu verzögern, müssen seitens der Antriebe entsprechende Momente aufgebracht werden, die sich in dazu proportionalen Motorenströmen niederschlagen. Sie sind bei der Schätzung der Kontaktkräfte und -momente zu kompensieren. Dazu muss die Massenträgheitsmatrix  $\underline{M}$  der Gleichung (4.9) berechnet werden. Für den Industrieroboter MANUTEC r3 wurde diese ebenfalls in [78] veröffentlicht. Multipliziert man  $\underline{M}$  mit dem Vektor der Gelenkbeschleunigungen  $\vec{\ddot{q}}$ , dann erhält man die Beschleunigungsmomente der einzelnen Gelenke.

Praktisch ist das Ermitteln der aktuellen Gelenkbeschleunigungen sehr problematisch. Da ein Industrieroboter üblicherweise weder mit Beschleunigungs- noch mit Geschwindigkeitssensoren in den Gelenken ausgerüstet ist, kann  $\vec{\ddot{q}}$  nur durch zweifaches Differenzieren von  $\vec{q}$  bestimmt werden. Die Gelenke des hier exemplarisch verwendeten MANUTEC r3 Roboters sind mit inkrementellen Winkelgebern (IGR) ausgestattet. Betrachtet man deren Auflösung (siehe Tabelle 4.1) und die Zykluszeit der verwendeten Robotersteuerung von  $5 ms$ , dann zeigt sich, dass bei geringen Geschwindigkeiten die Winkeländerungen nur wenige Inkremente betragen. Somit weisen schon die durch einfaches Differenzieren gewonnenen Signale der Gelenkgeschwindigkeiten  $\vec{\dot{q}}$  erhebliche Streuungen auf. Eine Weiterverwendung von  $\vec{\dot{q}}$  ist nur nach entsprechender Filterung sinnvoll. Durch zweifaches Differenzieren verstärkt sich dieser Diskretisierungseffekt noch um ein Vielfaches, was den daraus gewonnenen Vektor  $\vec{\ddot{q}}$  praktisch unbrauchbar macht.

Aus diesem Grunde wird bei der Implementierung auf die Kompensation der Beschleuni-

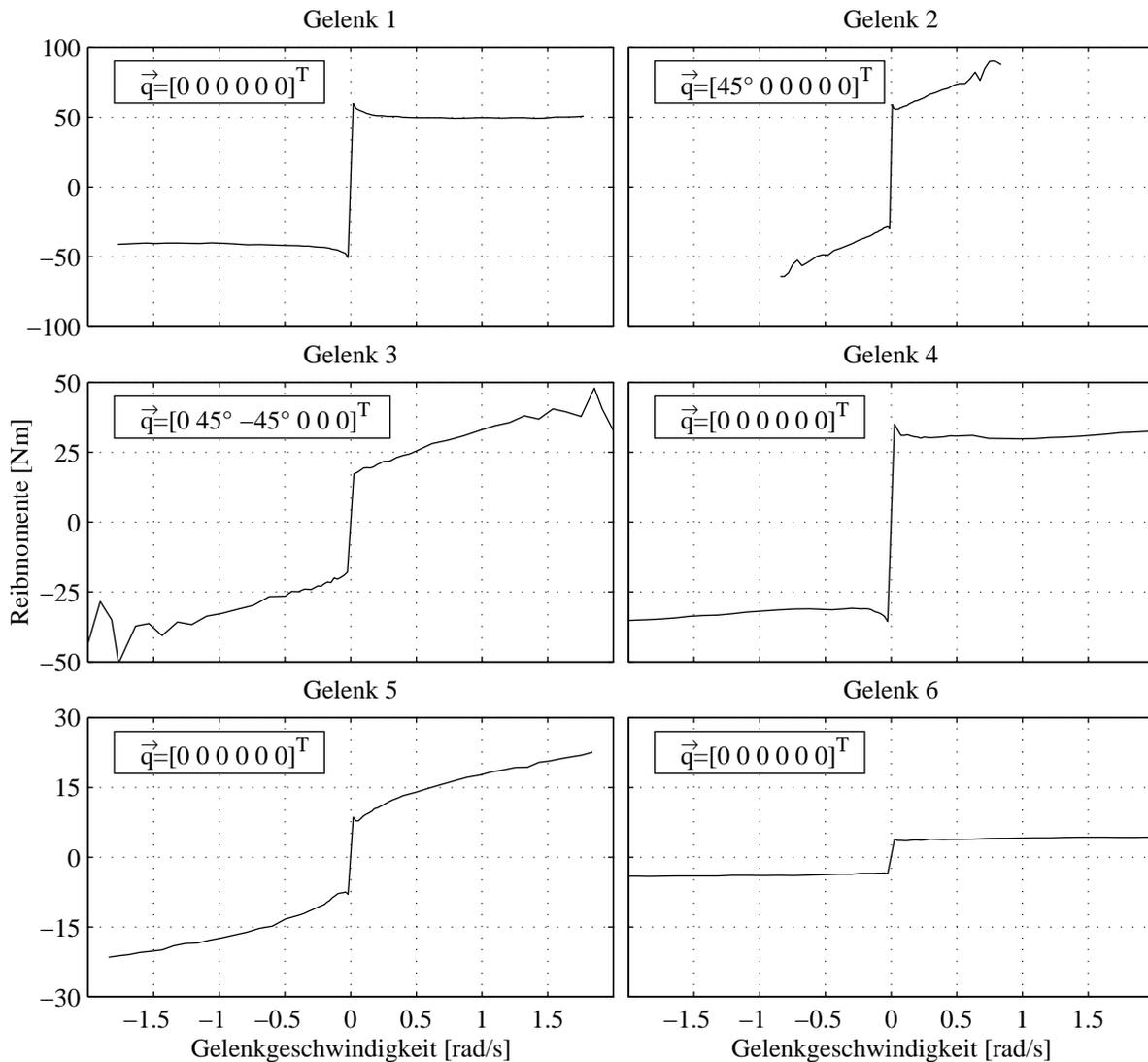


Abbildung 4.6: Reibmomente der einzelnen Gelenke.

gungsmomente verzichtet. Da bei der Zielanwendung der KB aus Sicherheitsgründen ohnehin von relativ geringen Werten der Gelenkbeschleunigungen ausgegangen werden kann und diese auch noch zeitlich begrenzt sind, ist dies durchaus akzeptabel, zumal die Strommesswerte tiefpassgefiltert werden.

Die Systemstabilität wird durch die fehlende Kompensation in keiner Weise gefährdet, da die entstehenden Beschleunigungsmomente zu einer negativen Rückkopplung führen und somit nur etwas bewegungshemmend wirken. Im Gegensatz dazu besteht bei einer fehlerhaften Kompensation, hervorgerufen z. B. durch Modellungenauigkeiten oder Unzulänglichkeiten bei der Bestimmung von  $\vec{q}$ , die Gefahr einer positiven Rückkopplung mit daraus folgender Instabilität.

**Reibmomente** Neben den Beschleunigungs-, Zentrifugal- und Coriolismomenten tritt des Weiteren noch Reibung auf.

Die Abb. 4.6 zeigt die Reibmomente in den 6 Gelenken des MANUTECH r3 Roboters, für ausgewählte Positionen in Abhängigkeit von der Gelenkgeschwindigkeit. Dabei wurde das je-

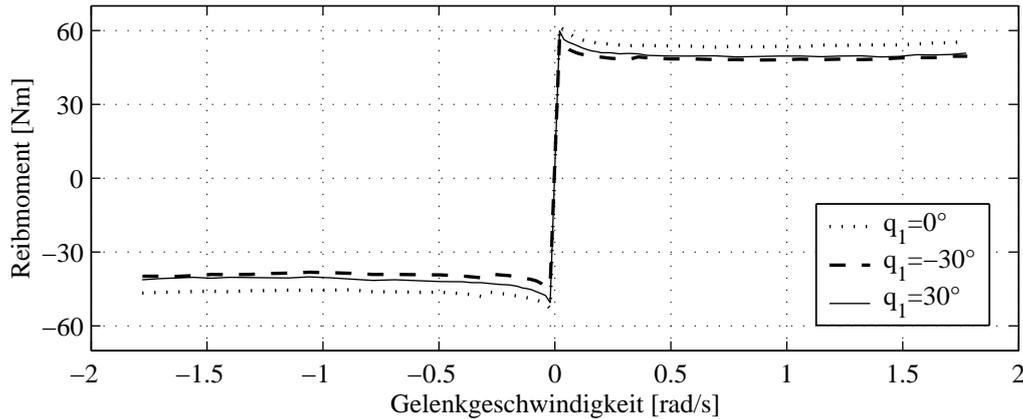


Abbildung 4.7: Lageabhängigkeit des Reibmomentes am Beispiel vom Gelenk 1.

weilige Reibmoment innerhalb des Bereiches von  $\pm 15^\circ$  um die entsprechende Gelenkposition gemittelt. Zu erkennen ist, dass die einzelnen Gelenke hinsichtlich der Reibung sehr unterschiedliche Eigenschaften aufweisen. Der Anteil der *Coulombschen*-Reibung ist bei allen 6 Gelenken deutlich sichtbar. Die Komponente der Haftreibung wirkt vor allen bei den Gelenken 1 und 4. Wohingegen dort, sowie auch bei dem Gelenk Nr. 6, keine merklich geschwindigkeitsabhängige Reibung zu erkennen ist. Diese ist aber sehr deutlich in den Momentverläufen der Gelenke 2, 3 und 5 zu sehen. Bei den Gelenken 2 und 3 kann das geschwindigkeitsabhängige Reibmoment als geschwindigkeitsproportional angesetzt werden. Im Gegensatz dazu ist es bei dem Gelenk 5 deutlich nichtlinear.

Die eben gezeigten und beschriebenen Verläufe der Reibmomente können nicht als repräsentativ für die Roboter von Typ MANUTEC r3 angesehen werden. Sie sind von vielen Faktoren abhängig. Schon bei dem hier verwendeten Exemplar, traten z. B. positionsabhängige Differenzen auf. Dies ist in Abb. 4.7, am Beispiel des ersten Gelenks, dargestellt. Der Reibmomentverlauf wurde für mehrere Gelenkstellungen ( $-30^\circ$ ,  $0^\circ$  und  $30^\circ$ ) bestimmt. Dabei traten Unterschiede von mehreren *Nm* auf. Sie sind z. B. durch die ungleichmäßige Abnutzung der Lager zu erklären. Es wird deutlich, dass die Reibmomente sehr von dem Zustand des Roboters, also von seinem Verschleiß, abhängen. Er wird u. A. durch die Betriebsstundenanzahl, das Einsatzprofil und durch die Qualität der Wartung bestimmt.

Des Weiteren kann davon ausgegangen werden, dass sich der Verlauf der Reibmomente auch mit der Betriebsdauer ändert. In der Regel, wird man aufgrund der Erwärmung von Motoren und Getrieben, eine leichte Verringerung erwarten können, siehe dazu auch [12].

Betrachtet man die absoluten Werte der Reibmomente der in Abb. 4.6 dargestellten Verläufe, dann wird deutlich, dass die Reibung im Gegensatz zu Zentrifugal-, Coriolis- und Beschleunigungsmomenten nicht vernachlässigbar ist. Setzt man als Grenzwert der Gelenkgeschwindigkeiten beim Handführen z. B.  $10^\circ/s$  ( $\approx 0,18 \text{ rad/s}$ ) an, so sind fast ausschließlich Haft- und *Coulombsche*-Reibung wirksam. Die Kompensation des geschwindigkeitsabhängigen Anteils ist nicht notwendig. Im Vergleich zur dominanten *Coulombschen*-Reibung können die Haftmomente ebenfalls vernachlässigt werden. Theoretisch wird der Verlauf des *coulombschen* Reibmomentes  $M_C$  durch folgende Gleichung beschrieben, wobei  $\overline{M}_C$  dessen Betrag ist:

$$M_C = \text{sgn}(\dot{q})\overline{M}_C \quad (4.17)$$

Praktisch ist die Kompensation mit Hilfe von (4.17) beim Stillstand des Gelenks problema-

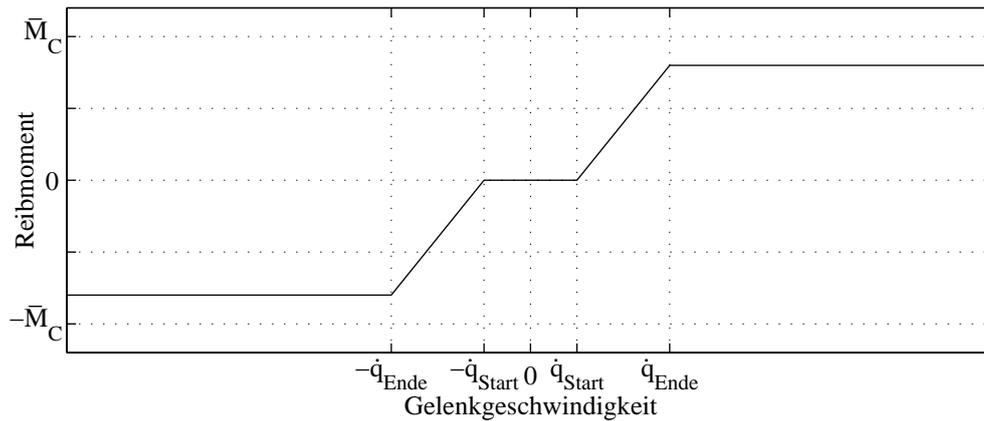


Abbildung 4.8: Vorschlag zur Kompensation der Reibmomente.

tisch. Durch die Signum-Funktion kann es dabei zu Dauerschwingungen, sog. Grenzyklen kommen. Um dies zu vermeiden, sollte um einen Bereich um  $\dot{q} = 0$  eine Totzone eingefügt werden. Ein möglicher Verlauf des Schätzwertes des Reibmomentes für die Kompensation ist in Abb. 4.8 dargestellt. Zu beachten ist, dass niemals der Fall eintreten darf, in dem ein höheres Reibmoment geschätzt wird als tatsächlich vorliegt, weil es dann zu einer positiven Rückkopplung kommt. Dies führt im Dauerzustand zur Instabilität des gesamten Systems. Deshalb wurde der Schätzwert von  $\overline{M}_C$  etwas geringer gewählt.

Da die Reibung aus Sicherheitsgründen nicht vollständig kompensiert werden kann, wird ein in Bewegungsrichtung einwirkendes Kontaktmoment zu niedrig geschätzt. Dies führt zur Bewegungshemmung der entsprechenden Achse bei deren KB.

## 4.2 Sensorlose Bewegungssteuerung

Die im vorherigen Abschnitt aus den Motorenströmen geschätzten Kontaktmomente sollen nun für die Bewegungssteuerung des Manipulators verwendet werden. Im Gegensatz zu dem in dieser Arbeit bereits ausführlich vorgestellten Ansatz zur KB mittels KMS, liegen diese Schätzwerte bereits im Gelenkraum vor. Somit wird die Jacobi-Matrix des Roboters nicht benötigt.

Zwar ist auch die Transformation der Gelenkmomente in den kartesischen Raum denkbar, um dort dann auch die Bewegungssteuerung vorzunehmen. Dafür müsste die inverse Jacobi-Matrix berechnet werden, was wiederum die schon vielfach diskutierten Singularitätsprobleme mit sich bringt. Außerdem würden die geschätzten Kontaktkräfte und -momente am Endeffektor einem wichtigen Vorteil entgegenstehen, und zwar an beliebigen Punkten auf den Roboter einwirken zu können. Die daraus resultierenden kartesischen Bewegungen des Endeffektors wären nur sehr schwer gezielt zu erzeugen.

### 4.2.1 Wunschverhalten

Die Grundlage der Bewegungssteuerung bildet wieder das sog. WV. Es stellt den Zusammenhang zwischen den geschätzten Kontaktmomenten (bzw. -kräften) und den Sollwerten der Gelenkpositionen her. Der Abschnitt 3.4 beschäftigte sich ausführlich mit Strukturauswahl, Parametrierung und Sonderfunktionen des WV. Sie eignen sich ebenso für die KB ohne

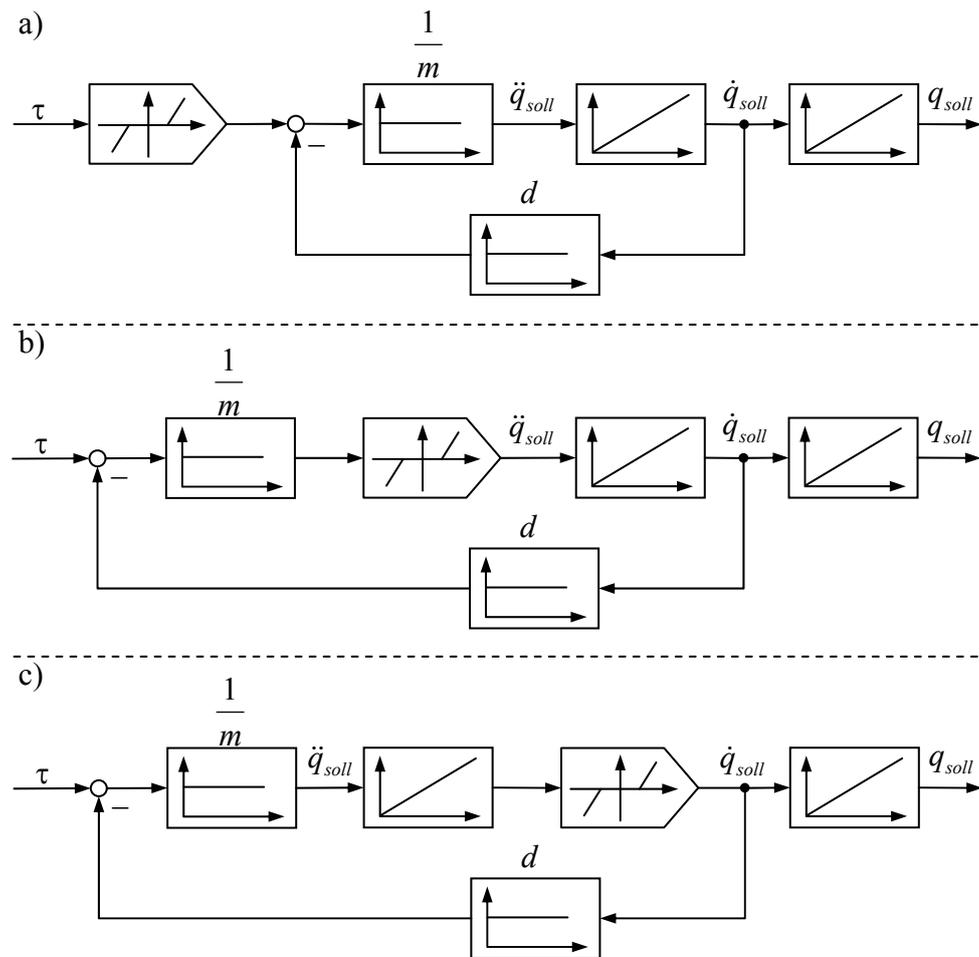


Abbildung 4.9: Vorschläge für die Integration der Ansprechschwelle in das Wunschverhalten.

zusätzliche Sensorik, wobei wieder die Grundstruktur des Masse-Dämpfer-System favorisiert wird.

Bei den Untersuchungen des Algorithmus zur Berechnung der Kontaktmomente aus den Motorenströmen an dem Experimentalsystem wurde deutlich, dass die Qualität der Schätzwerte im Wesentlichen durch die Genauigkeit der Gewichtskraftkompensation und die Unzulänglichkeiten hinsichtlich der *Coulombschen*-Reibung bestimmt wird. Im Idealfall sollten die Schätzwerte null sein, falls auf den Roboterarm keine äußeren Kräfte wirken. Da dies in der Realität nicht garantiert werden kann, zumal die Stromsignale von weiteren Störungen überlagert sind, müssen ungewollte Bewegungen des Roboters durch weitere Maßnahmen verhindert werden.

Bei der KB mit Hilfe eines KMS wurden Fehler bei der Gewichtskraftkompensation des Greifers durch entsprechende Ansprechschwellen der Eingangssignale (Kontaktmomente, -kräfte) eliminiert. Im Gegensatz zu der KMS-Messung sind die Fehler bei der Schätzung über die Motorenströme, aus den schon genannten Gründen, weitaus größer, so dass auch die Totzone einen breiteren Bereich überdecken wird. Dies kann zur Folge haben, dass vom Bediener erst eine relativ große Kraft aufgebracht werden muss, bevor sich der Manipulatorarm in Bewegung setzt.

Neben der Integration der Ansprechschwelle direkt nach der Berechnung des Gelenkmo-

Gelenk	1	2	3	4	5	6
$\overline{M}_C [Nm]$	25	25	10	15	5	3
$\dot{q}_{Start} [rad s^{-1}]$	0,005	0,005	0,005	0,02	0,005	0,002
$\dot{q}_{Ende} [rad s^{-1}]$	0,025	0,025	0,025	0,035	0,03	0,017

Tabelle 4.3: Parameter zur Kompensation der Reibmomente.

Gelenk $i$	1	2	3	4	5	6
Masse $m_i [Nms^2rad^{-1}]$	250	250	500	100	25	10
$[Nms^2grad^{-1}]$	4,36	4,36	8,73	1,75	0,44	0,17
Dämpfung $d_i [Nms rad^{-1}]$	350	200	500	100	25	20
$[Nms grad^{-1}]$	6,11	3,49	8,73	1,75	0,44	0,35
Breite der Totzone $[rad s^{-1}]$	$\pm 0,012$	$\pm 0,015$	$\pm 0,012$	$\pm 0,03$	$\pm 0,008$	$\pm 0,03$

Tabelle 4.4: Parameter des Wunschverhaltens.

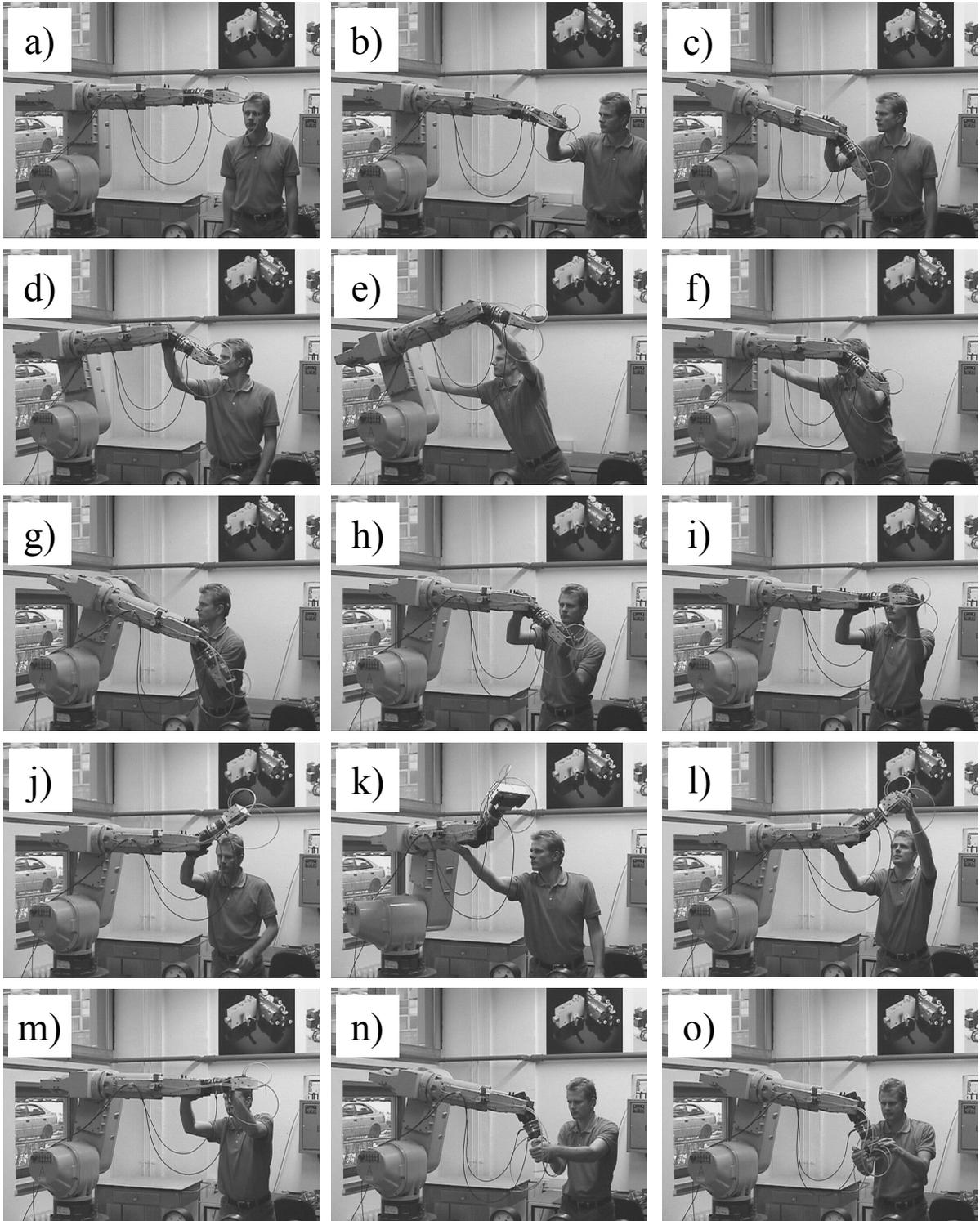
menten (siehe Abb. 4.9a), sind auch weitere Strukturen des WV zur Vermeidung ungewollter Drift denkbar. Eine Auswahl dazu ist in Abb. 4.9 dargestellt, wobei sich die Totzone im Geschwindigkeitssignal (4.9c) als besonders günstig erwiesen hat.

#### 4.2.2 Implementierung

Zur Überprüfung der Funktionsfähigkeit der KB ohne zusätzliche Sensorik erfolgte die Implementierung des Algorithmus an dem schon mehrfach verwendeten MANUTEC-Robotersystem. Die Ermittlung der Kontaktmomente geschah mit dem im Abschnitt 4.1 vorgestellten und an diesem System getesteten Verfahren, wobei mit der in Abb. 4.8 vorgeschlagenen Kennlinie eine teilweise Kompensation der Reibmomente integriert wurde. Die benutzten Parameter sind in der Tabelle 4.3 aufgelistet. Vergleicht man diese mit dem Verlauf der Reibmomente des MANUTEC r3 Roboters von Abb. 4.6, dann stellt man fest, dass die Reibmomente nie vollständig kompensiert werden. Dies ist aus Stabilitätsgründen unbedingt erforderlich, da eine Überkompensation zu einer positiven Rückkopplung im System führen würde. Auf die Kompensation von Coriolis-, Zentrifugal und Massenträgheitsmomenten wurde aus den schon erwähnten Gründen verzichtet.

Für das WV eines jeden Gelenks wurde die Struktur von Abb. 4.9c verwendet. Die Parameter sind in der Tabelle 4.4 dargestellt. Vergleicht man diese mit den Parametern des WV der KB mit KMS am Beispiel des STÄUBLI-Roboters von Tabelle 3.2, dann ist zu erkennen, dass es sich um die gleiche Größenordnung handelt. Im Gegensatz zum KMS-basierten Kraftführen ist bei der hier vorgestellten sensorlosen Variante allerdings mit durchaus erheblichen Abweichungen des realen Roboterverhaltens vom WV zu rechnen. Dies ist vor allem auf die unzureichende Kompensation der Reibung zurückzuführen. Die nicht kompensierten Reibmomente wirken dann als zusätzliche Dämpfung und verändern somit Geschwindigkeitsverstärkungen und Zeitkonstanten der Masse-Dämpfer-Systeme.

Für den Bedienschutz wurden wieder die schon im Abschnitt 3.5.3 aufgezählten Sicherheitsmechanismen implementiert.



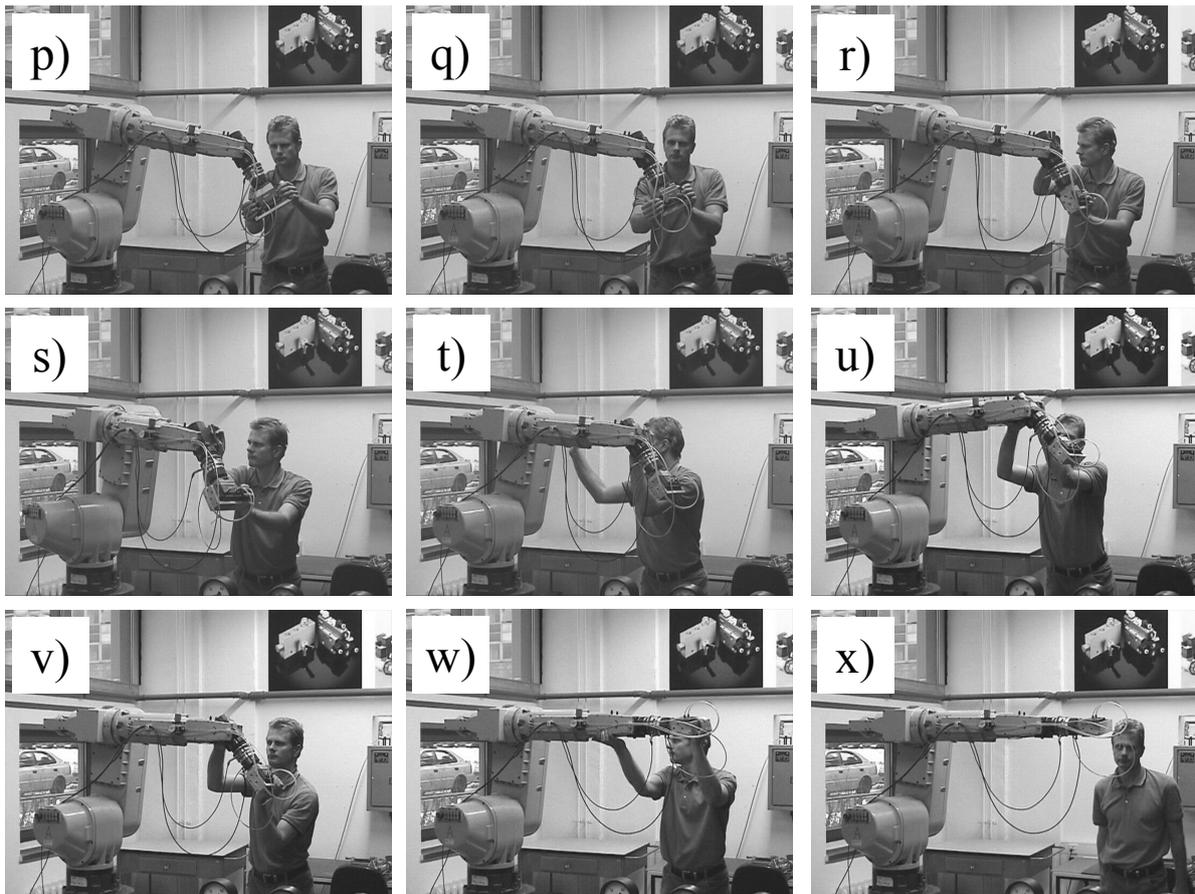


Abbildung 4.10: Ausgewählte Situationen beim Handführen des MANUTEC-Roboters.

### 4.2.3 Versuche

Die KB ohne zusätzliche Sensorik soll nun am Beispiel des MANUTEC-Robotersystems getestet werden. Dabei wird ähnlich wie auch schon beim Handführen des STÄUBLI-Roboters im Abschnitt 3.5.2 vorgegangen.

Der MANUTEC r3 Roboter befindet sich in der Startposition, dargestellt in Abb. 4.10a und gegeben durch den Gelenkwinkelvektor  $\vec{q} = [0 \ 0 \ 90^\circ \ 0 \ 0 \ 0]^T$ . Da die Bewegungsachsen der Gelenke 4 und 6 auf einer Linie liegen, geht dem Manipulator ein Freiheitsgrad verloren und er befindet sich in einer Singularität. Diese stellt für das Handführen kein Problem dar, weil es sich auch bei der hier vorgestellten sensorlosen Version der KB um einen gelenkraumbasierten Ansatz handelt. In der Startposition werden die Kontaktmomente für alle 6 Gelenke mit nahezu Null geschätzt, siehe Abb. 4.12. Betrachtet man dazu die in Abb. 4.13 dargestellten Motorenströme, dann kommt man zu folgender Interpretation:

1. Auf das Gelenk 1 wirkt in keiner Situation ein Gewichtsmoment, somit ist auch in der Startposition der Motorstrom 0.
2. Der Motorstrom des Gelenks 2 hat einen Wert von ca.  $-2 \text{ A}$ , obwohl ebenfalls kein Gewichtsmoment wirkt. Die Abweichung lässt sich durch die schon beschriebenen Probleme hinsichtlich der Reibung während des Stillstandes erklären.

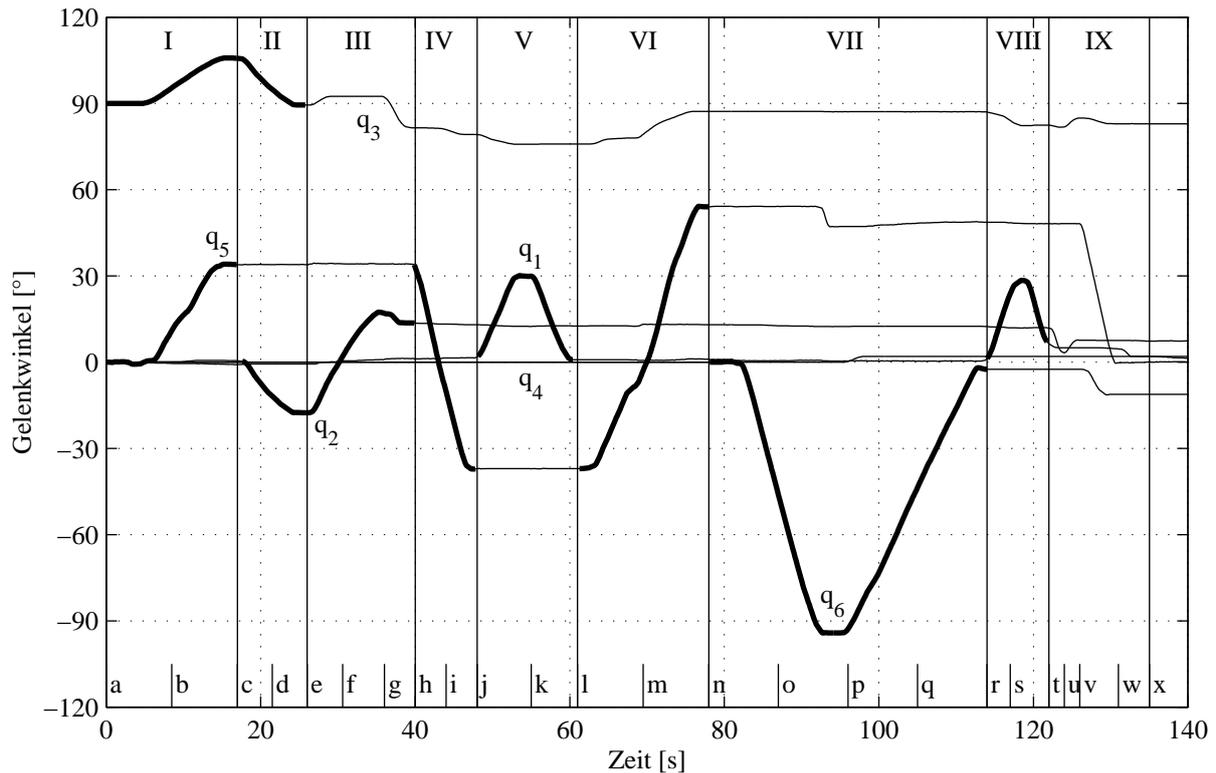


Abbildung 4.11: Verlauf der Gelenkwinkel beim Handführen des MANUTEC-Roboters.

3. Auf das Gelenk 3 wirken die Masse des Unterarmes  $MH$ , die Masse der Roboterhand  $M5$  und die Lastmasse  $ML$ , zusammen ca.  $70 \text{ kg}$ . Geht man von einem Abstand zwischen dem Gelenk 3 und dem entsprechenden Massenmittelpunkt von ca.  $0,22 \text{ m}$  aus, dann ergibt sich ein Gelenkmoment von rund  $150 \text{ Nm}$ . Durch das Getriebe wirken auf die Antriebswelle des Motors dann noch  $2,5 \text{ Nm}$ . Dividiert durch die Motorkonstante (siehe auch Tabelle 4.1), erhält man einen Motorenstrom von ca.  $7,8 \text{ A}$ , was in etwa dem Wert von Abb. 4.13 entspricht.
4. Obwohl kein Gewichtsmoment auf das Gelenk 4 wirkt, weist dessen Motorstrom einen geringen Offset von reichlich  $200 \text{ mA}$  auf, welcher wiederum auf die *Coulombsche*- bzw. Haftreibung zurückzuführen ist.
5. Der Wert des Motorenstroms  $i_5$  liegt bei ca.  $-400 \text{ mA}$ . Er ist das Resultat der Gewichtskraft von Roboterhand und Lastmasse. Aufgrund der konkreten Werte muss eine zusätzliche Störung durch Reibung angenommen werden.
6. In der Startposition ist  $i_6 = 0$ . Es wirkt kein Moment auf das Gelenk 6.

Zunächst wirkt der Bediener am Endeffektor auf den Roboterarm ein, so dass sich die Gelenke 3 und 5 in positive Richtung bewegen. Dies geschieht im Abschnitt I, bis zu einer Zeit von  $t = 17 \text{ s}$ , siehe auch Abb. 4.11. Deutlich zu erkennen sind dabei die positiven Schätzwerte der Kontaktmomente 3 und 5, dargestellt in Abb. 4.12. In den Verläufen der Motorenströme  $i_3$  und  $i_5$  ist nur ein geringer, betragsmäßiger Anstieg zu erkennen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass das Verhältnis zwischen Kontaktmomenten und Gewichtsmomenten relativ gering ist. Im

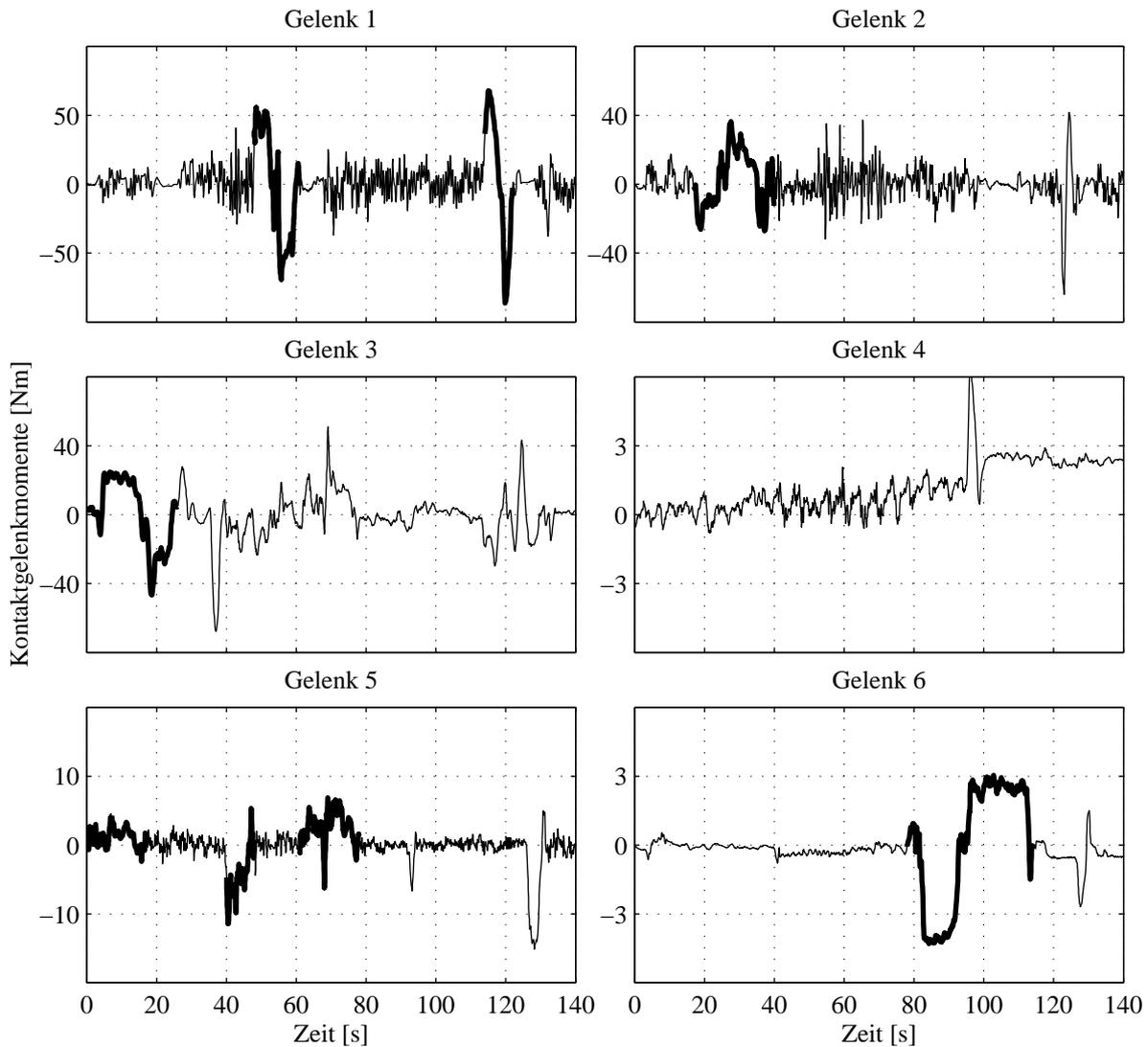


Abbildung 4.12: Aus den Motorenströmen geschätzte Kontaktmomente während des Handführens des MANUTECH-Roboters.

Verläufe dieser Bewegung werden die Beträge von  $i_3$  und  $i_5$  wieder geringer, da die Wirkung der Gewichtskraft nachlässt. Durch das Führen des Roboters direkt am Greifer unterscheidet sich dessen prinzipielles Verhalten nicht von dem der KB mit KMS.

Im Abschnitt II, beginnend bei Abb. 4.10c, werden  $q_2$  und  $q_3$  durch gezielte Krafteinwirkung am Unterarm in negativer Richtung verändert. Gut zu erkennen sind die geschätzten Kontaktmomente  $\tau_2$  und  $\tau_3$  in der Abb. 4.12. Übertragen auf die KB mit KMS, hätte der Benutzer mit dieser Bedienhandlung keine Reaktion des Roboters hervorgerufen.

Anschließend (III, Abb. 4.10efg) erfolgt die alleinige Bewegung des Gelenks 2. Diese wird durch kombiniertes Einwirken an Unter- und Oberarm erzielt. Da sich das Gelenk 2 während der Abschnitte II und III von seiner Nullstellung entfernt, treten sowohl positive als auch negative Gewichtsmomente auf. Diese sind in der Abb. 4.13 deutlich an dem Verlauf von  $i_2$  zu erkennen.

Im Abschnitt IV des Versuches zur sensorlosen KB (Abb. 4.10hi) wird das Gelenk 5 in positive Richtung bewegt. Dabei muss der Unterarm zusätzlich festgehalten werden. Bei  $q_5 = 0$

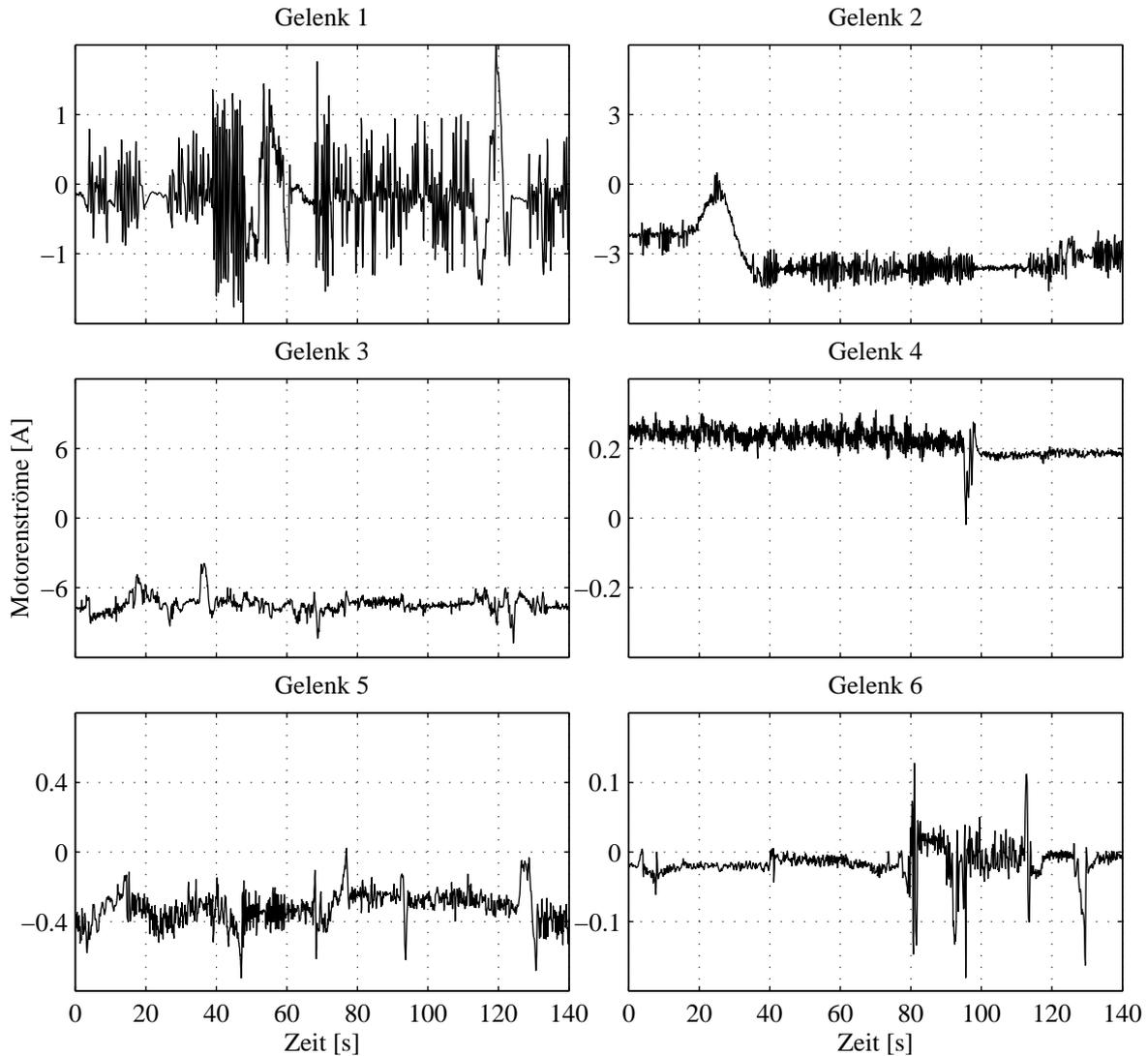


Abbildung 4.13: Verlauf der Motorenströme während des Handführens des MANUTEC-Roboters.

wird schließlich eine singuläre Lage problemlos überfahren.

Zwischen  $t = 48 \text{ s}$  und  $t = 61 \text{ s}$  (V, Abb. 4.10jk) erfolgt die Steuerung des ersten Gelenks in positive und negative Bewegungsrichtung. Die Krafteinwirkung ist sowohl im Verlauf von  $\tau_1$  (Abb. 4.12) als auch am Motorstrom  $i_1$  (Abb. 4.13) deutlich zu erkennen.

Analog zu IV wird in VI (4.10lm) erneut die Singularität bei  $q_5 = 0$ , diesmal in positiver Bewegungsrichtung, durchquert.

Im Abschnitt VII, dargestellt in den Abbildungen 4.10n-q, wirkt der Bediener mit einem Drehmoment um die z-Achse des Werkzeugkoordinatensystems (bzw. Bewegungsachse von Gelenk 6) auf den Endeffektor ein. Damit wird  $q_6$  zuerst in negative und dann in positive Bewegungsrichtung verändert. Die Abb. 4.12 zeigt wieder deutlich das geschätzte Kontaktmoment  $\tau_6$ . Das Handführen des Gelenks 6 ist, trotz dessen relativ hoher Getriebeübersetzung und des geringen Hebels am Greifer, relativ leichtgängig möglich.

Abschließend wird in VIII (Abb. 4.10rs) noch einmal das Gelenk 1 des Roboters vom Bediener gesteuert, bevor er im letzten Abschnitt (Abb. 4.10t-x) wieder annähernd zurück in

seine Ausgangsposition geführt wird.

#### 4.2.4 Auswertung

Die im vorherigen Abschnitt beschriebenen Versuche zur KB ohne zusätzliche Sensorik haben gezeigt, dass es prinzipiell möglich ist, die aus den Motorenströmen geschätzten Gelenkmomente zur Bewegungssteuerung eines Industrieroboters zu verwenden.

Eine wichtige Voraussetzung dafür ist der Zugang zu den Ist- bzw. Sollwerten der Stromregelkreise. Diese war bei dem verwendeten MANUTEC-Roboter erfüllt, kann aber so nicht auf andere Robotersysteme übertragen werden. Des Weiteren ist ein möglichst genaues, dynamisches Modell des Manipulators zwingend erforderlich. Besonders gilt dies hinsichtlich der Gewichtsmomente bzw. -kräfte. Für den verwendeten MANUTEC r3 Roboter war auch diese Bedingung erfüllt, da dieser Typ an zahlreichen Forschungseinrichtungen verwendet wurde und auch noch wird, und dadurch entsprechende Publikationen zur Verfügung standen. Ist dies nicht der Fall, dann ist man entweder auf Herstellerangaben angewiesen, die aber mit hoher Wahrscheinlichkeit der Vertraulichkeit unterliegen, oder man muss selbst die notwendigen Messungen durchführen, die mit erheblichen Aufwand verbunden sind. Die Modellgüte ist ein wesentlicher Faktor zum Erreichen eines komfortablen Verhaltens des Manipulators. Sie bestimmt zum großen Teil die Breite der Totzonen zur Vermeidung ungewollten Driftens. Je breiter diese angelegt werden müssen, desto mehr Kraft muss der Bediener aufwenden, um den Roboter zu bewegen.

Ein großes Problem bei der Schätzung der Kontaktmomente war die Kompensation der Reibung. Besonders schwierig ist dies bei niedrigen Gelenkgeschwindigkeiten, die aber ja gerade beim Handführen vorkommen. Die Reibmomente sind von mehreren Faktoren abhängig und variieren daher stark. Die Tatsache, dass eine Überkompensation auf jeden Fall vermieden werden muss, beeinträchtigt die Qualität der KB, in dem das reale Roboterverhalten stärker gedämpft ist als das WV.

Trotz der angesprochenen Probleme war es möglich, den Roboterarm ohne die Benutzung eines KMS durch den Arbeitsraum zu führen. Aufgrund der Bewegungssteuerung im Gelenkraum entsprach das Roboterverhalten der schon mehrfach erwähnten und beschriebenen „menschlichen Erwartung“. Auch das Durchqueren einer singulären Position war dadurch unproblematisch. Dem Vorteil einer kostengünstigen Lösung ohne teuren KMS stand ein sich weniger komfortabel anführendes Handführen gegenüber. Dies drückte sich in einer schwergängigen und unpräziseren Bewegungsführung, verglichen mit der Verwendung eines KMS aus.

Eine besondere Eigenschaft war es, dass sich die möglichen Positionen der Kraft-/ Momentenwirkung durch den Bediener nicht auf den Endeffektor beschränken. Der Benutzer kann an jeder beliebigen Stelle mit dem Manipulatorarm in Kontakt treten, um ihn zu führen. Dies macht eine effektivere Bewegungsführung möglich und ist vor allem bei redundanten Robotern von großer Bedeutung. Dies wäre zwar auch mittels Gelenkmomentsensoren oder, wie in [127] vorgestellt, mit taktilen Sensoren am Roboterarm (taktile Haut) möglich. Allerdings ist der Aufwand hierbei wesentlich größer.

Die hier vorgestellten Versuche lieferten ein durchaus akzeptables Ergebnis hinsichtlich der KB aufgrund von Motorenströmen. Besonders bei Robotern mit geringen Traglasten kann dies von Interesse sein, da dort der Einsatz eines KMS einen erheblichen Anteil an den Gesamtsystemkosten ausmachen kann. Außerdem besteht dort ein günstiges Verhältnis zwischen einwirkenden Kräften und Momenten und den zu kompensierenden Gewichtskraft- und Reibungseinflüssen. Bei Robotern mit hohen Traglasten und entsprechender Eigenmasse kehrt

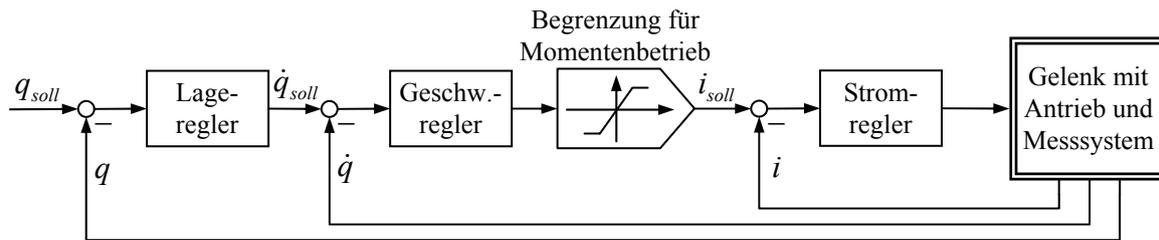


Abbildung 4.14: Realisierung des Momentenbetriebes durch Begrenzung des Sollstromes.

sich dieser Vorteil um. Es ist zu erwarten, dass die Modellgenauigkeiten in der Größenordnung der vom Bediener aufzubringenden Kräfte liegen. Dies macht das Handführen aufgrund der Momentschätzung dann unmöglich. Allerdings ist auch der Preis eines Schwerlastroboters wesentlich höher und die Verwendung eines KMS würde die Kosten nur unwesentlich erhöhen.

### 4.3 Industrielle Lösungen

Mit dem MANUTEC-Robotersystem konnte die KB ohne zusätzliche Sensorik erfolgreich realisiert werden. Dieses wurde gewählt, da ein dynamisches Modell des Manipulatorarmes zur Verfügung stand und es den Lesezugriff auf die Motorenströme erlaubte. Sollen an einem industriellen Robotersystem keine Änderungen an dessen *Hard-* und/oder *Firmware* vorgenommen werden, dann ist man bei der Implementierung von Steuer- und Regelalgorithmen auf die Möglichkeiten der jeweiligen Roboterprogrammiersprache beschränkt. Deren Funktionalität ist herstellerabhängig. Für den Großteil der Anwendungen ist es ausreichend, die Zielposition des Endeffektors und einige Bewegungsparameter vorzugeben. Informationen z. B. über die Motorenströme sind dabei nicht von Bedeutung. Deshalb kann man bei einem industriellen Robotersystem nicht zwingend erwarten, dass in dessen Programmiersprache eine Funktion zum Auslesen der aktuellen Motorenströme zur Verfügung steht, was aber für die kraftsensorlose Bewegungssteuerung erforderlich ist. Einige Robotersysteme bieten dennoch, wenn auch z. T. sehr eingeschränkte, Möglichkeiten des Zugriffs auf die Motorenströme. Sie sollen im Folgenden, am Beispiel des schon verwendeten KUKA-Robotersystems, kurz vorgestellt werden.

#### 4.3.1 Momentenbetrieb

Eine Möglichkeit zur sensorlosen Bewegungssteuerung ist der sog. Momentenbetrieb oder *Soft Servo* der KUKA-Robotersteuerung. Er ist gedacht für Anwendungen, bei denen der Roboter eine verringerte Steifigkeit aufweisen muss. Der Momentenbetrieb eignet sich prinzipiell auch zur KB. Er wird durch die Begrenzung des Ausgangssignals des Geschwindigkeitsreglers in der Kaskadenregelung realisiert. Die sich daraus ergebene Reglerstruktur mit Sollstrombegrenzung ist für ein Gelenk in Abb. 4.14 dargestellt (vgl. dazu Abb. 2.2). Für jedes Gelenk können obere und untere Grenze mit Hilfe entsprechender Systemvariablen ( $i_o$  und  $i_u$ ) eingestellt werden. Danach erfolgt die Freischaltung der gewünschten Gelenke für den Momentenbetrieb durch Aktivierung der Begrenzung.

Für die Anwendung des Momentenbetriebes zur KB müssen die Grenzen so gewählt werden, dass eine ungewollte Bewegung des Roboterarmes aufgrund von Gewichtsmomenten verhindert wird. Vereinfacht man die dynamische Grundgleichung des Manipulators (2.11) durch

Vernachlässigen von Beschleunigungs-, Zentrifugal, Coriolis und Reibmomenten, dann müssen die durch die Motorenströme hervorgerufenen Antriebsmomente also gerade die Gewichtsmomente ausgleichen.

$$\vec{\tau} = \vec{G}(\vec{q}) \quad (4.18)$$

Für ein einzelnes Gelenk ergibt sich der Sollstrom  $i_{soll}$ , unter Berücksichtigung von Motorenkonstante  $k_M$  und Getriebeübersetzung  $k_G$ , bei einem Gewichtsmoment  $G$  nach Gleichung (4.19), vgl. (4.4).

$$i_{soll} = \frac{k_G}{k_M} G \quad (4.19)$$

Möchte man den so ermittelten Sollstrom mit Hilfe des Momentenbetriebes realisieren, dann sind obere und untere Grenze auf diesen Wert zu setzen. Somit ist der Geschwindigkeitsregler praktisch wirkungslos:

$$i_o = i_u = i_{soll} \quad (4.20)$$

Die Grenzen  $i_o$  und  $i_u$  können auch auf den aktuellen Wert des Iststromes gesetzt werden. Dafür existieren in der KUKA-Roboterprogrammierspache KRL ebenfalls entsprechende Systemvariablen, die die Istströme der einzelnen Gelenke enthalten.

Genauer betrachtet ist der Momentenbetrieb für die KB aus den folgenden Gründen nicht sehr gut geeignet:

1. Setzt man zu Beginn der KB die Strombegrenzung auf den aktuellen Stromwert, dann verharrt der Robotarm nach Aktivierung des Momentenbetriebes zunächst in seiner Startposition. Wirkt der Bediener auf den Manipulator ein, so kann er die einzelnen Gelenke bewegen. Die Kaskadenregelung ist, trotz der entstehenden Regelabweichungen von Position und Geschwindigkeit, nicht in der Lage mit einem entsprechenden Antriebsmoment entgegenzusteuern. Aufgrund der Bewegung verändern sich auch die auf die Gelenke wirkenden Gewichtsmomente  $\vec{G}(\vec{q})$ . Da die Gewichtsmomente nun nicht mehr vollständig kompensiert werden, entstehen Beschleunigungsmomente, die den Roboter in Bewegung versetzen. Unter Vernachlässigung von Coriolis-, Zentrifugal- und Reibmomenten gilt:

$$\vec{\ddot{q}} = \underline{M}^{-1}(\vec{q}) \left( \vec{\tau} - \vec{G} \right) = \underline{M}^{-1}(\vec{q}) \left( \underline{K}_{MG} \vec{i}_{soll} - \vec{G} \right) \quad (4.21)$$

Diese Bewegung führt dann zu einem weiter ansteigenden Kompensationsfehler. Somit handelt es sich um ein System an der Stabilitätsgrenze, ähnlich dem eines inversen Pendels. Speziell gilt dies für die Gelenke 2 und 3 eines 6-Gelenk-Knickarmroboters. Aufgrund der großen Massen von Ober- und Unterarm reichen die Reibmomente nicht aus, um die Bewegung nennenswert zu hemmen. Es besteht somit die Gefahr des Durchsackens, der Roboter fällt in sich zusammen. Darauf wird auch ausdrücklich in der Dokumentation zum *Soft Servo* hingewiesen, so dass der Hersteller uneingeschränkt den Momentenbetrieb nur für das Gelenk Nr. 1 empfiehlt (bei Boden- oder Deckenmontage des Roboters). Dringend abgeraten wird von dem Momentenbetrieb des Gelenks 2 und auch für das Gelenk 3 ist die Gefahr des Durchsackens noch erheblich. Für die restlichen 3 Roboterachsen ist der Momentenbetrieb zwar grundsätzlich möglich, doch aufgrund der hohen Getriebeübersetzungen und des geringen Hebels schwierig.

2. Am zur Verfügung stehenden KUKA-Robotersystem wurde der *Soft Servo* für das erste Gelenk getestet. Dazu wurden obere und untere Grenze des Geschwindigkeitsreglerausganges zu null gesetzt,  $i_o = i_u = 0$ . Durch Krafteinwirkung des Bedieners am Endeffektor wurde um die Achse 1 ein Drehmoment erzeugt und der Manipulator konnte relativ

leichtgängig bewegt werden. Das Bewegungsverhalten entspricht dem des mechanischen Systems ohne Stellenergie und mit geöffneter Bremse. Es muss also die gesamte Masse allein durch die Kraft des Benutzers in Bewegung versetzt werden. Dies kann besonders bei Schwerlastrobotern unmöglich sein. Die gezielte Vorgabe des WV ist ausgeschlossen.

3. Möchte man für alle Gelenke permanent die Gewichtsmomente durch zyklisches Anpassen der Sollstromgrenzen kompensieren, dann ist man auf ein sehr genaues Modell des Roboters angewiesen. Da beim Momentenbetrieb keine weiteren Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um ungewollte Bewegungen aufgrund von Modellungenauigkeiten zu vermeiden, wie etwa eine Totzone, kann diese Variante für die KB nicht empfohlen werden, zumal deren Implementierung und Ausführung in KRL ungünstig ist.

### 4.3.2 Strom- bzw. Momentmessung mittels RSI-Expertenprogrammierung

Im Abschnitt 3.5.4 wurde das Technologiepaket zur KMR der KUKA-Roboter FTCtrl vorgestellt. Es wird von dem KUKA-Tochterunternehmen AMATEC Robotics GmbH entwickelt und basiert auf der ebenfalls schon vorgestellten RSI-Funktionalität. Nach der erfolgreichen Installation von FTCtrl stehen verschiedene Objektbibliotheken zur Verfügung. In ihnen sind diverse RSI-Objekte enthalten, darunter *ST\_MOTORCURRENT* und *ST\_GEARTORQUE*. Sie liefern an ihren Ausgängen die aktuellen Werte der Motorenströme bzw. der Antriebsmomente.

Die Implementierung des dynamischen Modells des Manipulators, insbesondere zur Kompensation der Gewichts- und Reibmomente, mittels RSI ist nahezu unmöglich. Die Gründe dafür wurden schon im Abschnitt 3.5.4 bei dem Versuch, die Berechnung der Jacobi-Matrix zu realisieren, beschrieben. Zwar sind auch die Funktionen *ST\_MOTORCURRENT* und *ST\_GEARTORQUE* in der Lage, statt der aktuellen Werte von Motorstrom und Antriebsmoment, theoretische Modellwerte zu liefern, allerdings befinden sich diese noch in einem Versuchsstadium mit einem relativ ungenauen Modell. Außerdem fehlt in diesem die Integration der Haupt- und Zusatzlasten.

Somit erfolgte der Test wieder nur für das Gelenk Nr. 1. Das aus dem Motorstrom berechnete Antriebsmoment, welches der Krafteinwirkung des Bedieners entgegen wirkt, wird direkt zur Steuerung des Roboters benutzt. Beschleunigungs-, Coriolis-, Zentrifugal und Reibmomente wurden dabei nicht berücksichtigt. Als WV wurde wieder das Masse-Dämpfer-System gewählt. Durch die Realisierung mittels RSI kann der Gelenkwinkelsollwert direkt auf den Lageregelkreis aufgeschaltet werden. Dies geschieht mit Hilfe des RSI-Objektes *ST\_AXISCORR*. Da dessen Eingänge integrierend wirken, ist das WV lediglich als PT1-Glied zu implementieren.

$$pG_{wunsch}(p) = \frac{1}{mp + d} \quad (4.22)$$

Die programmierte RSI-Struktur ist im Signalflussbild von Abb. 4.15 dargestellt. Im Versuch gelang es somit, das Gelenk 1 von Hand zu führen. Die Parameter des WV betragen  $d = 1000 Nms \text{ rad}^{-1}$  und  $m = 500 Nms^2 \text{ rad}^{-1}$ . Durch das Fehlen einer Totzone vor dem WV bzw. vor dem Objekt zur Bewegungsteuerung, kam es zu einer Dauerschwingung mit einer Amplitude von ca.  $0,025^\circ$ . Da z. Z. in RSI kein Objekt zum Erzeugen einer statischen Nichtlinearität zur Verfügung steht, wurde auf die relativ aufwändige Implementierung dieser Totzone verzichtet. Sie kann durch geschicktes Zusammenschalten mehrerer RSI-Objekte, wie z. B. Vergleicher, Summations- und Multiplikationsstellen programmiert werden. Dadurch,

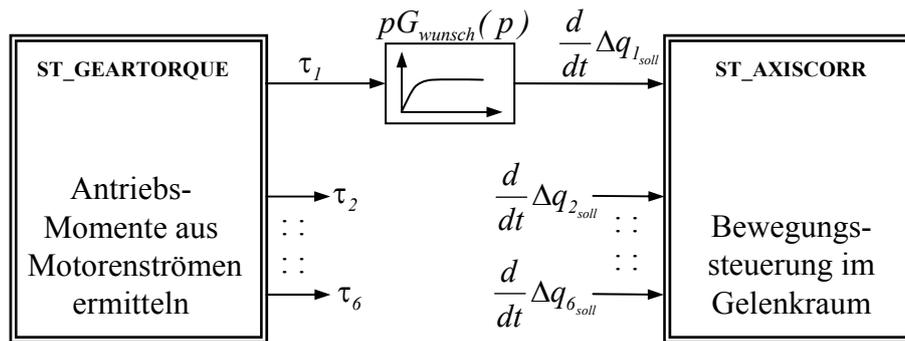


Abbildung 4.15: Struktur der RSI-Anwendung zur kraftgeführten Bewegung des Gelenks 1 auf Basis der Motorenströme.

dass die maximale Anzahl von RSI-Objekten derzeit bei 100 liegt, bleibt es fraglich, ob die KB aller 6 Achsen mit *ST\_GEARTORQUE* überhaupt realisierbar ist.

#### 4.4 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Möglichkeiten der KB ohne zusätzliche Sensorik untersucht. Der Hauptgrund dafür bestand darin, auf die Installation spezieller KMS verzichten zu können und somit die Akzeptanz des Handführens als eine Variante des *Teach In* zu erhöhen.

Zunächst wurde das Hauptaugenmerk auf die Ermittlung der auf den Roboter wirkenden Kontaktkräfte und -momente mit Hilfe der Motorenströme gelegt. Nach dem Zusammenstellen der dafür notwendigen Grundlagen erfolgte die Verifizierung an einem realen Robotersystem. Dafür wurde ein MANUTEC r3 Roboter gewählt, der mit einer neuen, offenen Steuerung ausgerüstet ist. Diese Auswahl hat zum einen den Vorteil, dass für diesen Manipulator zahlreiche Publikationen hinsichtlich Modellbildung vorliegen, zum anderen bestand so die Möglichkeit des Zugriffs auf die Motorenströme. Nach entsprechenden Versuchen konnte für den stationären Fall festgestellt werden, dass die aus den Motorenströmen ermittelten Kontaktgelenkmomente eine gute Schätzung darstellen. Verglichen wurden sie dazu mit den in den Gelenkraum überführten Messwerten eines am Roboterflansch montierten 6-Komponenten-KMS. Die Schätzwerte können durchaus für einfache Kraft-/ Momentregelaufgaben, wie sie ja auch beim Handführen vorliegen, benutzt werden. Problematisch bei der Momentschätzung ist Reibung in den Gelenken. Diese können im stationären und quasistationären Fall zu einer starken Verfälschung der Schätzung führen. Darum wurden Untersuchungen hinsichtlich der Reibmomente durchgeführt, die zumindest eine teilweise Reibungskompensation erlauben.

Mit Hilfe der so geschätzten Kontaktmomente kann dann die Steuerung des Roboters erfolgen. Das gewünschte Bewegungsverhalten wird durch den Benutzer vorgegeben, wobei sich das eines Masse-Dämpfer-Systems anbietet. Nach der Implementierung des Algorithmus in das MANUTEC-Robotersystem konnte der Roboter durch den Bediener nur aufgrund der Auswertung der Motorenströme geführt werden.

Zusammenfassend sind Vor-, Nachteile und Unterschiede der KB ohne zusätzliche Sensorik im Vergleich zur KMS-basierten Variante in der Tabelle 4.5 aufgeführt. Als Vorteil der Momentschätzung sind ausdrücklich die geringen Kosten aufgrund des fehlenden KMS zu nennen, wohingegen die subjektive Qualität während des Handführens weitaus geringer ist als bei der Verwendung eines KMS.

	Schätzung von Kontaktkräften und -momenten aus den Motorenströmen	Messung von Kontaktkräften und -momenten mit einem KMS
Kosten der Sensorik	gering	hoch (KMS)
Voraussetzungen	Zugang zu den Motorenströmen, dynamisches Modell des Roboters	Unterstützung eines KMS seitens der Robotersteuerung
Qualität der Messung bzw. Schätzung	mittel (Störungen, Modellungenauigkeit)	sehr hoch
Bewegungssteuerung des Roboters	nur im Gelenkraum sinnvoll	kartesischer Raum und Gelenkraum
Ort der Kraft-einwirkung des Bedieners	am gesamten Manipulatorarm	nur am Endeffektor
Exaktheit des Wunschverhaltens	gering (durch ungenaue Reibungskompensation)	sehr genau
Einschränkungen	nur bei Robotern mit geringen Traglasten	keine
Subjektive Qualität des Handführens	mittel	sehr hoch

Tabelle 4.5: Vergleich der kraftgeführten Bewegung ohne und mit zusätzliche Sensorik.

Zusätzlich wurden in diesem Kapitel noch zwei bedingt geeignete Möglichkeiten des sensorlosen Handführens unter Verwendung eines industriellen Robotersystems vorgestellt und untersucht. Dabei wurden keine Änderungen an der Robotersteuerung vorgenommen.

Abschließend kann gesagt werden, dass die sensorlose Variante der KMR besonders bei Robotern für geringe Traglasten eine Alternative darstellt, besonders in Anwendungen, bei denen die Genauigkeit der Mess- bzw. Schätzwerte eine untergeordnete Rolle spielt.

## 5 Zusammenfassung und Ausblick

Ziel dieser Arbeit war die eingehende Beschäftigung mit der kraftbasierten Mensch-Roboter-Interaktion als eine Einsatzmöglichkeit der Kraft-/ Momentregelung (KMR).

Die Grundlage dafür bildete das vorgeschlagene Verfahren zur kraftgeführten Bewegung (KB) eines Roboters im Gelenkraum. Dieses Handführen bietet im Vergleich zur kartesischen Variante gewisse Vorteile. Dazu zählen u. A. die Abhängigkeit des Bewegungsverhaltens von der Kinematik des Manipulatorarmes, die der Bediener mit dem Roboter assoziiert und die Robustheit des Algorithmus gegenüber Singularitäten. Diese Eigenschaften wurden anhand verschiedener kinematischer Beispiele ausführlich diskutiert.

Sehr wichtig, neben den kinematischen Eigenschaften der KB, ist deren dynamisches Bewegungsverhalten. Dieses basierte auf dem Einsatz virtueller Masse-Dämpfer-Systeme in jedem Gelenk als sog. Wunschverhalten (WV). Ein wichtiger Punkt ist dabei deren Parametrierung. Zusätzlich kann das WV um diverse Zusatzfunktionalitäten erweitert werden. Dazu zählt z. B. die virtuelle Begrenzung des Arbeitsraumes, die etwas ausführlicher untersucht und auch an einem realen Robotersystem implementiert wurde. Die virtuelle Arbeitsraumbegrenzung bietet Raum für weitere Forschungsaktivitäten. Eine interessante Funktion wäre z. B. die Generierung der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung aus den Planungsdaten der Roboterzelle.

Die KB wurde in verschiedene Robotersysteme implementiert, um deren Eigenschaften zu demonstrieren. Dabei wurden auch die unterschiedlichen Möglichkeiten der Bewegungssteuerung der Robotersysteme deutlich. Sie beeinflussen auch das dynamische Verhalten des Manipulators bei der KB und bei der KMR im Allgemeinen.

Neben dem Einsatz der KB zum komfortablen *Teach In* sind weitere Anwendungsfälle denkbar. Dazu zählt z. B. die Teleoperation per *Master/Slave* mit Krafrückkopplung. Eine mögliche Struktur für ein solches System wurde in dieser Arbeit vorgeschlagen. Weitere Untersuchungen auf dem Gebiet der Telerobotik basierend auf Kraft-/ Momentmessung scheinen angebracht, insbesondere betrifft dies den Einsatz prädiktiver Algorithmen.

Interessant für den Einsatz der KB im Gelenkraum sind auch mobile Roboter, die in dieser Arbeit nur kurz Erwähnung fanden. Sie bieten Spielraum für weitere Forschungsaktivitäten, besonders auch die Realisierung an einem realen System.

Ein wichtiger Aspekt bei jeglicher Mensch-Roboter-Interaktion ist die Benutzersicherheit. Bei der praktischen Umsetzung wurde dafür die entsprechende Funktionalität integriert. Noch ungelöst ist deren Überführung in industrielle Robotersteuerungen gemäß einschlägigen Normen. Dieser Arbeitsschritt ist nur in Kooperation mit den Roboterherstellern möglich.

Im ersten Teil dieser Arbeit wurde vorausgesetzt, dass der zur KB verwendete Roboter stets mit einem Kraft/- Momentsensor (KMS) ausgerüstet ist. Da die im Allgemeinen eingesetzten 6-Komponenten-KMS recht teuer sind, liegt es nahe, über alternative Messmethoden nachzudenken. Darum beschäftigt sich der zweite Teil dieser Arbeit mit der Substitution des KMS

durch einen Algorithmus der Kraft-/ Momentenschätzung aus den Motorenströmen, insbesondere für den Einsatz zur KB des Roboters.

Die Grundlage der Untersuchungen bildete ein 6-Gelenk-Knickarm-Roboter vom Typ MANUTEC r3, der mit einem offenen Steuerungssystem ausgestattet ist. An diesem wurde die Schätzung der Kontaktkräfte und -momente verifiziert. Der Vergleich mit den Messwerten eines KMS zeigte eine gute Übereinstimmung, so dass die sog. KB ohne zusätzlichen Sensor implementiert werden konnte. Zur Verbesserung des Bewegungsverhaltens war zusätzlich die Kompensation der Reibmomente in den Schätzwerten notwendig, die sich als ziemlich problematisch erwies. Trotzdem war eine erfolgreiche Bewegungsteuerung des Roboters im Gelenkraum auf Basis der Motorenströme möglich und konnte demonstriert werden.

Zum Teil bieten auch industrielle Robotersysteme die Möglichkeit des eingeschränkten Zugriffs auf die Motorenströme. Dazu wurden zwei ausgewählte Funktionalitäten der KUKA-Robotersteuerung vorgestellt. Weitere Recherchen hinsichtlich anderer Hersteller und entsprechende Untersuchungen scheinen sinnvoll.

Nach der erfolgreichen Substitution des KMS bei der KB liegt es nahe, die Motorenströme auch für anspruchsvollere Aufgaben auf dem Gebiet der KMR zu verwenden. Dazu bieten sich z. B. die Konturenverfolgung oder kraftgeregelter Montageaufgaben an, wofür weitere Arbeiten notwendig sind.

Letztendlich bleibt abzuwarten, ob sich der Haupteinsatzfall der KB beim *Teach In*, sei es mit oder ohne KMS, etablieren kann. Der hier vorgestellte, gelenkraumbasierte Ansatz, mit seinen diversen Vorteilen, bietet dafür gute Chancen und der Programmiervorgang ließe sich erheblich vereinfachen. Im Wesentlichen hängt diese aber von der Bereitschaft der Roboterhersteller ab, die kraftgeführte Bewegung im Gelenkraum, als eine Möglichkeit der *On Line Programmierung* in ihre Steuerungssysteme, zu integrieren.

## A Anhang

### A.1 Vorwärtstransformation und Jacobi-Matrix STÄUBLI RX90B

Die Abb. A.1 zeigt den Roboter STÄUBLI RX90B in seiner Grundstellung mit dem Gelenkwinkelvektor  $\vec{q} = [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$ .

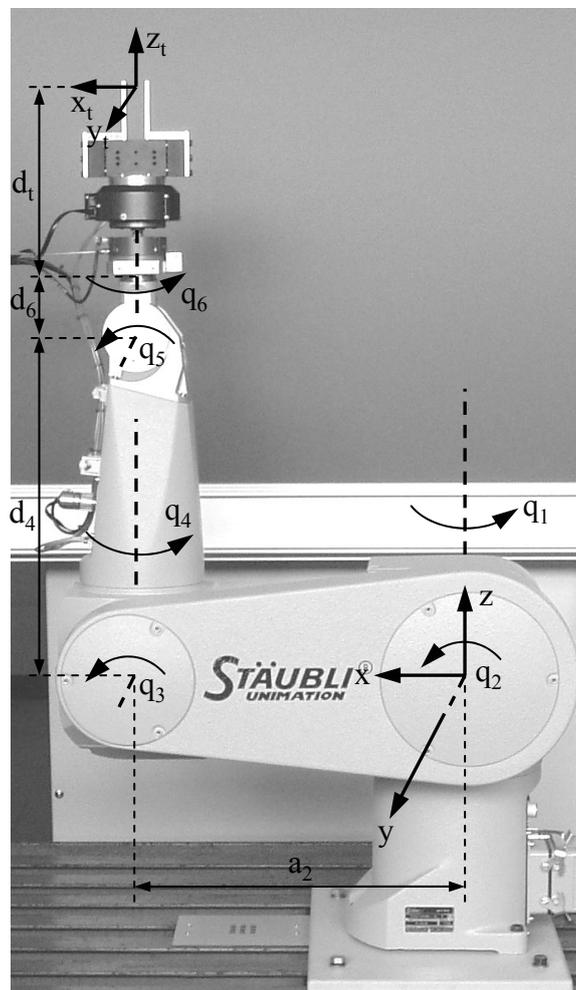


Abbildung A.1: Definition der Koordinatensysteme des Roboters STÄUBLI RX90B.

Transformationmatrizen nach *Denavit-Hartenberg*<sup>10</sup>:

$$\begin{aligned}
 {}^0\underline{A}_1 &= \begin{bmatrix} C1 & 0 & -S1 & 0 \\ S1 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1\underline{A}_2 &= \begin{bmatrix} C2 & -S2 & 0 & a_2C2 \\ S2 & C2 & 0 & a_2S2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2\underline{A}_3 &= \begin{bmatrix} C3 & 0 & S3 & 0 \\ S3 & 0 & -C3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3\underline{A}_4 &= \begin{bmatrix} C4 & 0 & -S4 & 0 \\ S4 & 0 & C4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4\underline{A}_5 &= \begin{bmatrix} C5 & 0 & S5 & 0 \\ S5 & 0 & -C5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5\underline{A}_6 &= \begin{bmatrix} C6 & -S6 & 0 & 0 \\ S6 & C6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^6\underline{A}_t &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & & a_2 = 450 \text{ mm}, d_4 = 450 \text{ mm}, d_6 = 85 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

Analytische Jacobi-Matrix für STÄUBLI RX90B bezogen auf den Roboterflansch mit der Orientierungsrepräsentation in zy'z"-Euler-Winkeln:

$${}^0\underline{A}_6 = \begin{bmatrix} \underline{R} & \vec{p} \\ \underline{0} & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} n_x & s_x & a_x & p_x \\ n_y & s_y & a_y & p_y \\ n_z & s_z & a_z & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = {}^0\underline{A}_1 \cdot {}^1\underline{A}_2 \cdot {}^2\underline{A}_3 \cdot {}^3\underline{A}_4 \cdot {}^4\underline{A}_5 \cdot {}^5\underline{A}_6$$

$$\underline{R} = ROT(z, \phi) \cdot ROT(y, \theta) \cdot ROT(z, \psi)$$

$$\phi = \arctan2(a_y, a_x), \quad \theta = \arccos(a_z), \quad \psi = \arctan2(s_z, n_z)$$

$$n_z = -S23C4C5C6 + S23S4S6 - C23S5C6$$

$$s_z = S23C4C5S6 + S23S4C6 + C23S5S6$$

$$a_x = C1C23C4S5 - S1S4S5 + C1S23C5$$

$$a_y = S1C23C4S5 + C1S4S5 + S1S23C5$$

$$a_z = C23C5 - S23C4S5$$

<sup>10</sup>Zur Vereinfachung gelten wieder folgende Abkürzungen:  $\sin(q_2) = S2$ ,  $\cos(q_2) = C2$ ,  $\sin(q_3) = S3$ ,  $\cos(q_3) = C3$ ,  $\sin(q_2 + q_3) = S23$ ,  $\cos(q_2 + q_3) = C23$ , usw.

$$\underline{J} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} & J_{13} & J_{14} & J_{15} & J_{16} \\ J_{21} & J_{22} & J_{23} & J_{24} & J_{25} & J_{26} \\ J_{31} & J_{32} & J_{33} & J_{34} & J_{35} & J_{36} \\ J_{41} & J_{42} & J_{43} & J_{44} & J_{45} & J_{46} \\ J_{51} & J_{52} & J_{53} & J_{54} & J_{55} & J_{56} \\ J_{61} & J_{62} & J_{63} & J_{64} & J_{65} & J_{66} \end{bmatrix}$$

$$J_{11} = \frac{\delta p_x}{\delta q_1} = -d_6 S1C23C4S5 - d_6 C1S4S5 - d_4 S1S23 - d_6 S1S23C5 - a_2 S1C2$$

$$J_{12} = \frac{\delta p_x}{\delta q_2} = -d_6 C1S23C4S5 + d_4 C1C23 + d_6 C1C23C5 - a_2 C1S2$$

$$J_{13} = \frac{\delta p_x}{\delta q_3} = -d_6 C1S23C4S5 + d_4 C1C23 + d_6 C1C23C5$$

$$J_{14} = \frac{\delta p_x}{\delta q_4} = -d_6 C1C23S4S5 - d_6 S1C4S5$$

$$J_{15} = \frac{\delta p_x}{\delta q_5} = d_6 C1C23C4C5 - d_6 S1S4C5 - d_6 C1S23S5$$

$$J_{16} = \frac{\delta p_x}{\delta q_6} = 0$$

$$J_{21} = \frac{\delta p_y}{\delta q_1} = d_6 C1C23C4S5 - d_6 S1S4S5 + d_4 C1S23 + d_6 C1S23C5 + a_2 C1C2$$

$$J_{22} = \frac{\delta p_y}{\delta q_2} = -d_6 S1S23C4S5 + d_4 S1C23 + d_6 S1C23C5 - a_2 S1S2$$

$$J_{23} = \frac{\delta p_y}{\delta q_3} = -d_6 S1S23C4S5 + d_4 S1C23 + d_6 S1C23C5$$

$$J_{24} = \frac{\delta p_y}{\delta q_4} = -d_6 S1C23S4S5 + d_6 C1C4S5$$

$$J_{25} = \frac{\delta p_y}{\delta q_5} = d_6 S1C23C4C5 + d_6 C1S4C5 - d_6 S1S23S5$$

$$J_{26} = \frac{\delta p_y}{\delta q_6} = 0$$

$$J_{31} = \frac{\delta p_y}{\delta q_1} = 0$$

$$J_{32} = \frac{\delta p_y}{\delta q_2} = -d_6 C23C4S5 - d_4 S23 - d_6 S23C5 - a_2 C2$$

$$J_{33} = \frac{\delta p_y}{\delta q_3} = -d_6 C23C4S5 - d_4 S23 - d_6 S23C5$$

$$J_{34} = \frac{\delta p_y}{\delta q_4} = d_6 S23S4S5$$

$$J_{35} = \frac{\delta p_y}{\delta q_5} = -d_6 S23C4C5 - d_6 C23S5$$

$$J_{36} = \frac{\delta p_y}{\delta q_6} = 0$$

$$J_{41} = \frac{\delta \phi}{\delta q_1} = \frac{a_x}{a_x^2 + a_y^2} (C1C23C4S5 - S1S4S5 + C1S23C5) - \frac{a_y}{a_x^2 + a_y^2} (-S1S23C4S5 - C1S4S5 - S1S23C5)$$

$$J_{42} = \frac{\delta \phi}{\delta q_2} = \frac{a_x}{a_x^2 + a_y^2} (-S1S23C4S5 + S1C23C5) - \frac{a_y}{a_x^2 + a_y^2} (-C1S23C4S5 + C1C23C5)$$

$$J_{43} = \frac{\delta \phi}{\delta q_3} = \frac{a_x}{a_x^2 + a_y^2} (-S1S23C4S5 + S1C23C5) - \frac{a_y}{a_x^2 + a_y^2} (-C1S23C4S5 + C1C23C5)$$

$$J_{44} = \frac{\delta \phi}{\delta q_4} = \frac{a_x}{a_x^2 + a_y^2} (-S1C23S4S5 + C1C4S5) - \frac{a_y}{a_x^2 + a_y^2} (-C1C23S4S5 - S1C4S5)$$

$$J_{45} = \frac{\delta \phi}{\delta q_5} = \frac{a_x}{a_x^2 + a_y^2} (S1C23C4C5 + C1S4C5 - S1S23S5) - \frac{a_y}{a_x^2 + a_y^2} (C1C23C4C5 - S1S4C5 - C1S23S5)$$

$$J_{46} = \frac{\delta \phi}{\delta q_6} = 0$$

$$J_{51} = \frac{\delta \theta}{\delta q_1} = 0$$

$$J_{52} = \frac{\delta \theta}{\delta q_2} = \frac{S23C5 + C23C4S5}{\sqrt{1 - a_z^2}}$$

$$J_{53} = \frac{\delta \theta}{\delta q_3} = \frac{S23C5 + C23C4S5}{\sqrt{1 - a_z^2}}$$

$$J_{54} = \frac{\delta \theta}{\delta q_4} = \frac{-S23S4S5}{\sqrt{1 - a_z^2}}$$

$$J_{55} = \frac{\delta \theta}{\delta q_5} = \frac{C23S5 + S23C4C5}{\sqrt{1 - a_z^2}}$$

$$J_{56} = \frac{\delta\theta}{\delta q_6} = 0$$

$$J_{61} = \frac{\delta\psi}{\delta q_1} = 0$$

$$J_{62} = \frac{\delta\psi}{\delta q_2} = \frac{n_z}{n_z^2 + s_z^2} (-C23C4C5S6 - C23S4C6 + S23S5S6) + \frac{s_z}{n_z^2 + s_z^2} (-C23C4C5C6 + C23S4S6 + S23S5C6)$$

$$J_{63} = \frac{\delta\psi}{\delta q_3} = \frac{n_z}{n_z^2 + s_z^2} (-C23C4C5S6 - C23S4C6 + S23S5S6) + \frac{s_z}{n_z^2 + s_z^2} (-C23C4C5C6 + C23S4S6 + S23S5C6)$$

$$J_{64} = \frac{\delta\psi}{\delta q_4} = \frac{n_z}{n_z^2 + s_z^2} (S23S4C5S6 - S23C4C6) + \frac{s_z}{n_z^2 + s_z^2} (S23S4C5C6 + S23C4S6)$$

$$J_{65} = \frac{\delta\psi}{\delta q_5} = \frac{n_z}{n_z^2 + s_z^2} (S23C4S5S6 - C23C5S6) + \frac{s_z}{n_z^2 + s_z^2} (S23C4S5C6 + C23C5C6)$$

$$J_{66} = \frac{\delta\psi}{\delta q_6} = \frac{n_z}{n_z^2 + s_z^2} (-S23C4C5C6 + S23S4S6 - C23S5C6) + \frac{s_z}{n_z^2 + s_z^2} (S23C4C5S6 + S23S4C6 + C23S5S6)$$

## A.2 Vorwärtstransformation MANUTEC r3

In der Abb. A.2 ist der Industrieroboter MANUTEC r3 in der durch den Gelenkwinkelvektor  $\vec{q} = [0 \ 90^\circ \ 90^\circ \ 0 \ 0 \ 0]^T$  vorgegebenen Stellung zu sehen.

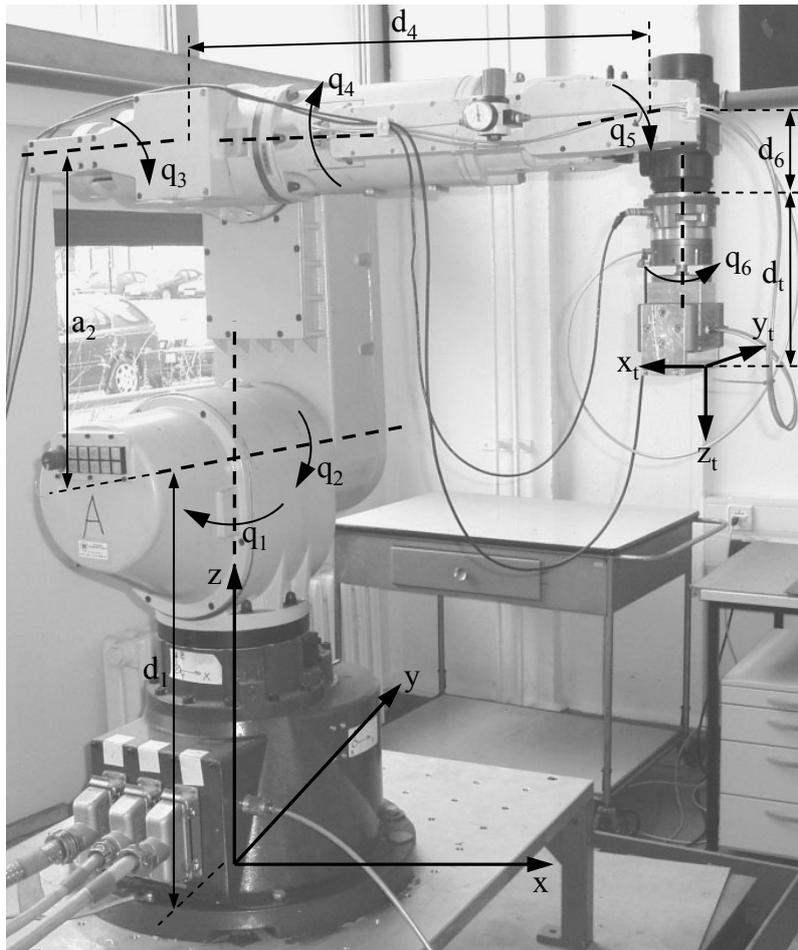


Abbildung A.2: Definition der Koordinatensysteme des Roboters MANUTEC r3.

Transformationmatrizen nach *Denavit-Hartenberg*:

$$\begin{aligned}
 {}^0\underline{A}_1 &= \begin{bmatrix} C1 & 0 & S1 & 0 \\ -S1 & 0 & C1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^1\underline{A}_2 &= \begin{bmatrix} S2 & C2 & 0 & a_2S2 \\ -C2 & S2 & 0 & -a_2C2 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^2\underline{A}_3 &= \begin{bmatrix} -S3 & 0 & C3 & 0 \\ C3 & 0 & S3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^3\underline{A}_4 &= \begin{bmatrix} C4 & 0 & S4 & 0 \\ -S4 & 0 & C4 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & d_4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^4\underline{A}_5 &= \begin{bmatrix} C5 & 0 & S5 & 0 \\ S5 & 0 & -C5 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & {}^5\underline{A}_6 &= \begin{bmatrix} C6 & S6 & 0 & 0 \\ -S6 & C6 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_6 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \\
 {}^6\underline{A}_t &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_t \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} & & d_1 = 665 \text{ mm}, a_2 = 500 \text{ mm}, \\
 & & & & d_4 = 730 \text{ mm}, d_6 = 100 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

### A.3 Koordinatensysteme KUKA KR6/2

In der Abb. A.3 ist der 6-Gelenk-Knickarmroboter KUKA KR6/2 in seiner *Home-Position* dargestellt. Der Vektor der Gelenkwinkel beträgt dabei  $\vec{q} = [0 \quad -90^\circ \quad 90^\circ \quad 0 \quad 0 \quad 0]^T$ . In der Roboterprogrammiersprache KRL erfolgt die Angabe der Orientierung des Endeffektors mit Hilfe der zy'x''-Euler-Winkel  $A$ ,  $B$  und  $C$ .

$$\underline{R} = ROT(z, A) \cdot ROT(y, B) \cdot ROT(x, C) = ROT(z, \phi) \cdot ROT(y, \theta) \cdot ROT(x, \psi)$$

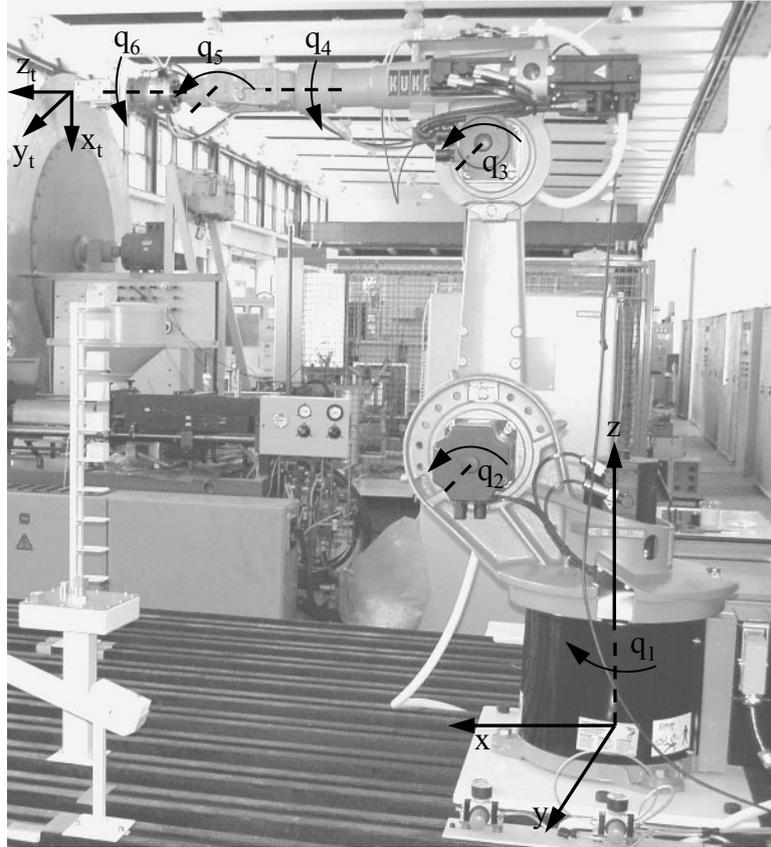


Abbildung A.3: Definition der Koordinatensysteme des Roboters KUKA KR6/2.

#### A.4 Ableitung des Vier-Quadranten-Arkustangens

Definition des Vier-Quadranten-Arkustangens im Bereich von  $-\pi \dots \pi$ :

$$\arctan2(y, x) = \begin{cases} \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{für } x > 0 \\ \pi + \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{für } x < 0, y \geq 0 \\ -\pi + \arctan\left(\frac{y}{x}\right) & \text{für } x < 0, y < 0 \\ 0 & \text{für } x = 0, y = 0 \\ \frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0, y > 0 \\ -\frac{\pi}{2} & \text{für } x = 0, y < 0 \end{cases}$$

Ohne die Berücksichtigung der Grenzfälle bei  $x = 0$  gilt verallgemeinert:

$$\arctan2(y, x) = \lambda\pi + \arctan\left(\frac{y}{x}\right) \quad \text{mit } \lambda = -\pi, 0, \pi$$

Ableitung [14]:

$$\begin{aligned} \frac{d\{\arctan2[y(h), x(h)]\}}{dh} &= \frac{d\{\lambda\pi + \arctan\left[\frac{y(h)}{x(h)}\right]\}}{dh} = \frac{1}{1 + \frac{y(h)^2}{x(h)^2}} \cdot \frac{d\frac{y(h)}{x(h)}}{dh} = \frac{x(h)^2}{y(h)^2 + x(h)^2} \cdot \frac{\frac{dy(h)}{dh}x(h) - \frac{dx(h)}{dh}y(h)}{x(h)^2} \\ &= \frac{\frac{dy(h)}{dh}x(h) - \frac{dx(h)}{dh}y(h)}{y(h)^2 + x(h)^2} \end{aligned}$$

## B Betreute Diplom- und Studienarbeiten

F. Jablonsky, Untersuchen des Handführens eines Industrieroboters hinsichtlich Stabilität und Arbeitsraumbeschränkungen, Studienarbeit, 2005.

F. Lückert, Untersuchung der Möglichkeiten zur Verwendung der Motorenströme eines 6-Gelenk-Knickarmroboters bei der Messung von Kontaktkräften und -momente, Studienarbeit, 2005.

J. Stiegler, Erstellung und Erprobung von RSI-Programmen zur Anwendung bei der Kraft-/Momentregelung eines KUKA Industrieroboters, Diplomarbeit, 2005.

A. Martin, Ausarbeitung eines Praktikumsversuches für das Simulationssystem KUKA-SimPro, Studienarbeit, 2005.

L. Voidel, Ausarbeitung eines Praktikumsversuches zur Kraft-/Momentregelung, Studienarbeit, 2005.

H. Veit, Erarbeitung und Erprobung von Kraft-/Momentregelalgorithmen an einem KUKA-Industrieroboter mit Hilfe des Softwarepaketes FTCtrl, Diplomarbeit, 2004.

A. Eichenberg, Demonstration der Funktionalität des Simulationssystems ALASKA, Studienarbeit, 2004.

J. Stiegler, Implementierung der Bewegungssteuerung für einen Industrieroboter in eine WinDDC basierende Steuerung, Studienarbeit, 2004.

L. Poneß, Kraft- / Momentenregelung an einem Standardindustrieroboter, Diplomarbeit, 2003.

M. Wallig, Realisierung der Kommunikation zwischen der Robotersteuerung CS7B und einem PC über die RS 232 Schnittstelle, Studienarbeit, 2003.

T. Gerlach, Programmierung einer Auswertesoftware für einen Kraft-/ Momentsensor mit Stand-Alone-Controller, Studienarbeit, 2003.

R. Böhm, Ausarbeitung der Vor- und Rückwärtstransformation für einen Industrieroboter vom Typ Stäubli RX 90 und Programmierung entsprechender Beispielprogramme, Studienarbeit, 2003.

## C Eigene Veröffentlichungen und Vorträge

A. Winkler und J. Suchý, Force-guided motions of a 6-d.o.f industrial robot with a joint space approach, *Advanced Robotics - International Journal of the Robotics Society of Japan*, Vol., Nr. 9, Seiten 1067-1084, 2006.

A. Winkler und J. Suchý, An Approach to Compliant Motion of an Industrial Manipulator, 8th International IFAC Symposium on Robot Control, Bologna, Italien, 2006.

A. Winkler und J. Suchý, Sensorless Force Guided Motions of an Industrial Robot Based on Motor Currents, Joint Conference on Robotics - 37th International Symposium on Robotics and 4th German Conference on Robotics, München, Bundesrepublik Deutschland, 2006, ISBN 3-18-091956-6.

A. Winkler und J. Suchý, Ausgewählte Anwendungen zum Einsatz von Kraft-/ Momentregelung an Industrierobotern, *Scientific Reports* Nr. 11, IWKM Robotik, Seiten 1-4, Hochschule Mittweida (FH), 2005, ISSN 1437-7624.

A. Winkler und J. Suchý, Novel Joint Space Force Guidance Algorithm with Laboratory Robot System, 16th IFAC World Congress, Prag, Tschechische Republik, 2005.

A. Winkler und J. Suchý, Kraftgeführte Bewegungen mit einem STÄUBLI-Industrieroboter, *AT&P journal PLUS6*, Seiten 94-98, 2005, ISSN 1336-5010.

A. Winkler, Kraftgeführte Bewegung stationärer Roboter durch Steuerung im Gelenkraum, 39. Regelungstechnisches Kolloquium in Boppard, Vortrag, 2005.

A. Winkler und J. Suchý, Kraft-/ Momentregelung von Industrierobotern, *Scientific Reports* Nr. 4, 1. Workshop Robotik, Seiten 22-30, Hochschule Mittweida (FH), 2004, ISBN 3-18-091841-1.

A. Winkler und J. Suchý, Kraftgeführte Bewegungen mit einem Standardindustrieroboter, *VDI Berichte* 1841, Seiten 527-534, VDI Verlag, 2004, ISSN 1437-7624.

A. Galle, R. Neumann und A. Winkler, Web Tension Measurement by using Shaft Torques, *International Conference on Applied Electronics*, Pilsen, Tschechische Republik, Seiten 67-70, 2003, ISBN 80-7082-951-6.

A. Galle, R. Neumann und A. Winkler, Improved Web Tension Control using Variable Structure, Gain Scheduling and Decoupling, International Conference on Applied Electronics, Pilsen, Tschechische Republik, Seiten 67-70, 2002, ISBN 80-7082-881-1.

R. Neumann, A. Winkler, P. Protzel, J. Gottlebe und A. Galle, Verfahren und Einrichtung zur Steuerung der Bahngeschwindigkeit einer Warenbahn, DE-Patent 10146984, 2001.

## Abbildungsverzeichnis

2.1	Modellbasierte Regelung eines Roboters. . . . .	18
2.2	Kaskadenregelung eines Roboter gelenks. . . . .	20
2.3	Signalflussbild der indirekten Kraft-/ Momentregelung. . . . .	21
2.4	Signalflussbild der direkten Kraft-/ Momentregelung. . . . .	23
2.5	Signalflussbild der hybriden Kraft-/ Lageregelung. . . . .	24
2.6	Signalflussbild der parallelen Kraft-/ Lageregelung. . . . .	24
3.1	Grundprinzip beim Kraftführen eines Roboters. . . . .	26
3.2	<i>Planar Two Link Manipulator</i> . . . . .	39
3.3	Signalflussbild für die Simulation des kartesischen Ansatzes zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des <i>Planar Two Link Manipulators</i> . . . . .	42
3.4	Signalflussbild für die Simulation des Ansatzes im Gelenkraum zur kraftgeführten Bewegung am Beispiel des <i>Planar Two Link Manipulators</i> . . . . .	43
3.5	Gelenkwinkel bei der kraftgeführten Bewegung des <i>Planar Two Link Manipulators</i> . . . . .	44
3.6	Bewegungsbahn des <i>Planar Two Link Manipulators</i> bei der kraftgeführten Bewegung. . . . .	45
3.7	Bewegungsbahn des <i>Planar Two Link Manipulators</i> bei der kraftgeführten Bewegung über eine singuläre Position. . . . .	45
3.8	Beispiel unterschiedlicher Gelenkkonfigurationen für eine Position eines 6-Gelenk-Knickarmroboters. . . . .	46
3.9	SCARA-Kinematik. . . . .	47
3.10	Kartesischer Manipulator in Form eines Portalroboters. . . . .	49
3.11	<i>Planar Three Link Manipulator</i> . . . . .	50
3.12	Mobiler Roboter mit zwei getrennt angetriebenen Rädern ( <i>Differential Drive Robot</i> ). . . . .	53
3.13	Bewegungsverhalten von Robotersystemen mit verschiedenen Möglichkeiten der Bewegungssteuerung. . . . .	56
3.14	Frequenzgang der Position des Gelenks 1 verschiedener Robotersysteme. . . . .	58
3.15	Signalflussbild des Masse-Dämpfer-Wunschverhaltens. . . . .	59
3.16	Mögliches Übertragungsverhalten zur Verhinderung ungewollter Drift (Anschwelle). . . . .	61
3.17	Signalflussbild des Feder-Masse-Dämpfer-Wunschverhaltens. . . . .	61
3.18	Möglicher Verlauf der Federkraft bzw. der Dämpfung des Wunschverhaltens zum Realisieren von Gelenkansschlägen. . . . .	63
3.19	Beispiel der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung mittels eines Kraft-Potenzialfeldes. . . . .	64
3.20	Beispiel der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung mittels eines Kraft-Potenzialfeldes erzeugt durch Ersatzladungen. . . . .	65

3.21	Orientierungen des Endeffektors zur Bestimmung von Gewichtskraft und Schwerpunkt am Beispiel eines KUKA KR6/2 Roboters. . . . .	67
3.22	Programmablaufplan zur kraftgeführten Bewegung des STÄUBLI-Roboters. . .	72
3.23	Ausgewählte Positionen beim Handführen des STÄUBLI-Roboters. . . . .	73
3.24	Gelenkwinkel in den einzelnen Bewegungsabschnitten beim Handführen des STÄUBLI-Roboters. . . . .	74
3.25	Messwerte des KMS beim Handführen des STÄUBLI-Roboters. . . . .	75
3.26	In die Orientierung des BKS gebrachte Messwerte des KMS beim Handführen des STÄUBLI-Roboters. . . . .	76
3.27	Berechnete Gelenkmomente beim Handführen des STÄUBLI-Roboters. . . . .	77
3.28	Struktur des MANUTEC r3 Robotersystems. . . . .	79
3.29	P-Lageregelkreis mit Vorsteuerung für ein einzelnes Robotergelenk. . . . .	80
3.30	Arbeitsweise <i>Robot Sensor Interface</i> . . . . .	82
3.31	Einstellungen in FTCtrl zur kraftgeführten Bewegung im kartesischen Raum. .	84
3.32	Verhalten des durch FTCtrl gesteuerten Roboters bei einwirkender Kraft bzw. einwirkendem Moment. . . . .	85
3.33	Struktur der RSI-Anwendung zur kraftgeführten Bewegung im kartesischen Raum. . . . .	86
3.34	Verlauf der kartesischen Größen beim Kraftführen des KUKA-Roboters mittels RSI-Expertenprogrammierung. . . . .	87
3.35	Verlauf der Gelenkwinkel beim Kraftführen des KUKA-Roboters mit RSI. . . .	88
3.36	Verhalten des Roboters bei der kraftgeführten Bewegung mit zusätzlicher virtueller Gelenkbegrenzung. . . . .	89
3.37	Beispiel der virtuellen Arbeitsraumbegrenzung durch Punktladungen. . . . .	90
3.38	Beispiel des Verlaufes des Kraftpotenzials einer Punktladung. . . . .	91
3.39	Beispiel der Kraftwirkung auf den Endeffektor in der Nähe des Hindernisses. .	92
3.40	Vorschlag für die Struktur eines Telerobotiksystems auf Basis der kraftgeführten Bewegung im Gelenkraum. . . . .	93
4.1	Funktionsweise des Elektronikmotors. . . . .	100
4.2	Signalflussbild des geschlossenen Regelkreises eines kompletten Gelenks. . . .	102
4.3	Vergleich der Momente an den Gelenken 1, 2 und 3 aufgrund des Umgebungskontaktes gemessen durch den KMS und geschätzt aus den Motorenströmen. .	106
4.4	Vergleich der Momente an den Gelenken 4 und 5 aufgrund des Umgebungskontaktes gemessen durch den KMS und geschätzt aus den Motorenströmen. . . .	107
4.5	Maximalwerte der Gelenkmomente hervorgerufen durch Zentrifugal- und Corioliskräfte bei unterschiedlichen Gelenkgeschwindigkeiten. . . . .	108
4.6	Reibmomente der einzelnen Gelenke. . . . .	109
4.7	Lageabhängigkeit des Reibmomentes am Beispiel vom Gelenk 1. . . . .	110
4.8	Vorschlag zur Kompensation der Reibmomente. . . . .	111
4.9	Vorschläge für die Integration der Ansprechschwelle in das Wunschverhalten. .	112
4.10	Ausgewählte Situationen beim Handführen des MANUTEC-Roboters. . . . .	115
4.11	Verlauf der Gelenkwinkel beim Handführen des MANUTEC-Roboters. . . . .	116
4.12	Aus den Motorenströmen geschätzte Kontaktmomente während des Handführens des MANUTEC-Roboters. . . . .	117
4.13	Verlauf der Motorenströme während des Handführens des MANUTEC-Roboters.	118
4.14	Realisierung des Momentenbetriebes durch Begrenzung des Sollstromes. . . .	120

---

4.15	Struktur der RSI-Anwendung zur kraftgeführten Bewegung des Gelenks 1 auf Basis der Motorenströme. . . . .	123
A.1	Definition der Koordinatensysteme des Roboters STÄUBLI RX90B. . . . .	127
A.2	Definition der Koordinatensysteme des Roboters MANUTEC r3. . . . .	130
A.3	Definition der Koordinatensysteme des Roboters KUKA KR6/2. . . . .	132

## Tabellenverzeichnis

3.1	DH-Parameter des <i>Planar Two Link Manipulators</i> . . . . .	39
3.2	Parameter des Wunschverhaltens zur kraftgeführten Bewegung des STÄUBLI RX90 Roboters. . . . .	70
3.3	Parameter des Wunschverhaltens zur kraftgeführten Bewegung eines KR6/2 Roboters mittels RSI-Expertenprogrammierung. . . . .	86
3.4	Vergleich zwischen kartesischem Ansatz und Gelenkraumansatz zur kraftgeführten Bewegung. . . . .	97
4.1	Ausgewählte Gelenkparameter des MANUTEC r3 Roboters. . . . .	104
4.2	Parameter zur Berechnung der Gravitationsmomente in den Gelenken des Roboters MANUTEC r3. . . . .	105
4.3	Parameter zur Kompensation der Reibmomente. . . . .	113
4.4	Parameter des Wunschverhaltens. . . . .	113
4.5	Vergleich der kraftgeführten Bewegung ohne und mit zusätzliche Sensorik. . .	124

## Literaturverzeichnis

- [1] AKELLA, P. ; PESHKIN, M. ; COLGATE, E. ; WANNASUPHOPRASIT, W. ; WELLS, J. ; NAGESH, N. ; HOLLAND, S. ; PEARSON, T. ; PEACOCK, B.: Cobots for the automobile assembly line. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1999, S. 728–733
- [2] ALBU-SCHÄFFER, A. ; C. OTT, U. F. ; HIRZINGER, G.: Cartesian Impedance Control of Redundant Robots: Recent Results with the DLR-Light-Weight-Arms. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2003, S. 3704–3709
- [3] ALBU-SCHÄFFER, A. ; HIRZINGER, G.: Cartesian Impedance Control Techniques for Torque Controlled Light-Weight Robots. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2002, S. 657–663
- [4] ALICI, G. ; DANIEL, R. W.: Robotic drilling under force control: execution of a task. In: *Proc. of IEEE/RSJ/GI International Conference on Intelligent Robots and Systems* Bd. 3, 1994, S. 1618–1625
- [5] ANDERSON, R. J. ; SPONG, M. W.: Bilateral Control of Teleoperators with Time Delay. In: *IEEE Transactions on Automatic Control* 34 (1989), Mai, Nr. 5, S. 494–501
- [6] ANGELES, J.: *Fundamentals of Robotic Mechanical Systems*. Zweite Ausgabe. Springer, 2003
- [7] ARAI, H.: Robotic Metal Spinning - Forming Non-axisymmetric Products Using Force Control -. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, S. 2702–2707
- [8] ÅSTRÖM, K. J. ; WITTENMARK, B.: *Adaptive Control*. Zweite Ausgabe. Addison-Wesley, 1995
- [9] ATI, INC: *Homepage ATI Industrial Automation*. [www.ati-ia.com](http://www.ati-ia.com). – Online-Ressource, Abruf: 24. Feb.. 2006
- [10] ATKESON, C. G. ; AN, C. H. ; HOLLERBACH, J. M.: Estimation of Inertial Parameters of Manipulator Loads and Links. In: *The International Journal of Robotics Research* 5 (1986), Nr. 3, S. 101–119
- [11] BERUFGENOSSENSCHAFTLICHES INSTITUT FÜR ARBEITSSCHUTZ: Roboter ohne Schutzzäune in der Pipelinefertigung. In: *Aus der Arbeit des BIA* 5 (2003), Nov., Nr. 0101. – ISSN 1619–2826

- [12] BÖHM, J.: *Fortschritt Berichte, Reihe 8. Bd. 405: Kraft- und Positionsregelung von Industrierobotern mit Hilfe von Motorsignalen*. VDI-Verlag, 1994
- [13] BLOMDELL, A. ; BOLMSJO, G. ; BROGARDH, T. ; CEDERBERG, P. ; ISAKSSON, M. ; JOHANSSON, R. ; HAAGE, M. ; NILSSON, K. ; OLSSON, M. ; OLSSON, T. ; ROBERTSSON, A. ; WANG, J.: Extending an industrial robot controller: implementation and applications of a fast open sensor interface. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12 (2005), Nr. 3, S. 85–94
- [14] BRONSTEIN, I. N. ; SEMENDJAJEW, K. A.: *Taschenbuch der Mathematik*. 24. Auflage. BSB B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, 1989
- [15] CACCAVALE, F. ; CHIACCHIO, P.: Identification of Dynamic Parameters and Feed-forward Control for a Conventional Industrial Manipulator. In: *Control Engineering Practice* 2 (1994), Nr. 6, S. 1039–1049
- [16] CACCAVALE, F. ; NATALE, C. ; SICILIANO, B. ; VILLANI, L.: Integration for the next generation: embedding force control into industrial robots. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12 (2005), Nr. 3, S. 53–64
- [17] CHEAH, C. C. ; LIAW, H. C.: Inverse Jacobian Regulator With Gravity Compensation: Stability and Experiment. In: *IEEE Transactions on Robotics* 21 (2005), Nr. 4, S. 741–747
- [18] CHIAVERINI, S. ; SCIavicco, L.: Force/Position Control of Manipulators in Task Space with Dominance in Force. In: *Proc. of 2nd IFAC Symp. on Robot Control*, 1988, S. 137–143
- [19] CHIAVERINI, S. ; SICILIANO, B.: Stability of Parallel Control. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1993, S. 127–140
- [20] CLARKE, D. W. ; MOHTADI, C. ; TUFFS, P. S.: Generalized Predictive Control - Part I, II. In: *Automatica* 23 (1987), Nr. 2, S. 137–160
- [21] CRAIG, J. J.: *Introduction to Robotics Mechanics and Control*. Pearson Prentice Hall, 2005
- [22] DAMME, M. van ; DAERDEN, F. ; LEFEBER, D.: A Pneumatic Manipulator used in Direct Contact with an Operator. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, S. 4505–4510
- [23] DAPPER, M.: *Kraftsensorlose Manipulator Kraftsteuerung zur Abtastung unbekannter, harter Oberflächen*, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Dissertation, 2003
- [24] DÉGOULANGE, E. ; DAUCHEZ, P.: External Force Control of an Industrial PUMA 560 Robot. In: *Journal of Robotic Systems* 11 (1994), Nr. 6, S. 523–540
- [25] DENAVIT, J. ; HARTENBERG, R. S.: A Kinematic Notation for Lower-Pair Mechanism Based on Matrices. In: *ASME Journal of Applied Mechanics* 77 (1955), Jun., S. 215–221
- [26] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 775 (ISO 10218), Industrieroboter - Sicherheit*. Aug. 1993

- [27] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 8373, Industrieroboter Wörterbuch*. Aug. 1996
- [28] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 954-1, Sicherheit von Maschinen - Sicherheitsbezogene Teile von Steuerungen*. März 1997
- [29] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN 999, Sicherheit von Maschinen - Anordnung von Schutzeinrichtungen im Hinblick auf Annäherungsgeschwindigkeiten von Körperteilen*. Dez. 1998
- [30] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 9787, Industrieroboter - Koordinatensysteme und Bewegungsnomentklaturen*. Jul. 2000
- [31] DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG: *DIN EN ISO 9946, Industrieroboter - Darstellung charakteristischer Eigenschaften*. Jul. 2000
- [32] FRANKE, J. ; OTTER, M.: The Manutec r3 Benchmark Models for the Dynamic Simulation of Robots / Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR). 1993. – Forschungsbericht
- [33] GARCÍA, J. G. ; ROBERTSSON, A. ; ORTEGA, J. G. ; JOHANSSON, R.: Force and Acceleration Sensor Fusion for Compliant Robot Motion Control. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, S. 2720–2725
- [34] GORINEVSKY, D. M. ; FORMALSKY, A. M. ; SCHNEIDER, A. Y.: *Force Control of Robotic Systems*. CRC Press, 1997
- [35] GOSWAMI, A. ; PESHKIN, M. A.: Mechanical Computation for Passive Force Control. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation* Bd. 1, 1993, S. 476–483
- [36] GRÜTTER, VERLAGSGESELLSCHAFT: Manutec lebt. In: *Automation&Qualität* 10 (2003). – Sonderdruck
- [37] GRUHLER, G.: *SW Forschung und Praxis*. Bd. 67: *Sensorgeführte Programmierung bahngesteuerter Industrieroboter*. Springer, 1987
- [38] HEILIGENSETZER, P.: *Sichere Mensch-Roboter Kooperation durch Fusion haptischer und kapazitiver Sensorik*, Fakultät für Informatik, Universität Karlsruhe, Dissertation, 2003
- [39] HEINRICHS, B. ; SEPEHRI, N. ; THORNTON-TRUMP, A. B.: Position-Based Impedance Control of an Industrial Hydraulic Manipulator. In: *IEEE Control Systems Magazine* 17 (1997), S. 46–52,
- [40] HÄGELE, M. ; NEUGEBAUER, J. ; SCHRAFT, R. D.: From Robots to Robot Assistants. In: *Proc. of the 32th International Symposium on Robotics 2001 (ISR)*, 2001
- [41] HIRZINGER, G. ; ARBTER, K. ; BRUNNER, B. ; KOEPPE, R. ; LANDZETTEL, K. ; J.VOGEL: Telerobotic control and human robot-interaction. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1997

- [42] HIRZINGER, G. ; BALS, J. ; OTTER, M. ; STELTER, J.: The DLR-KUKA success story: robotics research improves industrial robots. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12 (2005), Nr. 3, S. 16–23
- [43] HIRZINGER, G. ; BRUNNER, B. ; LANDZETTEL, K. ; SPORER, N. ; SCHEDL, M. ; BUTTERFASS, J.: Space Robotics - DLR's Telerobotic Concepts, Lightweight Arms and Articulated Hands. In: *Autonomous Robots* 14 (2003), S. 127–145
- [44] HIRZINGER, G. ; FISCHER, M. ; BRUNNER, B. ; KOEPPE, R. ; OTTER, M. ; GREBENSTEIN, M. ; SCHÄFER, I.: Advances in Robotics: The DLR Experience. In: *The International Journal of Robotics Research* 18 (1999), Nr. 11, S. 1064–1087
- [45] HIRZINGER, G. ; HEINDL, J.: *US-Patent 4,589,810, Device for programming movements of robot manipulators*. 1986
- [46] HOGAN, N.: Impedance Control, An Approach to Manipulation: Part I, II, III. In: *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 107 (1985), S. 1–24
- [47] IPR GMBH: *Homepage IPR-Intelligente Peripherien für Roboter GmbH*. [www.ipr-wordwide.de](http://www.ipr-wordwide.de). – Online-Ressource, Abruf: 24. Feb. 2006
- [48] JR3, INC: *Homepage JR3*. [www.jr3.com](http://www.jr3.com). – Online-Ressource, Abruf: 24. Feb. 2006
- [49] JUNG, S. ; HSIA, T. C. ; BONITZ, R. G.: Force Tracking Impedance Control for Robot Manipulators with an Unknown Environment: Theory, Simulation, and Experiment. In: *The International Journal of Robotics Research* 20 (2001), Nr. 9, S. 765–774
- [50] KAZEROONI, H.: Human-Robot Interaction via the Transfer of Power and Information Signals. In: *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics* 20 (1990), Nr. 2, S. 450–463
- [51] KAZI, A. ; BISCHOFF, R.: From research to products: The KUKA perspective on European research projects. In: *IEEE Robotics & Automation Magazine* 12 (2005), Nr. 3, S. 78–84
- [52] KHATIB, O.: Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. In: *The International Journal of Robotics Research* 5 (1986), Nr. 1, S. 90–98
- [53] KOEPPE, R. ; ENGELHARDT, D. ; HAGENAUER, A. ; HEILIGENSETZER, P. ; KNEIFEL, B. ; KNIPFER, A. ; STODDARD, K.: Robot-Robot and Human-Robot Cooperation in Commercial Robotics Applications. In: DARIO, P. (Hrsg.) ; CHATILA, R. (Hrsg.): *Robotics Research* Bd. 11. Springer, 2005, Kapitel 4, S. 202–216
- [54] KOEPPE, R. ; MEUSEL, P. ; HIRZINGER, G.: Technologien für die Kraftregelung von Industrie- und Servicerobotern. In: *Tagungsband VDI/VDE Konferenz für Robotik*, 2000, S. 159–165
- [55] KOZLOWSKI, K.: *Modelling and Identification in Robotics*. Springer, 1998
- [56] KÜPFMÜLLER, K. ; MATHIS, W. ; REIBIGER, A.: *Theoretische Elektrotechnik*. 16. Ausgabe. Springer, 2005

- [57] KREUZER, E. J. ; MEISSNER, H.-G. ; LUGTENBURG, J.-B. ; TRUCKENBRODT, A.: *Industrieroboter*. Springer, 1994
- [58] KUKA ROBOTER GMBH: *Homepage KUKA Roboter*. [www.kuka.com/de](http://www.kuka.com/de). – Online-Ressource, Abruf: 1. Mrz. 2006
- [59] KURFESS, T. R.: *Robotics and Automation Handbook*. CRC Press, 2005
- [60] LASKY, T. A. ; HSIA, T. C.: Force Control of Robotic Manipulators. In: TZAFESTA, S. G. (Hrsg.): *Applied Control*. Marcel Decker, 1993, Kapitel 22, S. 639–661
- [61] LEE, K.-K. ; TAKUBO, T. ; ARAI, H. ; TANIE, K.: Control of Mobile Manipulators for Power Assist Systems. In: *Journal of Robotic Systems* 17 (2000), Nr. 9, S. 469–477
- [62] LIU, G. ; IAGNEMMA, K. ; DUBOWSKY, S. ; MOREL, G.: A Base Force/Torque Sensor Approach to Robot Manipulator Inertial Parameter Estimation. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 1998, S. 3316–3321
- [63] LORENZ, W. A. ; PESHKIN, M. A. ; COLGATE, J. E.: New Sensors for new Applications: Force Sensors for Human/Robot Interaction. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation* Bd. 4, 1999, S. 2855–2860
- [64] LUNZE, J.: *Regelungstechnik 1*. Springer, 1996
- [65] MARRONE, F. ; RAIMONDI, F. M. ; STROBEL, M.: Compliant Interaction of a Domestic Service Robot with a Human and the Environment. In: *Proc. of 33rd International Symposium on Robotics (ISR)*, 2002
- [66] MASON, M. T.: Compliance and Force Control for Computer Controlled Manipulators. In: *IEEE Transaction on Systems, Man, and Cybernetics* 11 (1981), Nr. 6, S. 418–432
- [67] MCKERROW, P. J.: *Introduction to Robotics*. Addison Wesley, 1995
- [68] MERLET, J.-P.: *Parallel Robots*. Kluwer Academic Publishers, 2000
- [69] MÜLLER, G.: *Grundlagen elektrischer Maschinen*. VCH Verlagsgesellschaft, 1994
- [70] NAKAMURA, Y.: *Advanced Robotics: Redundancy and Optimization*. Addison-Wesley, 1991
- [71] NATALE, C.: *Interaction Control of Robot Manipulators*. Springer, 2003
- [72] NAWAZ, R.: *Modulares Koordinatentransformations- und Bahninterpolationsmodell für redundante Roboterkinematiken*, TU Freiberg, Dissertation, 2004
- [73] NEUMANN, R.: Rechnergestützte Implementierung digitaler Regler. In: *AGT Antriebs- und Gerätetechnik* (1991), Nr. 3, S. 25–26
- [74] NEUMANN, R.: *WIN-DDC Nutzerhandbuch*. Technische Universität Chemnitz, Professur Prozessautomatisierung, Nov. 2004
- [75] OHISHI, K. ; OHDE, H.: Collision and Force Control for Robot Manipulator without Force Sensor. In: *Proc. of IEEE International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON)* Bd. 2, 1994, S. 766–771

- [76] ORTEGA, R. ; SPONG, M. W.: Adaptive Motion Control of Rigid Robots: A Tutorial. In: *Automatica* 25 (1989), Nr. 6, S. 877–888
- [77] OTTER, M.: *Objektorientierte Modellierung mechatronischer Systeme am Beispiel geregelter Roboter*, Fakultät für Maschinenbau, Ruhr-Universität Bochum, Dissertation, 1993
- [78] OTTER, M. ; TÜRK, S.: The DFVLR Models 1 and 2 of the Manutec r3 Robot / Deutsche Forschungs- und Versuchsanstalt für Luft- und Raumfahrt (DLR). 1988. – Forschungsbericht
- [79] PAUL, R. P.: *Robot Manipulators: Mathematics, Programming and Control*. MIT-Press, 1981
- [80] PEINEMANN, F. W.: *Fortschritt Berichte, Reihe 8. Bd. 542: Neuronale Regelungskonzepte zur sensormotorischen Koordination von Industrierobotern*. VDI-Verlag, 1995
- [81] PESHKIN, M. ; COLGATE, J. E.: Cobots. In: *Industrial Robot: An International Journal* 26 (1999), Nr. 5, S. 335–341
- [82] PESHKIN, M. ; COLGATE, J. E. ; WANNASUPHOPRASIT, W. ; MOORE, C. A. ; GILLESPIE, R. B. ; AKELLA, P.: Cobot Architecture. In: *IEEE Transactions on Robotics and Automation* 17 (2001), Nr. 4, S. 377–390
- [83] PFEIFFER, F. ; REITHMEIER, E.: *Roboterdynamik*. Teubner, 1997
- [84] PIRES, J. N. ; RAMMING, J. ; RAUCH, S. ; ARAÚJO, R.: Force/Torque Sensing Applied to Industrial Robotic Deburring. In: *Sensor Review Journal* 22 (2002), Nr. 3, S. 231–241
- [85] PONESS, L.: *Kraft-/ Momentenregelung an einem Standardindustrieroboter*, TU Chemnitz, Diplomarbeit, 2003
- [86] QIAO, H. ; DALAY, B. S. ; M.PARKIN, R.: Fine motion strategies for robotic peg-hole insertion. In: *Proc. Institution Mechanical Engineers* Bd. 209, 1995, S. 429–448
- [87] RAIBERT, M. H. ; CRAIG, J. J.: Hybrid Position/Force Control of Manipulators. In: *ASME Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 102 (1981), Nr. 2, S. 126–133
- [88] RUOCCO, S. R.: *Sensoren und Wandler für Roboter*. VCH Verlagsgesellschaft, 1991
- [89] SCHRAFT, R. D. ; HELMS, E. ; MEYER, C.: Assistenzfunktionen des ASSISTOR-Demonstrators rob@work. In: *VDI Berichte 1841*, VDI Verlag, 2004, S. 165–172
- [90] SCHRAFT, R. D. ; MEYER, C. ; PARLITZ, C. ; HELMS, E.: PowerMate - A Safe and Intuitive Robot Assistant for Handling and Assembly Tasks. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2005, S. 4085–4090
- [91] SCHREIBER, G. ; HIRZINGER, G.: An Intuitive Interface for Nullspace Teaching of Redundant Robots. In: LENARČIČ, J. (Hrsg.) ; STANIŠIĆ, M. M. (Hrsg.): *Advances in Robot Kinematics*. Kluwer Academic Publishers, 2000, S. 209–219

- [92] SCHUNK GMBH & CO. KG: *Homepage SCHUNK Spann- und Greiftechnik*. [www.schunk.de](http://www.schunk.de). – Online-Ressource, Abruf: 24. Feb.. 2006
- [93] SCHUTTER, J. De ; BRUSSELS, H. Van: Compliant Robot Motion II. A Control Approach Based on External Control Loops. In: *The International Journal of Robotics Research* 7 (1988), Nr. 4, S. 18–33
- [94] SCHUTTER, J. De ; TORFS, D. ; BRUYNINCKX, H. ; DUTRÉ, S.: Invariant Hybrid Force/Position Control of a Velocity Controlled Robot with Compliant End Effector Using Modal Decoupling. In: *The International Journal of Robotics Research* 16 (1997), Nr. 3, S. 340–356
- [95] SCIAVICCO, L. ; SICILIANO, B.: *Modelling and Control of Robot Manipulators*. Springer, 2004
- [96] SICILIANO, B. ; VILLANI, L.: *Robot Force Control*. Kluwer Academic Publishers, 1999
- [97] SIEGERT, H.-J. ; BOCIONEK, S.: *Robotik: Programmierung intelligenter Roboter*. Springer, 1996
- [98] SIEGWART, R. ; NOURBAKHSI, I. R.: *Autonomous Mobile Robots*. MIT Press, 2004
- [99] SOM, F.: Sichere Robotersteuerung für einen personensicheren Betrieb ohne trennende Schutzeinrichtungen. In: *VDI Berichte 1841*, VDI Verlag, 2004, S. 745–752
- [100] STADLER, W.: *Analytical Robotics and Mechatronics*. McGraw-Hill, 1995
- [101] STIEGLER, J.: *Erstellung und Erprobung von RSI-Programmen zur Anwendung bei der Kraft-/ Momentregelung eines KUKA Industrieroboters*, TU Chemnitz, Diplomarbeit, 2005
- [102] STILLER, A.: *Fortschritt Berichte, Reihe 8. Bd. 414: Prädiktive Regelung von Roboterantrieben*. VDI-Verlag, 1994
- [103] STOKIĆ, D. ; VUKOBRATOVIĆ, M.: Historical perspective and state of the art in joint force sensory feedback control of manipulation robots. In: *Robotica* 11 (1993), S. 149–157
- [104] STOPP, A. ; BALDAUF, T. ; HORSTMANN, S. ; KRISTENSEN, S.: A Safety Concept for Robot Assistants in Manufacturing. In: *VDI Berichte 1841*, VDI Verlag, 2004, S. 753–760
- [105] STÄUBLI, Faverges: *Adept Force VME User's Guide*. Place Robert Stäubli, 72100 Faverges, 1995
- [106] STÄUBLI, Faverges: *V+ Language Version 13.0 Reference Guide*. Place Robert Stäubli, 72100 Faverges, 1997
- [107] TÜRK, S. ; OTTER, M.: Das DFVLR Modell Nr. 1 des Industrieroboters Manutec r3. In: *Robotersysteme* 3 (1987), S. 101–106
- [108] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE UNECE: *Pressemitteilung World Robotics 2004, ECE/STAT/04/P013*. [www.ifr.org](http://www.ifr.org). – Online-Ressource, Abruf: 5. Okt. 2004

- [109] UNITED NATIONS ECONOMIC COMMISSION FOR EUROPE UNECE: *Pressemitteilung World Robotics 2004 für Bundesrepublik Deutschland, ECE/STAT/04/P03. www.ifr.org.* – Online-Ressource, Abruf: 5. Okt. 2004
- [110] VEIT, H.: *Erarbeitung und Erprobung von Kraft-/Momentregelalgorithmen an einem KUKA-Industrieroboter mit Hilfe des Softwarepaketes FTCtrl*, TU Chemnitz, Diplomarbeit, 2004
- [111] VOGEL, J.: *Elektrische Antriebstechnik*. Vierte Ausgabe. Verlag Technik Berlin, 1988
- [112] VOLMER, J.: *Industrieroboter-Funktion und Gestaltung*. Verlag Technik Berlin, 1992
- [113] VUKOBRATOVIC, M. ; TUNESKI, A.: Adaptive Control of Single Rigid Robotic Manipulators Interacting with Dynamic Environment - An Overview. In: *Journal of Intelligent Robotic Systems* 17 (1996), Nr. 3, S. 1–30
- [114] WARNECKE, H.-J. ; SCHRAFT, R. D.: *Industrieroboter*. Springer, 1990
- [115] WATSON, P. C.: *US-Patent 4,098,001, Remote Center Compliance System*. 1978
- [116] WEBER, W.: *Industrieroboter - Methoden der Steuerung und Regelung*. Fachbuchverlag Leipzig, 2002
- [117] WHITNEY, D. E.: Force Feedback Control of Manipulator Fine Motions. In: *Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control* 99 (1977), Nr. 2, S. 91–97
- [118] WHITNEY, D. E.: Remote Center Compliance. In: DIPONIO, J. J. (Hrsg.) ; HASEGAWA, Y. (Hrsg.): *Encyclopedia of Robotics System and Control* Bd. 2. Industrial Training Corporation, 1986, S. 1316–1324
- [119] WHITNEY, D. E.: Historical Perspective and State of the Art in Robot Force Control. In: *The International Journal of Robotics Research* 6 (1987), Nr. 1, S. 3–14
- [120] WINKLER, A. ; SUCHÝ, J.: Kraft-/ Momentregelung von Industrierobotern. In: *Scientific Reports Nr. 4, 1. Workshop Robotik*, Hochschule Mittweida (FH), 2004, S. 22–30
- [121] WINKLER, A. ; SUCHÝ, J.: Kraftgeführte Bewegungen mit einem Standardindustrieroboter. In: *VDI Berichte 1841*, VDI Verlag, 2004, S. 527–534
- [122] WINKLER, A. ; SUCHÝ, J.: Ausgewählte Anwendungen zum Einsatz von Kraft-/ Momentregelung an Industrierobotern. In: *Scientific Reports Nr. 11, IWKM Robotik*, Hochschule Mittweida (FH), 2005, S. 1–4
- [123] WINKLER, A. ; SUCHÝ, J.: Kraftgeführte Bewegungen mit einem STÄUBLI-Industrieroboter. In: *AT&P journal PLUS6* (2005), S. 94–98
- [124] WINKLER, A. ; SUCHÝ, J.: Novel Joint Space Force Guidance Algorithm with Laboratory Robot System. In: *Proc. of 16th IFAC World Congress*, 2005
- [125] WINKLER, A. ; SUCHÝ, J.: Force-guided motions of a 6-d.o.f industrial robot with a joint space approach. In: *Advanced Robotics* 20 (2006), Nr. 9, S. 1067–1084

- 
- [126] WINKLER, A. ; SUCHÝ, J.: Sensorless Force Guided Motions of an Industrial Robot Based on Motor Currents. In: *Proc. of Joint Conference on Robotics - 37th International Symposium on Robotics and 4th German Conference on Robotics*, VDI Verlag, 2006
- [127] WÖSCH, T.: Taktile Mensch-Maschine-Interaktion. In: *VDI Berichte 1679*, VDI Verlag, 2002, S. 275–280
- [128] YOSHIKAWA, T.: Force Control of Robot Manipulators. In: *Proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2000, S. 220–226
- [129] ZENG, G. ; HEMAMI, A.: An overview of robot force control. In: *Robotica* 15 (1997), S. 473–482
- [130] ZHANG, G. ; FURUSHO, J.: Control of robot arms using joint torque sensors. In: *IEEE Control Systems Magazine* 18 (1998), Nr. 1, S. 48–55

## Selbstständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit ohne unzulässige Hilfe Dritter und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe; die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht.

Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten: KEINE

Weitere Personen waren an der Abfassung der vorliegenden Arbeit nicht beteiligt. Die Hilfe eines Promotionsberaters habe ich nicht in Anspruch genommen. Weitere Personen haben von mir keine geldwerten Leistungen für Arbeiten erhalten, die im Zusammenhang mit dem Inhalt der vorgelegten Dissertation stehen.

Die Arbeit wurde bisher weder im Inland noch im Ausland in gleicher oder ähnlicher Form einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Chemnitz, 27.09.2006

Alexander Winkler

## Thesen

1. Die kraftgeführte Bewegung (KB) von Robotern, als Spezialfall der Kraft-/ Momentregelung (KMR), bietet interessante Anwendungsmöglichkeiten. Im besonderen Maße zählt dazu das Anlernen von Positionen und Orientierungen des Endeffektors per Handführung als eine Alternative zu herkömmlichen Methoden des *Teach In*.
2. Die KB im Gelenkraum hat diverse Vorteile gegenüber ihrer kartesischen Variante. Dazu zählen die Robustheit gegenüber Singularitäten, die volle Ausnutzung des Arbeitsraumes des Manipulators und vor allem das erwartungsgetreue Bewegungsverhalten. Dieses hängt, im Gegensatz zum kartesischen Ansatz zur KB, von der Kinematik des Roboters ab.
3. Bei dem Ansatz zur KB im Gelenkraum werden die am Endeffektor gemessenen kartesischen Kräfte und Momente mit Hilfe der transponierten Jacobi-Matrix in den Gelenkraum überführt. Anhand der so berechneten Gelenkmomente bzw. -kräfte erfolgt dann die Bewegungssteuerung des Roboters.
4. Die KB im Gelenkraum, unter Verwendung eines am Flansch montierten Kraft-/ Momentsensors (KMS), eignet sich für alle seriellen Manipulatoren und z. T. auch für mobile Roboter. Für Parallelkinematiken ist sie nicht sinnvoll.
5. Im Wesentlichen bestimmen die Wahl der Struktur des Wunschverhaltens (WV) und dessen Parametrierung das dynamische Bewegungsverhalten des Roboters bei der KB. Das WV stellt in der Regel die Sollwerte der Gelenkpositionen zur Verfügung.
6. Neben dem WV sind auch die Möglichkeiten der Bewegungssteuerung des jeweiligen Robotersystems für die Dynamik bei der KB verantwortlich. In der Regel weisen offene Robotersteuerungen dabei Vorteile gegenüber industriellen Standardsteuerungen auf, da dort die Einflussnahme auf einer niedrigeren Ebene, wie z. B. der Gelenkgeschwindigkeit, erfolgen kann.
7. Als Struktur des WV der KB bietet sich besonders IT1-Verhalten zwischen Eingangsgröße (Gelenkmoment bzw. -kraft) und Ausgangsgröße (Sollposition) an. Dies entspricht dem eines Masse-Dämpfer-Systems.
8. Das WV kann je nach Anwendungsfall um verschiedene Sonderfunktionen erweitert werden. Dazu zählen u. A. die virtuelle Arbeitsraumbegrenzung oder die zusätzliche Federwirkung im WV, z. B. bei Assistenzaufgaben des Roboters.
9. Die Benutzersicherheit ist der wichtigste Punkt bei jeglicher Mensch-Roboter-Interaktion. Deren Erfüllung, gemäß einschlägiger Normen, ist mit industriellen Standardsteuerungen nur in enger Kooperation mit dem jeweiligen Hersteller möglich.

10. Eine kostengünstige Variante der Kraft-/ Momentmessung ist auf der Grundlage der Motorenströme des Roboters möglich. Dabei wird auf den relativ teuren KMS verzichtet, und die Kontaktkräfte- und -momente werden aus den aktuellen Werten der Motorenströme geschätzt.
11. Für eine möglichst genaue Schätzung bei niedrigen Verfahrensgeschwindigkeiten müssen die Einflüsse von Gewicht- und Reibkräften ständig kompensiert werden. Dafür ist ein dynamisches Modell des Roboters erforderlich. Dessen Güte bestimmt im Wesentlichen die Qualität der Schätzung. Besonders problematisch erweist sich dabei Reibung im Stillstand oder bei niedriger Geschwindigkeit eines Gelenks.
12. Die KB im Gelenkraum ist auf Basis der Kontaktmomentschätzung aus den Motorenströmen für einen 6-Gelenk-Knickarmroboter möglich. Aufgrund von Modellungenauigkeit kann nicht die Qualität der KB mit KMS erreicht werden. Die sensorlose Variante der KB kann daher nur für Roboter geringer Tragfähigkeit empfohlen werden.
13. Das Steuerungssystem und dessen Programmiermöglichkeiten entscheiden über die erfolgreiche Realisierung der KB ohne zusätzliche Sensorik.

## Lebenslauf

### Persönliche Daten

Name: Alexander Winkler  
Geboren: 03.06.1976, Karl-Marx-Stadt

### Wissenschaftlicher Wertegang

10/1995 bis 09/1997 Grundstudium an der TU Chemnitz,  
Studienrichtung Elektrotechnik, Abschluss: Vordiplom

10/1997 bis 09/2000 Hauptstudium an der TU Chemnitz,  
Studiengang Automatisierungstechnik, Abschluss: Dipl.-Ing.

10/2000 Hilfsassistent an der Professur für  
Prozessautomatisierung der TU Chemnitz

10/2000 bis 01/2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für  
Prozessautomatisierung der TU Chemnitz

02/2001 bis jetzt Wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Professur für  
Robotersystem der TU Chemnitz