DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 547

Hubertus Nitschke

Zur Bestimmung geometrischer Parameter von Industrierobotern

München 2002

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 9586 0

DGK Deutsche Geodätische Kommission
bei der Bayerischen Akademie der Wissenschaften

Reihe C | Dissertationen | Heft Nr. 547

Zur Bestimmung geometrischer Parameter von Industrierobotern

Vollständiger Abdruck
der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen
der Technischen Universität München
zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigten Dissertation

von

Dipl.-Ing. Hubertus Nitschke

München 2002

Verlag der Bayerischen Akademie der Wissenschaften
in Kommission beim Verlag C. H. Beck

ISSN 0065-5325 | ISBN 3 7696 9586 0

Adresse der Deutschen Geodätischen Kommission:

Deutsche Geodätische Kommission

Alfons-Goppel-Straße 11 ● D – 80 539 München

Telefon +49 – 89 – 23 031 1113 ● Telefax +49 – 89 – 23 031 - 1283 / - 1100

e-mail hornik@dgfi.badw.de ● http://www.dgk.badw.de

Prüfungskommission

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Reinhard Rummel
Prüfer der Dissertation:	1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Schnädelbach
	2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich
	3. Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer, TU Darmstadt

Die Dissertation wurde am 12.4.2001 bei der Technischen Universität München eingereicht
und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 18.10.2001 angenommen.

© 2002 Deutsche Geodätische Kommission, München

Alle Rechte vorbehalten. Ohne Genehmigung der Herausgeber ist es auch nicht gestattet,
die Veröffentlichung oder Teile daraus auf photomechanischem Wege (Photokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

ISSN 0065-5325 ISBN 3 7696 9586 0

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis 3

1 Einführung 5

2 Grundlagen 6

2.1 Definitionen und Normung 6

2.1.1 Definitionen – Industrieroboter 6

2.1.2 Normen in Deutschland 7

2.2 Verbreitung und Einsatz der Industrieroboter 8

2.2.1 Verbreitung 8

2.2.2 Einsatz 9

2.3 Bauformen, Arbeitsraum, Antriebe 10

2.3.1 Bauformen und Arbeitsraum 10

2.3.2 Antriebe 13

2.4 Roboterprogrammierung - Online / Offline 13

2.5 Geometrische und andere Roboterfehlerursachen 15

3 Industrieroboter – beschreiben, messen und prüfen 18

3.1 Definitionen und Kenngrößen 19

3.2 Koordinatensysteme 19

3.3 Die kinematische Kette 20

3.3.1 Übergänge zwischen den Koordinatensystemen der kinematischen Kette 21

3.3.2 Dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation 21

3.3.3 Das Denavit-Hartenberg-Verfahren 22

3.3.4 Ansatz nach Hayati und Mirmirani für parallele Achsen 24

3.3.5 Weitere Ansätze 25

3.4 Industrieroboter – Messen und Prüfen 26

3.4.1 Meß- und Prüfroboter 26

3.4.2 Meßmittel und Meßverfahren 30

4 Parameteridentifikation mit geodätischen Mitteln 36

4.1 Das vereinfachte Verfahren 36

4.2 Analyse von Achskopplungen 39

4.3 Das spezielle Verfahren 40

4.4 Das geschlossene Verfahren 43

4.4.1 Anmerkungen zur Ausgleichung und zum Gewichtsansatz 43

4.4.2 Vorwärtsrechnung 47

4.5 Wertung der Verfahren und Eignung der Robotermodelle 52

5 Praktische Beispiele 55

5.1 Allgemeine Vorgehensweise 55

5.2 Auswertung GMF S-420F 57

5.2.1 Der Industrieroboter GMF S-420F 57

5.2.2 Vergleichskoordinaten 58

5.2.3 Identifikation der Roboterparameter 60

5.2.4 Benötigte Ziel- und Posenanzahl 66

5.3 Auswertung Cloos ROMAT RO56 67

5.3.1 Der Industrieroboter Cloos ROMAT RO56 67

5.3.2 Vergleichskoordinaten 68

5.3.3 Identifikation der Roboterparameter 69

6 Zusammenfassung 71

Dank **73**

Glossar und Abkürzungen **74**

Literatur **75**

1 Einführung

Moderne Produktionsvorgänge stützen sich in zunehmenden Maße auf einen hohen Automatisierungsgrad. Dies wird vor allem durch den Einsatz vieler verschiedener Handhabungsgeräte erreicht. Damit gelingt es, in schnellen Taktfolgen die unterschiedlichsten Arbeitsschritte mit einer hohen Genauigkeit zu wiederholen. Außerdem ist der Einsatz *rund-um-die-Uhr* möglich, mit Ausnahme von Pausen für die Wartung und Reparatur. Die Arbeitsschritte der Maschine können wegen der hohen Auslastung nicht an Ort und Stelle eingegeben werden, denn Stillstandzeiten kosten bares Geld. Aus diesem Grund wird die Programmierung auf einem Rechner zuerst simuliert und anschließend in die Robotersteuerung übertragen. Dieser Weg funktioniert aber nur dann, wenn das Robotermodell im Rechner mit dem realen Roboter übereinstimmt. Bei Unterschieden von Modell und Realität können beim Anfahren der geplanten Roboterpositionen Abweichungen entstehen, die auch große Beträge annehmen können. Je enger die vorgegebene Toleranz für eine Roboterposition ist, desto höher sind die Anforderungen an die Geometrie der Maschine. Werden die Abweichungen zwischen Soll- und Istpunkt zu groß, hilft nur ein manuelles Nachkorrigieren, das aber im allgemeinen wegen der kleinen Zeitfenster so gut wie nicht durchführbar ist. Eine zweite Möglichkeit ist nur mit der Vermessung und anschließenden Kalibrierung des Roboters gegeben. Für eine Vermessung haben sich in der Vergangenheit vor allem die mobilen geodätischen Meßsysteme etabliert. Mit Theodolitmeßsystemen oder mit Photogrammetriesystemen können diese Aufgaben auch vor Ort, in der Produktion, durchgeführt werden.

Aus einem Vergleich zwischen vermessenen Sollpositionen und angefahrenen Istpositionen können die Parameter der Robotergeometrie in einer Ausgleichungsrechnung geschätzt werden. Für jeden Anwendungsfall sollte der Roboter hinsichtlich seiner Geometrie überprüft werden, damit die in Simulationsprogrammen erstellten Arbeitspositionen keine Abweichungen zu den realen Roboterpositionen erzeugen. Ein Roboter eignet sich prinzipiell auch zur Durchführung von Vermessungsaufgaben, zunächst allerdings nur mit einem eingeschränkten Genauigkeitsbereich. Dieser Genauigkeitsbereich kann erheblich verbessert werden, wenn die genaue Robotergeometrie bekannt ist.

Nach dieser kurzen Einführung werden in Kapitel 2 Definitionen für Industrieroboter gegeben. Das beinhaltet neben den Beschreibungen ihrer verschiedenen Bauformen und Einsatzmöglichkeiten, auch die Varianten der Programmierungen der Roboter. Vielfältige Fehlerursachen beschließen den Abschnitt. In Kapitel 3 werden verschiedene Kenngrößen und Koordinatensysteme vorgestellt. Im Anschluß daran wird die kinematische Kette formuliert und Meß- und Prüfverfahren für Roboter vorgestellt. Dabei kann der Roboter sowohl als Meßmittel als auch als Meßobjekt eingesetzt werden. Im 4. Kapitel wird die Parameteridentifikation mit geodätischem Instrumentarium behandelt. Zur Bestimmung der geometrischen Parameter werden verschiedene Wege beschrieben: erstens ein vereinfachtes Verfahren zur Überprüfung von Achslängen, zweitens ein Weg zur Analyse von Achskopplungen, drittens ein Verfahren zur abschnittweisen Bestimmung der Parameter und viertens eine geschlossene Lösung zur Berechnung aller geometrischen Parameter. Eine Bewertung der Verfahren beendet diesen Abschnitt. Die durchgeführten Messungen werden in Kapitel 5 vorgestellt und die Ergebnisse an Beispielen erläutert. Kapitel 6 faßt abschließend die Arbeit noch einmal zusammen.

2 Grundlagen

Der Begriff Roboter stammt von dem slawischen Wort Robota ab, was soviel wie schwere Arbeit heißt. Im allgemeinen Sprachgebrauch werden alle menschenähnlichen oder in den Funktionen dem Menschen ähnliche Maschinen als Roboter bezeichnet. Es ist daher notwendig, den Begriff des Industrieroboters genau zu definieren, um Unterschiede zu anderen Geräten und Maschinen abzugrenzen. Wegen des weitgefächerten Spektrums der Industrieroboter werden zunächst einige Definitionen, Auszüge aus nationalen und internationalen Normen und Beschreibungen gegeben. Anschließend wird auf den Einsatz und die Verbreitung der Industrieroboter in Deutschland, bzw. weltweit eingegangen. Mit den verschiedenen Einsatzbereichen sind auch die verschiedenen Bauformen und deren charakteristische Arbeitsraumgeometrien eng verknüpft. Ein weiterer Abschnitt beschreibt die Roboterprogrammierung, also die Möglichkeit, einem Industrieroboter Bewegungsabläufe vorzugeben, zu speichern und wiederholt ausführen zu lassen. Im Anschluß werden mögliche Fehler in Klassen eingeteilt, sowie deren Ursache und Wirkung auf Industrieroboter vorgestellt. In [Bernard, Albright 93; Hesse 98; Mooring, Roth, Driels 91; Sciavicco, Siciliano 96] werden gute Einblicke in die Robotik gegeben.

2.1 Definitionen und Normung

Jede nationale Standardisierungsbehörde beschreibt einen Roboter anders. Eine Auswahl der verschiedenen Definitionen wird im Anschluß vorgestellt. Bei der Betrachtung der Definitionen und Normen für Industrieroboter zeigen sich Unterschiede zwischen den einzelnen Ländern. Das verdeutlicht die Schwierigkeiten bei allgemeinen Vergleichen und dem Versuch, die verschiedenen Handhabungsgeräte in Klassen oder Kategorien einzuteilen [Katalinic 90].

2.1.1 Definitionen – Industrieroboter

Deutschland VDI – Richtlinie 2860, Blatt 1:

In Deutschland wird der Begriff des Roboters in vier Untergruppen beschrieben:

Manipulatoren sind manuell gesteuerte Bewegungseinrichtungen, die vornehmlich für Handhabungsaufgaben eingesetzt werden.

Teleoperatoren sind ferngesteuerte Manipulatoren.

Einlegegeräte sind Bewegungsautomaten, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und/oder Wegen bzw. Winkeln nach einem fest vorgegebenen Programm ablaufen, das ohne mechanischen Eingriff nicht verändert werden kann. Sie sind im allgemeinen mit Greifern ausgerüstet und werden vornehmlich für Handhabungsaufgaben eingesetzt.

Industrieroboter sind universell einsetzbare Bewegungsautomaten mit mehreren Achsen, deren Bewegungen hinsichtlich Bewegungsfolge und Wegen bzw. Winkeln frei (d.h. ohne mechanischen Eingriff) programmierbar und gegebenenfalls sensorgeführt sind. Sie sind mit Greifern, Werkzeugen oder anderen Fertigungsmitteln ausrüstbar und können Handhabungs- und/oder Fertigungsaufgaben ausführen.

ISO – International Standard Organisation ISO/TR 8373:

Ein Industrieroboter ist ein automatischer, servogesteuerter, programmierbarer, multifunktioneller Manipulator mit mehreren Achsen. Er ist zur Handhabung von Rohteilen, Bauteilen, Werkzeugen oder Spezialgeräten auf Grund frei programmierbarer Operationen befähigt. Ein Industrieroboter besitzt einen oder mehrere Arme, die in einem Gelenk enden. Seine Steuereinheit verfügt über einen Speicher, und manchmal verwendet er Sensoren und Adaptoren, welche Umgebung und äußere Umstände erfassen. Diese vielfältig anwendbaren Maschinen sind so allgemein zur Ausübung von repräsentativen Aufgaben entworfen und können ohne dauerhafte Veränderung der Ausrüstung an neue Aufgaben angepaßt werden.

Vereinigte Staaten von Amerika RIA – The Robot Institution of America:

Ein Industrieroboter ist ein freiprogrammierbares, multifunktionales Handhabungsgerät, das zum Bewegen von Material, Teilen, Werkzeugen oder besonderen Einrichtungen mittels frei programmierbarer Bewegungsabläufe dient, und mit dem man eine Vielzahl von Aufgaben erledigen kann.

Großbritannien BRA – British Robot Association:

Ein Industrieroboter ist ein programmierbares Gerät, das für Handhabungsaufgaben, zum Transport von Teilen und Werkzeugen und auch für spezielle Produktionseinrichtungen mittels frei programmierbarer Bewegungsabläufe dient.

Japan JIS – Japan Industrial Standard B.0134:

Ebenso wie in Deutschland unterteilt die japanische Standardisierungsinstitution die Industrieroboter in mehrere Untergruppen:

Manueller Manipulator: ein Manipulator (Roboter), der direkt vom Menschen bedient wird.

Fixedsequence - Roboter: ein Manipulator, der verschiedene Operationen im Einklang mit vorgegebenen Informationen (Reihenfolge und Bedingungen zur Ausführung der Aufgabe) ausführen kann. Es ist jedoch schwierig, diesen Manipulator für verschiedene Aufgaben einzusetzen.

Variablesequence - Roboter: ein Manipulator, der verschiedene Operationen im Einklang mit vorgegebenen Informationen (Reihenfolge und Bedingungen zur Ausführung der Aufgabe) ausführen kann. Diesen Manipulator kann man leicht für verschiedene Aufgaben einsetzen.

Playback - Roboter: ein Manipulator, der Operationen auf Grund von menschlichen Instruktionen unter Berücksichtigung der Reihenfolge der äußeren Bedingungen, der Position und anderen Informationen, die durch die Bewegungen des Roboters übermittelt werden, wiederholen kann.

NC - Roboter: ein Roboter, der die gewünschten Operationen auf Grund von NC-Informationen, wie z.B. der Reihenfolge der Operationen, der Position des Greifers und anderen sachdienlichen Informationen, ausführen kann.

Intelligente Roboter: ein Roboter, der auf Grund von Roboterinformationen, die er durch seine eigenen Sensoren erwirbt, selbst entscheiden kann, was zu tun ist.

Zusammenfassung:

Anhand dieser verschiedenen Definitionen können folgende Grundeigenschaften den Industrierobotern zugeschrieben werden:

Hinsichtlich der ***Bauform*** besitzt ein Roboter mindestens einen Arm mit mehreren Achsen und Gelenken, welcher am Ende mit Greifern oder Werkzeugen bestückbar ist. Die ***Universalität*** ermöglicht es, einen Roboter für die verschiedensten Arbeiten einzusetzen. Die Fähigkeit zur ***Programmierbarkeit*** erhöht die universelle Einsatzmöglichkeit und führt zur Möglichkeit der Automatisierung. Eine ***mechanische Wirkung auf die Umwelt*** ist der eigentliche Zweck eines Industrieroboters. ***Automatisierung*** bedeutet Arbeiten ohne ständige und unmittelbare Unterstützung durch den Menschen. Der Einsatz ergänzender Sensorik und leistungsfähiger Software führt schließlich zum ***intelligenten Roboter.***

Eine andere Möglichkeit die verschiedenen Roboterdefinitionen zusammenzufassen, ist beispielsweise in [Katalinic 90] beschrieben.

2.1.2 Normen in Deutschland

In Deutschland gelten für den Umgang mit einem Industrieroboter folgende Regelwerke:

VDI-Richtlinie 2860 Entwurf, Blatt 1: zur Erläuterung von Begriffen, Definitionen und Beschreibung von Symbolen für Handhabungsfunktionen und Handhabungseinrichtungen.

VDI-Richtlinie 2861: hier sind die roboterspezifischen Kenngrößen definiert. Blatt 1 beschreibt die Achsbezeichnungen, Blatt 2 die einsatzspezifischen Kenngrößen und Blatt 3 die Prüfung dieser Kenngrößen.

DIN 66217: in dieser DIN wird auf die Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen eingegangen.

Analog zu den Deutschen Industrienormen und VDI-Richtlinien gibt es folgende Normen der internationalen Standardisierungsorganisation ISO:

ISO 9283: hier werden für den Einsatz von Industrierobotern Leistungsmerkmale und verschiedene Testverfahren und Methoden festgelegt.

ISO 9787: als Ergänzung zur *ISO 9283* werden hier die Koordinatensysteme und Bewegungsmöglichkeiten definiert.

ISO 9946: liefert eine Vorgabe zur Angabe charakteristischer Eigenschaften von Industrierobotern und vereinheitlicht die Bestimmung der verschiedenen Kenngrößen.

2.2 Verbreitung und Einsatz der Industrieroboter

2.2.1 Verbreitung

Nach Schätzungen waren 1988 etwa 250,000 Roboter weltweit im Einsatz, 1996 waren es schon 680,000 und im Jahr 2000 werden es vermutlich 950,000 weltweit sein. Die Tendenz ist weiter steigend. Japan lag 1996 weltweit mit einem Anteil von ca. 60% an der Spitze, gefolgt von Europa mit 16% und 10% in den Vereinigten Staaten von Amerika installierter Roboter (Abbildung 2.2.1). Auch im jährlichen Zuwachs der Roboter-Installationen führt Japan, trotz sinkender Installationen mit 40,000 Stück vor Deutschland und den USA mit je 10,000 [NN 97a; NN 97b; Kroh 97b, NN 00].

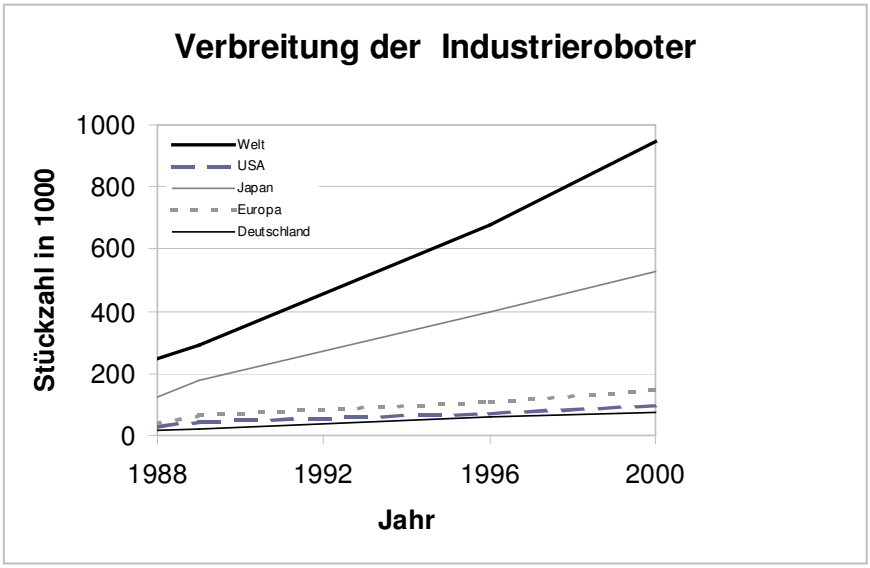


Abbildung 2.2.1 Verbreitung der Industrieroboter seit 1988.

Fallende Preise, sowie leichtere Bauarten haben die Verbreitung gefördert. So sind die Preise z.B. bei einem Roboter mit 6 kg maximaler Traglast um 50%, von 100,000 auf 50,000 DM in den letzten Jahren gefallen. Eine Gewichtsverringerung bei den Materialien konnte erreicht werden, indem man Aluminiumguß statt Konstruktionen aus geschweißtem Stahl den Vorzug gegeben hat. Außerdem sind die Roboter durch neue Technologien schneller und genauer geworden. Die Folge davon ist, daß sich der Grad der Automatisierung im Inland erhöht ([Weiss, Beuthner 00] und Abbildung 2.2.2). Diese Tendenz ist auch durch Steigerungen der Reinvestitionen bei den Forschungs- und Entwicklungsetats für Roboteranwendungen und Automatisierungen spürbar. Ungefähr 8% des Umsatzes werden in der Automobilindustrie dafür aufgewendet, im Vergleich dazu liegen die anderen Bereiche des Maschinenbaus jeweils bei ca. 4% [Kreis, Bönker, Albers 97].

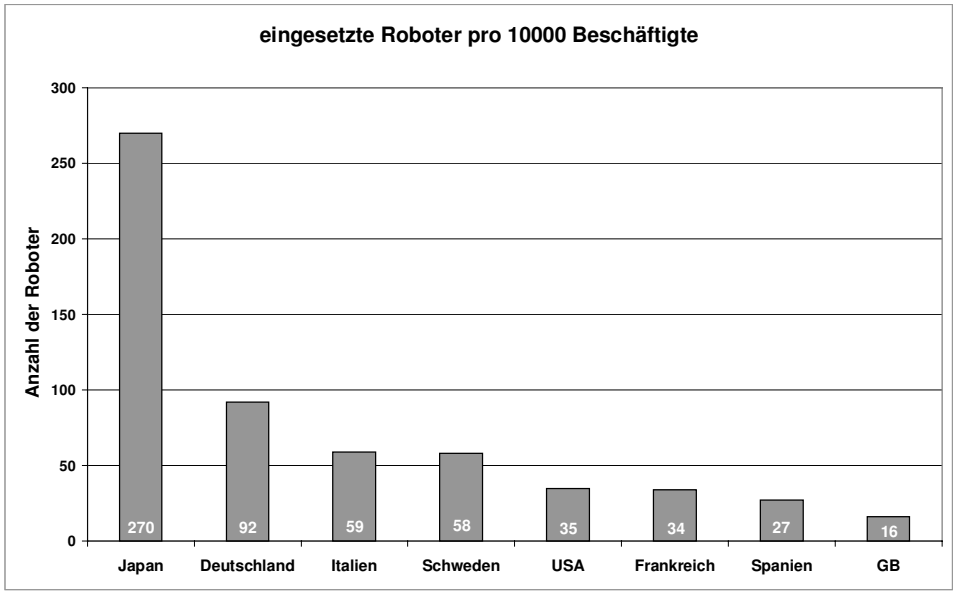


Abbildung 2.2.2 Automatisierungsgrad 1998 in Robotern pro 10000 Beschäftigte.

2.2.2 Einsatz

Der bisher größte Arbeitgeber für Industrieroboter in Deutschland ist die Automobilindustrie mit nahezu 60% aller installierten Einheiten. Davon werden die meisten beim Schweißen und Montieren eingesetzt [Müller, Schweizer 90].

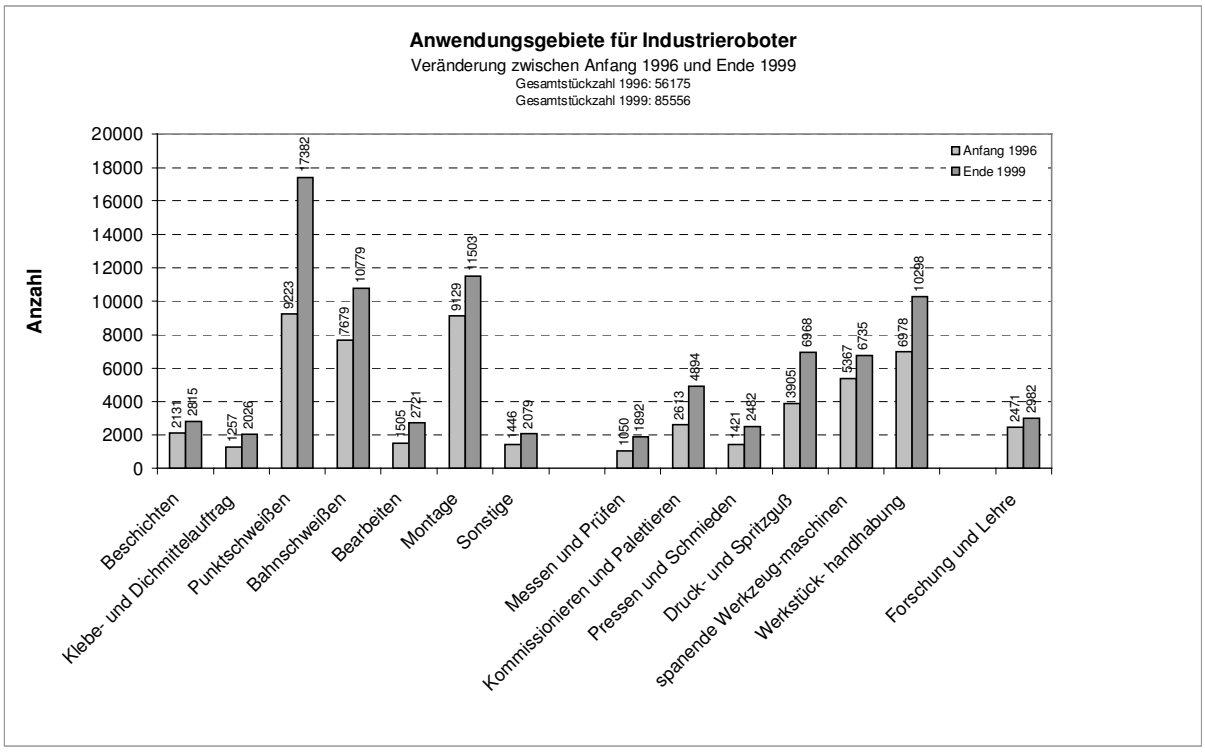


Abbildung 2.2.3 Einsatzgebiete für Industrieroboter in Deutschland zwischen 1996 und 1999.

Betrachtet man den Robotereinsatz genauer, so sind die weiteren Arbeitsgebiete der Roboter Beschichten, Palettieren, Entgraten und Lackieren. Mehrere Roboter können auch in sogenannten Fertigungszellen gemeinsam am selben Werkstück arbeiten. Dabei werden die Roboter nicht nur als Bearbeiter, sondern auch als Transporteure genutzt. Die Veränderungen bei den verschiedenen Einsatzgebieten in Deutschland zeigt

die Abbildung 2.2.3 [Kreis, Bönker, Albers 97; NN 97c; NN 00]. Zwischen den Jahren 1996 und 1999 haben alle Einsatzbereiche merklich zugenommen – den größten Zuwachs mit nahezu 90% verzeichneten die Roboter beim Punktschweißen und beim Palettieren/Kommissionieren. Die Verpackungsindustrie erkennt in zunehmenden Maße die Möglichkeiten für den Einsatz von Industrierobotern. Ein weiterer zunehmender Markt für Roboter ist bei Dienstleistungen und im Service zu erkennen (Tankroboter, Haushaltsroboter, etc.).

In Japan dagegen stellt sich die heutige Verbreitung von Industrierobotern anders dar. Dort werden 50% in der Elektroindustrie, 18% im Automobilbau, 6% in der Kunststoffindustrie, 5% im allgemeinen Maschinenbau, 4% in der Metallverarbeitung, 3% in der Lebensmitteltechnik und 2,5% in anderen Bereichen, wie Meeresforschung, Kerntechnik und Dienstleistungen eingesetzt [NN 97b].

Zu erkennen ist ein immer größer werdender Trend zur Präzision und Geschwindigkeit, z.B. durch den Einsatz in der Elektroindustrie. Leichtbautechniken, neue Werkstoffe, Steuerungen und Geber mit höherer Genauigkeit, exaktere Getriebe und der Einsatz neuer Computertechnologien ermöglichen diesen Fortschritt.

2.3 Bauformen, Arbeitsraum, Antriebe

2.3.1 Bauformen und Arbeitsraum

Anhand der verschiedenen Definitionen aus Kapitel 2.1. wird ersichtlich, daß es demnach viele unterschiedliche Bauformen geben muß. Es sei deshalb an dieser Stelle darauf hingewiesen, daß sich die folgenden Ausführungen auf einen Industrieroboter nach VDI-Richtlinie 2860 beziehen. Nach der dort beschriebenen Definition setzt sich der Arbeitsraum aus der Gesamtheit aller durch die Achsbewegungen erreichbaren Punkte zusammen – ohne den Bereich, den der Roboter selbst darstellt. Der Arbeitsraum wiederum wird durch die Anordnung oder Folge der verschiedenen Achsen und Gelenke festgelegt. Diese Achsen- und Gelenkfolge wird auch als kinematische Kette bezeichnet. Als Kollisionsraum wird der Bereich beschrieben, den der Roboter erreichen kann – einschließlich dem Roboter selbst. Der Unterschied zwischen Arbeits- und Kollisionsraum liegt in der Berücksichtigung des Roboters selbst. Moderne Industrieroboter besitzen hinsichtlich ihrer Achsenkonstruktion zwei Abschnitte: die Haupt- und die Nebenachsen, die auch als Handachsen bezeichnet werden. Mit den Haupt- und Nebenachsen kann der Gesamtarbeitsraum in einen Haupt- und einen Nebenarbeitsraum unterteilt werden (s. Abb. 2.3.1). In der Regel werden drei Haupt- und drei Nebenachsen kombiniert, so entsteht ein Roboter mit sechs möglichen Bewegungseinrichtungen, die als Freiheitsgrade bezeichnet werden. Durch die Anordnung von sechs Achsen kann ein Roboter identische Punkte im Raum über verschiedene Armstellungen erreichen.

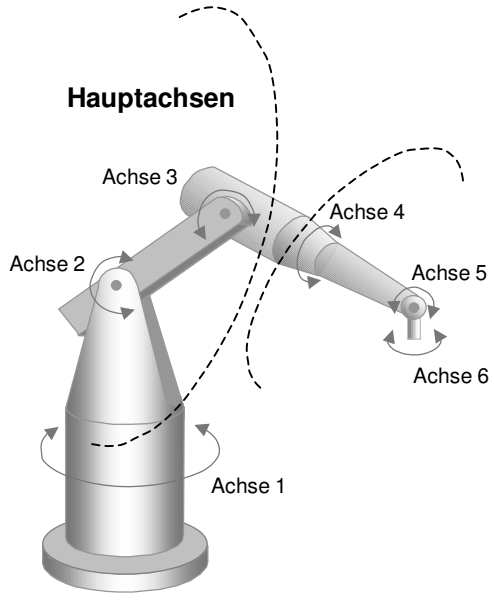


Abbildung 2.3.1 Sechsachsiger Industrieroboter mit drei Haupt- und drei Nebenachsen.

Die Hauptachsen leisten im Arbeitsraum des Roboters eine Positionierung und Vororientierung des Tool Center Point (TCP). Die Nebenachsen bewirken die Einstellung der gewünschten Pose, also der exakten Positionierung und der Orientierung des TCP (s. Abb. 2.3.2). Die Hauptachsen können mit drei translatorischen Achsen ausgebildet sein und beschreiben damit einen kubischen oder kartesischen Arbeitsraum (Bezeichnung auch TTT). Werden drei rotatorische Achsen zum Hauptarbeitsraum verknüpft, so wird ein kugelförmiger Hauptarbeitsraum gebildet (RRR). Ein zylindrischer Hauptarbeitsraum entsteht durch die Aneinanderreihung zweier translatorischer und einer rotatorischen Achse (RTT) [Kahmen 93; Müller, Schweizer 90; Volmer 86].

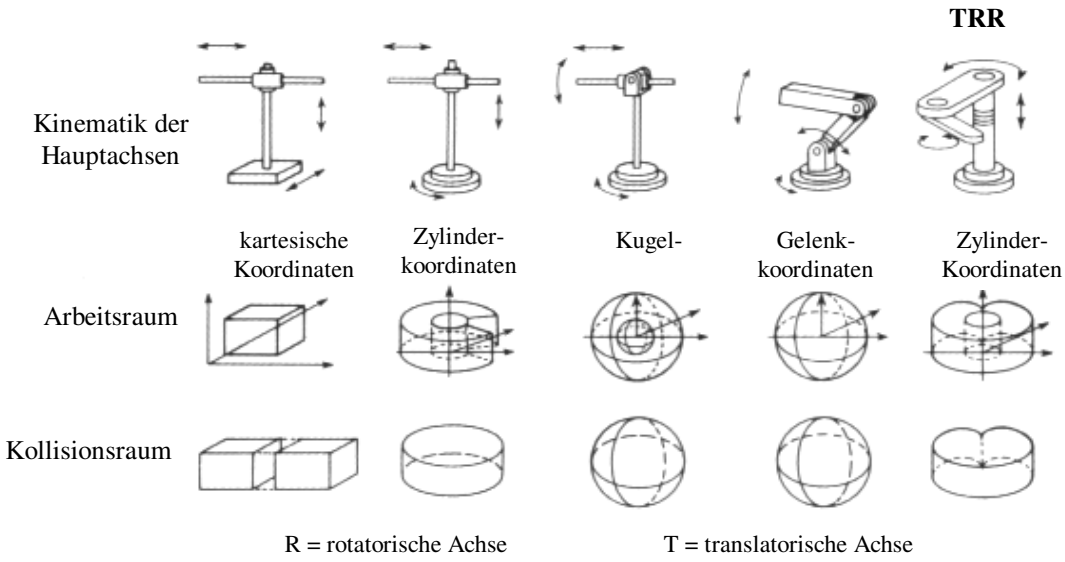


Abbildung 2.3.2 Verschiedene Bauformen bezüglich der Gestaltung der drei Hauptachsen mit ihren charakteristischen Hauptarbeitsräumen [Müller, Schweizer 90].

Die Vor- und Nachteile eines kinematischen Aufbaus mit translatorischen oder rotatorischen Hauptachsen sind nach [Müller, Schweitzer 90] in Tabelle 2.3.1 beschrieben.

Achsentyp	**Vorteil**	**Nachteil**
Rotatorisch	• großer Arbeitsraum, • kleiner Kollisionsraum, • kleine Stellfläche, • Spielfreiheit der Gelenklager, • hohe Arbeitsgeschwindigkeit, • geringer Wartungsaufwand.	• mögliche Achskopplungen, • bei mehr als drei Achsen komplizierte, schwer vorstellbare Systeme für den Programmierer.
translatorisch	• Bewegungen mit kartesischen Raumkoordinaten ohne Koordinatentransformation, • rationelle Baukastenbauweise besser anwendbar, • keine großen Anforderungen an das räumliche Vorstellungsvermögen des Programmierers.	• großer Kollisionsraum, • große Stellfläche, • Abdeckung der Führungsbahnen.

Tabelle 2.3.1 Vor- und Nachteile der unterschiedlichen Roboterachsen.

Eine Vergrößerung des Arbeitsraumes kann durch die Einführung von zusätzlichen Translationsachsen erreicht werden. Diese Achsen können bis zu 25 Meter lang werden und verfahren den ganzen Roboter (s. Abb. 2.3.3). Es ist auch möglich, mehrere Lineareinheiten orthogonal zu verknüpfen und damit den Roboter in den drei Raumrichtungen zu verfahren. Diese Konstellation ermöglicht es, den Roboter mit seinem eigenen Arbeitsraum innerhalb eines Quaders zu verfahren und damit den Aktionsradius wesentlich zu erweitern.

Weiterhin wäre denkbar, auf weiteren Lineareinheiten zusätzliche Roboter zu montieren. Bei anstehenden Roboteruntersuchungen müßten dann aber auch diese Zusatzachsen und die gegenseitigen Einflüsse der Roboter, z.B. durch Massenverlagerungen in diesem gemeinsamen System, mit in die Berechnungen einbezogen werden.

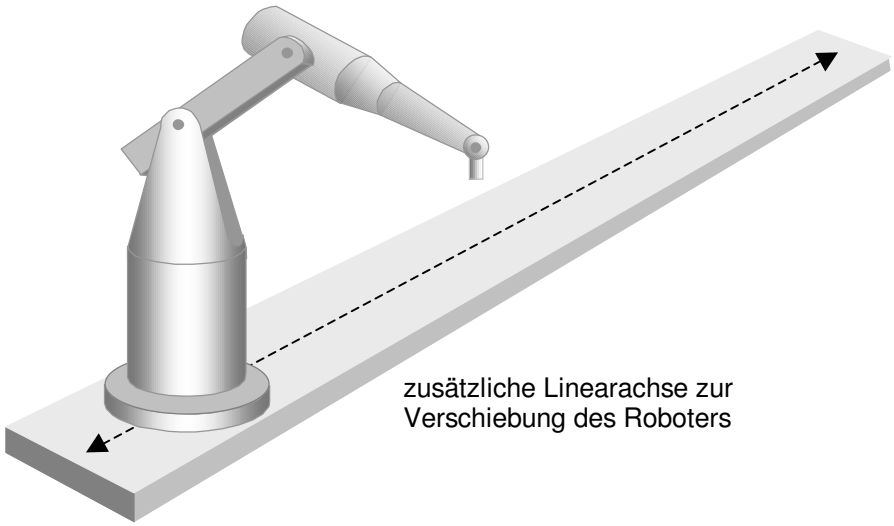


Abbildung 2.3.3 Sechsachsiger Industrieroboter auf einer einfachen Lineareinheit montiert.

Roboter vom SCARA-Typ (Selective Compliance Assembly Robot Arm - Montageroboter mit ausgewählter Nachgiebigkeit) haben dagegen meist nur vier Achsen: drei rotatorische und eine translatorische. Dabei sind die drei rotatorischen Achsen hintereinander parallel angeordnet (s. Abb. 2.3.4), die schiebende Achse bildet hier die erste oder letzte Achse aus und ist im Normalfall in vertikaler Richtung verfahrbar [Schlaich, Kaufmann 90].

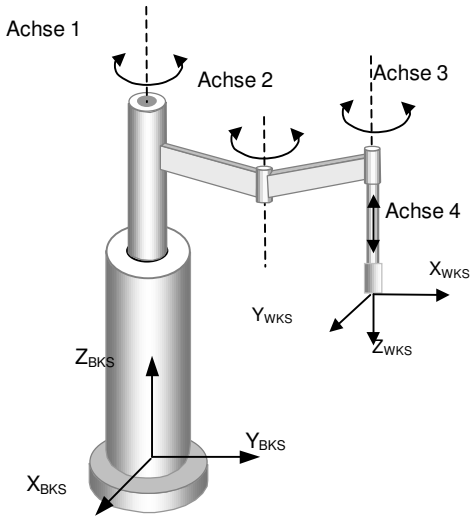


Abbildung 2.3.4 SCARA-Roboter.

2.3.2 Antriebe

Die Antriebe eines Roboters setzen sich aus drei Komponenten zusammen: Motor, Bremse und Getriebe. In den meisten Fällen werden Roboterachsen mit den folgenden möglichen Antrieben ausgestattet:

- **Elektrisch:** bei ca. 50% aller installierten Geräte. Positiv ist die gute Regelbarkeit und die hohe Dynamik. Negativ ist der Einsatz bei explosionsgefährlicher Umgebung (z.B. Lacksprühnebel).
- **Hydraulisch:** bei ca. 30% aller installierten Geräte. Wegen der hohen Kraftübertragung lassen sich auch schwere Lasten bewegen. Nachteilig ist die schlechte Regelbarkeit und damit die geringe Positioniergenauigkeit.
- **Pneumatisch:** bei ca. 20% aller installierten Geräte. Wegen der geringen Positioniergenauigkeit wird diese Antriebsform vor allem bei Pick-and-Place-Jobs eingesetzt.

Dabei ist es nicht notwendig, daß alle Achsen den gleichen Antrieb haben. Manche Achsen haben zusätzlich zum elektrischen Antrieb eine hydraulische Unterstützung, damit auch Bewegungen mit schweren Traglasten möglich sind (z.B. VW G60). Moderne Industrieroboter sind auch mit Elektromotoren in der Lage, schwere Lasten zu bewegen, z.B. Rohbaukarosserien von Fahrzeugen [KUKA Hannover Industrie Messe 1998, VDI-Nachrichten vom 24.04.1998].

Die Bremsen werden benötigt, damit die vom Motor eingeleitete Bewegung beendet werden kann. Die Getriebe setzen in geeigneter Weise die Kräfte und Momente vom Motor auf die Gelenke um. Ausführliche Beschreibungen der möglichen Getriebeformen werden in [Gerstmann 91] und in [Rosenbauer 94] gegeben.

2.4 Roboterprogrammierung - Online / Offline

Im Rahmen rationeller Fertigungsprozesse werden Industrieroboter je nach Anspruch und Aufgabenniveau eingesetzt. Sind sie einmal in ihre Arbeitsabläufe eingewiesen, können sie diese ohne Unterlaß ausführen. Neben Wartungsintervallen können Unterbrechungen durch Justierungen am Roboter oder seiner Umgebung den Fertigungsprozeß einschränken. Die Übertragung von Arbeitsaufgaben zum Roboter kann in zwei Grundvarianten eingeteilt werden: in Online- und Offlineprogrammierung. Die Offline-Programmierung kann über einen Eingabetext oder auch über ein CAD-Programm erfolgen.

Bei der **Online-Programmierung** wird der Roboter in seiner unmittelbaren Arbeitsumgebung angelernt. Das hat zur Folge, daß der Fertigungsprozeß während dieser Zeit angehalten werden muß. Es kann sowohl nach der Teach-In-Methode, als auch nach der Playback-Methode verfahren werden.

- Im ***Teach-In-Verfahren*** wird mit der Handsteuerung jeder einzelne Arbeitschritt genau angefahren und über die Robotersteuerung abgespeichert. Ungenauigkeiten, die der Roboter als kompliziertes Fehlerfortpflanzungsmodell besitzt, fließen in den Lernprozeß mit ein und fallen im so erlernten Arbeitsablauf nicht mehr auf. Anders dagegen spielen Ungenauigkeiten beim Anfahren eines Ziels eine sehr große Rolle – falsche Punkte aus dem Teach-In werden vom Roboter ebenso falsch angefahren.
- Von der ***Playback-Programmierung*** wird gesprochen, wenn sich die Roboterkinematik von den Antrieben entkoppeln läßt und der Roboter von Hand geführt werden kann. So lassen sich alle entscheidenden Punkte erreichen und auch über die Steuerung abspeichern. Ebenso wie beim Teach-In ist zu beachten: die Fehlereinflüsse des Roboters entfallen, aber die Ziele müssen auch hier exakt eingestellt werden.

Die **Offline-Programmierung** findet in der Regel nicht direkt am Roboter statt, sondern an einem anderen Arbeitsplatz und wird bei Bedarf in die Steuerung übertragen. Der Vorteil ist hier, daß der Fertigungsprozeß nicht unterbrochen oder behindert werden muß.

- Mit der ***Text-Offline-Programmierung*** werden dem Roboter die einzelnen Arbeitsschritte über eine bestimmte Programmiersprache vorgegeben. Mit diesem Verfahren können einfache Roboteroperationen sehr schnell erstellt werden. Für aufwendige große Programme und Roboter in einem komplexen Umfeld ist die graphische Offline-Programmierung vorzuziehen. Die Zielpunkteinstellung erfolgt hier über die Eingabe kartesischer oder polarer Koordinaten. Ein Einstellfehler, wie er bei der Online-Programmierung vorkommen kann, stellt sich hier als Programmierfehler dar.

- Bei der ***graphischen Offline-Programmierung*** wird der Roboter mit seiner Umgebung in einem Computer durch ein CAD-Modell abgebildet und darin anschließend die einzelnen Arbeitsschritte simuliert. Die grafische Darstellung während der Programmierung erleichtert die Beurteilung der Arbeitsschritte (s. Abb. 2.4.1). Die meisten Pogramme zur grafischen Offline-Programmierung beinhalten neben der Erstellung der reinen Bewegungsabläufe auch noch weitere Optionen, wie beispielsweise Programme zur Optimierung der Roboterbewegungen hinsichtlich Geschwindigkeit oder Verschleiß [Stryk, Pesch, Bulirsch 93; Kroh 97a; Westkämper, Wietfeld 94]. Erst, wenn die einzelnen Bewegungen optimal sind, werden diese in die Robotersteuerung übertragen. Auch hier stellt sich der Einstellfehler als Programmierfehler dar.

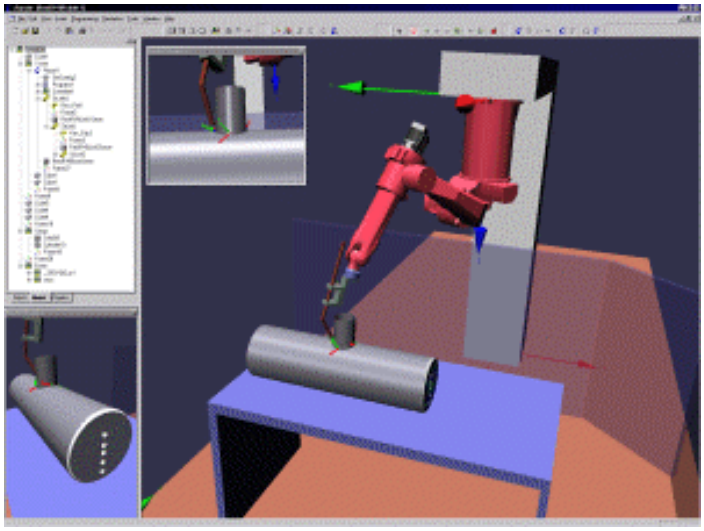


Abbildung 2.4.1 Beispiel einer möglichen CAD-Simulation [CAMELOT 99].

Die Vorkenntnis der genauen Robotergeometrie spielt bei den beiden Online-Verfahren, wie Teach-In und Playback-Programmierung, nur eine untergeordnete Rolle, da hier einzelne Arbeitsschritte direkt eingestellt werden. Anders dagegen bei den Offline-Verfahren mit grafischer oder Text-Programmierung, denn hier wird eine Roboterbewegung rechnerisch über ein mathematisches Modell angefahren. Damit das erstellte Programm auch zu der tatsächlichen Roboterumgebung paßt, müssen sowohl die Robotergeometrie, als auch die Geometrie der Werkzeuge und Werkstücke im CAD abgebildet werden (z.B. Achslängen des Roboterarms, Position von Kabel- und Leitungsführungen am Roboter, Spannvorrichtungen, Drehtische, Transportachsen). Die Kenntnis aller den Arbeitsraum beeinflussenden Merkmale ist hier eine Grundvoraussetzung zur Offline-Programmierung. Fehler in diesen Daten führen nach einer Übertragung in die Robotersteuerung direkt zu Abweichungen in den gewünschten Arbeitschritten. In Abbildung 2.4.2 ist dieser Zusammenhang noch einmal dargestellt.

Trotz der vielen Möglichkeiten, die die Offline-Programmierung mit sich bringt, wird sie noch nicht flächendeckend angewendet. Das liegt daran, daß in den meisten Fällen die Umgebung gar nicht oder unzureichend für das CAD erfaßt ist. Kroh geht von nur ca. 10 % aller installierten Roboteranlagen aus, die mit ihrer Umgebung im CAD abgebildet sind [Kroh 97a]. Die Anwender der Offline-Programmierung schließen jedoch diese Lücke in zunehmendem Maß. Die Automobilbranche ist führend mit einer Quote von 40% Offline-CAD-Programmierungen aller installierter Roboter und möchte diese sogar noch auf 70% im Fahrzeugrohbau steigern.

Leider wird der durch Offline-Programmierung erlangte Zeitvorteil wegen auftretender Poseabweichungen oft durch ein Folge-Teach-In geschmälert. Die für eine Roboterprogrammierung aufgewendete Zeit sollte maximal 25% für eventuelles Folgearbeiten vorsehen, damit hier die eingesparte Zeit nicht wieder wett gemacht wird [Westkämper, Wietfeld 94].

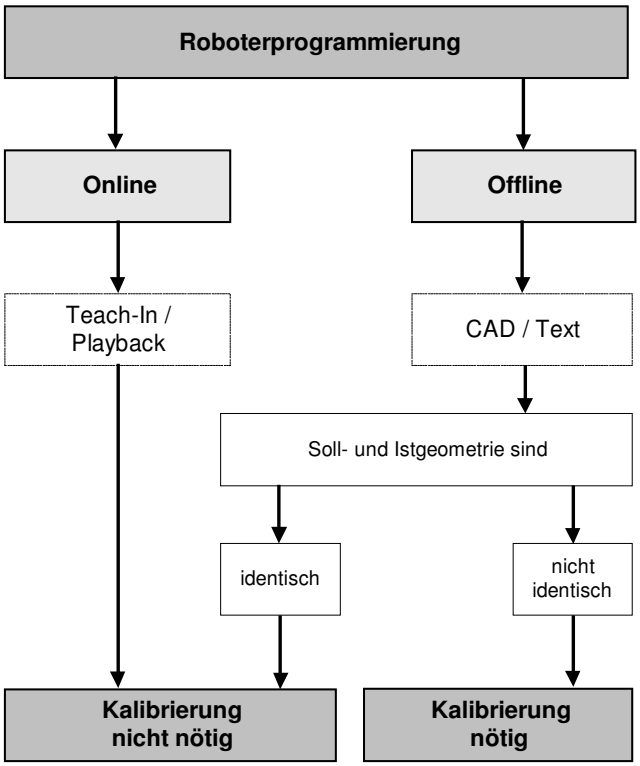


Abbildung 2.4.2 Notwendigkeit einer Roboterkalibrierung.

2.5 Geometrische und andere Roboterfehlerursachen

Beim Roboter als hochkomplexem Gerät können Fehler an unterschiedlichen Stellen auftreten. [Kovac und Frank 91] ordnen sie deshalb drei verschiedenen gedanklichen Ebenen zu. Treten die Fehler auf, bedeutet das für den Roboter: das kinematische Modell stimmt nicht mit dem realen Roboter überein und es kommt bei Offline-Programmen zu Poseabweichungen. Die folgende Beschreibung der Ebenen erläutert die entsprechenden Fehler:

Gelenkebene:

- Getriebefehler können in den Gelenken durch Spiel, Nachgiebigkeit oder Übersetzungsabweichungen auftreten.
- Sensorfehler werden durch Fehler bei der Auflösung wirksam.

Kinematische Ebene:

- Nulllagenfehler entstehen durch Abweichungen zwischen Soll- und Ist-Nullpunkt in den Gelenken.
- Fertigungs- oder Montagefehler sind Längenabweichungen oder Abweichungen der räumlichen Lage der Achsen.

Treten hier bereits Fehler auf, so führt das zu signifikanten Pose- und Bahnabweichungen und damit auch zu Fehlern in der absoluten Positionsgenauigkeit.

Nichtkinematische Ebene:

- Temperaturfehler werden durch interne und/oder externe Wärmequellen verursacht.
- Strukturfehler entstehen durch das Eigengewicht, die Greiferlast oder durch Führungs- und Lagerfehler.
- Je nach Güte der Regelkreise können Regelungsfehler auftreten.
- Ferner können Abweichungen durch Reibung und durch dynamische Fehler wirksam werden.

Diewald gibt für die Ebenen noch den Einfluß der Fehler an:

Ebene	Fehler	Einfluß
Gelenk	Spiel	als stochastisch angenommen
	Übersetzungsschwankungen	systematisch
	Reibung	als stochastisch angenommen
	Nachgiebigkeiten	systematisch
Kinematik	Nulllagenfehler	systematisch
	Fertigungs- und Montagefehler	systematisch
Sonstiges	Externe und interne Wärmequellen	als stochastisch angenommen
	Nachgiebigkeit der Arme	systematisch
	Lastkräfte	systematisch
	Sensorik	als stochastisch angenommen

Tabelle 2.5.1 Ursachen der Posefehler [Diewald 95].

Die Abweichungen in der Gelenkebene entstehen zum Teil während der Fertigung der einzelnen Komponenten und beim Zusammenbau. Einen wesentlichen Einfluß auf die Robotergenauigkeit hat die Auswahl der Getriebeform. In [Gerstmann 91] werden einige typische Getriebeformen vorgestellt und deren Einsatz und Einfluß auf die Genauigkeit bewertet. Zusätzlich werden Verfahren zur Prüfung dieser Getriebe mit folgenden zu bestimmenden Größen beschrieben:

- Nachgiebigkeit als Funktion der Belastung,
- Verdrehspiel und Hysterese,
- kinematischer Verdrehwinkel als Maß für die Übersetzungsabweichung und
- Kennfrequenzen und Dämpfungswerte.

Gerstmann zeigte mit seinen Untersuchungen, daß die Arbeits- und Positionierungsgenauigkeit verbessert werden kann, wenn eine gezielte Auswahl des Getriebes unter Beachtung der einsatzspezifischen Belastungsart und -größe vorgenommen wird.

In der kinematischen Ebene treten als Folge der unverzichtbaren Toleranzketten am fertigen Roboter Maß-, Form- und Lageabweichungen auf, d.h. sowohl die Länge der Roboterglieder als auch deren räumliche Zuordnung weichen vom theoretischen Modell ab. Wird die mathematische Roboterwelt mit ungenügend genauen Parametern beschrieben, kommt es zu Abweichungen mit der realen Roboterumgebung. Selbst geringe Abweichungen in den Parametern können große Wirkung in der Pose zeigen. Solche Unterschiede in der Geometrie können:

1. konstruktionsbedingt sein, wie z.B. durch Achsenspiel oder Fertigungstoleranzen in den Lagern und Gelenken, oder
2. durch äußere mechanische Einwirkungen hervorgerufen werden, wie z.B. durch eine Kollision oder durch Massenveränderungen wegen An- und Umbauten.

In der nichtkinematischen Ebene werden die Umgebungsbedingungen aufgeführt, z.B durch Veränderungen im Raumklima, durch Ölnebel und Staub.

Manche Maßabweichungen können mechanisch kompensiert werden, z.B. durch engere Fertigungstoleranzen, stabilere und steifere Werkstoffe oder mit genaueren Fertigungsmaschinen. Mit diesem Aufwand steigen aber die Herstellungskosten stark an. Ein anderer Weg, die Maßabweichungen zu kompensieren, geschieht rechnerisch, z.B. durch die Bestimmung der tatsächlichen Roboterparameter und die anschließende Übertragung in die Robotersteuerung.

Werden geometrische Abweichungen am Roboter festgestellt, müssen Produktionsunterbrechungen in Kauf genommen werden. Die Dauer solcher Zwangspausen richtet sich nach dem Aufwand der vorzunehmenden Arbeiten:

- Beseitigen aller Abweichungen durch ein anschließendes Teach-In. Dabei sollten nur noch kleine Beträge, im mm-Bereich, korrigiert werden.
- Ersetzen des Roboters durch einen bereits kalibrierten gleichen Typs, oder

- eine Kalibrierung des Roboters vor Ort.

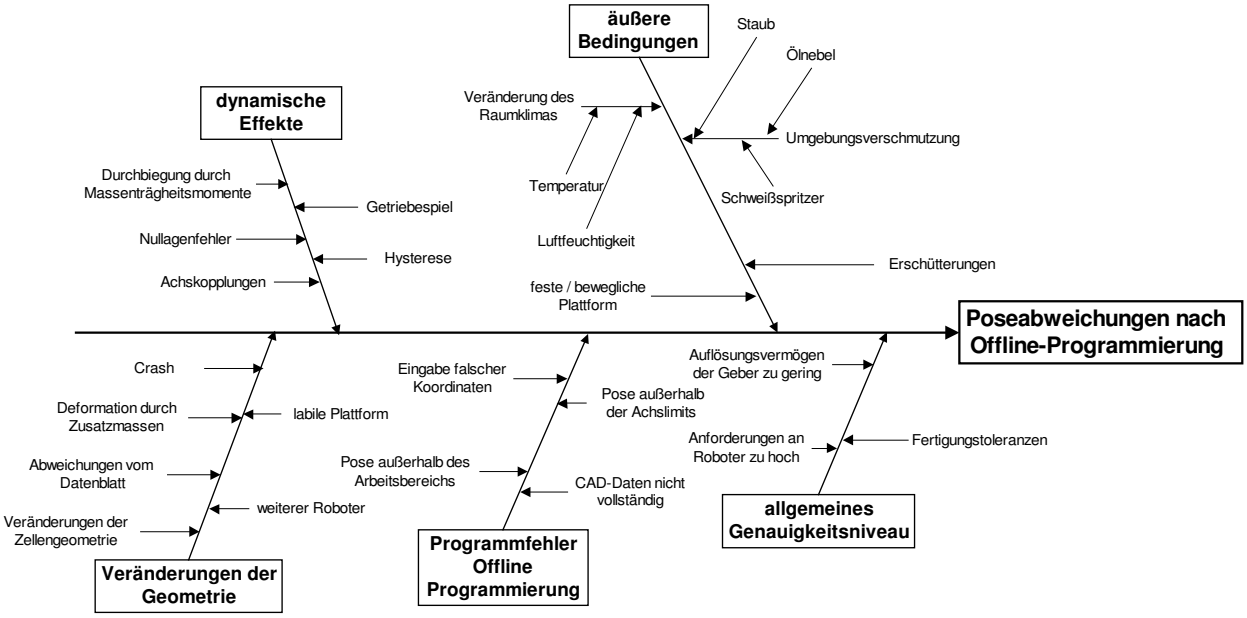


Abbildung 2.5.1 Zusammenfassung der Einflüsse, die zu einer Poseabweichung führen.

Den größten Einfluß auf die Robotergenauigkeit haben die Fehler der kinematischen Ebene mit 90% nach [Renders, Rossignol, Becquet, Hanus 91] und bei [Zhong 95] sogar mit 95%. Die Fehler der nichtkinematischen und der Gelenkebene dagegen spielen dagegen nur eine untergeordnete Rolle. Ihr Einfluß wird mit 5-10% der Robotergenauigkeit angegeben. Allein Achsen- und Getriebespiel verursachen bis zu 8% des gesamten Roboterfehlers, Übertragungsfehler und Totgänge werden mit <1% und Temperaturveränderungen in der Umgebung mit <0.1% angegeben.

In Tabelle 2.5.2 sind diese Zusammenhänge noch einmal zusammengefaßt.

Fehlerebene	**Wirkung auf Robotergenauigkeit**
Gelenk	5-10 %
Kinematik	90-95 %
Sonstiges	< 1 %

Tabelle 2.5.2 Wirkungsanteile der Fehlerebene auf die Robotergenauigkeit.

3 Industrieroboter – beschreiben, messen und prüfen

Zu den typischen Arbeitsbereichen in der Geodäsie ist in den vergangenen Jahren ein weiterer hinzugekommen: Präzisionsvermessungen im Maschinenbau. Die Meßobjekte können hier Anlagen, Maschinen, Roboter oder Förder- und Transportanlagen sein. Eine Vielzahl von Lehrbüchern und Tagungsbänden dokumentieren diese geodätischen Meßaufgaben im Maschinenbau. Beispielhaft seien die folgenden erwähnt: [Henneke, Müller, Werner 92], 26. DVW Seminar 1991 - Geodätische Meßverfahren im Maschinenbau, [Schwarz 95] oder auch die Veranstaltungsreihe „optical 3d measurement techniques“. Ebenso gibt es Tagungen in den verschiedenen Bereichen des Maschinenbaus, in denen bei Meßproblemen auch geodätische Meßverfahren beschrieben werden, z.B. im VDI-Bericht 921, 1991, Industrieroboter - Messen und Prüfen, oder im ESPRIT Project CAR-5220, 1994.

Die geodätischen Meßinstrumente und -verfahren ergänzen sich mit der geometrischen Meßtechnik im Maschinenbau. Die Zusammenarbeit mehrerer Ingenieure unterschiedlicher Ausbildung im interdisziplinären Betätigungsfeld fördert so den Austausch von Meßtechniken und Auswertestrategien untereinander und Synergien können entstehen. Aus diesem breiten Angebot kann das geeignetste Meßmittel für die Meßaufgabe ausgewählt werden. (Abbildung 3.0.1).

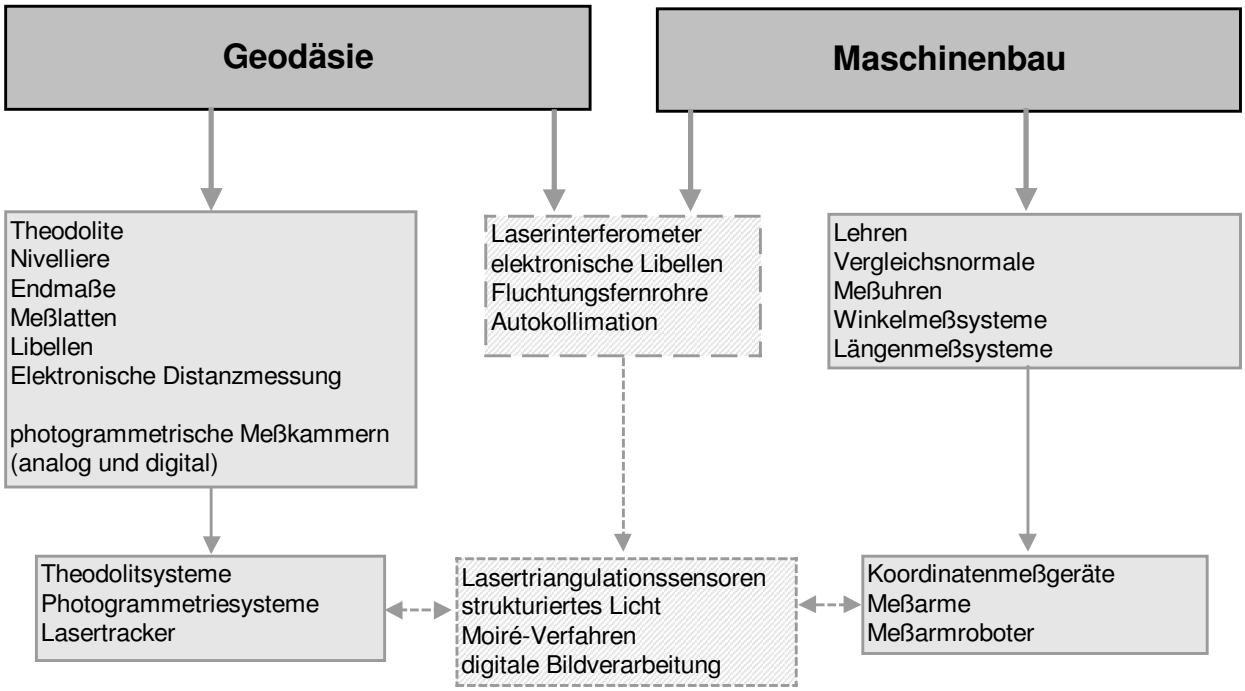


Abbildung 3.0.1 Zusammenspiel und Herkunft verschiedener Meßverfahren und -instrumente aus Geodäsie und Maschinenbau.

Dieses Kapitel behandelt die Meß- und Prüfaufgaben an Robotern. Dazu werden zunächst einige Definitionen gegeben. Der anschließende Abschnitt erläutert die auftretenden Koordinatensysteme. Der dritte Teil beschreibt die kinematische Struktur eines Roboters und wie sie mathematisch formuliert werden kann. Der letzte Abschnitt analysiert, wie ein Roboter zu Meßaufgaben herangezogen und auf welche Art und Weise er vermessen werden kann.

3.1 Definitionen und Kenngrößen

Nach [DIN 1319]gilt:
Messen ist ein experimenteller Vorgang, durch den ein spezieller Wert einer physikalischen Größe als Vielfaches einer Einheit oder eines Bezugswertes ermittelt wird.
Prüfen bedeutet, feststellen, ob der Prüfgegenstand (-körper, Probe, Meßgerät) eine oder mehrere Bedingungen erfüllt, insbesondere, ob vorgegebene Fehlergrenzen eingehalten werden.

In [VDI 2860, Blatt 2] werden verschiedene Untersuchungsgegenstände vorgestellt, die zur Beurteilung physikalischer und geometrischer Eigenschaften von Industrierobotern geeignet sind. Damit ist dem Anwender eine Liste gegeben, nach der er einen Roboter untersuchen und beurteilen kann. Diese Kenngrößen werden in vier Gruppen aufgeteilt:

- geometrische Kenngrößen,
- Belastungskenngrößen,
- kinematische Kenngrößen und
- Genauigkeitskenngrößen.

In jeder dieser Gruppen sind wiederum weitere Unterpunkte zu beschreiben. Die geometrischen Kenngrößen beinhalten die mechanischen Systemgrenzen (Limits), die Raumaufteilung und den Arbeitsbereich (s. Kap. 2.3.1). Bei den Belastungskenngrößen werden die verschiedenen Lastfälle und Momente, also statische und dynamische Belastungen, eingeordnet: z.B. Nennlast, maximale Nutzlast, maximale Last, Nennmoment und Nennmassenträgheitsmoment. Die kinematischen Kenngrößen schließen Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Überschwingverhalten, Ausschwingzeiten, Verfahrzeiten und Zykluszeiten mit ein. Die verschiedenen Genauigkeiten werden unter den Genauigkeitskenngrößen zusammengefaßt, also z.B. Wiederholgenauigkeiten hinsichtlich einer definierten Pose, einer vorgegebenen Bahn oder einer allgemeinen Grundgenauigkeit.

3.2 Koordinatensysteme

Im Umgang mit Industrierobotern werden verschiedene Koordinatensysteme eingeführt (s. Abb. 3.2.1 und 3.2.2):

- Jeder Roboterachse liegt ein eigenes kartesisches ***Achskoordinatensystem*** (AKS) zugrunde. Dabei wird um die z-Achse rotiert oder entlang der z-Achse verschoben. Die x-Achse zeigt zu einer Nullstellung des Winkel- oder Wegmeßsystems und die y-Achse ergänzt zum Rechtssystem.
- Das ***Bezugskoordinatensystem*** (BKS) definiert den Koordinatenursprung des Roboters. Im BKS sind alle Achskoordinatensysteme zusammengefaßt. Bei vielen Industrierobotern beschreibt die Bodenplatte die $(xy)_{BKS}$-Ebene mit $z_{BKS}=0$. Die z_{BKS}-Achse verläuft parallel zur ersten vertikalen Roboterachse (vergleichbar mit der Stehachse eines Theodolits). Die zweite Roboterachse (vergleichbar mit der Kippachse eines Theodolits) ist dann parallel zur x_{BKS}- oder zur y_{BKS}-Achse; die verbleibende dritte Koordinatenachse ergänzt schließlich zum Rechtssystem.
- Im ***Werkzeugkoordinatensystem*** (WKS) wird die Geometrie eines bestimmten Objekts (Werkzeugs) angegeben. Der Ursprung und die Orientierung sind oft durch eine Montagevorrichtung am Roboter festgelegt. Die Werkzeuge können Schweißzangen, -pistolen, Greifer, Flansche oder andere Gegen-stände sein.
- Das ***Meßkoordinatensystem*** (MKS) wird durch das eingesetzte Meßinstrumentarium bestimmt, läßt sich in der Regel hinsichtlich Lage und Orientierung frei wählen. Im MKS werden zunächst alle Punkte einer Robotervermessung angegeben.
- Das ***Objektkoordinatensystem*** (OKS) ist dem Objekt zugeordnet, das der Roboter bearbeitet. Das Objekt bringt also sein eigenes Koordinatensystem zum Roboter mit (z.B. Fahrzeugkoordinatensystem im Automobilbau).
- Das ***Zellenkoordinatensystem*** (ZKS) beschreibt die Zuordnung mehrerer Werkzeuge und Roboter innerhalb einer abgeschlossenen Produktionszelle.

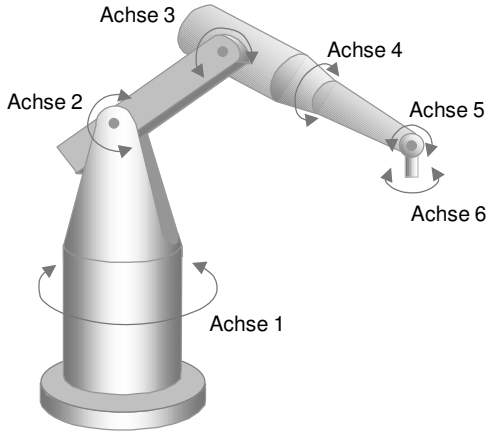


Abbildung 3.2.1 Sechsachsiger Industrieroboter mit seinen sechs Achskoordinatensystemen.

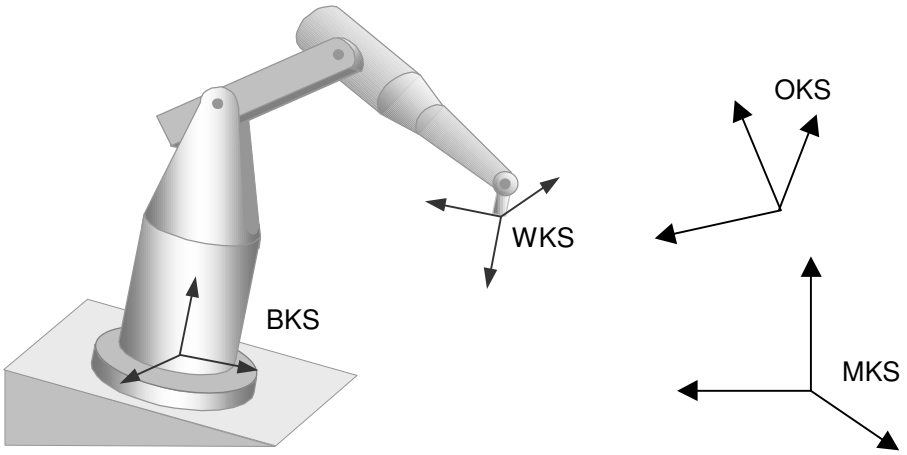


Abbildung 3.2.2 Sechsachsiger Industrieroboter mit verschiedenen kartesischen Koordinatensystemen.

3.3 Die kinematische Kette

Die Folge aller Roboterachsen wird auch als kinematische Kette bezeichnet. Die individuelle Geometrie eines Roboters wird durch die unterschiedlichen Längen der einzelnen Achsen und deren räumlicher Lage zueinander festgelegt. Dabei können rotatorische und translatorische Achsen in willkürlicher Folge aneinandergereiht werden. Der Standardfall bleibt im allgemeinen eine kinematische Kette mit fünf oder sechs Drehachsen. Sind die räumlichen Achszuordnungen und die Achslängen bekannt, kann vom Achskoordinatensystem der einen in das der folgenden Achse gerechnet werden. Dazu eignen sich Koordinatentransformationen. Beginnt man damit in einem Ausgangskoordinatensystem, z.B. im BKS des Roboters, können diese Koordinaten bis in ein Endkoordinatensystem übertragen werden, z.B. in das WKS. Kurzum: jede Position des Werkzeugs kann somit im BKS des Roboters angegeben werden.

Je nach Richtung der Berechnung wird zwischen Vorwärts- und Rückwärtsrechnung unterschieden. Bei der Vorwärtsrechnung werden mit gegebenen Gelenkeinstellungen die Position und die Orientierung eines Werkzeugs im Raum berechnet. Bei der Rückwärtsrechnung werden aus der Lage eines Punktes im Raum alle dafür notwendigen Gelenkeinstellungen berechnet. Da ein Punkt im Raum bei einem sechsachsigen Gelenkarmroboter mit verschiedenen Gelenkeinstellungen erreicht werden kann, ist dieser Schritt mehrdeutig. Hier

muß gegebenenfalls eine Roboterstellung unter anderen ebenso möglichen ausgewählt werden. Die Auswahlkriterien für eine spezielle Gelenkeinstellung zu einer Pose richten sich dabei nach der auszuführenden Gesamtbewegung und den Anwendungszielen hinsichtlich Zeitoptimierung, Verschleiß oder anderer äußerer Umstände [Stryk, Pesch, Bulirsch 93].

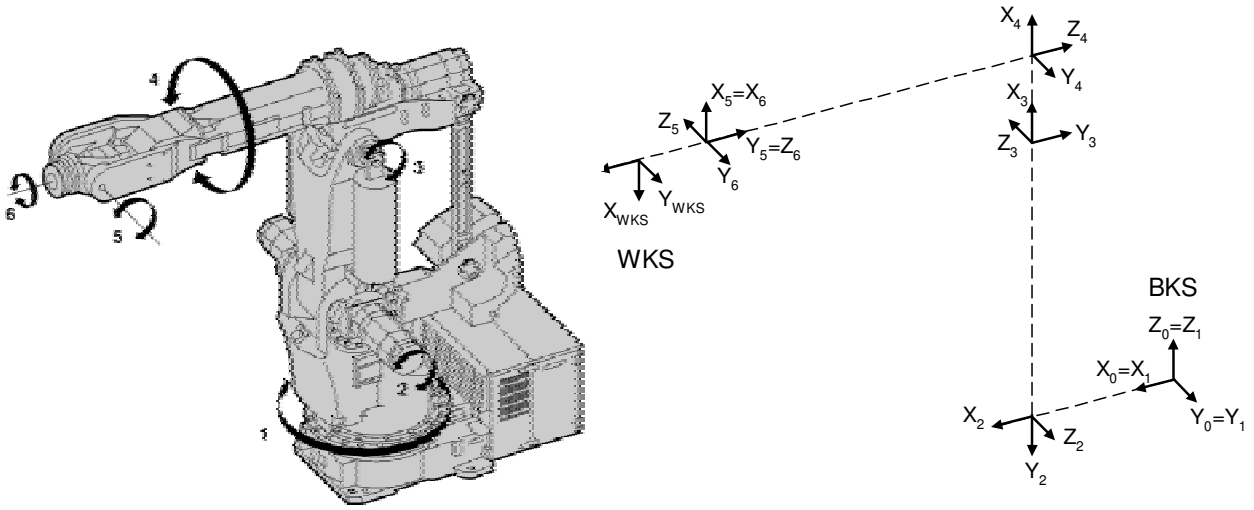


Abbildung 3.3.1 Industrieroboter GMF S420-F und seine kinematische Kette.

Jedem Gelenk wird ein räumliches Koordinatensystem zugeordnet, das die Grundlage für den Übergang von einem zum nächsten Gelenk darstellt. Durch schrittweise Rechengänge, beginnend beim BKS, können Transformationen bis in das WKS gerechnet werden.

3.3.1 Übergänge zwischen den Koordinatensystemen der kinematischen Kette

Zwischen den Koordinatensystemen der kinematischen Kette können Übergänge gerechnet werden. Dazu eignen sich Koordinatentransformationen. In den folgenden Abschnitten werden drei verschiedenen Verfahren ausführlich beschrieben:

1. die dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation (3D-Transformation),
2. das Verfahren von Denavit und Hartenberg (DH-Verfahren), und
3. die Vereinbarung von Hayati und Mirmirani (HM-Vereinbarung).

Abschließend werden noch zwei weitere Verfahren erwähnt und schließlich die aufgeführten Verfahren in einer Tabelle gegenübergestellt.

3.3.2 Dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation

Eine Transformation zwischen zwei aufeinander folgenden Koordinatensystemen kann mit einer dreidimensionalen Ähnlichkeitstransformation mit sieben Parametern durchgeführt werden: drei Rotationen um die drei Koordinatenachsen und drei Translationen entlang der drei Koordinatenachsen (s. Abb. 3.3.2); der siebente Parameter ist ein gemeinsamer Maßstab (eine ausführliche Beschreibung zur dreidimensionalen Ähnlichkeitstransformation ist z.B. in [Schmid, Heggli 78] gegeben). Die Gleichung dazu lautet

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{t} + m \cdot \mathbf{R} \cdot \mathbf{p}_{i+1}. \qquad (3\text{-}1)$$

Die Vektoren $\mathbf{p}_i$ und $\mathbf{p}_{i+1}$ stellen die Koordinatentripel des Quellsystems S_i und des Zielsystems S_{i+1} dar, $\mathbf{t} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)^T$ den Translationsvektor und $\mathbf{R}$ die kombinierte Rotationsmatrix aus der Matrizenmultiplikation der drei orthogonalen Drehmatrizen:

$$\mathbf{R}_x(\omega)=\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\omega & -\sin\omega\\ 0 & \sin\omega & \cos\omega\end{bmatrix},\ \mathbf{R}_y(\varphi)=\begin{bmatrix}\cos\varphi & 0 & \sin\varphi\\ 0 & 1 & 0\\ -\sin\varphi & 0 & \cos\varphi\end{bmatrix},\ \mathbf{R}_z(\kappa)=\begin{bmatrix}\cos\kappa & -\sin\kappa & 0\\ \sin\kappa & \cos\kappa & 0\\ 0 & 0 & 1\end{bmatrix} \tag{3-2}$$

Dabei ist $\mathbf{R}_x(\omega)$ die Rotation mit dem Winkel ω um die x-Achse, $\mathbf{R}_y(\varphi)$ und $\mathbf{R}_z(\kappa)$ sind entsprechend die Rotationen um die y- und die z-Achse mit den Winkeln φ und κ. Nach der Matrizenmultiplikation der drei Rotationsmatrizen erhält man $\mathbf{R} = \mathbf{R}_z(\kappa)\cdot\mathbf{R}_y(\varphi)\cdot\mathbf{R}_x(\omega)$, oder

$$\mathbf{R}=\begin{bmatrix}\cos\varphi\cos\kappa & \sin\omega\sin\varphi\cos\kappa-\cos\omega\sin\kappa & \cos\omega\sin\varphi\cos\kappa+\sin\omega\sin\kappa\\ \cos\varphi\sin\kappa & \sin\omega\sin\varphi\sin\kappa+\cos\omega\cos\kappa & \cos\omega\sin\varphi\sin\kappa-\sin\omega\cos\kappa\\ -\sin\varphi & \sin\omega\cos\varphi & \cos\omega\ \cos\varphi\end{bmatrix}. \tag{3-3}$$

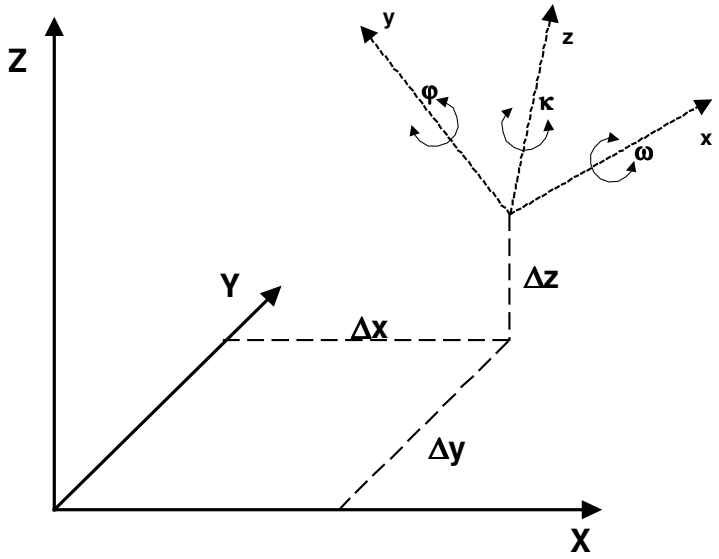


Abbildung 3.3.2 Koordinatensysteme und Parameter bei einer dreidimensionalen Koordinatentransformation.

Werden alle Transformationen zwischen den Gelenken zu einer Gesamttransformation zusammengesetzt, so erhält man die allgemeine mathematische Formel

$$\mathbf{p}_A = \mathbf{t}_1 + m_1\cdot\mathbf{R}_1\cdot\left[\mathbf{t}_2 + m_2\cdot\mathbf{R}_2\left[\cdots\left[\mathbf{t}_n + m_n\cdot\mathbf{R}_n\left[\mathbf{p}_E\right]\right]\cdots\right]\right] \tag{3-4}$$

zwischen Anfang und Ende der kinematischen Kette eines Industrieroboters (s. Abb. 3.3.1). Liegen keine Maßstabsunterschiede zwischen den Koordinatensystemen vor, d.h. der Maßstab des übergeordneten Systems ist mit allen anderen identisch *m = 1*, so vereinfacht sich obige Formel zu

$$\mathbf{p}_A = \mathbf{t}_1 + \mathbf{R}_1\cdot\left[\mathbf{t}_2 + \mathbf{R}_2\cdot\left[\cdots\left[\mathbf{t}_n + \mathbf{R}_n\cdot\left[\mathbf{p}_E\right]\right]\cdots\right]\right]\ . \tag{3-5}$$

3.3.3 Das Denavit-Hartenberg-Verfahren

Die kinematische Struktur eines Industrieroboters kann mit den Regeln von Denavit und Hartenberg (DH-Regeln) abgebildet werden [Denavit/Hartenberg 55]. Für einen Übergang von einem Gelenksystem zum nächsten wird dabei folgendermaßen vorgegangen:

1. Die z-Achse eines Systems S_i ist durch die Bewegungsachse eines Gelenkes festgelegt. Ihre Richtung entspricht der positiven Bewegungsrichtung.
2. Die x_{i+1}-Achse des Systems S_{i+1} wird durch das gemeinsame Lot der z_{i+1}-Achse und der z_i-Achse des Systems S_i definiert.
3. Die y-Achse ergänzt zum Rechtssystem.

Auch beim DH-Verfahren wird der Maßstab zwischen den Gelenken mit $m = 1$ festgelegt. Damit ergibt sich auch hier eine 6-Parametertransformation. Der wesentliche Unterschied zur dreidimensionalen Ähnlichkeitstransformation sind die folgenden Vereinbarungen: die Rotation um die y-Achse und die Translation entlang der y-Achse werden gleich Null angesetzt. Damit wird die Rotationsmatrix $\mathbf{R}_y$ um die y-Achse zur Einheitsmatrix: $\mathbf{R}_y=\mathbf{I}$. So wird mit nur zwei Rotationen und zwei Translationen eine Transformation gerechnet. Ein System S_i läßt sich folgendermaßen in ein System S_{i+1} überführen (s. Abb. 3.3.3):

1. Eine Translation um die Strecke k_i entlang der z_i-Achse bis zum gemeinsamen Lot der z_i- und der z_{i+1}-Achse,
2. eine Rotation um die z_i-Achse mit dem Winkel ϑ_i, bis die x_i-Richtung mit dem gemeinsamen Lot zusammenfällt,
3. eine Translation entlang dem gemeinsamen Lot um die Strecke l_i, bis zum Ursprung des Systems S_{i+1},
4. eine Rotation um die x_{i+1}-Achse mit dem Winkel α_i, bis die z_i-Achse in die Richtung der z_{i+1}-Achse zeigt.

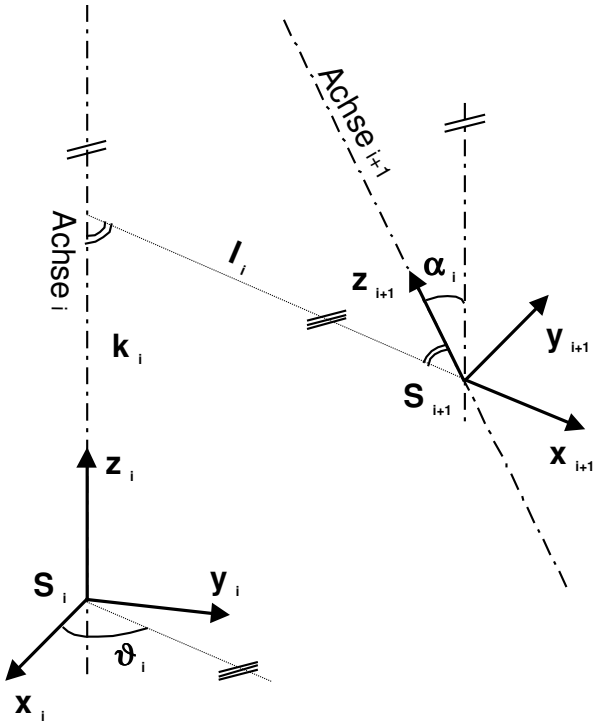


Abbildung 3.3.3 Koordinatensysteme und Parameter bei einem DH-Übergang von einem System S_{i+1} in das System S_i.

Die Transformation des Punktes $\mathbf{p}_{i+1}= (x_{i+1}, y_{i+1}, z_{i+1})^T$ vom System S_{i+1} in das System S_i lautet

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{R}_z(\vartheta_i)\cdot\left[\begin{pmatrix} l_i \\ 0 \\ k_i \end{pmatrix} + \mathbf{R}_x(\alpha_i)\cdot\mathbf{p}_{i+1}\right], \tag{3-6}$$

mit den beiden Drehmatrizen

$$\mathbf{R}_x(\alpha_i)=\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \\ 0 & \sin\alpha_i & \cos\alpha_i \end{bmatrix},\ \mathbf{R}_z(\vartheta_i)=\begin{bmatrix} \cos\vartheta_i & -\sin\vartheta_i & 0 \\ \sin\vartheta_i & \cos\vartheta_i & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \tag{3-7}$$

Die Bewegungen des Roboters werden durch Gelenkvariablen beschrieben. Im Falle eines Drehgelenks kommt zur ersten Rotation um den konstanten Wert ϑ noch der jeweilige Betrag d der Achsdrehung um die z-Achse hinzu. Bei Schubgelenken wird der aktuelle Verschiebungsbetrag h noch zum konstanten Wert k addiert. Dabei wird die Gleichung (3-6) um die Gelenkvariablen d und h erweitert und lautet

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{R}_z(\vartheta_i + d_i) \cdot \left[\begin{pmatrix} l_i \\ 0 \\ k_i + h_i \end{pmatrix} + \mathbf{R}_x(\alpha_i) \cdot \mathbf{p}_{i+1} \right] . \tag{3-8}$$

Zählt man den Übergang vom BKS in das System der ersten Achse bei einem Roboter mit n Gelenken mit, so sind n+1 Transformationen nötig, um in das WKS zu gelangen. Die DH-Parameter und ihre Gelenkvariablen werden für einen Roboter mit n Gelenken zusammengefaßt:

$\delta_i = \vartheta_i + d_i$ und $\eta_i = k_i + h_i$.

Da der erste DH-Übergang die Transformation vom BKS in das System der ersten Achse beschreibt, treten hier keine Gelenkvariablen auf, denn das BKS stellt kein bewegliches Gelenk dar. Dieser Übergang bleibt frei vom Einfluß einer Gelenkvariablen, also $\delta_0 = \vartheta_0$ und $\eta_0 = k_0$. Da ein Gelenk entweder translatorisch oder rotatorisch arbeitet, kann jeweils nur eine Gelenkvariable wirksam werden. Die andere Gelenkvariable wird dann gleich Null gesetzt. Mit den obigen Gleichungen erhält man die allgemeine Form

$$\mathbf{p}_{BKS} = \mathbf{R}_z(\delta_0) \cdot \left[\begin{pmatrix} l_0 \\ 0 \\ \eta_0 \end{pmatrix} + \mathbf{R}_x(\alpha_0) \cdot \mathbf{R}_z(\delta_1) \cdot \left[\begin{pmatrix} l_1 \\ 0 \\ \eta_1 \end{pmatrix} + \mathbf{R}_x(\alpha_1) \cdot \mathbf{R}_z(\delta_2) \cdot [\ldots + \mathbf{R}_x(\alpha_n) \cdot \mathbf{p}_{WKS}] \ldots \right] \right] \tag{3-9}$$

für n+1 nacheinander auszuführende DH-Übergänge.

3.3.4 Ansatz nach Hayati und Mirmirani für parallele Achsen

Ein Sonderfall tritt bei der DH-Parametrierung ein, wenn zwei direkt aufeinander folgende Achsen parallel sind. Dann sind die z_i- und die z_{i+1}-Achse der beiden Achskoordinatensysteme parallel, und das gemeinsame Lot kann an jedem Punkt auf den Achsen gefällt werden[1]. Der sonst zum gemeinsamen Lot auftretende Verschiebungsbetrag entfällt in diesem Fall, und es gilt dann $k_i = 0$ (s. Abb. 3.3.4). Das DH-Modell löst diesen Fall nicht vollständig, da die Bedingung der Parallelität nicht überprüft und die Abweichung von der Parallelität nicht bestimmt werden kann. Deswegen führen Hayati und Mirmirani [Hayati, Mirmirani 85] an diesen Stellen der kinematischen Kette einen zusätzlichen Parameter ein, eine Rotation mit dem Winkel β_i um die y_i-Achse. Dies wird als HM-Vereinbarung bezeichnet. Auch hier werden die sechs Parameter einer dreidimensionalen Ähnlichkeitstransformation auf geschickte Weise auf vier zu bestimmende Parameter reduziert.
Die Gleichung (3-6) wird demnach zu

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{R}_z(\delta_i) \cdot \left[\begin{pmatrix} l_i \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} + \mathbf{R}_x(\alpha_i) \cdot \mathbf{R}_y(\beta_i) \cdot \mathbf{p}_{i+1} \right] \tag{3-10}$$

mit der orthogonalen Drehmatrix

$$\mathbf{R}_y(\beta) = \begin{bmatrix} \cos\beta & 0 & \sin\beta \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin\beta & 0 & \cos\beta \end{bmatrix} . \tag{3-11}$$

Die Transformationen zwischen den anderen Achsen erfolgen nach dem ursprünglichen DH-Modell.

[1] Eine sehr kleine Winkelabweichung von der Parallelität kann bei der Berechnung dazu führen, daß das gemeinsame Lot zwischen zwei aufeinander folgenden Achsen erst in einigen hundert Metern Entfernung gefällt wird. Diese Werte sind dann sicher nicht richtig und kommen ausschließlich durch die Numerik in der Berechnung zustande.

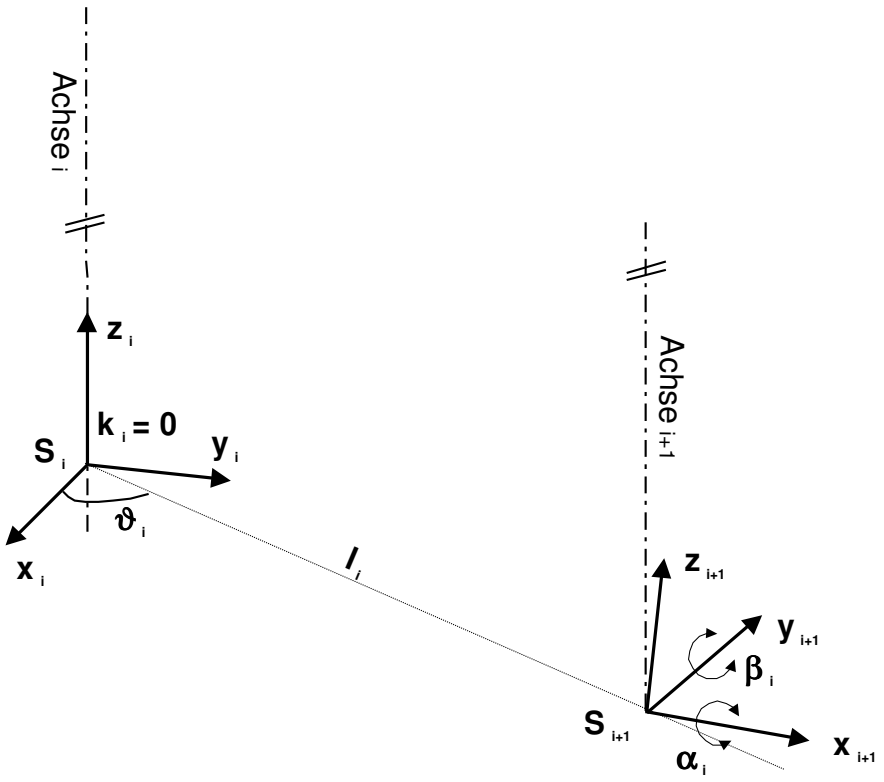


Abbildung 3.3.4 Koordinatensysteme und Parameter nach der HM-Vereinbarung.

3.3.5 Weitere Ansätze

Im folgenden Lösungsvorschlag von [Veitschegger, Wu 85] und [Hsu, Everett 85] werden die Ansätze von Denavit und Hartenberg mit denen von Hayati und Mirmirani zusammengefaßt. Es wird eine Form mit fünf Parametern zu

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{R}_z(\delta_i) \cdot \left[\begin{pmatrix} l_i \\ 0 \\ \eta_i \end{pmatrix} + \mathbf{R}_x(\alpha_i) \cdot \mathbf{R}_y(\beta_i) \cdot \mathbf{p}_{i+1} \right] \tag{3-12}$$

für einen Übergang vom System S_{i+1} nach S_i gebildet. Damit sollen eventuell auftretende parallele Achsen zwischen zwei folgenden Gelenken immer berücksichtigt werden.

Im Ansatz von Stone [Stone 87] wird die Zahl der Geometrieparameter auf sechs erhöht:

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{R}_z(\delta_i) \cdot \left[\begin{pmatrix} l_i \\ 0 \\ \eta_i \end{pmatrix} + \mathbf{R}_x(\alpha_i) \cdot \mathbf{R}_z(\gamma_i) \cdot \left[\begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ b_i \end{pmatrix} + \mathbf{p}_{i+1} \right] \right]. \tag{3-13}$$

Die Erweiterungen des DH-Modells um eine Rotation γ_i und um eine Translation b_i entlang der z_{i+1}- Achse sollen die Roboterkinematik noch besser beschreiben. Damit ist dieser Weg wie eine 3D-Transformation mit anderen Parametern, wobei die beiden Parameter γ_i und b_i nur noch kleine Korrekturbeträge aufnehmen (s. Abb. 3.3.5).

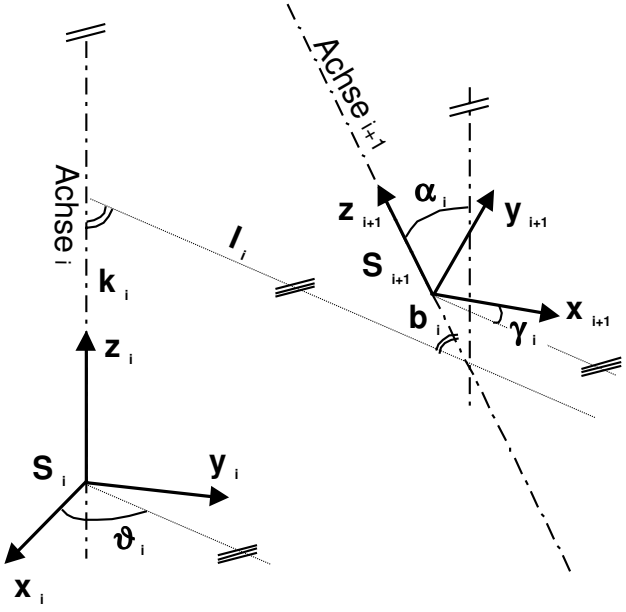


Abbildung 3.3.5 Koordinatensysteme und Parameter nach Stone.

Diese beiden Modelle sind hier nur zur Ergänzung erwähnt. Auf sie wird im folgenden nicht weiter eingegangen.

Die nachstehende Tabelle verdeutlicht mit dem Symbol ☺ abschließend, welche Parameter bei den verschiedenen Modellen zu bestimmen sind.

Verfahren	Anzahl der Parameter	Translationen entlang			Rotationen um		
		x	y	z	x	y	z
3D-Transformation	**6**	☺	☺	☺	☺	☺	☺
Denavit-Hartenberg	**4**	☺		☺*)	☺		☺◆)
Hayati-Mirmirani	**4**	☺			☺	☺	☺
Veitschegger-Wu	**5**	☺		☺	☺	☺	☺
Stone	**6**	☺		☺*)☺ 1)	☺		☺◆)☺ 1)

1) Die z-Parameter werden an unterschiedlichen Stellen in der Transformationsfolge bestimmt. Jeweils einer der z-Parameter ist mit dem des DH-Verfahrens gleich (*),(◆).

Tabelle 3.3.1 In den Verfahren zu bestimmende Parameter.

3.4 Industrieroboter – Messen und Prüfen

In einem ersten Teil wird der Einsatz von Robotern zu Meß- und Prüfzwecken beschrieben. In einem weiteren Abschnitt werden Verfahren und Meßgeräte zum Prüfen von Robotern vorgestellt.

3.4.1 Meß- und Prüfroboter

Ein einfacher Theodolit kann auch als Manipulator betrachtet werden: die Veränderungen durch Drehungen um die Steh- und Kippachse sind nur von Hand ausführbar, die Zielachse ist eine optische Achse. Geht man nun eine Entwicklungsstufe weiter, ist der Theodolit mit Servomotoren ausgestattet, d.h. seine Achsen sind nun motorisch steuerbar. Mit seinem elektrischen Antrieb besitzt er eine gute Antriebsart, da im allgemeinen nur kleine Kräfte und damit kleine Momente auftreten. Ferner wird eine hohe Positioniergenauigkeit ver-

langt, und die einfachen Bauteile gewährleisten eine exakte und nahezu verzögerungsfreie Reaktion. Diese Ausführung ist so einem Roboter schon sehr ähnlich. Kahmen wählte dafür die Bezeichnung *Meßroboter* [Kahmen 93].

Wird die Roboterkinematik auf den Theodolit übertragen, bedeutet das, die beiden Drehachsen der Ablesekreise (Steh- und Kippachse) stehen zueinander senkrecht, und schneiden sich mit der dritten Achse (Zielachse) in einem Punkt (s. Abb. 3.4.1).

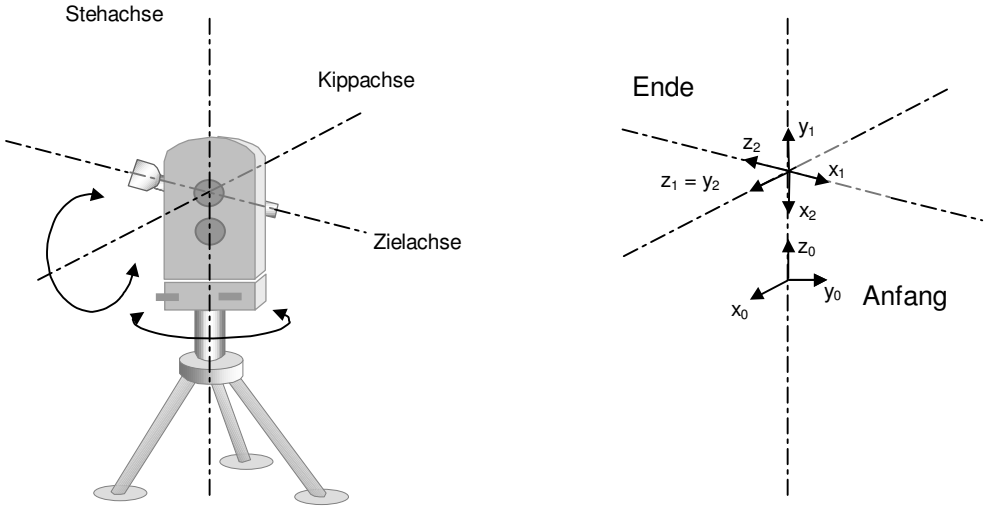


Abbildung 3.4.1: Theodolit mit seinen Achsen und seiner kinematischen Struktur.

Für den Fall der DH-Regeln wird die Gleichung (3-6) auf einen Theodolit übertragen und man erhält mit

$$\mathbf{p}_{Anfang} = \mathbf{R}_{\delta_0} \cdot \left[\mathbf{t}_0 + \mathbf{R}_{\alpha_0}\mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \left[\mathbf{t}_1 + \mathbf{R}_{\alpha_1}\mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \mathbf{R}_{\alpha_2} \cdot \mathbf{p}_{Ende}\right]\right]\right] \tag{3-14}$$

eine entsprechende Formulierung[2]. Damit können nun die geometrischen Größen, wie z.B. die Achslängen oder die Rechtwinkligkeit der Achsen zueinander, bestimmt werden.

Als Beispiel für einen komplexen, motorischen, sechsachsigen Gelenkarmroboter, der sich durch seine hohe Genauigkeit auszeichnet, kann der µKROS 316 (s. Abb. 3.4.2a) [Eusemann 94; Keferstein, Frick 91] genannt werden. Er erreicht eine absolute Positioniergenauigkeit von 40µm. Die Gelenkarmroboter erreichen diese hohe Positioniergenauigkeit üblicherweise nicht. SCARA-Roboter dagegen gelangen sogar in Genauigkeitsbereiche um 25µm.

Weitere Beispiele für Meßroboter wären:

- die handgeführten Meßarme der Firmen Faro (*Bronze* und *Silver Series*) [Faro 96], Romer (*System 6*) [Romer 96] und Zettmess [Zettmess 98], mit Wiederholgenauigkeiten im zehntelmillimeter Bereich (s. Abb. 3.4.2b),
- das handgeführte *anthropoidische Meßgerät AMG-1* [Kovacs 92; Kovacs, Frank 98] mit einer Wiederholgenauigkeit von wenigen hundertstel Millimetern,
- das handgeführte Gelenkarmmeßgerät *ScanMax* von Zeiss, mit einer Wiederholgenauigkeit weniger µ-Meter [Lotze 96] (s. Abb. 3.4.2c).

[2] Die Gelenkvariablen beim dritten Übergang (Index 2) treten nicht auf, es ist sozusagen eine starre Achse (Zielachse).

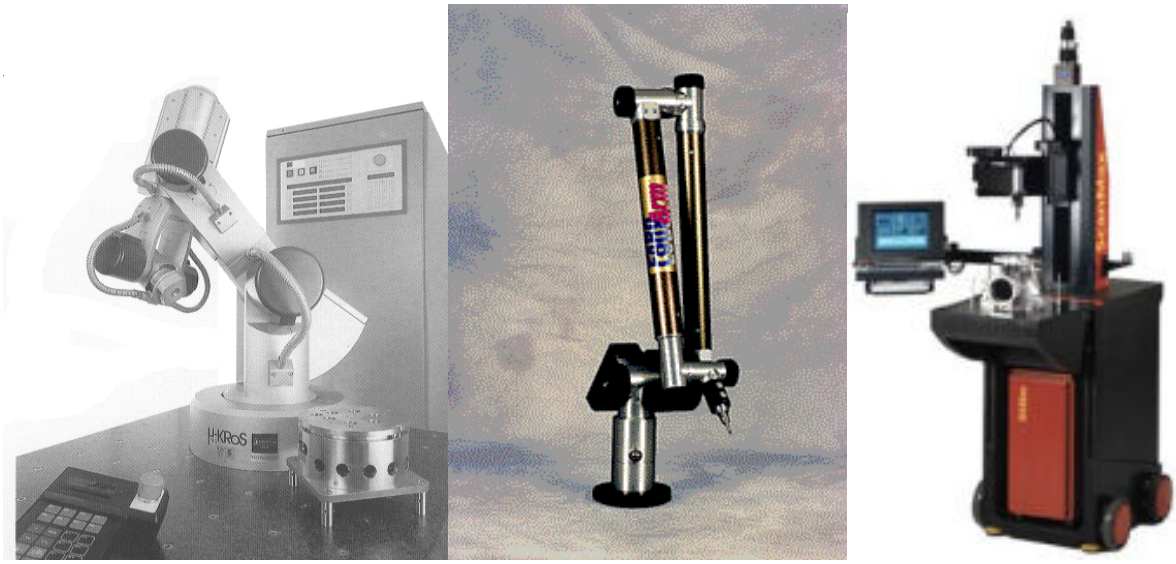


Abbildung 3.4.2 a Präzisionsroboter µKROS 316 [Keferstein, Frick 92], **b** Faro Meßarm [Faro 96], **c** Zeiss Scan-Max [Lotze 96].

Profos und Pfeifer sehen in der Robotik einen Ansatzpunkt zur Schaffung der notwendigen Flexibilität und Automatisierung in der produzierenden Industrie. Vor allem in die Fertigung integrierte Meßsysteme schaffen hier Vorteile. In diesem Zusammenhang werden *Online-* und *Inline-Meßsysteme* genannt. Die Verknüpfung von Fertigungs- und Meßprozessen stellt einen kleinen Baustein von *computer integrated manufacturing* (CIM) dar – neben der Steuerungs- und Regeltechnik, sowie den Simulationsmöglichkeiten. Der Hauptvorteil wird hier in der freien Positionierbarkeit gesehen, und zwar sowohl in der vom Meßmittel, als auch in der vom Meßobjekt. Der Roboter wird somit zur intelligenten Meßvorrichtung. Ist der Roboter jedoch ein aktives Meßelement, so müssen er und seine Meßumgebung kalibriert werden [Profos, Pfeifer 92].

Nach [Ahlers 87; Brunk 87] gibt es vier verschiedene Möglichkeiten, Roboter und Meßmittel miteinander zu kombinieren (s. Abb. 3.4.3):

1. Meßmittel werden vom Roboter gehandhabt, die Position des Roboters geht nicht in das Meßergebnis mit ein.
2. Der Roboter besitzt messende Achsen und ist somit in der Lage, z.B. mit einem Kontaktsensor (Nulltaster), Meß- und Prüfaufgaben zu übernehmen.
3. Der Industrieroboter besitzt messende Achsen und wird zusätzlich mit einem Meßmittel ausgestattet. Der Roboter und das Meßsystem bilden eine Einheit, in der alle Meßgrößen zu einem Ergebnis zusammengestellt werden.
4. Der Roboter mit seinen Meßachsen handhabt ein Meßobjekt, das in eine entsprechende Meßeinrichtung eingelegt wird: der Roboter liefert durch seine Achsen die genaue geometrische Lage und Orientierung des Meßobjekts in der Prüfvorrichtung. In der Prüfvorrichtung selbst werden anschließend weitere Messungen unter Berücksichtigung der aktuellen Orientierung und Lage durchgeführt. In diesem zweistufigen Prüfprozeß führt der Roboter den ersten Teil durch, der zweite Teil der Vermessung wird dann in einer speziellen Vorrichtung ausgeführt.

Auch ein 3D-Koordinatenmeßgerät mit seinen zueinander orthogonal stehenden Linearachsen kann als Roboter betrachtet werden. Die freie Positionierbarkeit kann durch eine zweiachsige Gelenkeinheit zwischen dem Tastkopf und der letzten Achse noch verbessert werden. Damit erhält man eine Meßkombination, bestehend aus einem Koordinatenmeßgerät und einem Meßsensor. Die Anforderungen an eine solche Apparatur sind in [Nitschke 97] erläutert.

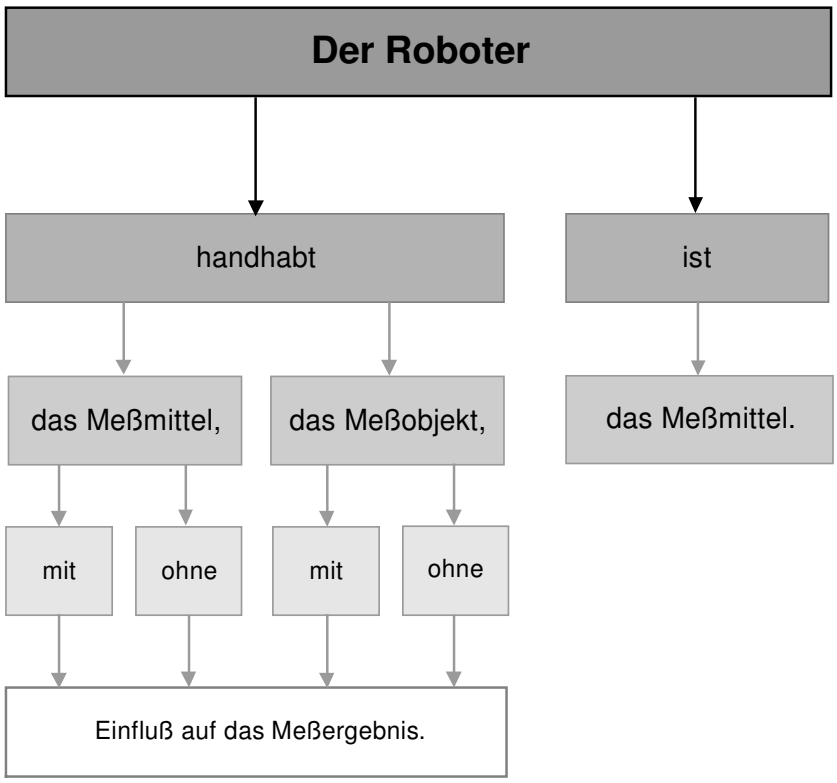


Abbildung 3.4.3 Systematik der Einsatzfälle, wenn Roboter zum Messen eingesetzt werden [Brunk 87].

Zur Überwachung automatisierter Montagearbeiten mit Robotern eignen sich sogenannte *Inline-Koordinatenmeßgeräte*. Der Begriff drückt damit aus, daß sowohl *in* der Fertigung, als auch *Online* gemessen und ausgewertet wird. Innerhalb eines gegebenen Produktionsabschnitts können damit Roboteraktionen, bezüglich einer vorgegebenen Pose, Bahn oder auch Werkstücklage, überwacht und bei Fehlverhalten sofort korrigiert werden. Seit Beginn der neunziger Jahre werden solche Systeme zunehmend eingesetzt. Die folgenden Varianten kommen dabei zum Einsatz (s. Abb. 3.4.4):

1. Am Roboter werden direkt die entsprechenden Sensoren montiert, also an der Hand oder an den Achsen. Sie machen auf diese Weise alle Roboterbewegungen mit. Während der Arbeitsbewegungen werden Messungen zu ausgewählten Meßstellen durchgeführt. Dieses Verfahren wird in erster Linie zur Detektion der Werkstücklage herangezogen. Man nennt diese Art auch *on-the-flight,* da hier der Sensor bei seiner Messung bewegt wird. Zum Einsatz können beispielsweise Lasertriangulationssensoren kommen [PERCEPTRON 99; Kondo et. al. 95; ISRA VISION 99; Angerer, Bongardt 99] oder auch Sensoren, die Musterprojektionen (codiertes Licht, Topometrie) aufnehmen und auswerten können. In [Breuckmann 93] wird ein Industrieroboter mit einem optischen Topometriesensor ausgestattet und auf einen Transportschlitten für Rohbaukarosserien (Skid) montiert. Mit dieser Kombination entsteht ein Meßroboter als mobiles dreidimensionales Meßsystem. Nach einer Orientierungsmessung mit anschließender Transformation in das Skid-Koordinatensystem können nun einzelne Abschnitte entlang des Fertigungsbandes vermessen werden (z.B. Zuordnungen und Positionen von Robotern, Werkzeuglagen, etc.).
2. Innerhalb des Produktionsabschnitts werden ein oder mehrere Sensoren in der unmittelbaren Roboterumgebung, zur aktuellen Positions- und Bahnprüfung, angebracht. In diesem Meßverfahren werden z.B. Lasertriangulationssensoren [PERCEPTRON 99; Kondo et. al. 95; Rzeznik 97], Lasertracker [LEICA 98; SMX 96] oder auch Ultraschallsysteme [Ishii 91] eingesetzt. Dazu ist es bei einigen Verfahren nötig, den Roboter mit entsprechenden Zielmarken auszurüsten.

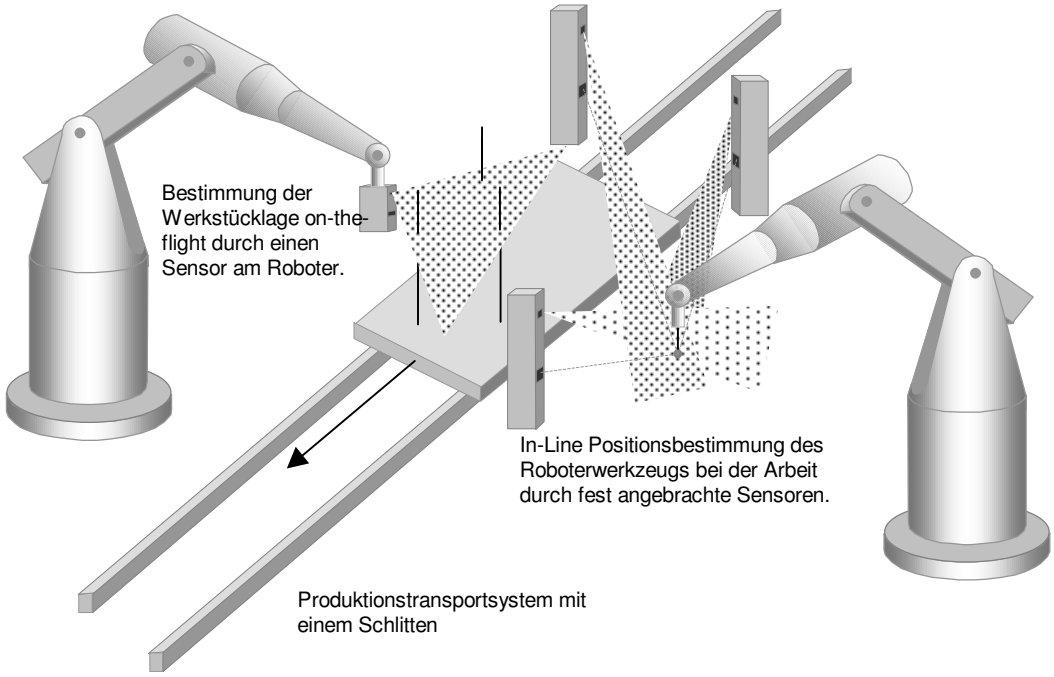


Abbildung 3.4.4 Messung *on-the-flight* (links)**,** *inline* Messung (rechts).

Vor einem geplanten Einsatz dieser Meßsysteme sollte auf folgende Punkte geachtet werden. Zum einen ist aufgrund der anfallenden großen Datenmengen, in relativ kurzer Zeitfolge, ein erheblicher Aufwand an Computer-Hardware nötig. Zum anderen ist zu prüfen, inwieweit ein solches System den widrigen Einflüssen (Erschütterungen, Ölnebel, Staub, etc.) innerhalb des Produktionsbetriebs standhält.

Bei der Auswertung der Messungen wird dabei folgendermaßen vorgegangen. Die Istpositionen des Roboters oder des Werkstücks werden aus den Messungen mit den Sensoren erhalten und den Sollpositionen, die aus der Steuerung oder aus der Planung (CAD) bekannt sind, gegenübergestellt. Über ausgewählte Rechenschritte können diejenigen Stellgrößen bestimmt werden, mit denen der Sollwert erreicht wird.

Bei absoluten Messungen empfiehlt es sich, vor den eigentlichen Sensormessungen die Position der Sensoren in die verschiedenen Koordinatensysteme zu transformieren, also z.B. in das des Roboters oder das der Fertigungszelle, etc. Dies ist nötig, damit erstens nicht in zu vielen verschiedenen Koordinatensystemen gearbeitet wird und zweitens bei der eigentlichen Meßaufgabe nur noch kleine Differenzbeträge zu bestimmen sind. Bei Relativmessungen (z.B. Abstandsprüfungen) ist dieser Transformationsschritt nicht nötig, da hier das Koordinatensystem eine untergeordnete Rolle spielt.

3.4.2 Meßmittel und Meßverfahren

Je nach Untersuchungsgegenstand werden an Industrierobotern verschiedene Messungen durchgeführt. Ziel einer Vermessung kann einerseits eine Gesamtprüfung sein, bei der die Summe aller Fehleranteile das Ergebnis bildet. Andererseits kann mit gezielten Einzeltests auch ein konkreter Wert geprüft bzw. das spezifische Verhalten in einer definierten Situation untersucht werden. Außerdem können alle den Roboter beschreibenden Parameter ermittelt werden. Solche Überprüfungen finden nicht nur im Rahmen von Neuinstallationen, sondern auch nach Instandsetzungen Anwendung (Untersuchungen des allgemeinen Istzustandes). Die Robotervermessungen sind somit nicht nur für die Eignung im Produktionsumfeld oder für die Wartung von hohem Interesse, sondern auch für den Einkauf (Wareneingangsprüfung) und die produktionsbegleitende Qualitätssicherung (Verschleiß, Alterung).

Die Ergebnisse der Vermessungen können vielfältig sein. Einmal ist die absolute Bestimmung von Punkt-, Bahn- oder Posegenauigkeiten gefordert, das nächste Mal sind die Längen, die Parallelität oder die Orthogo-

nalität von Achsen gesucht. Weiter kann auch das Biegeverhalten der Achsen untersucht werden. Zielen die Vermessungen auf Punkt-, Bahn- oder Poseverhalten ab, sollte auf eine gleichmäßige Verteilung der Messpunkte im Arbeitsraum des Roboters geachtet werden. So können regionale Stärken und Schwächen des Roboters, Bereiche im Arbeitsraum mit minimalen und maximalen Abweichungen zu Sollwerten, bestimmt werden. In manchen Fällen sind Untersuchungen zu speziellen Eigenschaften oder Elementen des Roboters ausreichend, wie z.B. bei der Untersuchung der Achslängen.

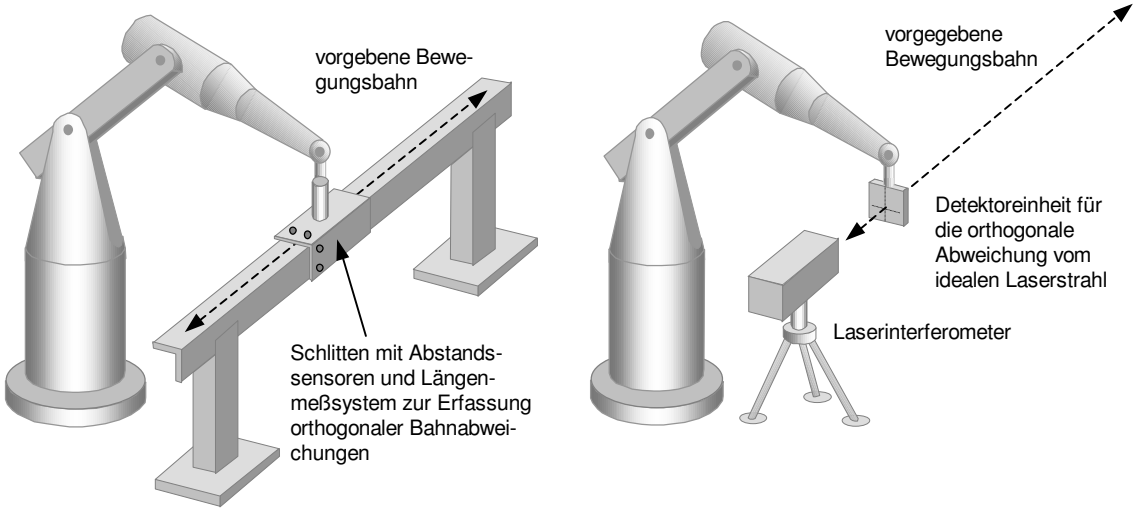
Sehr große oder dauerhaft installierte Roboter müssen vor Ort untersucht werden. Kleine, flexibel einsetzbare Roboter dagegen können durchaus für eine Vermessung zum Meßmittel transportiert werden. Um eventuell auftretende Umwelteinflüsse auf den Roboter mit berücksichtigen zu können, ist es besser, die Untersuchung an seinem Arbeitsplatz durchzuführen. Denn die Simulierung der Umwelteinflüsse kann, mit Ausnahme der Klimatisierung, schnell zu aufwendig werden (Staub, Ölnebel, Erschütterungen und Vibrationen).

In verschiedenen Veröffentlichungen sind gute Übersichten zur Robotervermessung aufbereitet, so z.B. in [Schüßler 87; Tradt 91; Schnädelbach 93; Bernhardt, Albright 93; Roos 98].

Nach ISO TR 13309 werden diese Systeme in acht Gruppen eingeteilt.

1. **Positionierverfahren mit Prüfkörpern (z.B. Würfel, Kugel)**
   Die exakte Einstellung einer Pose, bzw. eines Punktes, kann mit einem geeigneten Prüfkörper erfolgen. In [KRYPTON 99] werden dazu Prüfwürfel und Prüfspitzen eingesetzt.

2. **Bahnprüfungen entlang einer Geraden (z.B. Laserstrahl, Stahllineal)**



a: Stahllineal b: Laserinterometer

Abbildung 3.4.5: lineare Meßverfahren.

Die Robotervermessung entlang vorgegebener Bahnen kann entweder mit einem Abstandssensor oder mit einem Laserinterferometer durchgeführt werden. Mit einem Abstandsensor wird die Kante eines Stahllineals abgetastet (s. Abb. 3.4.5a). Der Lösungsvorschlag von Gossel erweitert dieses Verfahren, daß mehrere Geraden in einer Ebene aneinander gesetzt werden. Der Roboter vermißt mit einem Abstandssensor an der Hand z.B. die Kante einer Metallplatte [Gossel 96]. Damit kann eine absolute Genauigkeit, je nach Roboter, bis zu 5 hundertstel Millimeter erreicht werden.

Ein einfaches Laserinterferometer genügt, wenn nur in einer Richtung die Längenänderungen bestimmt werden sollen. Geht es aber darum, die Beträge der Abweichung von dieser Bahn zu bestimmen, dann muß eine Detektoreinheit für die Abweichungen orthogonal zum Laserstrahl montiert werden. Der Laserstrahl trifft dort auf eine photoempfindliche Schicht. Die verschiedenen Zielpunktlagen dokumentieren

das Bahnverhalten. Der Bereich der Sensorfläche kann zusätzlich mit einem rechtwinkligen Schlittensystem erweitert werden. Bei einer Verknüpfung von Laserinterferometer mit der Detektoreinheit werden zwei Photosensoren, je einer parallel und einer orthogonal zum Laserstrahl montiert. Strahlteiler und Umlenkspiegel lenken den Laserstrahl, sowohl zum Interferometer, als auch zu den Sensoren. Damit kann die Bahngeometrie in sechs Freiheitsgeraden untersucht werden [Reichling 88; Hoffmann 91; VDI 2861 Teil 3] (s. Abb. 3.4.5b).

3. **Trilaterationsverfahren (z.B. Multilasertrackingsysteme)**
   In [Reichling 88] sind verschiedene Verfahren beschrieben, die die Lasertechnik nutzen. So zum Beispiel die Triangulation eines Zielpunktes mit nachgeführten Laserstrahlen: hier wird von zwei Standpunkten aus ein Laserstrahl über einen Dreh-Kippspiegel zu einem Retroreflektor abgelenkt. Aus den Stellungen der Spiegel kann die Orientierung beider Laserstrahlen und somit ein räumlicher Vorwärtsschnitt zur Position des Retroreflektors gerechnet werden. Die Weiterentwicklung dieses Verfahrens führt über den Einsatz eines Lasertrackers (s. 4. Polarverfahren) zu einem System mit drei oder mehr nachgeführten Laserstrahlen und drei Interferometern. Die Koordinaten eines Punktes werden schließlich aus drei Streckenmessungen über einen räumlichen Bogenschlag bestimmt (Multilasertracker).

4. **Polarverfahren (z.B. Singlelasertracker)**
   Hier kommen Präzisionstachymeter oder Lasertrackingsysteme (z.B. Leica LTD500, SMX Tracker 4000) zum Einsatz [Filz, Vincze, Krautgartner, Spiess 95]).

5. **Triangulationsverfahren (z.B. Theodolit-, Photogrammetriesysteme)**
   [Meyer 94] beschreibt den Einsatz eines Videotheodolitsystems zur Bestimmung der Robotergeometrie. Dabei unterscheidet er eine schrittweise Vermessung und eine automatische Vermessung, bei der sowohl der Roboter als auch die Theodolite offline für diese Vermessung programmiert wurden. Die Besonderheiten, die hier herausgestellt werden, sind die gemeinsame Offline-Programmierung von Roboter und Meßsystem, sowie die vertikale Anordnung dreier Servotheodolite übereinander (s. Abb. 3.4.6) Weitere Beispiele für die Vermessung mit einem Standard-Theodolitmeßsystem sind unter anderem bei [Bill, Staiger 85; Behrens 87; Schirmer 91; Meyer 91; ISO TR 13309] zu lesen.

   In [Peipe 91] werden Leuchtspuren von Leuchtdioden aus langzeitbelichteten Bildern ausgewertet (Motografie). An einem Roboter wird ein Zielstern mit mehreren Leuchtdioden montiert. Von mindestens zwei Standpunkten aus werden gleichzeitig mit Kameras Langzeitbelichtungen zu den verschiedenen Roboterposen durchgeführt. Die Leuchtdioden verursachen auf den registrierten Bildern Spuren, die Rückschlüsse auf die räumlichen Positionen erlauben. Damit eine zeitliche Zuordnung zwischen den beiden Kamerastandpunkten möglich ist, werden von den Leuchtdioden Lichtimpulse abgestrahlt. Durch eine Einmessung des Zielsterns in das Koordinatensystem des Roboters können die ausgewerteten Spuren mit der geplanten Bahn im CAD verglichen werden.

   In zahlreichen Veröffentlichungen ist der Einsatz der digitalen Online-Photogrammetrie in der Robotervermessung beschrieben [Diewald, Godding, Henrich 93; Godding, Lehmann, Rawiel 97; Maas 96; SLV Halle 98 a und b]. Das wird zusätzlich durch die Produktinformationen photogrammetrischer Meßsysteme dokumentiert (z.B. Leica V-Stars, Metronor, Krypton, etc.). Dabei werden dem Roboter Zieleinrichtungen in Form von Sternen, Paßpunkttafeln oder sogar die Kamera selbst an die Hand montiert und die angefahrenen Posen photogrammetrisch bestimmt.

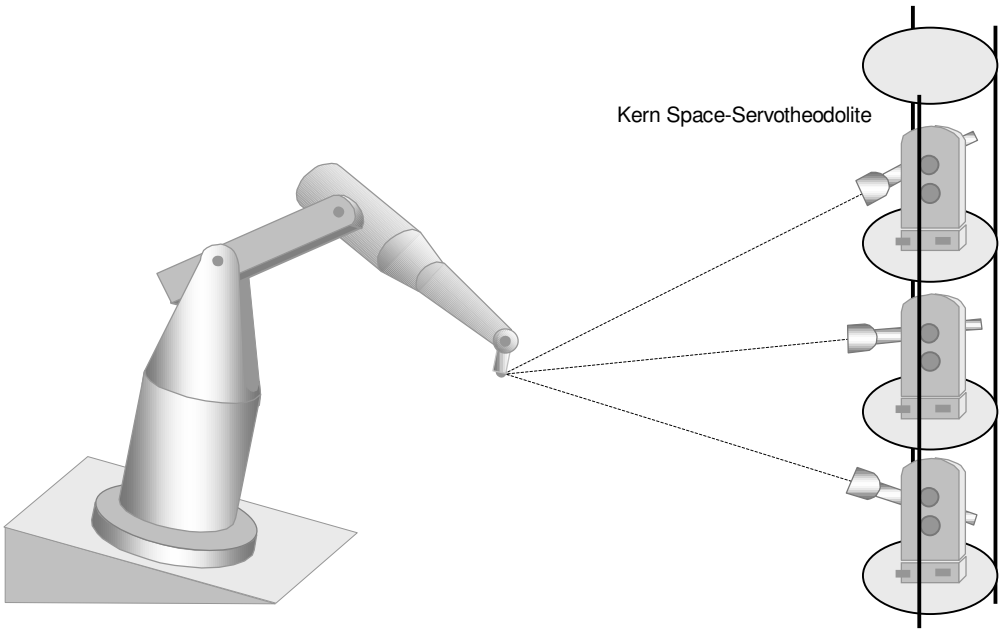


Abbildung 3.4.6 Vertikale Meßanordnung der Theodolite nach [Meyer 94] mit dem Kern Space-System.

6. Inertialverfahren

Ein kombinierter Vermessungsaufbau wird in [Janocha, v. Hienüber, Diewald, Godding 95] vorgestellt. Er setzt sich aus zwei Réseau-Scanning-Kameras und einem Inertialsystem (INS) zusammen. Das INS wird mit einem Zielstern am Roboter angebracht. Mit den Kameras werden die Zielpunkte an dem Zielstern koordiniert (s. 5. Triangulationsverfahren). Sie dienen später als Paßpunkte zur Korrektur des INS, da die Beschleunigungsmesser und Kreisel den verschiedensten Fehlereinflüssen unterliegen, wie Drifts, Nullpunktsfehlern, etc. Die korrigierten INS-Daten lassen sich wiederum mit den Robotersollpositionen vergleichen. Aus den Daten des INS und den der beiden Kameras kann schließlich der gesamte Bahnverlauf rekonstruiert werden (s. Abb. 3.4.7).

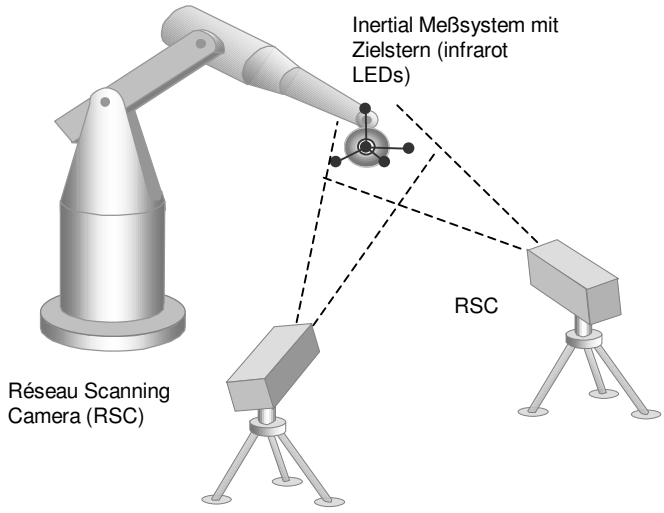


Abbildung 3.4.7 Kombination von Photogrammetrie und INS [Diewald, Janocha, v. Hinüber, Godding 95].

7. Verfahren mit kartesischen Koordinaten (z.B. Koordinatenmeßgerät)

Eine Möglichkeit ist hier die direkte Positionsvermessung der Roboterhand auf einem Koordinatenmeßgerät oder auch mit einem Meßarm.

[Zhong, Lewis 95] schlagen einen anderen Weg ein, sie stellen vor einem Roboter drei Tafeln auf. Diese Tafeln bilden drei Ebenen und sind orthogonal zueinander und gleichzeitig orthogonal zu den Koordinatenachsen des BKS. Anschließend werden sie mit einer Tastereinrichtung an der Roboterhand angetastet.

Die Genauigkeitsschranke für eine Antastung beträgt 1/10 mm. Auf jeder Tafel werden so bis zu 40 Punkte gemessen. Die Punkte haben dann jeweils eine Koordinate konstant. Mit Hilfe der Gelenkstellungen können nun Soll-Ist-Vergleiche gerechnet werden und auf diesem Weg die Parameter über die konstanten Koordinaten bestimmt werden. Die Schwierigkeit liegt hier in der genauen orthogonalen Ausrichtung der Prüfebenen zum BKS. Die Abweichungen zwischen Soll- und Istkoordinaten können, aufgrund einer solchen Kalibrierung, von wenigen Millimetern auf 2/10 mm reduziert werden.

8. Verfahren zur direkten Zeichnung der Bahn (z.B. Digitalisiergriffel)
Ein relativ einfacher Test zur Bahngenauigkeit wird mit der Abbildung 3.4.8 beschrieben [VDI 2861 Teil 3]. Hier soll der Roboter eine definierte Bewegungsfolge auf eine Unterlage zeichnen. Die Abweichungen von der Ideallinie können direkt herausgegriffen werden. Die typischen Schleppkurven sind gestrichelt gezeichnet. Im Bereich langer Geraden kann es auch zu Bahnabweichungen kommen.

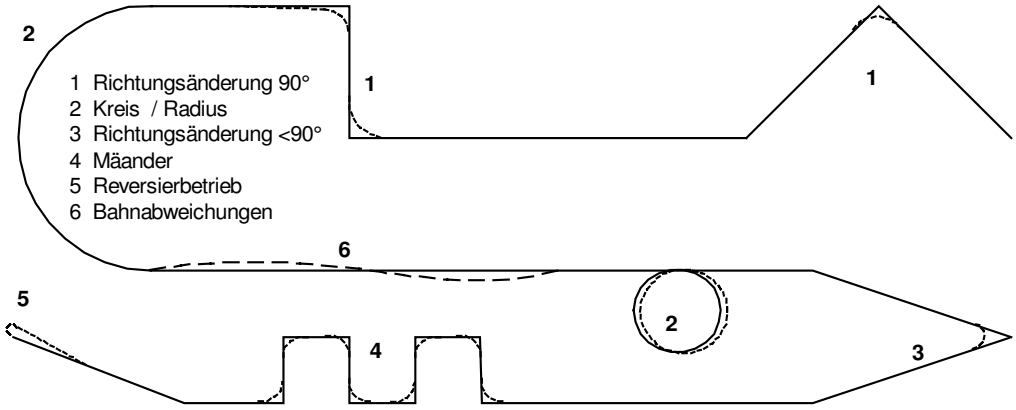


Abbildung 3.4.8 Testbahn für Roboterbewegungen in einer Ebene mit den charakteristischen Fehlern (Abkürzungen) nach Richtungsänderungen [ISO 9283, VDI 2861 Teil 3].

Daneben sind auch noch andere Meßsysteme zur Robotervermessung geeignet. Diese Systeme stellen oftmals Mischformen aus den acht Gruppen dar.

Mit OPTIS® (offline programmierte Testverfahren für Industrierobotersysteme) wird ein Testfeld mit definierten Paßpunkten zunächst kalibriert und anschließend auf einem Tisch vor dem Roboter aufgebaut. Danach werden mit einem speziellen Sensor an der Roboterhand, bestehend aus einer CCD-Kamera und einem Abstandssensor, alle Paßpunkte mit verschiedenen Posen eingemessen. Aus der Differenz zwischen Soll- (aus der Kalibrierung) und Istkoordinaten (aus der Sensormessung) der Paßpunkte, können die Roboterkenngrößen abgeleitet werden. Damit läßt sich die Posegenauigkeit des Roboters wesentlich verbessern [OPTIS® 99; EUROBTEC 99].

Andere Ansätze kommen ohne zusätzliche Meßgeräte aus, sie bestimmen die innere Genauigkeit der Roboter über eine Prüfung der Gelenkwinkelsensoren: dabei wird ein sechsachsiger Industrieroboter mit verschiedenen Gelenkstellungen mehrfach an eine identische Pose, bzw. an einen identischen Punkt, verfahren. Bei sechs Achsen mit Drehgelenken sind diese verschiedenen Stellungen (Arm oben, unten, seitlich, etc.) möglich.

Mit dem Wissen, daß verschiedene Gelenkeinstellungen alle zu einer Pose (Punkt) führen, werden in [Khalil/Garcia/Delagarde 95] die Gelenkwinkelstellungen und das Auflösevermögen der Sensoren überprüft. [Rall, Wollnack, Schwill 92] nutzen diese Technik zur Auffindung des BKS innerhalb einer Montagevorrichtung und zusätzlich zur Armlängenbestimmung.

In der folgenden Tabelle 3.4.1 sind die verschiedenen Verfahren noch einmal in Verbindung mit ihrer typischen Genauigkeit zusammengestellt:

Meßverfahren	Beispiel	Genauigkeit [mm]	**statisch**e / **dynamisch**e Messung	**Pose** / **Bahn** Vermessung
Positionierverfahren mit Prüfkörpern	Prüfwürfel	0.002 - 0.02	statisch	Pose
Bahnprüfung entlang einer Geraden	Stahllineal	0.05 - 0.2	dynamisch	Bahn
	Laserstrahl	0.01		
Trilaterationsverfahren	Multilasertracker	0.005 – 0. 1	dynamisch	Bahn
	Ultraschall	0.4 – 3.0		
	Seilzüge	0.3		
Polarverfahren	Singlelasertracker	0.005 – 0.05	dynamisch	Bahn
	Präzisionstachymeter	0.5	statisch [1)]	Pose
	Meßarm / Meßroboter	0.1 – 0.5	statisch	Pose
Triangulationsverfahren	Laserscanning	1 - 2	dynamisch	Bahn
	Photogrammetriesysteme	0.02 – 0.2	statisch [2)]	Pose
	Theodolitsysteme	0.02 – 0.2	statisch	Pose
Inertialverfahren		0.05 [3)]	dynamisch	Bahn
Verfahren mit kartesischen Koordinaten	Koordinatenmeßgerät	0.01	statisch [4)]	Pose
Verfahren zur direkten Zeichnung der Bahn	Digitalisiergriffel	0.2 – 0.5	dynamisch	Bahn

1) Moderne Präzisionstachymeter sind auch in der Lage, Ziele zu verfolgen. Damit ergeben sich aber Einschränkungen in der Genauigkeit.
2) Bei einigen Systemen sind auch geringe dynamische Veränderungen meßbar.
3) In Verbindung mit der Photogrammetrie oder einem anderen Meßmittel zur Driftkorrektur.
4) Hier können nur Positionen gemessen werden, keine Posen.

Tabelle 3.4.1 Typische Genauigkeiten der Meßverfahren.

Diese Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, es soll damit nur die Vielzahl der verschiedenen Möglichkeiten der Robotervermessung und der Messung mit Robotern aufgezeigt werden.

4 Parameteridentifikation mit geodätischen Mitteln

Das Ziel der Parameteridentifikation ist die Bestimmung exakter Werte aller benötigten Parameter des ausgewählten kinematischen Robotermodells. Nachdem diese Parameter nicht direkt gemessen werden können, müssen sie über Hilfsmessungen errechnet werden. Dazu hat sich der Einsatz geodätischer Meß- und Auswertetechnik bewährt. Bei den geodätischen Beobachtungen handelt es sich um dreidimensionale Koordinaten, die beispielsweise als Ergebnisse aus Messungen mit Präzisionstachymetern, Lasertrackern, Theodolit- oder Photogrammetriesystemen erhalten werden.

Mit diesen übergeordneten Meßsystemen sind verschiedene Vorgehensweisen durchführbar. Zunächst wird ein *vereinfachtes Verfahren* beschrieben, mit dem auf einfache Weise lediglich Achslängen zu bestimmen sind. Daran schließt sich ein Lösungsweg zur *Analyse von Achskopplungen* am Beispiel der KUKA Doppelwinkelhand. Mit diesen beiden Wegen kann aber jeweils nur ein sehr kleiner Teil der Roboterparameter bestimmt werden.

In zwei weiteren Fällen wird gezeigt, wie eine vollständige Parameterbestimmung durchgeführt werden kann. Im ersten Fall werden die Roboterparameter achsweise berechnet. Damit sind ganz spezielle Messungen zur Bestimmung der Achslagen an allen Achsen durchzuführen. Die Zielzeichen werden direkt an den Roboterachsen angebracht. Dieser Weg wird im folgenden als *das spezielle Verfahren* bezeichnet. Im zweiten Fall werden alle Parameter zusammen berechnet. Dazu werden verschiedene Roboterposen vermessen, die nach Möglichkeit über den gesamten Arbeitsbereich verteilt sind. Es genügt für die Vermessung ein Mehrfachziel (z.B. eine Zielhand s. Abb. 4.1.1) an der Roboterhand. Für die Auswertung werden hier zusätzlich noch die Werte der Gelenkgeber des Roboters benötigt. Dieses Verfahren wird anschließend als *geschlossenes Verfahren* bezeichnet.

Die sofortige Transformation der gemessenen Koordinaten in das BKS erleichtert den direkten Vergleich von Soll- und Istpositionen des Roboters. Die Sollpositionen liefert die Steuerung, und die Istpositionen werden aus dem Meßsystem erhalten. Ein möglicher Weg, das BKS direkt aufzusuchen, wird kurz aufgezeigt. Die erste Roboterachse steht meist vertikal und die zweite Roboterachse dazu senkrecht. Die $(xy)_{BKS}$-Koordinatenebene mit $z_{BKS}=0$ wird im Normalfall durch die Bodenplatte des Roboters festgelegt, und die erste Achse definiert die Lage der z_{BKS}-Achse. Der Schnittpunkt der $(xy)_{BKS}$-Ebene mit der z_{BKS}-Achse ist der Ursprung des BKS. In einer Nullstellung des Roboters zeigt die zweite Achse je nach Roboter in die Richtung der x_{BKS}- oder y_{BKS}-Achse.

4.1 Das vereinfachte Verfahren

Eine Vereinfachung bei der Robotervermessung kann eintreten, wenn nur die Achsabstände zwischen den Achsen gesucht sind. Das ist beispielsweise zur Bestimmung der äußersten Arbeitsraumgrenze wichtig. Das Grundprinzip dieses Verfahrens ist folgendes: aus Kreisbahnen werden Radien berechnet und aus den Radien die Achsabstände. Als Ziel eignet sich z.B. eine Zielhand, die an der Roboterhand montiert wird (s. Abb. 4.1.1). Die einzelnen Ziele der Zielhand werden durchnummeriert oder entsprechend ihrer Länge bezeichnet (1=lang, 2=mittel, 3=kurz); sie sind orthogonal zueinander angeordnet.

Beginnend bei der letzten Achse werden alle (geeigneten) Achsen nacheinander gedreht. Diese Drehungen erzeugen mit den Zielen Kreise. Die Radien der Kreise und die überstrichenen Sektoren sollen möglichst groß werden. Es ist deshalb darauf zu achten, daß jeweils die letzte vermessene Position einer Achse mit der vorigen und der nächsten Achse eine möglichst gestreckte Figur ergibt. Deswegen hat sich ein achsweises Vorgehen von außen nach innen bewährt. Die gesuchten Achslängen werden aus den Abständen der Kreismittelpunkte gerechnet. Ein Beispiel soll die Vorgehensweise kurz erläutern.

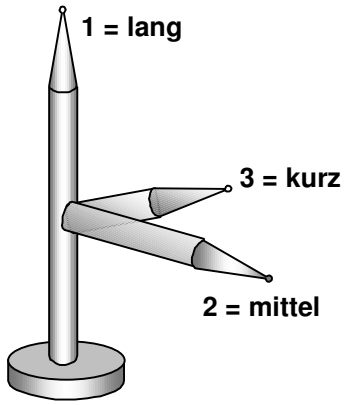


Abbildung 4.1.1 Zielhand an einem Roboter.

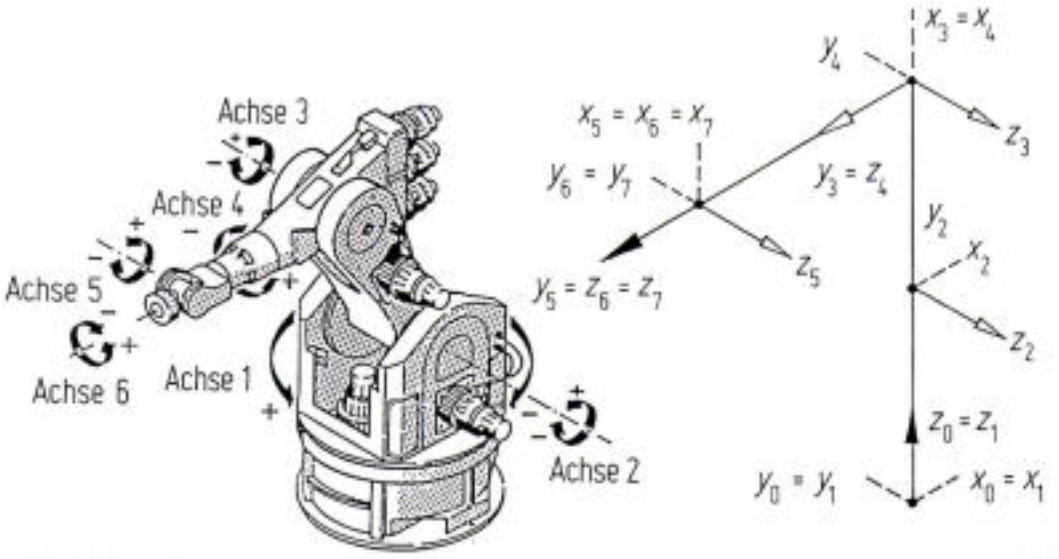


Abbildung 4.1.2 Industrieroboter KUKA 161/15 mit seiner kinematischen Struktur.

Achsen	**ϑ** [°]	**k [mm]**	**l [mm]**	**α** [°]
BKS-1	0	0	0	0
1-2	0	k_1	0	90
2-3	90	0	l_2	0
3-4	0	0	0	-90
4-5	0	k_4	0	90
5-6	0	0	0	-90
6-WKS	0	0	0	0

Tabelle 4.1.1 Ausgangsparameter des KUKA 161/15

Abbildung 4.1.2 zeigt einen Industrieroboter mit seiner kinematischen Struktur. In Verbindung mit Tabelle 4.1.1 sieht man, daß einige Parameter Null bzw. ϑ und α gleich 90° sind. Das vereinfachte Meßprogramm für die Achslängen k_1, l_2 und k_4 benötigt ein an Achse 6 zentrisch montiertes Ziel mit dem Abstand d vom Ursprung des WKS. Die durchzuführenden Messungen (minimale Anzahl) sind in Abbildung 4.1.3 dargestellt.

Zu Beginn wird die Achse 1 in eine für die Beobachtung günstige Position gebracht: sie darf sich im Verlauf der Messungen nicht verändern. Kontrolliert wird dies durch ein Hilfsziel am Roboter, welches vor und nach der Vermessung die gleichen Werte aufweisen muß. Abweichungen lassen dann auf eine Veränderung des Ziel- bzw. des Standpunktes schließen.

Der Übersichtlichkeit wegen ist eine minimale Meßpunktanzahl dargestellt und die Punkte von 1 bis 7 durchnumeriert. Die Messung beginnt mit drei Stellungen an der Achse 5 (Punkte 1 bis 3). Der Radius des Kreises dieser Punkte gibt den Abstand d an, und der Kreismittelpunkt wird mit H_1 bezeichnet. Achse 5 bleibt im weiteren fest mit der Position 3. Mit der Achse 3 wird jetzt analog verfahren und die nächsten drei Positionen mit den Meßpunkten 3, 4 und 5 beobachtet. Der Kreismittelpunkt aus diesen Beobachtungen wird mit H_2 bezeichnet. Der Abstand zwischen den Kreismittelpunkten $\overline{H_1H_2}$ ist direkt der DH-Parameter für k_4. So wird nun weiter verfahren, bis schließlich der Abstand $\overline{H_3U_0}$ berechnet und als DH-Parameter k_1 angegeben werden kann.

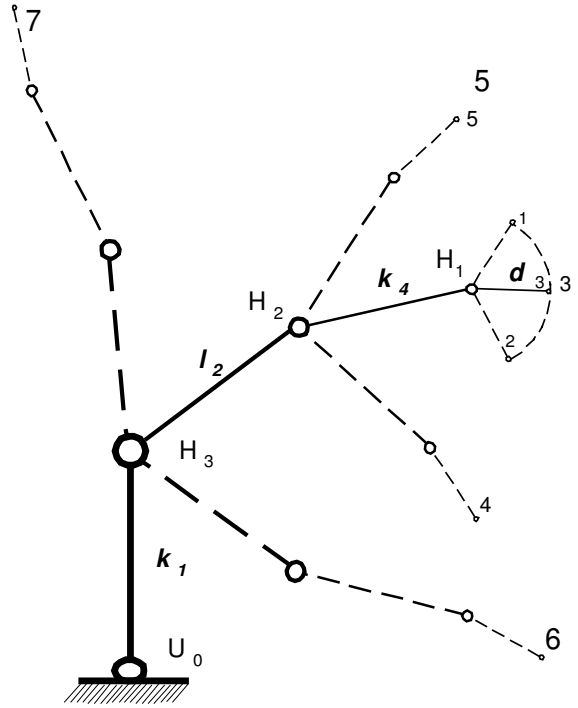


Abbildung 4.1.3 Vereinfachte Bestimmung der Achsabstände aus Kreisbeobachtungen [Nitschke, Schirmer, Schnädelbach 92].

Ob der Roboter alle Voraussetzungen für diese Vorgehensweise erfüllt, läßt sich leicht kontrollieren:
1. Alle Meßpunkte müssen in einer gemeinsamen Ebene liegen.
2. Es dürfen keine Achskopplungen auftreten.

Ist das nicht der Fall, sollte die vollständige Prüfung, wie in Abschnitt 4.3 beschrieben, durchgeführt werden.

Es kann sich also lohnen, das vereinfachte Verfahren anzuwenden, wenn die Parameter ϑ und α nicht gesucht sind, oder ausreichend genau mit den Vorgaben übereinstimmen. Ebenso ist dieses Verfahren für gelegentliche Überprüfungen geeignet. Der Unterschied bezüglich des Meßaufwands bei minimaler Meßpunktanzahl ist in Tabelle 4.1.2 gegenübergestellt.

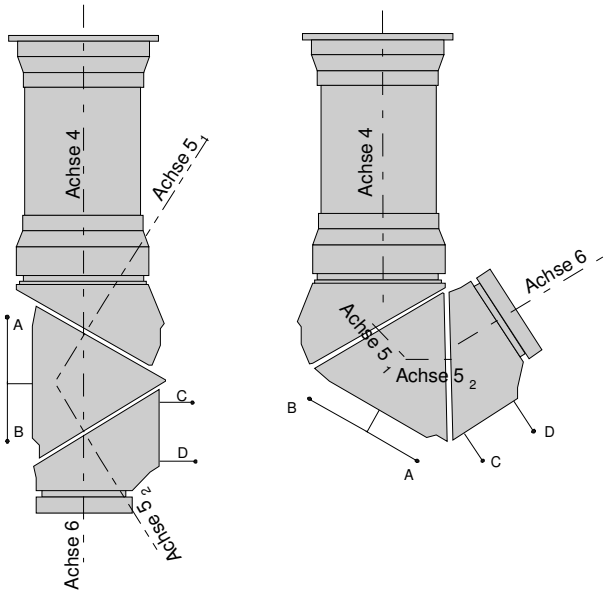
	Anzahl der Zielmarken	Anzahl der Meßpunkte
Vollständiges Vorgehen nach Abschnitt 4.3	12	36
Vereinfachtes Vorgehen nach Abschnitt 4.1	1	7

Tabelle 4.1.2 Aufwandsvergleich zwischen dem speziellen und dem vereinfachten Verfahren.

4.2 Analyse von Achskopplungen

Bei gekoppelten Achsen bewirkt eine Veränderung an der Achse i ebenso eine Veränderung an der Achse j. Die beiden Achsen werden also gleichzeitig angetrieben. Im einfachsten Fall werden sie im Verhältnis 1:1 bewegt. Das muß aber nicht immer der Fall sein, hier sind auch andere Verhältnisse möglich. Zur Analyse dieser Bewegungen sind besondere Meß- und Berechnungsschritte der kinematischen Größen notwendig. Im allgemeinen sind diese Achskopplungen ungewollt und werden auch weitgehend vermieden. In machen Fällen ist dies aber bauartbedingt nicht anders zu lösen.

Ein Beispiel für eine solche gewollte Achskopplung ist die Doppelwinkelhand von KUKA (s. Abb. 4.2.1). An Stelle einer üblichen fünften Achse wird hier die Doppelwinkelhand mit den Unterachsen 5_1 und 5_2 eingefügt.



a) 0° b) 180°

Abbildung 4.2.1 Bewegungsmöglichkeiten der KUKA Doppelwinkelhand.

In der Ausgangsstellung bilden die Achse 4 und die Achse 6 eine Gerade, die Achse 5_1 schließt mit Achse 4 einen Winkel von 30° ein, mit Achse 5_2 einen Winkel von 120° (s. Abb. 4.2.1 a). Bewegt man nun die Achse 5_1 um einen bestimmten Winkel, so wird automatisch die Achse 5_2 um den gleichen Winkel weitergedreht. Bei einer Drehung der Achse 5_1 um 180° wird die Achse 5_2 ebenso um diesen Betrag verstellt (s. Abb. 4.2.1 b).

Bei einer Analyse von Achskopplungen können die gesuchten Werte beispielsweise der Schnittwinkel und der Abstand zwischen den beiden Unterachsen 5_1 und 5_2, sowie das Verhältnis der Achskopplungen sein. Für eine Vermessung zur Analyse der gekoppelten Achsen werden an der Doppelwinkelhand vier Zielkugeln befestigt, A und B am Mittelteil und C und D am Unterteil (s. Abb. 4.2.1). Während einer Drehung der fünften Achse beschreiben die Zielkugeln A und B an der Achse 5_1 Kreise im Raum mit den Kreismittelpunkten M_A und M_B. Bei den Zielmarken C und D an der Achse 5_2 überlagern sich die Kreisbewegungen der beiden Unterachsen. Zur Analyse sollten etwa 10 verschiedene Stellungen ($j=1...10$, *mit* $j_1=0°$, also der Ausgangsstellung) der vier Zielpunkte (A, B, C und D) gleichmäßig über den Vollkreis verteilt vermessen werden.

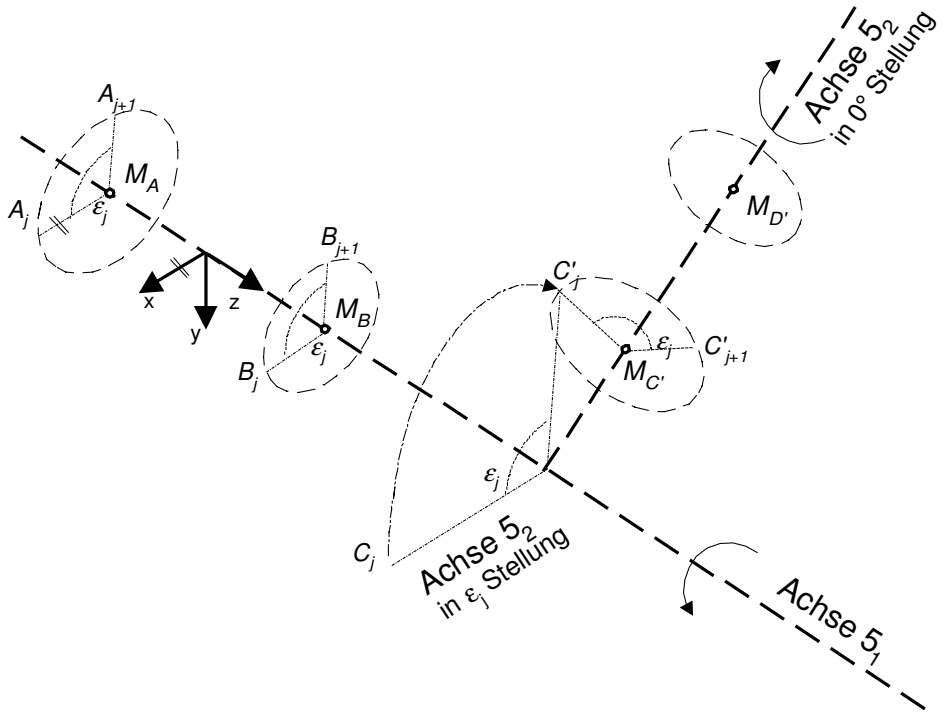


Abbildung 4.2.2 Rechnerische Entkoppelung beider Achsen der KUKA Doppelwinkelhand.

In obiger Abbildung ist eine Teilbewegung der Doppelwinkelhand während der Analyse skizziert. Die Koordinaten der vier Meßpunkte werden in ein Koordinatensystem mit $M_A - M_B$ als z-Achse transformiert. Die x-Achse zeigt parallel zu A_j mit $\varepsilon_j = 0°$ und die y-Achse ergänzt zum Rechtssystem. Der Winkelfortschritt ε_j der jeweiligen Stellung j ist gleich der Differenz der Richtungswinkel zwischen A_j und A_{j+1} in der xy-Ebene. Um diesen Betrag ε_j werden nun die Ziele C_j und D_j um die Drehachse zurückgedreht. Alle so entstandenen Punkte C'_j liegen auf einem Kreis um die Achse 5_2 (für die Punkte D gilt es analog). Die Kreismittelpunkte $M_{C'}$ und $M_{D'}$ beschreiben dann die Lage der Achse 5_2 gegenüber der Achse 5_1 in der Stellung $\varepsilon_j = 0°$. Mit den Geraden $M_A - M_B$ und $M_C - M_D$ lassen sich anschließend Schnittwinkel und Achsenabstand berechnen. Der Kopplungsfaktor folgt dann aus einem Vergleich der Winkelfortschritte durch den Ansatz einer Regressionsgeraden (sofern er konstant ist) [Schirmer 90].

4.3 Das spezielle Verfahren

Mit dem speziellen Verfahren werden die geometrischen Parameter der kinematischen Kette achsweise identifiziert [Schirmer 90]. Die Durchführung des speziellen Verfahrens sieht folgendermaßen aus:

Vorbereitung: An jeder Gelenkachse werden mindestens zwei gut sichtbare Zielzeichen angebracht. Diese Ziele sollten einen deutlichen Abstand (> 10 cm) zu der Achse selbst, als auch untereinander haben. Ferner sollten sie fest mit der zu vermessenden Achse verbunden sein und nicht an Folge-elementen und beweglichen Teilen befestigt werden, deren Stabilität ungewiß ist.

Beobachtung: In einem ersten Schritte sollte das BKS aufgesucht werden (s. Kap. 4.1). Die Berechnungen werden dann im BKS, als übergeodnetes Koordinatensystem durchgeführt. Jede Gelenk-achse wird nach einer paarweisen Beobachtung der Zielzeichen schrittweise gedreht, wodurch die Ziele Kreise im Raum um die Drehachse beschreiben (s. Abb. 4.3.1). Mit mindestens drei Beobachtungen pro Ziel können daraus Kreismittelpunkte gerechnet werden. Bewährt haben sich hier ca. 6 – 8 Punkte pro Kreis, aus denen dann mit einer Ausgleichung ein Kreismittelpunkt gerechnet wird. Die Punkte sollten bestmöglich den gesamten Bewegungsbereich der Achse beschreiben, jedoch einen Sektor ≥ 60° überstreichen.

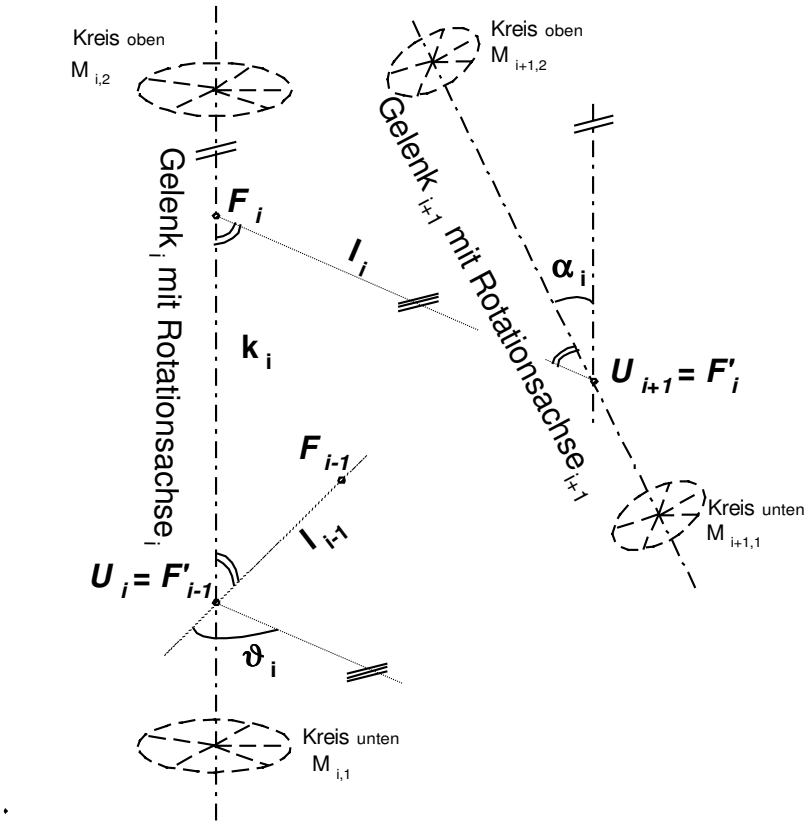


Abbildung 4.3.1 Bestimmung der geometrischen Parameter aus Kreisbeobachtungen [Nitschke, Schirmer, Schnädelbach 92].

Auswertung: Mindestens zwei Kreismittelpunkte ($M_{i,1}$ und $M_{i,2}$) an der Achse i beschreiben deren räumliche Lage (z-Achse) widerspruchsfrei. Werden mehr als zwei Kreismittelpunkte an einer Achse bestimmt, wird die Lage der Achse durch eine Ausgleichungsgerade bestimmt[3]. Die gesuchten DH-Parameter (ϑ_i, k_i, l_i und α_i) lassen sich einfach mit den Formeln der analytischen Geometrie berechnen [Strubecker 84].

Die Vektoren

$$\mathbf{n}_0 = \begin{pmatrix} x_{M_{i,1}} \\ y_{M_{i,1}} \\ z_{M_{i,1}} \end{pmatrix} \qquad \text{und} \qquad \mathbf{r} = \begin{pmatrix} x_{M_{i,2}} - x_{M_{i,1}} \\ y_{M_{i,2}} - y_{M_{i,1}} \\ z_{M_{i,2}} - z_{M_{i,1}} \end{pmatrix} \tag{4-1}$$

bedeuten Aufpunkt und Richtung der Rotationsachse des Gelenks G_i mit dem Bezugspunkt U_i. Dabei gilt für alle Punkte der Geraden und auch für den Ortsvektor $\mathbf{n} = \left(x_{F_i}, y_{F_i}, z_{F_i}\right)^T$ des Fußpunktes F_i des gemeinsamen Lotes der Rotationsachsen der Gelenke G_i und G_{i+1}

$$\mathbf{n} = \mathbf{n}_0 + u \cdot \mathbf{r} \tag{4-2}$$

mit dem reellen Parameter u. Für die Rotationsachse des Gelenks G_{i+1} lauten die entsprechenden Gleichungen

$$\mathbf{n}'_0 = \begin{pmatrix} x_{M_{i+1,1}} \\ y_{M_{i+1,1}} \\ z_{M_{i+1,1}} \end{pmatrix} \qquad \text{und} \qquad \mathbf{r}' = \begin{pmatrix} x_{M_{i+1,2}} - x_{M_{i+1,1}} \\ y_{M_{i+1,2}} - y_{M_{i+1,1}} \\ z_{M_{i+1,2}} - z_{M_{i+1,1}} \end{pmatrix} \tag{4-3}$$

[3] Alternativ ist es möglich, nur einen Kreis zu beobachten, die gesuchte Drehachse errechnet sich dann aus der Normalen zur Kreisebene durch den Kreismittelpunkt. Ungenauigkeiten können allerdings entstehen, wenn ein relativ kleiner Kreis einer relativ großen Achslänge gegenübersteht.

und

$$\mathbf{n}' = \mathbf{n}_0' + u' \cdot \mathbf{r}', \tag{4-4}$$

wenn $\mathbf{n}' = \left(x_{F_i'}, y_{F_i'}, z_{F_i'}\right)^T$ der Ortsvektor des Lotfußpunktes F_i' (das ist gleich U_{i+1}) auf der Rotationsachse des Gelenkes G_{i+1} ist und u' ebenfalls einen reellen Parameter darstellt. Nun folgen die DH-Parameter in zwei Schritten. Aus (4-2) und (4-4) berechnen sich unmittelbar l_i als Abstand der beiden Rotationsachsen

$$l_i = \frac{\left|\det\begin{pmatrix}\mathbf{r}\\ \mathbf{r}'\\ \mathbf{n}_0 - \mathbf{n}_0'\end{pmatrix}\right|}{\left|\mathbf{r}\times\mathbf{r}'\right|} \tag{4-5}$$

und α_i als der von ihnen eingeschlossene Winkel

$$\alpha_i = \arccos\left(\frac{\mathbf{r}\cdot\mathbf{r}'}{|\mathbf{r}|\cdot|\mathbf{r}'|}\right). \tag{4-6}$$

Die Größen ϑ_i und k_i lassen sich erst über die Fußpunkte F_i und F_i' festlegen. Für die Parameter u und u' gilt

$$u = \frac{\det\begin{pmatrix}\mathbf{n}_0 - \mathbf{n}_0'\\ \mathbf{r}'\\ (\mathbf{r}\times\mathbf{r}')\end{pmatrix}}{(\mathbf{r}\times\mathbf{r}')^2}$$

und (4-7)

$$u' = \frac{\det\begin{pmatrix}\mathbf{r}\\ \mathbf{n}_0 - \mathbf{n}_0'\\ (\mathbf{r}\times\mathbf{r}')\end{pmatrix}}{(\mathbf{r}\times\mathbf{r}')^2}, \tag{4-8}$$

$\mathbf{n}$ und $\mathbf{n}'$ folgen dann aus (4-2) und (4-4). Der gesuchte Abstand zwischen F_i und U_i ist also mit dem Ortsvektor $\mathbf{w}' = \left(x_{U_i}, y_{U_i}, z_{U_i}\right)^T = \left(x_{F_{i-1}'}, y_{F_{i-1}'}, z_{F_{i-1}'}\right)^T$ des Ursprunges

$$k_i = \left|(\mathbf{n} - \mathbf{w}')\right| \tag{4-9}$$

und der Winkel zwischen zurückliegendem und folgendem Verbindungslot beträgt

$$\vartheta_i = \arccos\left(\frac{(\mathbf{n}' - \mathbf{n})\cdot(\mathbf{w}' - \mathbf{w})}{\left|(\mathbf{n}' - \mathbf{n})\right|\cdot\left|(\mathbf{w}' - \mathbf{w})\right|}\right) \tag{4-10}$$

worin über den Ortsvektor $\mathbf{w} = \left(x_{F_{i-1}}, y_{F_{i-1}}, z_{F_{i-1}}\right)^T$ für i>0 die Verbindung zum zurückliegendem Gelenk G_{i-1} hergestellt wird. Für das Gelenk G_0 mit U_0 gilt immer $\mathbf{w}' = (0,0,0)^T$ und $\mathbf{w} = (-1,0,0)^T$.

Auf diese Weise werden ausgehend vom Gelenk G_0 alle Achsen vermessen und ihre DH-Parameter (ϑ_i, k_i, l_i und α_i) berechnet.

4.4 Das geschlossene Verfahren

Bei diesem Verfahren werden alle geometrischen Parameter der kinematischen Kette des Roboters in einer geschlossenen Berechnung gemeinsam bestimmt. Grundlagen der Berechnung sind die mathematische Beschreibung des geometrischen Robotermodells und die Formulierung des Ausgleichungsansatzes. Nach einer Kurzbeschreibung des Verfahrens im direkten Anschluß werden zunächst einige allgemeine Anmerkungen zur Ausgleichungsrechnung und zum Gewichtsansatz gegeben. Daran schließt sich eine ausführliche Beschreibung und Formulierung der Vorwärtsrechnung an.

Kurzbeschreibung des geschlossenen Vefahrens

Vorbereitung: Der Roboter wird in seine Nullstellung gebracht (die Werte aller Gelenkwinkelsensoren sind hier Null). Eine Zielhand (s. Abb. 4.1.1) wird wie ein Werkzeug an der Roboterhand montiert. Durch die Nullstellung lässt sich die Zielhand einfach zum BKS ausrichten: in etwa parallel zu den Koordinatenachsen des BKS. Die Werkzeugkoordinaten $\mathbf{p}_{WKS}$ der Zielhand sind mechanisch festgelegt und müssen vorab bestimmt werden

Beobachtung: Beginnend bei der Nullstellung werden nun verschiedene Roboterposen angefahren. Bei jeder Pose, die der Roboter einnimmt, werden die Zielpunkte der Zielhand vermessen. Mit einem geeigneten Meßsystem können die Zielpunktkoordinaten $\mathbf{p}_{BKS}^{gemessen}$ beobachtet werden. Ferner werden zu jeder Pose die Werte der Gelenkgeber, die Gelenkvariablen, aus der Robotersteuerung mit aufgenommen. Die Anzahl der Posen, wie auch deren Verteilung im Arbeitsraum, richtet sich nach dem Untersuchungsziel: entweder sollen die Parameter allgemein für den Roboter bestimmt werden, oder es soll ein Parametersatz berechnet werden, der einer ganz speziellen Roboterarbeit angepasst ist. Im allgemeinen Fall sind die Posen gleichmäßig im gesamten Arbeitsbereich zu verteilen. Bei einer festgelegten Arbeit werden die Posen dieser Arbeitsschritte für die Parameterbestimmung verwendet.

Auswertung: Mit einem Parametersatz, der näherungsweise aus Konstruktionsangaben bekannt ist, der Information der Gelenkvariablen und der Werkzeugkoordinaten der Zielhand kann eine Vorwärtsrechnung durchgeführt werden. Als Ergebnis erhält man die Koordinaten $\mathbf{p}_{BKS}^{gerechnet}$. Die Beobachtungen werden so angelegt, daß das zu lösende System redundant wird. Das bedeutet eine Überbestimmung durch mehr Beobachtungen als unbekannte Parameter. Die gerechneten und gemessenen Koordinaten werden in Verbesserungsgleichungen (z.B. basierend auf dem DH-Modell nach Gleichung (3-9)) gegenüber gestellt und die Unbekannten in einer Ausgleichung geschätzt. Zusätzlich kann der Vorwärtsrechnung noch eine dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation (für den Übergang vom MKS in das BKS) vorangestellt werden.

4.4.1 Anmerkungen zur Ausgleichung und zum Gewichtsansatz

Die vermittelnde Ausgleichung läßt sich in fünf Abschnitte gliedern [Ebner 1997]:

1. Die Wahl des mathematischen Modells
   - Funktionalmodell: Aufstellen von *m* unabhängigen nichtlinearen Verbesserungsgleichungen $\hat{\mathbf{b}} - f(\hat{\mathbf{x}}) = 0$ mit *m* ausgeglichenen Beobachtungen $\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{b} + \hat{\mathbf{v}}$ und *u* Unbekannten $\hat{\mathbf{x}}$.
   - Stochastisches Modell: Aufstellen der Gewichtskoeffizientenmatrix $\mathbf{Q}_{bb}$ der Beobachtungen. Die Gewichtung erfolgt im Falle gleich genauer und unkorrelierter Beobachtungen mit der Einheitsmatrix ***I***.

2. Bestimmung von Näherungswerten $\mathbf{x}^0$ für die Unbekannten und Linearisierung der Verbesserungsgleichungen. Beim Linearisieren wird eine Funktion nach den Unbekannten differenziert und in einer Taylorreihe entwickelt, wobei nach dem Glied erster Ordnung abgebrochen wird. Die Differentiale werden in einer Jacobi-Matrix **A** zusammengefaßt. Im Absolutgliedvektor $\mathbf{l}$ wird die Differenz aus Beobachtungen $\mathbf{b}$ und der Funktion $f(\mathbf{x}^0)$ mit $\mathbf{l} = \mathbf{b} - f(\mathbf{x}^0)$ angegeben. Die Gleichungen für die Unbekannten, die Beobachtungen und die Verbesserungen lauten

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^0 + \Delta\hat{\mathbf{x}}, \quad \hat{\mathbf{b}} = \mathbf{b} + \hat{\mathbf{v}} \quad \text{und} \quad \hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\Delta\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}. \tag{4-11}$$

3. Die Ergebnisse der Ausgleichung werden mit

$$\Delta\hat{\mathbf{x}} = (\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1}\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{l} \quad \text{mit} \quad \mathbf{P} = \mathbf{Q}_{bb}^{-1} \tag{4-12}$$

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{x}^0 + \Delta\hat{\mathbf{x}} \tag{4-13}$$

$$\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\Delta\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l} \tag{4-14}$$

$$\hat{\mathbf{b}} = \mathbf{b} + \hat{\mathbf{v}} \tag{4-15}$$

berechnet. Erfüllen die Ausgleichungsergebnisse $\hat{\mathbf{x}}$ und $\hat{\mathbf{b}}$ die nichtlinearen Beobachtungsgleichungen $\hat{\mathbf{b}} - f(\hat{\mathbf{x}}) = 0$? Wenn nicht, Wiederholung ab der Linearisierung (Iteration).

4. Berechnung des Varianzfaktors $\hat{\sigma}_0^2$ und der Kovarianzmatrix der Beobachtungen

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\hat{\mathbf{v}}^T\mathbf{P}\hat{\mathbf{v}}}{r} \tag{4-16}$$

$$\hat{\mathbf{K}}_{bb} = \hat{\sigma}_0^2\mathbf{Q}_{bb} \tag{4-17}$$

zur Beurteilung der Beobachtungen mit der Redundanz $r = m - u$.

5. Berechnung der Kovarianzmatrizen der Ausgleichungsergebnisse

$$\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}} = (\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1} \qquad \text{und} \quad \hat{\mathbf{K}}_{\hat{x}\hat{x}} = \hat{\sigma}_0^2\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}} \tag{4-18}$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{v}\hat{v}} = \mathbf{Q}_{bb} - \mathbf{A}\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}}\mathbf{A}^T \qquad \text{und} \quad \hat{\mathbf{K}}_{\hat{v}\hat{v}} = \hat{\sigma}_0^2\mathbf{Q}_{\hat{v}\hat{v}} \tag{4-19}$$

$$\mathbf{Q}_{\hat{b}\hat{b}} = \mathbf{Q}_{bb} - \mathbf{Q}_{\hat{v}\hat{v}} = \mathbf{A}\mathbf{Q}_{\hat{x}\hat{x}}\mathbf{A}^T \qquad \text{und} \quad \hat{\mathbf{K}}_{\hat{b}\hat{b}} = \hat{\sigma}_0^2\mathbf{Q}_{\hat{b}\hat{b}} \ . \tag{4-20}$$

Im vorliegenden Fall sind die Unbekannten die Roboterparameter, z.B. nach dem DH-Modell, ihre Näherungswerte folgen aus den Konstruktionsangaben. Die Beobachtungen sind die kartesischen Koordinatentripel der Zielhand im BKS. Es wird für jede Beobachtung eine Verbesserungsgleichung $\hat{\mathbf{v}} = \mathbf{A}\Delta\hat{\mathbf{x}} - \mathbf{l}$ auf der Basis des entsprechenden Robotermodells (z.B. (3-8), (3-10)) formuliert. Ferner treten die Gelenkvariablen (aus der Robotersteuerung bekannt) hier als Sollgrößen auf.

Die Gewichtung der eingeführten Beobachtungen erfolgt über die Genauigkeit der Koordinaten. Die Gewichtskoeffizientenmatrix $\mathbf{Q}_{bb}$ wird durch Matrizeninversion zur Gewichtsmatrix **P**. Je nach Meßmittel und Auswertung stehen die folgenden drei Gewichtungen zur Auswahl:

a) Alle Beobachtungen sind gleich genau und unkorreliert. Die Gewichte werden jeweils gleich 1 eingeführt. Die Gewichtsmatrix

$$\mathbf{P}_I = \begin{pmatrix} 1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & 1 \end{pmatrix} \tag{4-21}$$

wird zur Einheitsmatrix.

b) Die Beobachtungen haben für jede Koordinate eine individuelle Genauigkeit und sind unkorreliert. An einem Meßpunkt entsteht ein ellipsoidischer Genauigkeitsbereich. Die Gewichtsmatrix **P** ist eine Diagonalmatrix mit den Elementen $\frac{1}{\sigma_{x_i}^2}$, $\frac{1}{\sigma_{y_i}^2}$ und $\frac{1}{\sigma_{z_i}^2}$ für die drei Koordinatenrichtungen eines Punktes $\mathbf{p}_i$.

$$\mathbf{P}_{xyz} = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_{x_1}^2} & & & & 0 \\ & \frac{1}{\sigma_{y_1}^2} & & & \\ & & \frac{1}{\sigma_{z_1}^2} & & \\ & & & \ddots & \\ 0 & & & & \frac{1}{\sigma_{z_n}^2} \end{pmatrix} \tag{4-22}$$

Ein Sonderfall in b) tritt auf, wenn nur eine Punktgenauigkeit bekannt ist, dann werden gleiche Gewichte für jede Koordinatenrichtung in dem Punkt angegeben. Damit ist der Genauigkeitsbereich um den Punkt kugelförmig ausgebildet, wobei $\frac{1}{\sigma_{x_i}^2}=\frac{1}{\sigma_{y_i}^2}=\frac{1}{\sigma_{z_i}^2}$ gilt.

c) Es liegt die volle Varianz-Kovarianzmatrix aus einer vorangegangenen Auswertung vor. Die Gewichtsmatrix **P** ist demnach voll besetzt und symmetrisch. Die gegenseitigen Einflüsse zwischen den einzelnen Punktkoordinaten sind bekannt. Die Gewichtsmatrix hat folgende Gestalt:

$$\mathbf{P}_{gesamt}=\mathbf{Q}_{gesamt}^{-1}=\begin{pmatrix} \sigma_{x_1}^2 & \sigma_{x_1}\sigma_{y_1} & \sigma_{x_1}\sigma_{z_1} & \cdots & \sigma_{x_1}\sigma_{y_n} & \sigma_{x_1}\sigma_{z_n} \\ & \sigma_{y_1}^2 & \sigma_{y_1}\sigma_{z_1} & & & \\ & & \sigma_{z_1}^2 & & & \vdots \\ & & & \ddots & & \\ & & & & \sigma_{y_n}^2 & \sigma_{y_n}\sigma_{z_n} \\ \textit{symmetr.} & & & & & \sigma_{z_n}^2 \end{pmatrix}^{-1}. \qquad (4\text{-}23)$$

Die vollbesetzte Varianz-Kovarianzmatrix erhält man beispielsweise aus einer vorangegangenen Ausgleichung von Beobachtungen mit einem Theodolit- oder Photogrammetriesystem. Diese Matrix aus der Vorausgleichung muß dann in die Ausgleichung zur Bestimmung der zu schätzenden Roboterparameter einfließen. Der Varianzfaktor aus der Vorausgleichung σ_0^2 à posteriori ist entsprechend auch zu berücksichtigen. Nach [Matthias 86] ist die Korrelation eine Mischform von vollständiger Unabhängigkeit und funktionaler Abhängigkeit je zweier Realisierungen von Zufallsgrößen. Sie umfaßt die ganze große Zahl aller Fälle der Wirklichkeit zwischen beiden Grenzfällen: einerseits der reinen Zufallsereignisse und andererseits des völligen funktionalen Zusammenhangs. In aller Strenge kommen Korrelationen in der Meßtechnik wahrscheinlich immer vor. Je genauer man messen kann, d.h. je kleiner die Varianz der Häufigkeitsverteilung der Realisierung der reinen Zufallsgrößen wird, desto größer wird die Bedeutung von Korrelationen.

Die Gewichte müssen also aus einer vorangegangenen Auswertung mitgenommen werden oder gleich genau eingeführt werden. Der letzte Fall tritt dann ein, wenn

- keine weiteren Informationen vorhanden sind,
- die Meßgeräte alle Punkte nur gleich genau angeben können, wie beispielsweise beim normalen Einsatz eines Koordinatenmeßgerätes zur Robotervermessung, oder wenn
- der Roboter mit einem Prüfkörper kalibriert wird.

Die Eingabe punktweiser Gewichtungen wird durch Auswertungen von Messungen mit folgendem Meßsystemen möglich:

- Präzisionstachymeter und Lasertracker,
- Theodolitsystem oder
- Photogrammetriesystem.

Alle geodätischen Systeme berechnen Online einen RMS-Wert oder eine Standardabweichung für jeden Meßpunkt. In den meisten Fällen sind diese Systeme auch in der Lage, die Anteile in den Koordinatenrichtungen anzugeben. Diese Fälle sind im allgemeinen die praktikabelste Möglichkeit, denn der Anwender kann ohne zusätzliche Berechnungen auf diese Gewichte zurückgreifen. Anhand zweier Exkurse wird die Thematik der Gewichtung anschließend vertieft.

Exkurs 1

Für den Fall, daß bei Messungen mit einem Polarmeßsystem für die erhaltenen Koordinaten keine Genauigkeiten angegeben werden, können diese schnell bestimmt werden. Mit den allgemeinen Erfahrungswerten zur Genauigkeit σ_{r_i}, σ_{ε_i} und σ_{λ_i} der Meßelemente können die Koordinatengenauigkeiten für einen beobachteten Punkt $\mathbf{p}_i$ aus der Fehlerfortpflanzung berechnet werden.

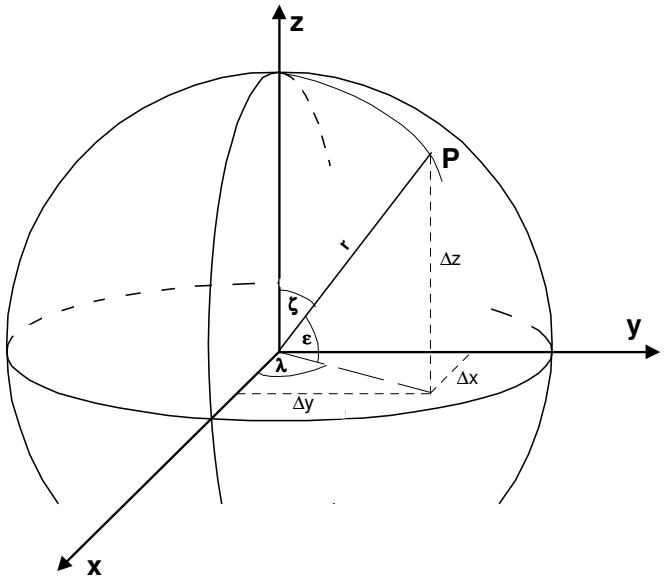


Abbildung 4.4.1 Mathematisch-rechtwinkliges Koordinatensystem mit den polaren Elementen zwischen Stand- und Zielpunkt.

Dieser Weg wird kurz aufgezeigt. Die Koordinaten für einen beobachteten Punkt $\mathbf{p}_i$ berechnen sich zu

$$\mathbf{p}_i = r_i \cdot \begin{pmatrix} \cos\varepsilon_i \cos\lambda_i \\ \cos\varepsilon_i \sin\lambda_i \\ \sin\varepsilon_i \end{pmatrix} \tag{4-24}$$

mit den Beobachtungen (s. Abb. 4.4.1):

r_i für die Streckenmessung,
λ_i für die Richtungsinkel und
ε_i=*90-*ζ_i für die Höhenwinkel.

Wird nun das Fehlerfortpflanzungsgesetz auf die Gleichung (4-24) angewendet, ergibt sich folgende Darstellung:

$$\begin{pmatrix} \sigma^2_{x_i} \\ \sigma^2_{y_i} \\ \sigma^2_{z_i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sigma^2_{x_i,r_i} + \sigma^2_{x_i,\varepsilon_i} + \sigma^2_{x_i,\lambda_i} \\ \sigma^2_{y_i,r_i} + \sigma^2_{y_i,\varepsilon_i} + \sigma^2_{y_i,\lambda_i} \\ \sigma^2_{z_i,r_i} + \sigma^2_{z_i,\varepsilon_i} + \sigma^2_{z_i,\lambda_i} \end{pmatrix}. \tag{4-25}$$

Angeschrieben lauten sie für für jedes Element:

$$\sigma^2_{x_i,r_i} = \cos\varepsilon_i \cdot \cos\lambda_i \cdot \sigma^2_{r_i}, \tag{4-26}$$

$$\sigma^2_{x_i,\varepsilon_i} = -r_i \cdot \sin\varepsilon_i \cdot \cos\lambda_i \cdot \sigma^2_{\varepsilon_i},$$

$$\sigma^2_{x_i,\lambda_i} = -r_i \cdot \cos\varepsilon_i \cdot \sin\lambda_i \cdot \sigma^2_{\lambda_i},$$

$$\sigma^2_{y_i,r_i} = \cos\varepsilon_i \cdot \sin\lambda_i \cdot \sigma^2_{r_i},$$

$$\sigma^2_{y_i,\varepsilon_i} = -r_i \cdot \sin\varepsilon_i \cdot \sin\lambda_i \cdot \sigma^2_{\varepsilon_i},$$

$$\sigma^2_{y_i,\lambda_i} = r_i \cdot \cos\varepsilon_i \cdot \cos\lambda_i \cdot \sigma^2_{\lambda_i},$$

$$\sigma^2_{z_i,r_i} = \sin\varepsilon_i \cdot \sigma^2_{r_i},$$

$$\sigma^2_{z_i,\varepsilon_i} = r_i \cdot \cos\varepsilon_i \cdot \sigma^2_{\varepsilon_i} \ ,$$

$$\sigma^2_{z_i,\lambda_i} = 0 \ .$$

Mit diesem Formelsystem kann nun für jeden Punkt $\boldsymbol{p}_i$ eine Koordinatengenauigkeit berechnet werden.

Exkurs 2

In Ausnahmefällen kann beim Einsatz von Koordinatenmeßgeräten auch eine Gewichtung aus der Formel für die Längenmeßunsicherheit

$$U = A + K \cdot L \quad \leq B \tag{4-27}$$

hergeleitet werden [VDI/VDE 2617]. Darin ist *A* ein konstanter Anteil, sozusagen eine Grundunsicherheit, *K* ist ein längenabhängiger Parameter und *B* begrenzt die Längenmeßunsicherheit auf einen maximalen Wert, der trotz einer Änderung der Meßlänge *L* nicht überschritten wird. Zwischen den einzelnen Meßpunkten kann damit eine punktweise Genauigkeit bezüglich eines Ausgangswertes interpoliert werden. Der minimale Wert ist dann gleich *A* und der maximale gleich *B* (s. Abb. 4.4.2).

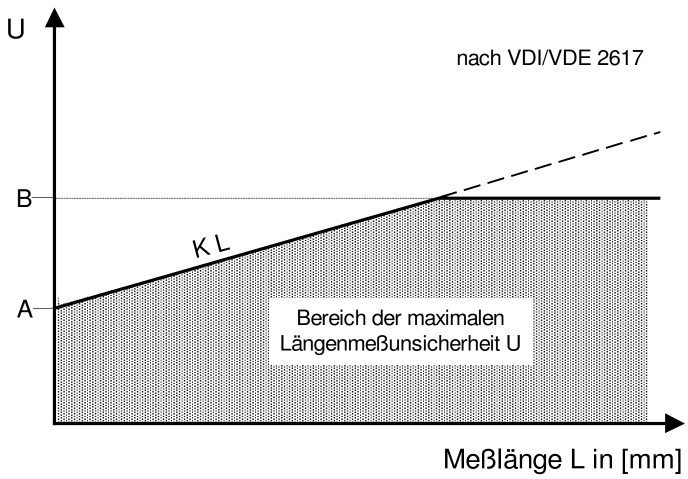


Abbildung 4.4.2 Grafische Darstellung der Längenmeßunsicherheit eines Koordinatenmeßgerätes.

4.4.2 Vorwärtsrechnung

In der Vorwärtsrechnung wird das gesamte ausgewählte Robotermodell formuliert. Die Vorwärtsrechnung ist immer abhängig vom jeweiligen Robotertyp. Die folgenden Ausführungen beziehen sich auf einen sechsachsigen Industrieroboter mit rotatorischen Achsen. Damit lautet die Gleichung (3-9) komplett ausgeschrieben

$$\mathbf{p}_{BKS} = \\ = \mathbf{R}_{\delta_0} \cdot \left[\mathbf{t}_0 + \mathbf{R}_{\alpha_0}\mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \left[\mathbf{t}_1 + \mathbf{R}_{\alpha_1}\mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \mathbf{R}_{\alpha_2}\mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \left[\mathbf{t}_3 + \mathbf{R}_{\alpha_3}\mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \left[\mathbf{t}_4 + \mathbf{R}_{\alpha_4}\mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \left[\mathbf{t}_5 + \mathbf{R}_{\alpha_5}\mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \left[\mathbf{t}_6 + \mathbf{R}_{\alpha_6} \cdot \mathbf{p}_{WKS}\right]\right]\right]\right]\right]\right]\right] . \tag{4-28}$$

Werden in dieses Modell noch die Parameter β_i nach der HM-Vereinbarung eingefügt, hat sie folgendes Aussehen:

$$\mathbf{p}_{BKS} = \\ = \mathbf{R}_{\delta_0} \left[\mathbf{t}_0 + \mathbf{R}_{\alpha_0}\mathbf{R}_{\beta_0}\mathbf{R}_{\delta_1} \left[\mathbf{t}_1 + \mathbf{R}_{\alpha_1}\mathbf{R}_{\beta_1}\mathbf{R}_{\delta_2} \left[\mathbf{t}_2 + \mathbf{R}_{\alpha_2}\mathbf{R}_{\beta_2}\mathbf{R}_{\delta_3} \left[\mathbf{t}_3 + \mathbf{R}_{\alpha_3}\mathbf{R}_{\beta_3}\mathbf{R}_{\delta_4} \left[\mathbf{t}_4 + \mathbf{R}_{\alpha_4}\mathbf{R}_{\beta_4}\mathbf{R}_{\delta_5} \left[\mathbf{t}_5 + \mathbf{R}_{\alpha_5}\mathbf{R}_{\beta_5}\mathbf{R}_{\delta_6} \left[\mathbf{t}_6 + \mathbf{R}_{\alpha_6}\mathbf{R}_{\beta_6}\mathbf{p}_{WKS}\right]\right]\right]\right]\right]\right]\right] \tag{4-29}$$

Ausrechnen bringt

$$
\begin{aligned}
\mathbf{p}_{BKS} = {} & \mathbf{R}_{\delta_0} \cdot \mathbf{t}_0 + \\
& \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \mathbf{t}_1 + \\
& \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \mathbf{t}_2 + \\
& \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \mathbf{t}_3 + \\
& \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \mathbf{t}_4 + \\
& \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \mathbf{t}_5 + \\
& \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_5 \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \mathbf{t}_6 + \\
& \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_5 \cdot \mathbf{R}_6 \cdot \mathbf{p}_{WKS}
\end{aligned}
\tag{4-30}
$$

wobei $\mathbf{R}_i = \mathbf{R}_{\delta_i} \cdot \mathbf{R}_{\alpha_i} \cdot \mathbf{R}_{\beta_i}$ das Produkt der drei Rotationsmatrizen darstellt. In der Gleichung (4-28) ist für $\mathbf{R}_{\beta_i} = \mathbf{I}$.

Allgemein gilt für einen Roboter mit n Achsen

$$
\mathbf{p}_{BKS} = \mathbf{R}_{\delta_0} \cdot \mathbf{t}_0 + \sum_{i=1}^{n-1} \left(\left(\prod_{j=0}^{i-1} \mathbf{R}_j \right) \cdot \mathbf{R}_{\delta_i} \cdot \mathbf{t}_i \right) + \left(\prod_{k=0}^{n} \mathbf{R}_k \right) \cdot \mathbf{p}_{WKS} . \tag{4-31}
$$

Zusätzlich kann der Vorwärtsrechnung noch eine dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation vom BKS ins MKS vorangestellt werden. Das Robotermodell wird so um weitere sechs Parameter erweitert. Dazu wird in die Gleichung (3-1) für $\mathbf{p}_{i+1}$ der Vektor $\mathbf{p}_{BKS}$ aus der Gleichung (4-29) eingesetzt

$$
\mathbf{p}_{MKS} = \mathbf{t}_{3D} + \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{p}_{BKS} , \tag{4-32}
$$

wobei $\mathbf{t}_{3D} = (x_{3D}, y_{3D}, z_{3D})^T$ und $\mathbf{R}_{3D} = \mathbf{R}_z(\kappa_{3D}) \cdot \mathbf{R}_y(\varphi_{3D}) \cdot \mathbf{R}_x(\omega_{3D})$.

Das lineare Modell benötigt man als Grundlage für die Ausgleichungsrechnung. Dazu wird die obige Gleichung (4-32) nach den Unbekannten differenziert und in einer Taylorreihe entwickelt, wobei nach dem Glied erster Ordnung abgebrochen wird. Die entsprechenden Diffentiale werden in der Jacobimatrix ***A*** zusammengefaßt. Die Jacobimatrix setzt sich aus allen auftretenden Differentialquotienten zusammen. Für einen sechsachsigen Industrieroboter werden folgende Differentialquotienten erhalten:

Differentialquotienten für δ_i

$$
\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \delta_0} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\delta_0}}{d\delta_0} \cdot \left[\mathbf{t}_0 + \mathbf{R}_{\alpha_0} \cdot \mathbf{R}_{\beta_0} \cdot \mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \left[\mathbf{t}_1 + \cdots \right] \right] \tag{4-33}
$$

$$
\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \delta_1} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\delta_1}}{d\delta_1} \cdot \left[\mathbf{t}_1 + \mathbf{R}_{\alpha_1} \cdot \mathbf{R}_{\beta_1} \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \cdots \right] \right]
$$

$$
\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \delta_2} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\delta_2}}{d\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \mathbf{R}_{\alpha_2} \cdot \mathbf{R}_{\beta_2} \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \left[\mathbf{t}_3 + \cdots \right] \right]
$$

$$
\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \delta_3} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\delta_3}}{d\delta_3} \cdot \left[\mathbf{t}_3 + \mathbf{R}_{\alpha_3} \cdot \mathbf{R}_{\beta_3} \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \left[\mathbf{t}_4 + \cdots \right] \right]
$$

$$
\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \delta_4} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\delta_4}}{d\delta_4} \cdot \left[\mathbf{t}_4 + \mathbf{R}_{\alpha_4} \cdot \mathbf{R}_{\beta_4} \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \left[\mathbf{t}_5 + \cdots \right] \right]
$$

$$
\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \delta_5} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\delta_5}}{d\delta_5} \cdot \left[\mathbf{t}_5 + \mathbf{R}_{\alpha_5} \cdot \mathbf{R}_{\beta_5} \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \left[\mathbf{t}_6 + \mathbf{R}_{\alpha_6} \cdot \mathbf{R}_{\beta_6} \cdot \mathbf{p}_{WKS} \right] \right]
$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \delta_6} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_5 \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\delta_6}}{d\delta_6} \cdot \left[\mathbf{t}_6 + \mathbf{R}_{\alpha_6} \cdot \mathbf{R}_{\beta_6} \cdot \mathbf{p}_{WKS}\right]$$

Die differenzierte Drehmatrix dazu lautet allgemein

$$\frac{d\mathbf{R}_{\delta_i}}{d\delta_i} = \begin{pmatrix} -\sin\delta_i & -\cos\delta_i & 0 \\ \cos\delta_i & -\sin\delta_i & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \tag{4-34}$$

Die Differentialquotienten für η_i

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \eta_0} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_{\delta_0} \cdot \frac{d\mathbf{t}_{\eta_0}}{d\eta_0} \tag{4-35}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \eta_1} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \frac{d\mathbf{t}_{\eta_1}}{d\eta_1}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \eta_2} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \frac{d\mathbf{t}_{\eta_2}}{d\eta_2}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \eta_3} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \frac{d\mathbf{t}_{\eta_3}}{d\eta_3}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \eta_4} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \frac{d\mathbf{t}_{\eta_4}}{d\eta_4}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \eta_5} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \frac{d\mathbf{t}_{\eta_5}}{d\eta_5}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \eta_6} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_5 \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \frac{d\mathbf{t}_{\eta_6}}{d\eta_6}$$

Der differenzierte Translationsvektor dazu lautet allgemein

$$\frac{d\mathbf{t}_{\eta_i}}{d\eta_i} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix}. \tag{4-36}$$

Die **Differentialquotienten für l_i** haben die gleiche Gestalt und der differenzierte Translationsvektor lautet entsprechend

$$\frac{d\mathbf{t}_{l_i}}{dl_i} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}. \tag{4-37}$$

Die Differentialquotienten für α_i

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \alpha_0} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_{\delta_0} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\alpha_0}}{d\alpha_0} \cdot \mathbf{R}_{\beta_0} \cdot \mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \left[\mathbf{t}_1 + \mathbf{R}_{\alpha_1} \cdot \mathbf{R}_{\beta_1} \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \cdots\right]\right] \tag{4-38}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \alpha_1} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_{\delta 1} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\alpha_1}}{d\alpha_1} \cdot \mathbf{R}_{\beta_1} \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \mathbf{R}_{\alpha_2} \cdot \mathbf{R}_{\beta_2} \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \left[\mathbf{t}_3 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \alpha_2} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\alpha_2}}{d\alpha_2} \cdot \mathbf{R}_{\beta_2} \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \left[\mathbf{t}_3 + \mathbf{R}_{\alpha_3} \cdot \mathbf{R}_{\beta_3} \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \left[\mathbf{t}_4 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \alpha_3} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\alpha_3}}{d\alpha_3} \cdot \mathbf{R}_{\beta_3} \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \left[\mathbf{t}_4 + \mathbf{R}_{\alpha_4} \cdot \mathbf{R}_{\beta_4} \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \left[\mathbf{t}_5 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \alpha_4} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\alpha_4}}{d\alpha_4} \cdot \mathbf{R}_{\beta_4} \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \left[\mathbf{t}_5 + \mathbf{R}_{\alpha_5} \cdot \mathbf{R}_{\beta_5} \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \left[\mathbf{t}_6 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \alpha_5} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\alpha_5}}{d\alpha_5} \cdot \mathbf{R}_{\beta_5} \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \left[\mathbf{t}_6 + \mathbf{R}_{\alpha_6} \cdot \mathbf{R}_{\beta_6} \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \mathbf{p}_{WKS}\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \alpha_6} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_5 \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\alpha_6}}{d\alpha_6} \cdot \mathbf{p}_{WKS}$$

Die differenzierte Drehmatrix hat allgemein folgendes Aussehen

$$\frac{d\boldsymbol{R}_{\alpha_i}}{d\alpha_i} = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\sin\alpha_i & -\cos\alpha_i \\ 0 & \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i \end{pmatrix}. \tag{4-39}$$

Die Differentialquotienten von β_i

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \beta_0} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_{\delta_0} \cdot \mathbf{R}_{\alpha_0} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\beta_0}}{d\beta_0} \cdot \mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \left[\mathbf{t}_1 + \mathbf{R}_{\alpha_1} \cdot \mathbf{R}_{\beta_1} \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \cdots\right]\right] \tag{4-40}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \beta_1} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_{\delta_1} \cdot \mathbf{R}_{\alpha 1} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\beta_1}}{d\beta_1} \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \left[\mathbf{t}_2 + \mathbf{R}_{\alpha_2} \cdot \mathbf{R}_{\beta_2} \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \left[\mathbf{t}_3 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \beta_2} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_{\delta_2} \cdot \mathbf{R}_{\alpha_2} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\beta_2}}{d\beta_2} \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \left[\mathbf{t}_3 + \mathbf{R}_{\alpha_3} \cdot \mathbf{R}_{\beta_3} \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \left[\mathbf{t}_4 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \beta_3} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_{\delta_3} \cdot \mathbf{R}_{\alpha_3} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\beta_3}}{d\beta_3} \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \left[\mathbf{t}_4 + \mathbf{R}_{\alpha_4} \cdot \mathbf{R}_{\beta_4} \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \left[\mathbf{t}_5 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \beta_4} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_{\delta_4} \cdot \mathbf{R}_{\alpha_4} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\beta_4}}{d\beta_4} \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \left[\mathbf{t}_5 + \mathbf{R}_{\alpha_5} \cdot \mathbf{R}_{\beta_5} \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \left[\mathbf{t}_6 + \cdots\right]\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \beta_5} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_{\delta_5} \cdot \mathbf{R}_{\alpha_5} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\beta_5}}{d\beta_5} \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \left[\mathbf{t}_6 + \mathbf{R}_{\alpha_6} \cdot \mathbf{R}_{\beta_6} \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \mathbf{p}_{WKS}\right]$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \beta_6} = \mathbf{R}_{3D} \cdot \mathbf{R}_0 \cdot \mathbf{R}_1 \cdot \mathbf{R}_2 \cdot \mathbf{R}_3 \cdot \mathbf{R}_4 \cdot \mathbf{R}_5 \cdot \mathbf{R}_{\delta_6} \cdot \mathbf{R}_{\alpha_6} \cdot \frac{d\mathbf{R}_{\beta_6}}{d\beta_6} \cdot \mathbf{p}_{WKS}$$

Die differenzierte Drehmatrix dazu lautet allgemein

$$\frac{d\boldsymbol{R}_{\beta_i}}{d\beta_i} = \begin{pmatrix} -\sin\beta_i & 0 & \cos\beta_i \\ 0 & 0 & 0 \\ -\cos\beta_i & 0 & -\sin\beta_i \end{pmatrix}. \tag{4-41}$$

Die Differentialquotienten der 3D-Transformation haben folgende Gestalt:
dafür wird die Gleichung aus (4-32) nach den Unbekannten x_{3D}, y_{3D}, z_{3D}, ω_{3D}, φ_{3D} und κ_{3D} differenziert.

(4-42)

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial x_{3D}} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p}_{BKS}, \quad \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial y_{3D}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p}_{BKS}, \quad \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial z_{3D}} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p}_{BKS} .$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \omega_{3D}} = \begin{pmatrix} 0 & \cos\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\cos\kappa_{3D} + \sin\omega_{3D}\sin\kappa_{3D} & -\sin\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\cos\kappa_{3D} + \cos\omega_{3D}\sin\kappa_{3D} \\ 0 & \cos\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\sin\kappa_{3D} - \sin\omega_{3D}\cos\kappa_{3D} & -\sin\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\sin\kappa_{3D} - \cos\omega_{3D}\cos\kappa_{3D} \\ 0 & \cos\omega_{3D}\cos\varphi_{3D} & -\sin\omega_{3D}\cos\varphi_{3D} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p}_{BKS}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \varphi_{3D}} = \begin{pmatrix} -\sin\varphi_{3D}\cos\kappa_{3D} & \sin\omega_{3D}\cos\varphi_{3D}\cos\kappa_{3D} & \cos\omega_{3D}\cos\varphi_{3D}\cos\kappa_{3D} \\ -\sin\varphi_{3D}\sin\kappa_{3D} & \sin\omega_{3D}\cos\varphi_{3D}\sin\kappa_{3D} & \cos\omega_{3D}\cos\varphi_{3D}\sin\kappa_{3D} \\ -\cos\varphi_{3D} & -\sin\omega_{3D}\sin\varphi_{3D} & -\cos\omega_{3D}\sin\varphi_{3D} \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p}_{BKS}$$

$$\frac{\partial \mathbf{p}_{MKS}}{\partial \kappa_{3D}} = \begin{pmatrix} -\cos\omega_{3D}\sin\kappa_{3D} & -\sin\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\sin\kappa_{3D} - \cos\omega_{3D}\sin\kappa_{3D} & -\cos\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\sin\kappa_{3D} + \sin\omega_{3D}\cos\kappa_{3D} \\ \cos\omega_{3D}\cos\kappa_{3D} & \sin\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\cos\kappa_{3D} - \cos\omega_{3D}\sin\kappa_{3D} & \cos\omega_{3D}\sin\varphi_{3D}\cos\kappa_{3D} + \sin\omega_{3D}\sin\kappa_{3D} \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{p}_{BKS}$$

Je nach ausgewähltem kinematischen Modell werden nur die gewünschten Parameter in die Ausgleichung übernommen. Die gesamte Jacobimatrix mit den Differentialquotienten für alle Unbekannte hat dann folgende größtmögliche Gestalt:

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,1}}{\partial x_{3D}} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,1}}{\partial \kappa_{3D}} & \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,1}}{\partial \delta_i} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,1}}{\partial \eta_i} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,1}}{\partial l_i} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,1}}{\partial \alpha_i} & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,1}}{\partial \beta_i} \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,n}}{\partial x_{3D}} & \cdots & & & \cdots & & \cdots & & \cdots & & \cdots & \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,n}}{\partial \beta_i} \end{pmatrix}. \tag{4-43}$$

Jede Beobachtung *j* liefert 3 Zeilen. Dabei stellt $\mathbf{p}_{MKS\,j} = (x_j, y_j, z_j)^T$ den Koordinatenvektor der Beobachtung *j=1...n* dar. Für einen sechsachsigen Roboter hat **A** mit allen Unbekannten 41 Spalten: 6 Unbekannte aus der 3D-Transformation und jeweils 7 mal 5 Unbekannte aus den Achsübergängen (einschließlich dem Übergang vom BKS in das System der ersten Achse). Die Unbekannten der Achsübergänge sind zu Siebenergruppen in der Jacobimatrix folgendermaßen aufgeführt: δ_i, η_i, l_i, α_i und β_i mit *i=0...6*.

Der Absolutgliedvektor wird aus der Differenz von beobachteten und errechneten (aus der Vorwärtsrechnung) Koordinaten zu $\mathbf{l} = \mathbf{p}_{MKS}^{gemessen} - \mathbf{p}_{MKS}^{gerechnet}$ gebildet. Mit der Vorwärtsrechnung, der Jacobimatrix, der

Gewichtsmatrix und dem Absolutgliedvektor können nun die Verbesserungsgleichungen (wie in Abschnitt 4.4.1 beschrieben) für die Ausgleichung aufgestellt werden:

$$\mathbf{v}_j = \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,j}}{\partial x_{3D}} x_{3D}^0 + \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,j}}{\partial y_{3D}} y_{3D}^0 + \cdots + \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,j}}{\partial \delta_i} \delta_i^0 + \cdots + \frac{\partial \mathbf{p}_{MKS\,j}}{\partial \beta_i} \beta_i^0 - \left(\mathbf{p}_{MKS\,j}^{gemssen} - \mathbf{p}_{MKS\,j}^{gerechnet} \right), \tag{4-44}$$

mit $\mathbf{v}_j = \left(v_{x_j}, v_{y_j}, v_{z_j} \right)^T$ für jede Beobachtung j.

4.5 Wertung der Verfahren und Eignung der Robotermodelle

Die vier vorgestellten Verfahren der Kapitel 4.1 bis 4.4 werden abschließend zusammengefaßt und miteinander verglichen.

Vereinfachtes Verfahren

Dieses Verfahren liefert schnell Informationen hinsichtlich ganz spezieller Achslängen. Es können also nur sehr wenige Parameter aus dem DH-Modell bestimmt werden. Das einzige Ziel muß in der Verlängerung der letzten Roboterachse angebracht werden. Da hier achsweise vorgegangen wird, dürfen sich die anderen Achsen nicht zusätzlich verändern. Alle Meßpunkte müssen in einer Ebene liegen.

Das Meß- und Auswertesystem muß in der Lage sein:

1) Zielpunkte im Raum vermessen zu können,
2) aus den achsweisen Messungen Kreise mit ihren Mittelpunkten zu berechnen,
3) die Abstände zwischen den Mittelpunkten zu bestimmen.

Die Genauigkeiten ermitteln sich über das Fehlerfortpflanzungsgesetz (FFG).

Analyse von Achskopplungen

Mit diesem Verfahren wurde am Beispiel einer Doppelwinkelhand die rechnerische Analyse einer Achskopplung aufgezeigt. Es werden zwei Ziele pro Achse benötigt. Beg innend in einer Ausgangsstellung, wird die Achsenkombination schrittweise gedreht. Aus den Drehungen an der einen Achse werden die Drehwinkel berechnet und mit denen der zweiten Achse verglichen: das Verhältnis der Drehwinkelpaare ist der Kopplungsfaktor. Für die Schnittwinkelberechnung beider Achsen muß eine rechnerische Entkopplung durchgeführt werden. Aus den Drehungen werden so jeweils zwei Kreismittelpunkte pro Achse erhalten. Mit den Geraden durch zwei Kreismittelpunkte kann der Schnittpunkt bestimmt werden. Das Meß- und Auswertesystem muß Punkte im Raum vermessen und geometrische Grundfiguren (Gerade, Kreis, Schnittpunkt zweier Geraden, etc.) berechnen können. Die Genauigkeiten berechnen sich aus dem FFG.

Spezielles Verfahren

Hier werden achsweise die geometrischen Parameter bestimmt. Für die Berechnung der Parameter sind keine zusätzlichen Informationen über den Roboter nötig. Es werden zwei Ziele pro Achse angebracht. Wichtig dabei ist die systematische Messung der Kreise an den Achsen. Die Parameteridentifikation ist einfach und übersichtlich aufgebaut und es sind in der Auswertung immer nur aufeinanderfolgende Achsenpaare betroffen. Bei der Vermessung der einzelnen Kreispunkte ist darauf zu achten, daß keine Achskopplungen das Meßergebnis beeinflussen. Wie auch beim vereinfachten Verfahren muß das Meß- und Auswertesystem Ziele im Raum koordinieren und aus den Messungen Kreise mit ihren Mittelpunkten berechnen können. Die Mittelpunkte definieren eine Gerade, die die Lage der Roboterachse beschreibt. Die gesuchten Parameter werden mit dem gemeinsamen Lot zwischen zwei Achsen über die analytische Geometrie bestimmt. Die Anwendung des FFG liefert die Genauigkeiten. Treten parallele Achsen auf, muß hier vom DH-Modell auf die HM-Vereinbarung gewechselt werden.

Geschlossenes Verfahren

In diesem Weg werden alle Parameter in einem Rechengang gleichzeitig bestimmt. An der Roboterhand wird eine Zielhand angebracht. Mit einem Meßsystem werden alle Ziele an der Zielhand bei unterschiedlichen Roboterposen beobachtet. In jeder Pose werden die Gelenkvariablen aus der Robotersteuerung erfaßt. Es ist darauf zu achten, daß zu jeder vermessenen Stellung die richtigen Gelenkvariablen beigesteuert werden, sonst kann es zu Fehlern bei der Parameteridentifikation führen. Bei der Auswertung des geschlossenen Verfahrens spielt es keine Rolle, welche Achsen zwischen den einzelnen Stellungen bewegt wurden. Zur Vermessung der verschiedenen Roboterposen kann auch ein kalibrierter Prüfkörper eingesetzt werden. Mit näherungsweise bekannten Roboterparametern, den Gelenkvariaben und der Zielhandgeometrie (WKS) können Koordinaten der Zielhand im BKS angegeben werden. Durch eine geeignete zusätzliche dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation können die Daten auch gleich vom MKS ins BKS transformiert werden. Diese Koordinaten können den beobachteten in einer Ausgleichungsrechnung gegenübergestellt und Zuschläge zu den Parametern berechnet werden. Die Genauigkeiten der Parameter werden ebenfalls aus der Ausgleichung erhalten. Bei parallelen Achsen ist im DH-Modell die Normalgleichungsmatrix

$$\mathbf{N} = \mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A} \tag{4-45}$$

des Normalgleichungssystems an dieser Stelle singulär und die Inverse

$$\mathbf{N}^{-1} = (\mathbf{A}^T\mathbf{P}\mathbf{A})^{-1} \tag{4-46}$$

kann nicht berechnet werden. Dann müssen andere Wege eingeschlagen werden, entweder durch

- die direkte Wahl eines anderen Robotermodells, oder durch
- die Lösung des Gleichungssystems mit der Pseudoinversen.

Die Pseudoinverse kann das singuläre Gleichungssystem lösen, sie stellt daher ein Hilfsmittel zur Analyse dar, die Singularitäten zu entdecken. Mit dieser Vorgehensweise läßt sich anschließend eine geeignete, lösbare Roboterkinematik formulieren. Bei einem Gleichungssystem ohne Singularitäten ist das Ergebnis der Pseudonormallösung mit dem der Gauss-Jordan-Inversion identisch.

Welches der Verfahren zur Bestimmung der DH-Parameter herangezogen wird, ist abhängig vom Informationsstand über die Roboterdaten. Ist die Kinematik (z.B. aus dem Datenblatt) bekannt und ein Zugriff auf die Gelenkvariablen möglich, so kann das Ausgleichungsverfahren zur Bestimmung der Robotergeometrie verwendet werden. Ist kein Zugriff auf diese Daten möglich, kann auf die Robotergeometrie über das spezielle Verfahren geschlossen werden. Das spezielle und das vereinfachte Verfahren sind immer durchführbar, auch ohne Kenntnis der gesamten kinematischen Struktur.

Das ausgewählte Robotermodell (z.B. nach der DH- oder der HM-Vereinbarung) stellt nur eine mögliche Formulierung der Roboterkinematik dar und ist keine vollständige mathematisch-physikalische Beschreibung [Spur 89]. Inwieweit das Robotermodell mit seinen Parametern der Realität entspricht, hängt in hohem Maße von den Einzelteilen des Roboters aufgrund von Fertigungstoleranzen und von den in der Steuerung abgelegten Konstruktionsvorgaben ab. Aus diesem Grund können systematische Poseabweichungen auftreten, die in Anlehnung an die Begriffe der DIN-Norm 55350 als ein Maß für die Richtigkeit der Modellierung angesehen werden können [Meyer 94].

Verschiedene Untersuchungen (siehe Kapitel 2.5) haben gezeigt, daß die absolute Posegenauigkeit des Roboters, die die Positions- und Orientierungsabweichungen zwischen einer vorgegebenen Sollpose und einer tatsächlich erreichten Istpose beschreibt, im wesentlichen von den systematischen Abweichungen des Robotermodells abhängt. Als größter Einflußfaktor ist hier die Abweichung von der Geometrie zu nennen. Die verbleibenden stochastischen oder zufälligen Einflüsse, wie z.B. die begrenzte Auflösung der Winkelmeßsysteme oder Reibung, beschreiben die Wiederholgenauigkeit oder Präzision der Roboterpositionierung. Ihr Anteil an der Posegenauigkeit fällt unter einen Betrag von 5% und kann vernachlässigt werden.

Tabelle 4.5.1 zeigt anschließend die Verfahren im Überblick.

	Vereinfacht	**Achskopplung**	**Speziell**	**Geschlossen**
Anzahl Achsen	beliebig (typisch 6)	2	beliebig (typisch 2)	beliebig (typisch 6)
Anzahl Ziele	1	2 pro Achse = 4	2 pro Achse = 12	Zielhand, 2-3 Ziele
Anzahl Posen	7	8-10	6-8 pro Achse = <48	20-30
Genauigkeit aus	FFG	FFG	FFG	Ausgleichung
Datenmenge	gering	mittel	mittel	hoch
3D-Transformation	nein	nein	nein	ja
Anzahl Parameter	ca. 3	3	alle	alle
kinemat. Modell	-	-	DH, HM	DH, HM
volle Var./Kovar.	nein	nein	nein	ja
Achskopplungen	unerwünscht	nötig	unerwünscht	ohne Bedeutung
Meßsystem	3D-Koordinaten	3D-Koordinaten	3D-Koordinaten	3D-Koordinten
kalibrierter Prüfkörper	nicht möglich	nicht möglich	nicht möglich	möglich

Tabelle 4.5.1 Vergleich der Verfahren.

5 Praktische Beispiele

Im Anschluß werden die Kalibrierverfahren an Hand von praktischen Beispielen näher erläutert. Die durchgeführten Messungen und Auswertungen bezogen sich dabei auf zwei unterschiedliche Roboter.

5.1 Allgemeine Vorgehensweise

Die Robotervermessung wurde mit einem Theodolitsystem *Leica ECDS 3* durchgeführt. Dieses Meßverfahren zur dreidimensionalen Punktbestimmung beruht auf der Triangulation bzw. dem räumlichen Vorwärtsschnitt. Die Minimalanforderung an das Meßsystem für eine Koordinierung sind zwei Visuren von zueinander orientierten Standpunkten (s. Abb. 5.1.1). Es wurden unter Berücksichtigung der baulichen Gegebenheiten des Roboterumfeldes jeweils drei bis vier digitale Sekundentheodolite *Kern E2* eingesetzt. Die Aufstellung der Theodolite wurde so gewählt, daß der Zielpunktbereich unter bestmöglichen Schnittgeometrien eingesehen werden konnte und schleifende Schnitte in den Zielpunkten weitgehend vermieden wurden.

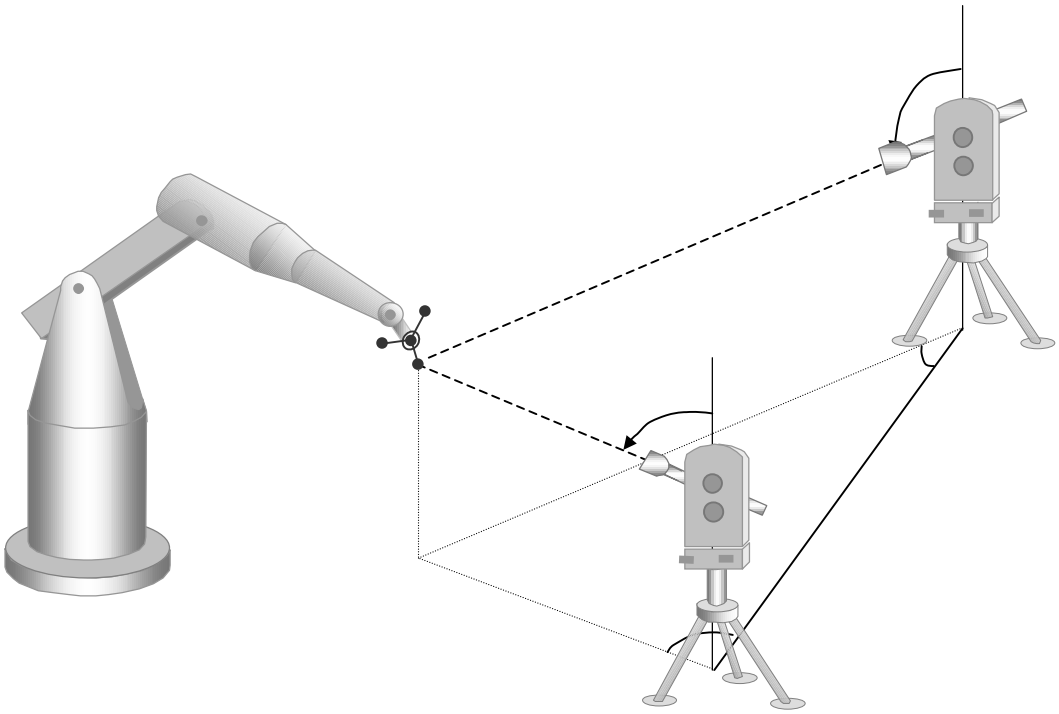


Abbildung 5.1.1 Typische Meßkonfiguration bei einem Theodolitsystem.

Die Lage der Koordinatenachsen im MKS wurde dabei so festgelegt, daß es ungefähr parallel zum BKS des Roboters liegt, damit im Fall durchgeführter dreidimensionaler Ähnlichkeitstransformationen die Drehungen leicht nachvollzogen werden konnten. Hilfreich war dabei die Nullstellung des Roboters. Nach der Orientierungsmessung für die räumliche Zuordnung der Theodolite untereinander und für die Einbringung eines Maßstabs in das System konnte mit der eigentlichen Robotervermessung begonnen werden. Der erste Schritt war das exakte Aufsuchen des BKS des Roboters (s. Kap. 4.1). Damit konnten die Roboterposen für die Parameteridentifikation eingestellt werden. Als Ziel diente eine Zielhand. Die Zielhand sollte in der Nullstellung des Roboters parallel zu den Achsen des BKS ausgerichtet werden. Bei jeder eingestellten Pose mußten die Daten der Gelenkvariablen registriert werden. Mit der Nullstellung sollte die Vermessung begonnen werden. Nun war es möglich, direkt Vergleiche zwischen Koordinaten aus der Robotersteuerung und dem Meßsystem vorzunehmen. Natürlich war es ebenso möglich alle Beobachtungen auch weiterhin im MKS durchzuführen und erst später eine Transformation zu rechnen.

Eine Ausgleichung aller Beobachtungen nach der Vermessung half bei der Beurteilung der Ergebnisse und lieferte die Gewichte der Beobachtungen für die Parameteridentifikation. Dazu eignete sich beispielsweise eine 3D-Netzausgleichung oder eine Bündelausgleichung. Als Näherungswerte für die Ausgleichung sollten gleich alle Punkte im BKS eingeführt werden, denn das erleichterte den direkten Vergleich zwischen gemessenen und gerechneten (aus der Vorwärtsrechnung) Koordinaten. Eine der Vermessung nachgeschaltete 3D-Transformation entfiel dann.

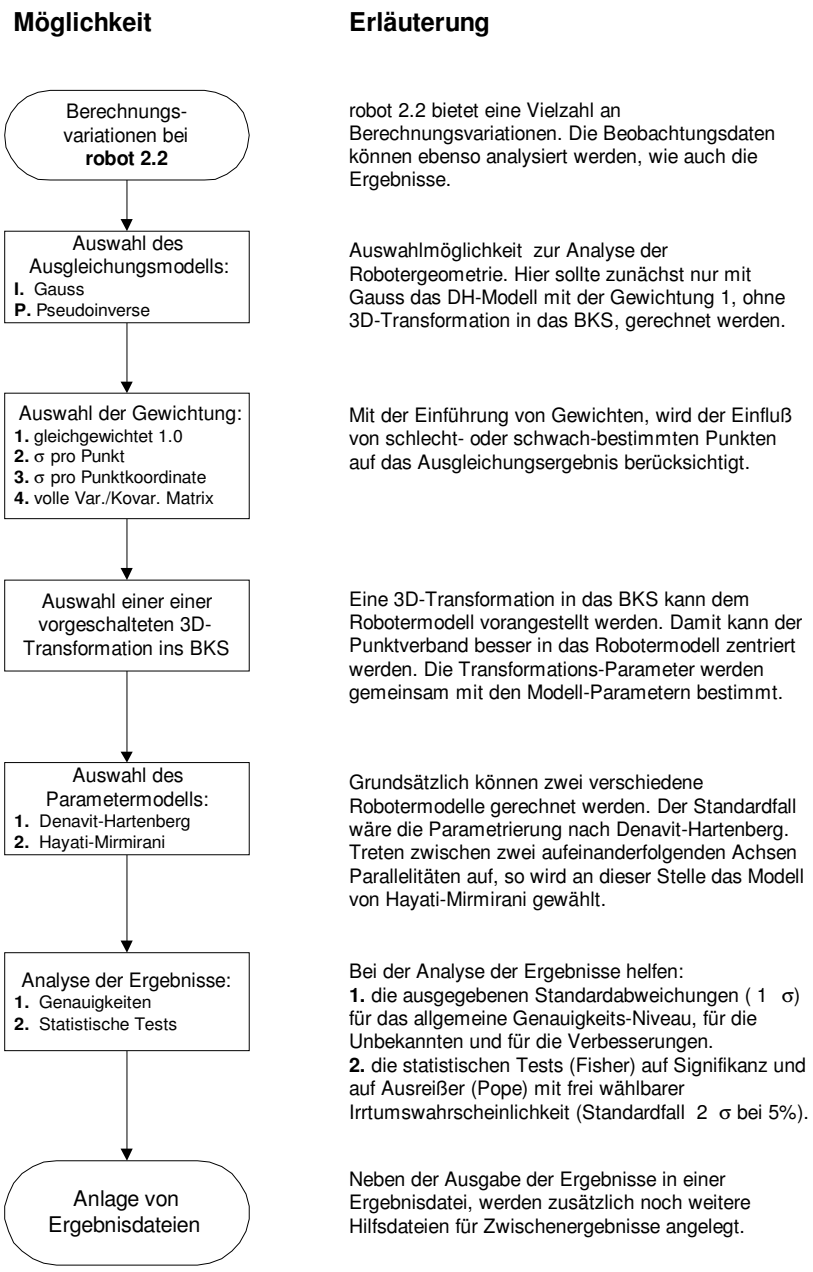


Abbildung 5.1.2 Rechenmöglichkeiten mit *robot*.

Für die Ausgleichung der Beobachtungen standen die folgenden Programme am Geodätischen Institut zur Verfügung:

- dreidimensionale Netzausgleichung aus Beobachtungen von Horizontalrichtungen, Zenitwinkel und Raumstrecken, *d3netz*,
- Bündeltriangulation, *ribaneu*,
- dreidimensionale Ähnlichkeitstransformation, *d3trafo*,

Zusätzlich wurde das Software Paket des Theodolitsystems Leica ECDS 3 eingesetzt.

Für die Berechnung der Roboterparameter wurden im Rahmen dieser Arbeit die folgenden Programme entwickelt:

- *robmess* zur Bestimmung der Robotergeometrie aus Kreismessungen (spezielles Verfahren) mit Hilfe der analytischen Geometrie (s. Kap. 4.3),
- *robot* zur Berechnung der Roboterparameter mit Hilfe der Ausgleichungsrechnung (s. Kap. 4.4 und Abb. 5.1.2).

5.2 Auswertung GMF S-420F

5.2.1 Der Industrieroboter GMF S-420F

Dieser Roboter wird vorwiegend für Punktschweißarbeiten im Rohbau der Fahrzeugfertigung und in der allgemeinen industriellen Fertigung, sowie für Handhabungsaufgaben eingesetzt. Über 13000 Roboter sind bisher weltweit von dieser Typreihe im Einsatz. Die geringen Massen des gesamten Roboterarmes erlauben hohe Geschwindigkeiten. Alle sechs Achsen sind direkt elektrisch angetrieben und die Motore lassen sich sehr präzise regeln. Je nach Ausführung können durch diesen Roboter Massen bis zu 120 Kilogramm bewegt werden. Die Herstellerangaben bezüglich der Wiederholgenauigkeit liegen bei $\pm 4/10$ Millimeter. Tabelle 5.2.1 enthält den Grundparametersatz und die nachfolgenden Abbildungen zeigen Abmessungen und verschiedene Ansichten.

Achsen	**ϑ [°]**	**k [mm]**	**l [mm]**	**α [°]**	**β [°]**
BKS-1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1-2	0.000	0.000	270.000	-90.000	0.000
2-3	-90.000	0.000	900.000	180.000	0.000
3-4	0.000	0.000	270.000	-90.000	0.000
4-5	0.000	-1300.000	0.000	90.000	0.000
5-6	0.000	0.000	0.000	-90.000	0.000
6-WKS	180.000	-260.000	0.000	180.000	0.000

Tabelle 5.2.1 Ausgangsparameter des GMF S420F.

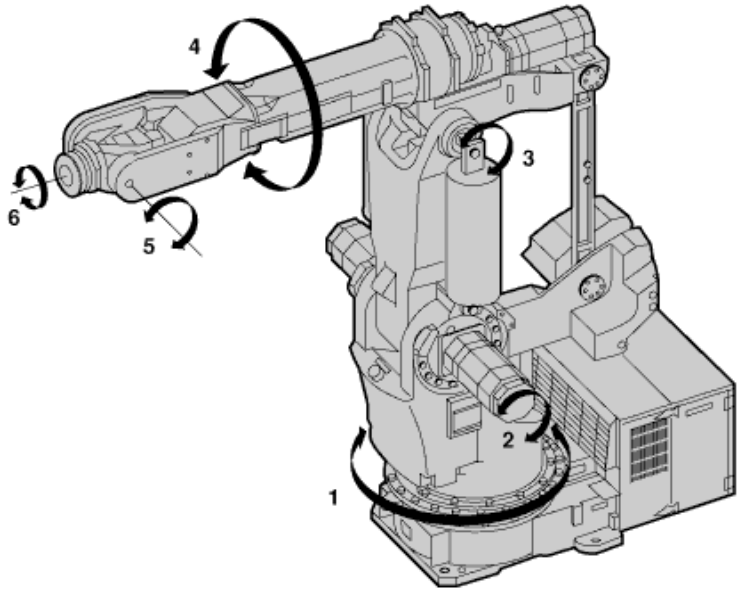


Abbildung 5.2.1 Industrieroboters GMF S420F.

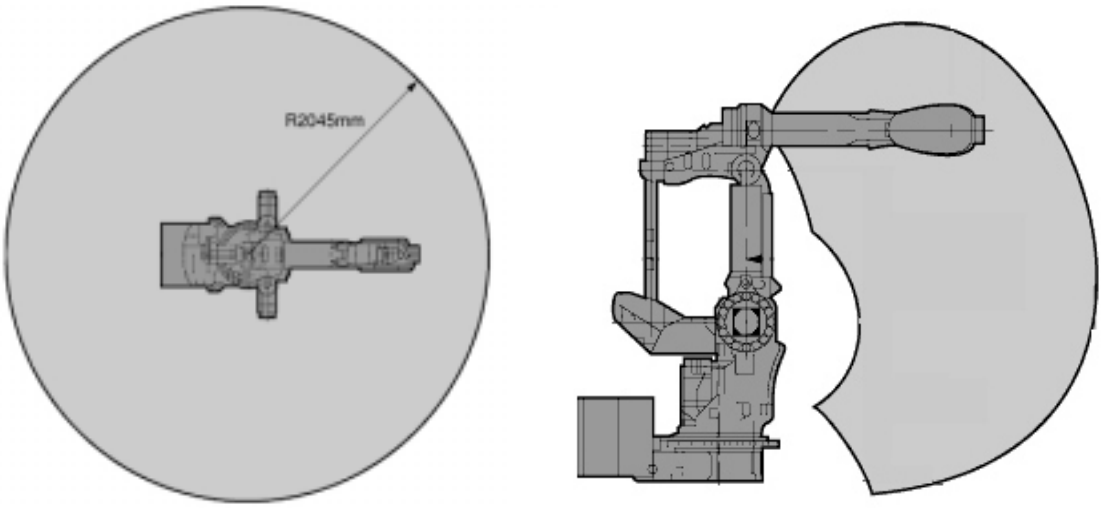


Abbildung 5.2.2 Der Arbeitsraum des Industrieroboters GMF S420F.

Bei diesem Typ sind bauartbedingt, die Achsen 2 und 3 parallel. Das bedeutet, daß nur beim Übergang von Achse 2 zu Achse 3 vom DH-Modell auf das HM-Modell gewechselt werden muß, sofern der Parallelitätsparameter β_2 eingeführt werden soll. Die anderen Achstransformationen werden auf alle Fälle nach dem DH-Modell abgebildet.

5.2.2 Vergleichskoordinaten

Die Vermessung wurde mit drei Theodoliten durchgeführt. Das BKS wurde, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, aufgesucht. Anschließend wurde die Transformation vom MKS in das BKS gerechnet und die Roboterposen mit einer Zielhand im BKS direkt vermessen. Maximal konnten so pro Pose drei Ziele an der Zielhand beobachtet werden. In einigen Ausnahmefällen konnten manche der Ziele von den Standpunkten nicht eingesehen werden und mußten dadurch entfallen.

Mit 4 Raumstrecken (Basislattenaufstellungen), 1005 Horizontalrichtungen und 1005 Zenitdistanzen von 3 Standpunkten aus wurden in der 3D-Netzausgleichung 402 Neupunkte bestimmt. Die Konfiguration zwischen den Stand- und Zielpunkten der Vermessung ist in den Abbildungen 5.2.3 und 5.2.4 dargestellt. Ein Auszug der Ergebnisse gibt die Tabelle 5.2.2 wieder.

	σ_x [mm]	σ_y [mm]	σ_z [mm]
Mittel	0.022	0.010	0.036
max	0.037	0.020	0.066
min	0.002	0.001	0.014

Tabelle 5.2.2 Koordinatengenauigkeiten aus der 3D-Netzausgleichung.

Die Ergebnisse zeigen, daß im Durchschnitt die Punkte Koordinatengenauigkeiten < 0.04 Millimeter aufweisen. Damit war dieser Datensatz zur Bestimmung der Geometrieparameter des Roboters geeignet.

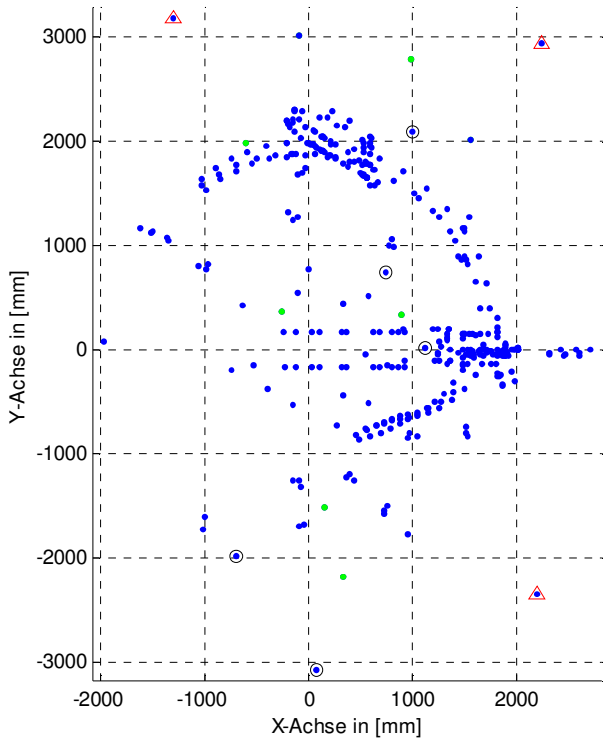


Abbildung 5.2.3 Grundriß der Vermessung (Standpunkte Δ, Paßpunkte ⊙ und Objektpunkte ●).

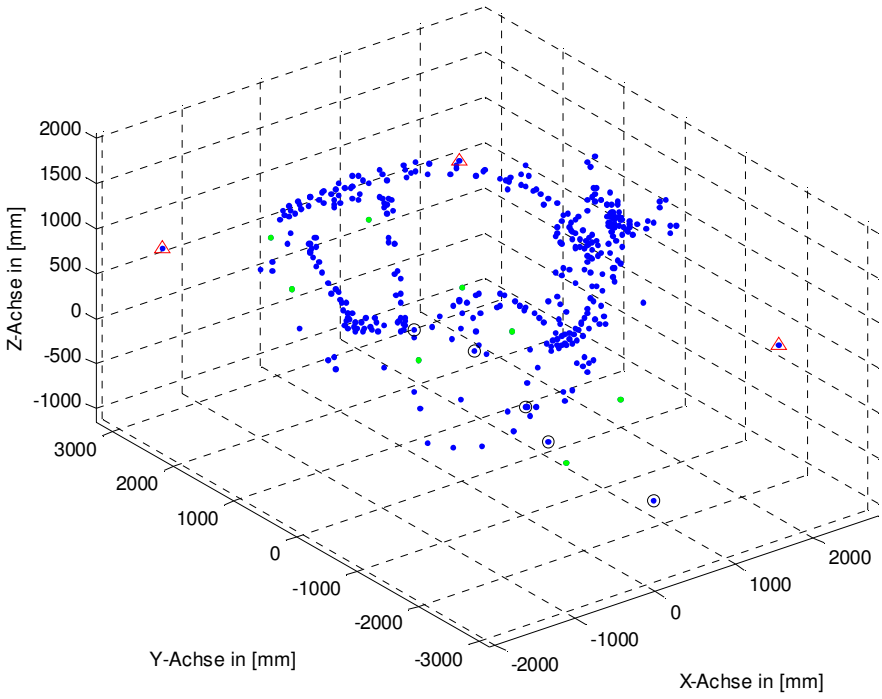


Abbildung 5.2.4 Netzbild der Vermessung in 3D-Darstellung (Standpunkte Δ, Paßpunkte ⊙ und Objektpunkte ●).

5.2.3 Identifikation der Roboterparameter

Bei der Auswertung wurden aus dem gesamten Datenmaterial vier Varianten gebildet und mit den Buchstaben A, B, S, K bezeichnet. Diese Fälle werden nachfolgend näher beschrieben:

S: 30 Roboterposen sind gleichmäßig über den gesamten Arbeitsbereich verteilt. Insgesamt werden 86 Zielpunkte eingeführt.

A: 26 Roboterposen liegen nur in einem kleinen Bereich des Arbeitsraumes, der für den Einbau einer PKW-Türgummidichtung benötigt wird. Hier werden 72 Zielpunkte in die Ausgleichung eingeführt.

BK: 52 Roboterposen entstammen den Beobachtungen der achsweise bestimmten Parameter, aus dem speziellen Verfahren. Mit den 52 verschiedenen Stellungen werden 143 Zielpunkte als Beobachtungen in die Ausgleichung eingebracht.

BSAK: Alle vorhandenen Roboterposen aus 1 bis 3 ergeben 108 Stellungen. Im letzten Fall sind 298 Punkte als Beobachtungen für Sollpunkte vorgegeben[4].

Für die Gewichtsbestimmung wurden die Beobachtungen für alle Punkte in einer 3D-Netzausgleichung im BKS ausgeglichen. Diese Ausgleichung liefert die vollbesetzte Varianz-Kovarianzmatrix, aus der sich auch die einfacheren Gewichte ableiten lassen. Die Gewichtungen werden folgendermaßen bezeichnet:

1. Einheitsmatrix,
2. punktweise Gewichtung (nur Punktgenauigkeit),
3. punktweise Gewichtung (in x-, y-, z-Richtung) und
4. volle Varianz/Kovarianzmatrix.

Damit und mit den zur Verfügung stehenden möglichen kinematischen Robotermodellen, mit und ohne vorgeschalteter 3D-Transformation in das BKS, konnten verschiedene Fälle gerechnet werden. Weiterhin wurde das Datenmaterial auf mögliche Ausreißer, nicht signifikante Parameter und minimale Beobachtungsanzahl untersucht.

Die Auswertung aller Varianten hat gezeigt, daß die Verteilung der Posen im Arbeitsraum einen Einfluß auf die Ergebnisse der geometrischen Parameter hat. Das bedeutet, daß bei der Parameteridentifikation unterschieden werden muß: wird der Roboter in seiner Anwendung den gesamten Arbeitsbereich ausfüllen oder arbeitet er nur in einer kleinen Region des Arbeitsraumes. Ein Parametersatz, der für eine bestimmte regionale Aufgabe berechnet wurde, kann von dem Parametersatz für den gesamten Arbeitsbereich mehr oder weniger stark abweichen[5]. Hier muß also ein Kompromiß zwischen maximal erreichbarer Genauigkeit in einer speziellen Anwendung und der maximal möglichen Flexibilität (Kalibrierung des gesamten Arbeitsraumes) eingegangen werden. In Tabelle 5.2.3 sind zwei Fälle in Ergebnisauszügen gegenübergestellt[6].

In beiden Fällen wurde mit der punktweisen Gewichtung der gleiche Gewichtsansatz gewählt. Mit beiden Datensätzen wurde jeweils eine hohe Grundgenauigkeit erreicht und doch unterscheiden sich die beiden Ergebnisse an manchen Stellen erheblich. Jeder Satz Beobachtungen modelliert die gesuchten Parameter bestmöglich. Das muß derart gedeutet werden, daß beim Beispiel *Fall A* manche Parameter deswegen schlecht bestimmt wurden, weil deren Achsen nur wenig verfahren wurden. Im Beispiel *Fall S* dagegen, wurde der Bewegungsbereich jeder Achse durch 30 verschiedene Stellungen abgetastet.

Die großen Unterschiede bei den Längenparametern sind durch Korrelationenen der Parameter untereinander zu begründen. In der Abbildung 5.2.5 sind neben der kinematischen Struktur mit einigen Längenparametern auch ihre Wirkungsrichtungen aufgezeigt. In Tabelle 5.2.4 sind die größten Korrelationen (in Prozent) zwischen den Längenparametern dargestellt. Durch die hohen Korrelationen werden Zuschläge an einzelnen Parametern an anderer Stelle wieder wett gemacht. Im Beispiel S, Gewicht 3 (s. Tab. 5.2.4) ist der Parame-

[4] Die Abweichung zur Summe der Fälle S, A, BK kommt daher, daß die Nullstellung auch in den Varianten S und A auftritt.
[5] Dieses Ergebnis tritt in gleicher Weise bei der Kalibrierung geodätischer Instrumente auf, z. B. bei dem Verhalten von Fernrohren („Gang der Fokussierlinse“) oder bei elektronischen Distanzmessern. Bei beiden Beispielen können sich die Ergebnisse der Kalibrierung im Nahbereich von denen des gesamten Bereichs erheblich unterscheiden.
[6] Zur Darstellung könnten ebenso die anderen Gewichtsansätze herangezogen werden.

ter k_5 zu 95 % mit dem Parameter l_2 und zu 84% mit dem Parameter l_1 korrelliert. Die errechneten Parameter heben sich gegenseitig wieder auf:

	k_5	l_2	l_1
Vorgabe:	1300.000	+ 270.000	+ 0.000 = 1570.000 mm
Berechnet:	1304.154	+ 265.011	+ 0.839 = 1570.004 mm.

Fall A mit DH-Modell, Gewicht 3:

					DH - Parameter:					
Achse	theta		k		l		alpha		beta	
B-1:	0.000+-	x	0.000+-	x	-0.883+-	0.354	-0.062+-	0.027	0.000+-	x
1-2:	0.145+-	0.029	0.592+-	0.755	265.634+-	0.498	-89.994+-	0.016	0.000+-	x
2-3:	-90.215+-	0.029	0.000+-	x	901.917+-	0.590	179.942+-	0.031	0.000+-	x
3-4:	-0.068+-	0.033	-0.631+-	0.712	270.588+-	0.567	-90.160+-	0.053	0.000+-	x
4-5:	-0.047+-	0.068	-1302.854+-	0.385	0.907+-	0.435	90.073+-	0.100	0.000+-	x
5-6:	-0.087+-	0.026	-0.978+-	0.221	-0.654+-	0.499	-90.091+-	0.109	0.000+-	x
6-W:	179.954+-	0.073	-263.844+-	0.457	0.078+-	0.070	180.010+-	0.019	0.000+-	x

Fall S mit DH-Modell, Gewicht 3:

					DH - Parameter:					
Achse	theta		k		l		alpha		beta	
B-1:	0.000+-	x	0.000+-	x	-0.839+-	0.124	0.051+-	0.005	0.000+-	x
1-2:	0.157+-	0.029	-5.183+-	0.841	265.011+-	0.773	-89.914+-	0.025	0.000+-	x
2-3:	-89.968+-	0.027	0.000+-	x	904.991+-	0.401	180.144+-	0.015	0.000+-	x
3-4:	0.103+-	0.027	-2.107+-	0.514	270.754+-	0.605	-90.338+-	0.029	0.000+-	x
4-5:	0.071+-	0.025	-1304.154+-	0.512	-1.087+-	0.172	89.951+-	0.014	0.000+-	x
5-6:	-0.028+-	0.008	-0.760+-	0.096	0.841+-	0.181	-89.942+-	0.014	0.000+-	x
6-W:	179.945+-	0.012	-261.335+-	0.050	0.219+-	0.026	180.062+-	0.007	0.000+-	x

Tabelle 5.2.3 Ergebnisse der Fälle A und S mit DH-Modell und Gewicht 3.

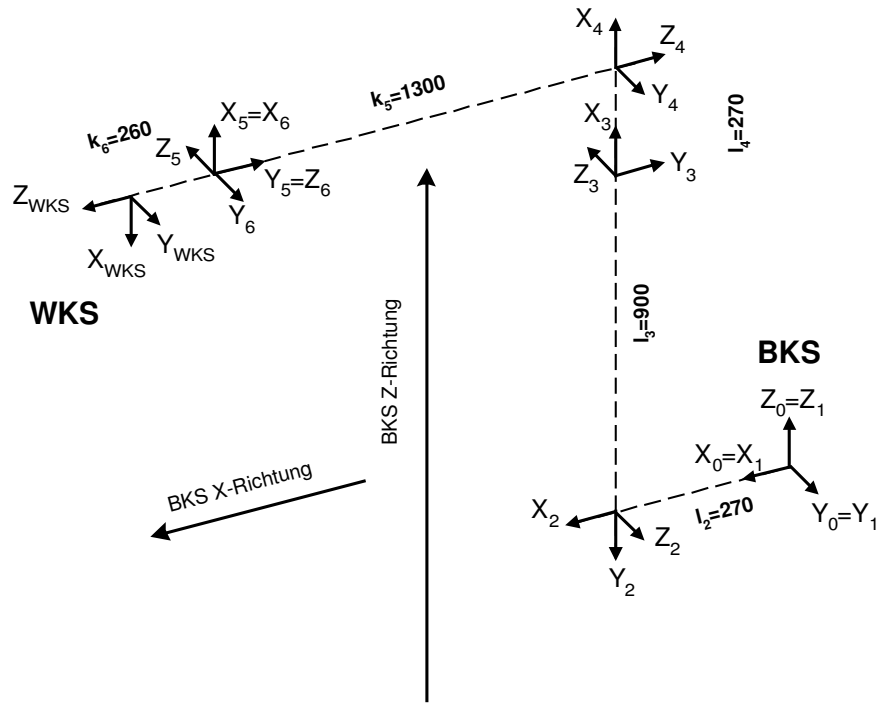
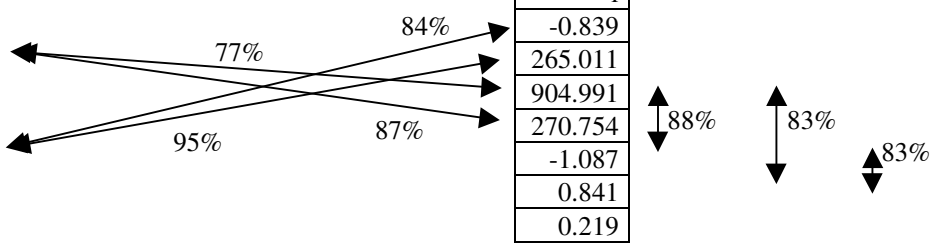


Abbildung 5.2.5 Kinematische Struktur mit den Längenparametern und ihren beiden Wirkungsrichtungen.

Achse	k
B-1	0.000
1-2	-5.183
2-3	0.000
3-4	-2.107
4-5	-1304.154
5-6	-0.760
6-W	-261.335



l
-0.839
265.011
904.991
270.754
-1.087
0.841
0.219

Tabelle 5.2.4 Korrelationen zwischen den Längenparametern im Fall S und Gewicht 3 (s.Tab. 5.2.3).

Der Zusammenhang zwischen eingeführten Beobachtungen in einem speziellen Arbeitsbereich und dem dazu bestimmten Parametersatz soll nun näher erläutert werden. Ergänzt man den Datensatz aus dem *Fall A* um fünf weitere Posen aus den *Fällen S* und *BK* und wendet diese Daten dann auf die in *A* bestimmten DH-Parameter an, so erhält man für diese neuen Punkte erhebliche Verbesserungen. Alle neuen Beobachtungen wurden so ausgewählt, daß sie ausserhalb des optimierten Arbeitsbereichs lagen. Diese neuen Punkte passen nicht zu dem optimierten Parametersatz des *Falles A*. Die Verbesserungen in den neuen Punkten erreichen Werte bis zu 8.4 mm (s. Abb. 5.2.6). Die Werte der alten Punkte dagegen bleiben alle unter 0.7 mm.

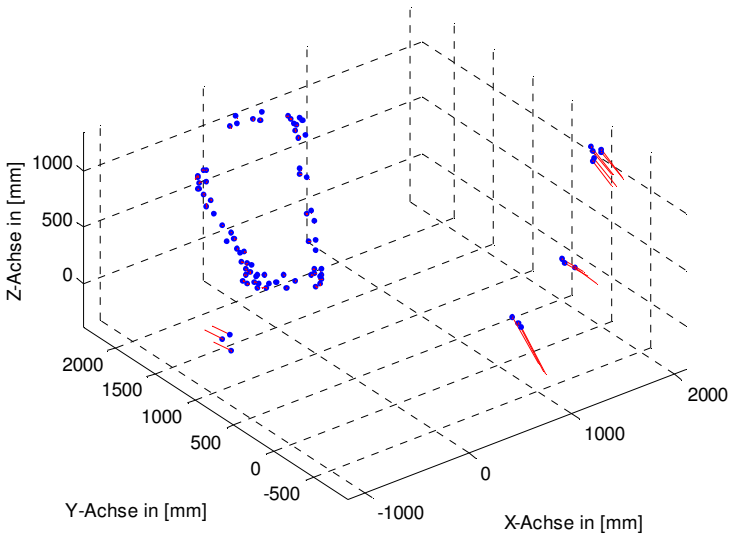


Abbildung 5.2.6 Fall A: Verbesserungen (50-fach überhöht zum Achsenmaßstab) in Punkten, die außerhalb des Arbeitsbereichs liegen, in dem eine Parameteranpassung durchgeführt wurde.

Zur Beurteilung der Ergebnisse wurde der Grad der Verbesserung eingeführt. Hier wird das Verhältnis der mittleren Restklaffungen vor und nach der Parameteridentifikation bestimmt. Im unten aufgeführten Beispiel ergeben sich die folgenden typischen Werte:

```
Fall S, DH-Modell, Gewicht 1:
              vorher          Restklaffungen        nachher
      mittl. Betrag (dx, dy, dz)             mittl. Betrag (dx, dy, dz)
             1.6835                                  0.0543
 Verhaeltnis der Betraege in [%]    96.8 (Grad der Verbesserung)
```

Tabelle 5.2.5 Verhältnis der Beträge der Restklaffungen vor und nach der Parameter Parameteridentifikation.

Bei der Mehrzahl aller untersuchten Fälle lag der Grad der Verbesserung über 90% - das Maximum sogar bei 97.2%. Mit der Parameterschätzung wird das Robotermodell bis auf ca. 5% Restabweichungen neu modelliert. Die verbleibenden 5% sind dynamischen Effekte, die durch die durchgeführten statischen Messungen nicht erfasst werden konnten. Der hohe Grad der Verbesserung unterstreicht die Wirksamkeit des Verfahrens, einen Roboter hinsichtlich seines typischen Arbeitsraumes zu modellieren.

Im Folgenden werden die Ergebnisse an zwei Beispielen grafisch und tabellarisch aufbereitet. Zunächst handelt es sich in beiden Beispielen um eine Auswertung nach dem DH-Modell für alle Achsen. Wegen Singularitäten bei der Inversion der Normalgleichungsmatrix wurden folgende Parameter aus der Ausgleichung herausgenommen:

- ϑ_0, da das BKS mit dem System der ersten Achse parallel verläuft,
- k_0, da das BKS mit dem System der ersten Achse parallel verläuft und
- k_2, da die Achsen zwei und drei zueinander parallel sind.

Die eingeführten Datensätze betreffen zum einen den gesamten Arbeitsraum (*Fall S*) und zum anderen einen stark eingeschränkten Arbeitsraum (*Fall A*). Siehe dazu auch die Tabelle 5.2.3.

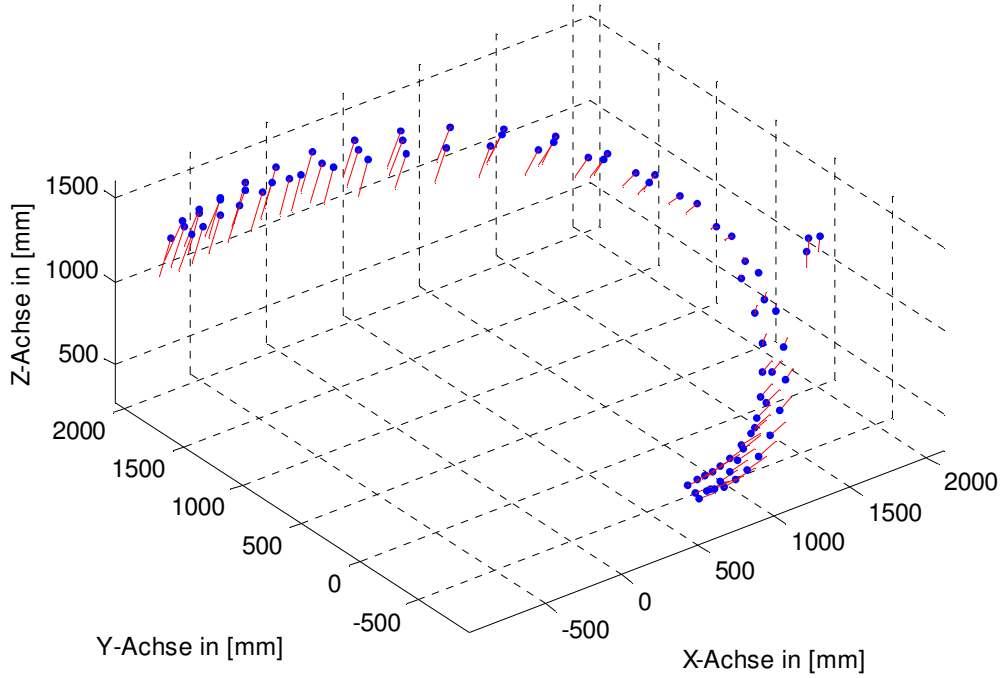


Abbildung 5.2.7 Fall S: Veränderung der Posekoordinaten (50-fach überhöht zum Achsenmaßstab) durch Parameteroptimierung.

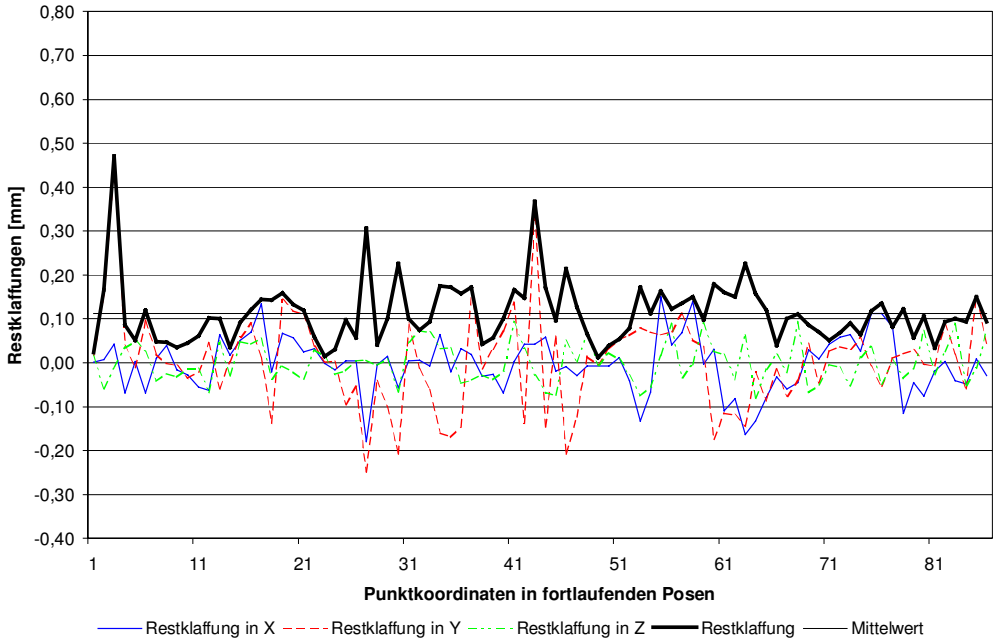


Abbildung 5.2.8 Fall S: Beträge der Restklaffungen nach der Parameterbestimmung.

Die Beträge der Koordinatenveränderungen durch Parameteroptimierung liegen im Fall S zwischen 2 und 5 Millimetern verteilt im gesamten Arbeitsraum (s. Abb. 5.2.7). Die Restklaffungen nach der Ausgleichung liegen im Mittel bei 0.11 mm (s. Abb. 5.2.8).

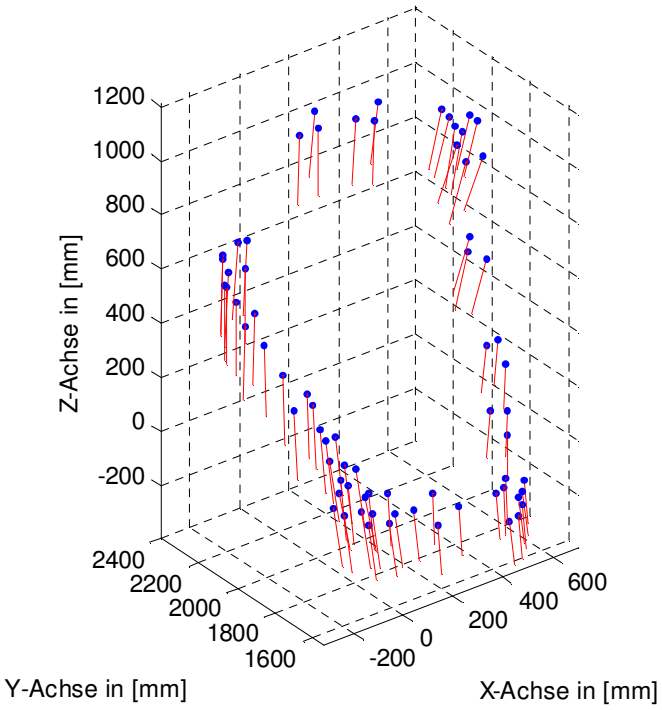


Abbildung 5.2.9 Fall A: Veränderung der Posekoordinaten (50-fach überhöht zum Achsenmaßstab) durch Parameteroptimierung.

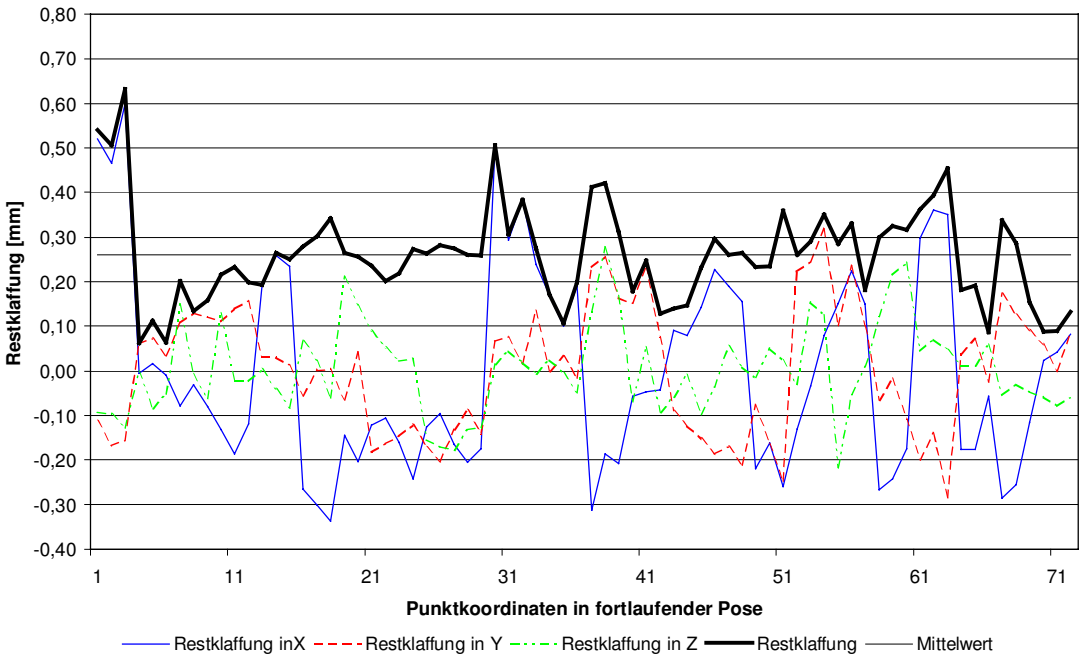


Abbildung 5.2.10 Fall A: Beträge der Restklaffungen nach der Parameterbestimmung.

Die Koordinatenveränderungen durch Parameteroptimierung liegen hier ebenfalls in einer Größenordnung zwischen 3 und 5 Millimetern (s. Abb. 5.2.9). Nach der Ausgleichung liegt der Mittelwert der Restklaffungen bei 0.26 mm (s. Abb. 5.2.10). Das schlechtere Genauigkeitsniveau im zweiten Beispiel ist auf die geringere Ausdehnung im Arbeitsraum zurückzuführen.

Parameter mit nichtsignifikanten Veränderungen können aus einer Folgeausgleichung herausgenommen werden. Die Fehleranteile, die bisher diese Parameter modelliert haben, werden von den in der Ausgleichung verbleibenden, ohne Genauigkeitsverlust mit aufgenommen.

Bei der Variation der Gewichte zeigte sich überraschenderweise kein signifikanter Unterschied in den Ergebnissen. In der Tabelle 5.2.6 sind die Ergebnisse für den Fall A mit den vier verschiedenen Gewichtungen aufgelistet. Sowohl die Genauigkeiten der Parameter, als auch die Verbesserungen der Beobachtungen sind nahezu identisch. Auf den ersten Blick erscheint die Gewichtung 1 von den anderen drei Varianten abzuweichen. Bei näherer Betrachtung wird deutlich, dass es sich auch hier um die gleichen Ergebnisse handelt. Das σ_0 mit der Gewichtung 1 gibt das Genauigkeitsniveau einer Beobachtung wieder. Bei den Varianten 2 bis 4 kann das Genauigkeitsniveau für eine Beobachtung nach Höpcke [Höpcke 80] mit

$$\sigma_i = \frac{\sigma_0}{\sqrt{p_i}} \tag{5-1}$$

errechnet werden (mit *i* für die jeweilige Beobachtung). Für Gewicht 2 erhält man mit $\sigma_0 = 0.02548$ und $p_i = 0.020397$ ein $\sigma_i = 0.178$, das wiederum die gleiche Größenordnung darstellt, wie das σ_0 im Beispiel der Gewichtung 1 (σ_0=0.161). Die Werte der einzelnen Gewichte für die punktweise Gewichtung gibt die Abbildung 5.2.11 wieder.

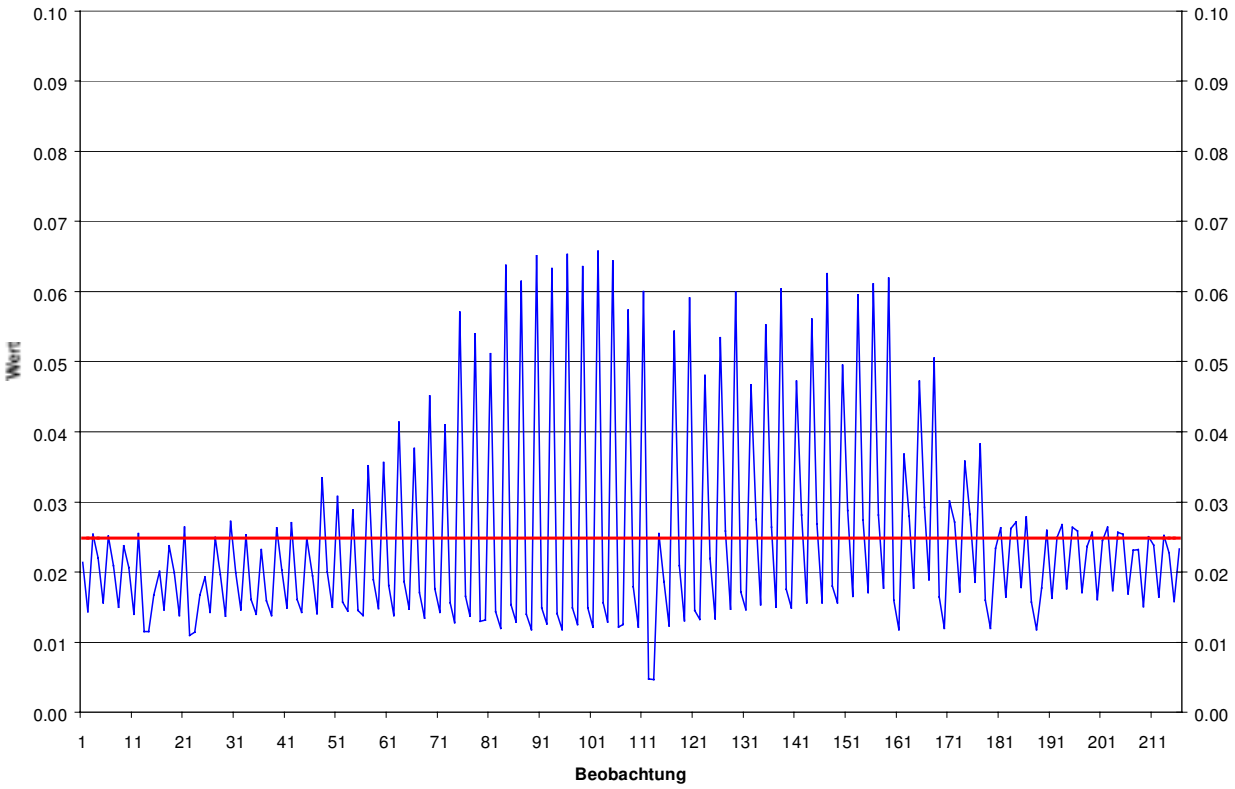


Abbildung 5.2.11 Fall A mit den einzelnen Gewichten (x, y, z) und dem mittleren Gewicht.

```
Fall A, HM-Modell, Gewicht 1:
Sigma 0       (S0)           =        0.16098
Rang          (p)            =       27        (Berechnung)
[vvP] aus den Verbesserungen =        4.89781
                                                  DH - Parameter:
Achse        theta              k                 l               alpha            beta
B-1:     0.000+-   x       0.000+-   x      -1.819+-  0.390   -0.014+-  0.029    0.053+-  0.016
1-2:     0.065+-  0.052    0.683+-  0.685  265.874+-  0.564  -89.965+-  0.017    0.000+-   x
2-3:   -90.164+-  0.028    0.000+-   x     901.780+-  0.547  179.968+-  0.036    0.028+-  0.025
3-4:    -0.069+-  0.035    0.229+-  0.917  271.140+-  0.565  -90.061+-  0.061    0.000+-   x
4-5:    -0.161+-  0.080-1302.224+-  0.398    0.900+-  0.358   90.064+-  0.108    0.000+-   x
5-6:    -0.021+-  0.030   -0.051+-  0.375   -1.296+-  0.444  -89.959+-  0.118    0.000+-   x
6-W:   180.099+-  0.088 -263.973+-  0.504   -0.103+-  0.091  180.044+-  0.022    0.000+-   x

Fall A, HM-Modell, Gewicht 2:
Sigma 0       (S0)           =        0.02548
Rang          (p)            =       27        (Berechnung)
[vvP] aus den Verbesserungen =        0.12267
                                                  DH - Parameter:
Achse        theta              k                 l               alpha            beta
B-1:     0.000+-   x       0.000+-   x      -1.659+-  0.397   -0.010+-  0.028    0.050+-  0.016
1-2:     0.081+-  0.052    0.328+-  0.686  265.697+-  0.560  -89.970+-  0.017    0.000+-   x
2-3:   -90.168+-  0.028    0.000+-   x     902.093+-  0.543  179.976+-  0.036    0.022+-  0.025
3-4:    -0.077+-  0.035    0.222+-  0.898  271.221+-  0.552  -90.083+-  0.061    0.000+-   x
4-5:    -0.146+-  0.078-1302.489+-  0.395    0.748+-  0.352   90.081+-  0.107    0.000+-   x
5-6:    -0.020+-  0.029   -0.089+-  0.365   -1.076+-  0.437  -89.983+-  0.117    0.000+-   x
6-W:   180.093+-  0.087 -264.041+-  0.495   -0.114+-  0.094  180.048+-  0.022    0.000+-   x

Fall A, HM-Modell, Gewicht 3:
Sigma 0       (S0)           =        0.02370
Rang          (p)            =       27        (Berechnung)
[vvP] aus den Verbesserungen =        0.10619
                                                  DH - Parameter:
Achse        theta              k                 l               alpha            beta
B-1:     0.000+-   x       0.000+-   x      -1.712+-  0.399   -0.022+-  0.028    0.055+-  0.015
1-2:     0.109+-  0.048   -0.039+-  0.724  265.865+-  0.482  -89.971+-  0.017    0.000+-   x
2-3:   -90.188+-  0.028    0.000+-   x     902.321+-  0.568  179.974+-  0.034    0.007+-  0.023
3-4:    -0.072+-  0.032   -0.040+-  0.874  271.080+-  0.548  -90.130+-  0.053    0.000+-   x
4-5:    -0.139+-  0.070-1302.691+-  0.367    0.682+-  0.414   90.152+-  0.096    0.000+-   x
5-6:    -0.046+-  0.026    0.035+-  0.340   -0.777+-  0.472  -90.039+-  0.106    0.000+-   x
6-W:   180.148+-  0.082 -263.862+-  0.433   -0.150+-  0.082  180.038+-  0.020    0.000+-   x

Fall A, HM-Modell, Gewicht 4:
Sigma 0       (S0)           =        0.03028
Rang          (p)            =       27        (Berechnung)
[vvP] aus den Verbesserungen =        0.17327
                                                  DH - Parameter:
Achse        theta              k                 l               alpha            beta
B-1:     0.000+-   x       0.000+-   x      -2.133+-  0.361   -0.037+-  0.031    0.064+-  0.015
1-2:     0.112+-  0.053    0.965+-  0.657  265.909+-  0.520  -89.964+-  0.017    0.000+-   x
2-3:   -90.179+-  0.030    0.000+-   x     901.609+-  0.497  179.936+-  0.037    0.008+-  0.024
3-4:    -0.051+-  0.032    0.566+-  0.895  271.057+-  0.489  -90.087+-  0.056    0.000+-   x
4-5:    -0.129+-  0.075-1302.223+-  0.407    1.043+-  0.314   90.113+-  0.105    0.000+-   x
5-6:    -0.032+-  0.025    0.149+-  0.342   -1.393+-  0.384  -90.010+-  0.114    0.000+-   x
6-W:   180.127+-  0.086 -263.847+-  0.472   -0.146+-  0.084  180.043+-  0.020    0.000+-   x
```

Tabelle 5.2.6 Ergebnisse Fall A mit HM-Modell und den verschiedenen Gewichtsansätzen.

In allen gerechneten Fällen konvergierte die Ausgleichung, durch eine gute Linearisierung mit den Fabrikdaten, nach der zweiten Iteration.

5.2.4 Benötigte Ziel- und Posenanzahl

Die Variation der benötigten Posen und verwendeten Ziele an der Zielhand hat ergeben, daß sich die Ergebnisse zwischen 30 Posen mit allen 3 Zielen und 20 Posen mit 3 Zielen nicht so sehr unterscheiden. Die Unterschiede werden jedoch größer, je weniger Posen und je weniger Ziele zur Parameteridentifikation eingeführt werden. Bei zu geringer Posen- und Zielanzahl kann es vorkommen, daß einige Parameter nicht mehr identifizierbar sind. Im Beispiel S konnten die Winkelparameter jeweils noch gut bestimmt werden, die Längenparameter dagegen unterschieden sich teilweise um einen Millimeter.

5.3 Auswertung Cloos ROMAT RO56

5.3.1 Der Industrieroboter Cloos ROMAT RO56

Bei diesem Roboter handelt es sich um einen sechsachsigen Typ mit vertikalem Knickarm. Dieser Roboter ist kleiner als der GMF S420-F in Kapitel 5.2. Damit fällt auch sein Arbeitsraum kleiner aus (s. Abb. 5.3.2). Den typischen Einsatz hat dieser Roboter bei Schweißarbeiten (Bahnschweißen). Während der Vermessung befand sich der Roboter in seinem Arbeitsumfeld in einer Fertigungszelle.

Abbildung 5.3.1 Cloos ROMAT Ro56 in einer typischen Fertigungsumgebung (stehend).

Entgegen der Abbildung 5.3.1 war der Roboter hängend in der Fertigungszelle montiert (s. Abb. 5.3.2); die zu bearbeitenden Teile wurden unter ihm zugeführt. Seine kinematische Struktur nach dem DH-Modell hat folgende Gestalt:

Achsen	**ϑ [°]**	**k [mm]**	**l [mm]**	**α [°]**	**β [°]**
BKS-1	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
1-2	0.000	895.000	0.000	-90.000	0.000
2-3	0.000	0.000	430.000	0.000	0.000
3-4	0.000	0.000	0.000	-90.000	0.000
4-5	0.000	430.000	0.000	-90.000	0.000
5-6	0.000	0.000	0.000	90.000	0.000
6-WKS	0.000	60.000	0.000	0.000	0.000

Tabelle 5.3.1 Ausgangsparameter des Cloos ROMAT Ro56.

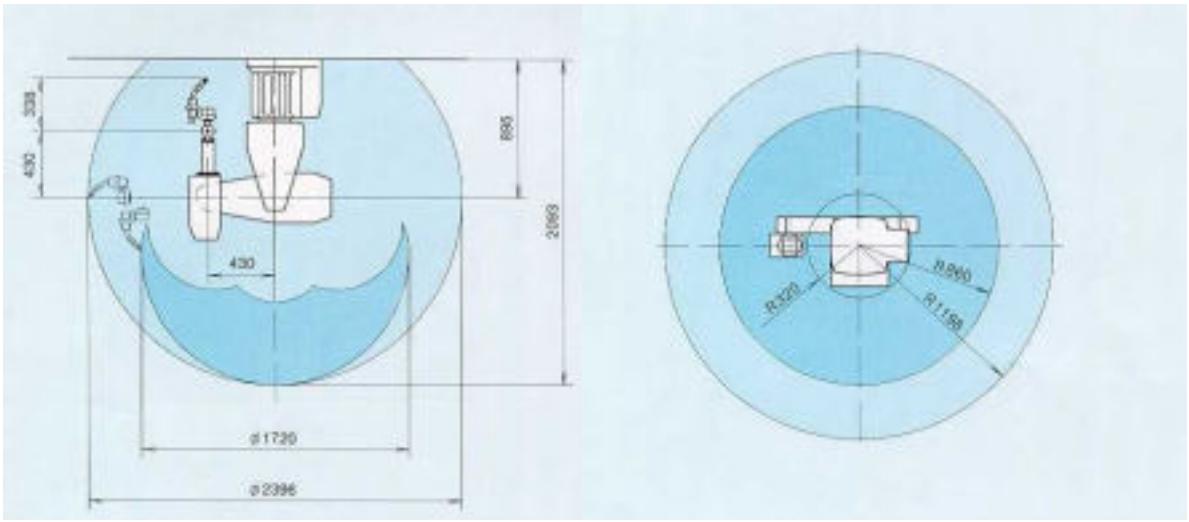


Abbildung 5.3.2 Cloos ROMAT Ro56 Arbeitsraum (hängend).

5.3.2 Vergleichskoordinaten

Bei der Vermessung wurden drei digitale Sekundentheodolite verwendet. Das BKS wurde, wie in Kapitel 4.1 beschrieben, aufgesucht. Anschließend wurde die Transformation in das BKS gerechnet und die Roboterposen mit einer Zielhand im BKS direkt vermessen. Maximal konnten so pro Pose drei Ziele an der Zielhand beobachtet werden. In einigen Ausnahmefällen konnten manche der Ziele von den Standpunkten nicht eingesehen werden und mußten dadurch entfallen.

In die Bündelausgleichung wurden die drei Theodolitstandpunkte, 160 Neupunkte und 4 Raumstrecken (Basislattenaufstellungen) eingeführt. In der Ausgleichung wurden alle Beobachtungen (Strecken, Horizontalrichtungen und Zenitdistanzen) gemeinsam ausgeglichen. Der mittlere RMS wurde mit 0.056 mm berechnet. Die Konfiguration zwischen den Stand- und Zielpunkten der Vermessung ist in den Abbildungen 5.3.3 und 5.3.4 dargestellt.

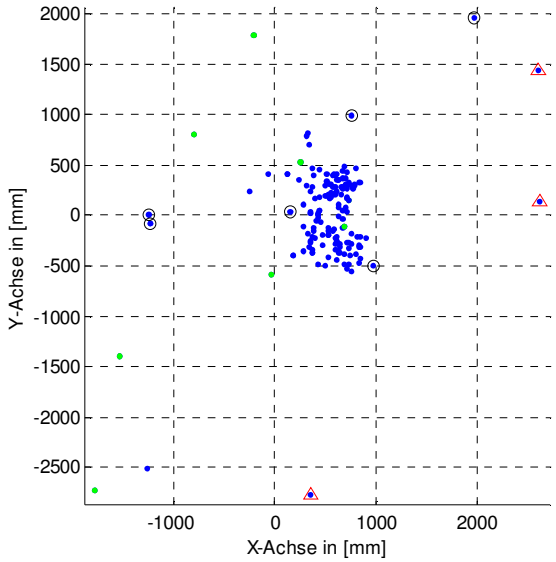


Abbildung 5.3.3 Grundriß der Vermessung (Standpunkte Δ, Paßpunkte ⊙ und Objektpunkte ●).

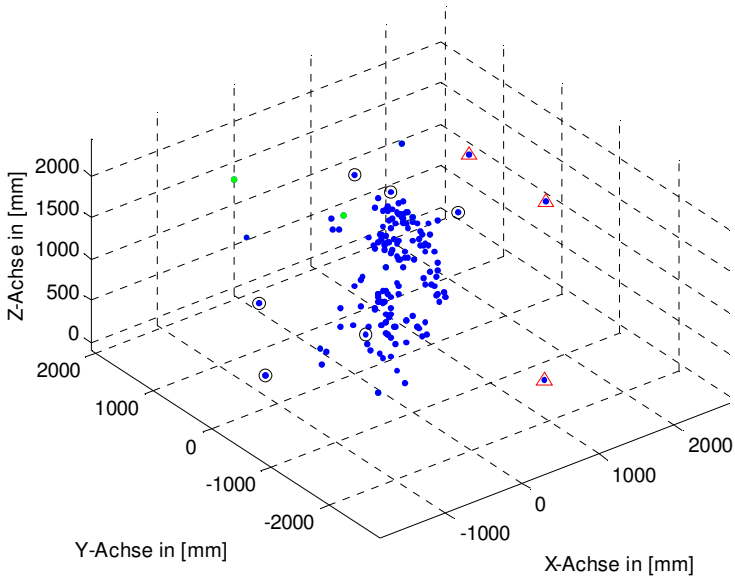


Abbildung 5.3.4 Netzbild der Vermessung in 3D-Darstellung(Standpunkte Δ, Paßpunkte ⊙ und Objektpunkte ●).

Die Genauigkeit der berechneten Koordinaten schwankte zwischen 0.014 und 0.112 mm. Damit läßt sich ebenfalls eine Parameterbestimmung des Roboters durchführen.

5.3.3 Identifikation der Roboterparameter

Im Folgenden wird ein Ergebnis der Parameterbestimmung grafisch und tabellarisch dargestellt. Die Auswertung erfolgte zunächst nach dem HM-Modell. Da die Achssysteme von BKS und der ersten Achse, sowie zwischen der zweiten und dritten Achse parallel sind, wurden die Parameter β_0 und β_2 zusätzlich eingeführt bzw. die Parameter k_0 und k_2 herausgenommen. Ebenso wurde auch ϑ_0 nicht mitbestimmt. Außerdem wurde der Datensatz noch zum Vergleich nach dem DH-Modell, also ohne die Parameter ϑ_0, k_0, β_0, β_2 und k_2, gerechnet.

Die eingestellten 32 Roboterposen waren im gesamten Arbeitsraum verteilt, Einschränkungen gab es nur durch die Umbauung des Roboters. Bei allen Posen wurden alle Ziele der Zielhand berücksichtigt.

Nach zwei Iterationen wurden folgende Ausgleichungsergebnisse erhalten (s. Tab. 5.3.2). Die Veränderung der Posekoordinaten bewegt sich zwischen 0.2 und 5 Millimetern (s. Abb. 5.3.5). Die verbleibenden Restklaffungen nach der Ausgleichung erreichen im Mittel 0.24 mm (s. Abb. 5.3.6). Der Grad der Verbesserung (s. Tab. 5.2.5) liegt hier bei 93.1% bei einem σ_0 von 0.16. Dieses Beispiel zeigt wieder, daß ein posenbezogener Parametersatz diese Posen besser modelliert, als die reinen Herstellerangaben.

```
Sigma 0        (S0)            =        0.16133
Rang           (p)             =       27        (Berechnung)
[vvP] aus den Verbesserungen =        6.55917
```

DH - Parameter:										
Achse	theta		k		l		alpha		beta	
B-1:	0.000+-	x	0.000+-	x	-0.012+-	0.119	0.001+-	0.002	0.032+-	0.006
1-2:	-0.157+-	0.009	895.347+-	0.043	0.235+-	0.055	-89.984+-	0.004	0.000+-	x
2-3:	0.006+-	0.007	0.000+-	x	430.193+-	0.042	0.036+-	0.004	0.015+-	0.007
3-4:	-0.032+-	0.011	0.242+-	0.104	-0.159+-	0.090	-89.998+-	0.009	0.000+-	x
4-5:	-0.536+-	0.009	430.097+-	0.027	0.213+-	0.024	-89.917+-	0.016	0.000+-	x
5-6:	-0.212+-	0.014	0.108+-	0.046	-0.112+-	0.045	89.957+-	0.017	0.000+-	x
6-W:	0.361+-	0.022	57.423+-	0.022	0.038+-	0.022	0.059+-	0.010	0.000+-	x

Tabelle 5.3.2 Ergebnisauszug Auswertung Cloos ROMAT Ro56 mit HM-Modell, Gewicht 1.

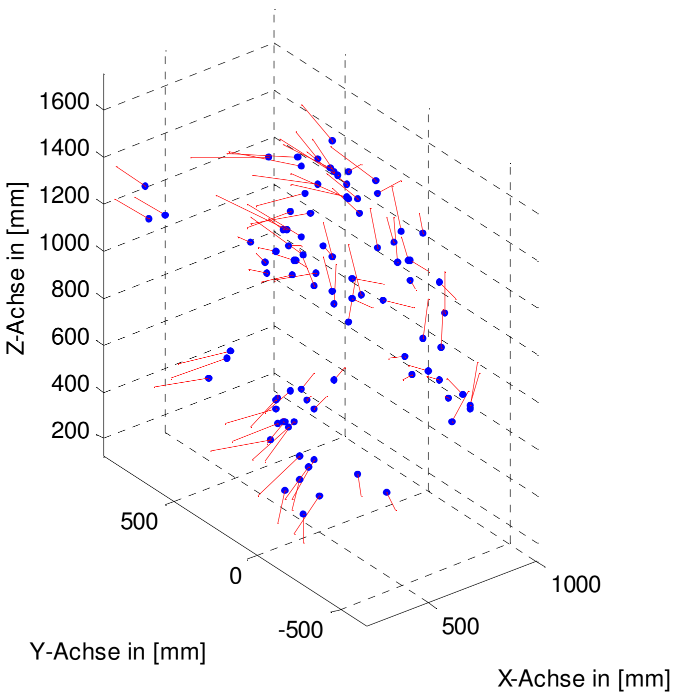


Abbildung 5.3.5 Veränderung der Posekoordinaten (50-fach überhöht zum Achsenmaßstab) durch Parameteroptimierung.

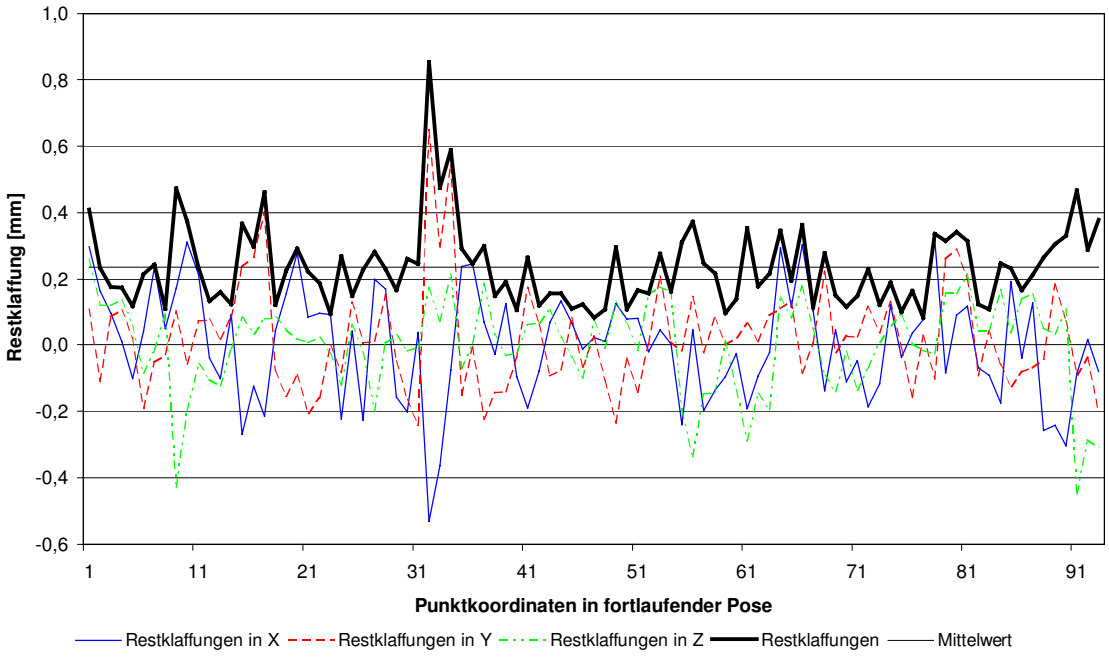


Abbildung 5.3.6 Romat Ro56 Beträge der Restklaffungen nach der Parameterbestimmung.

Nachfolgend ist der Vergleich zwischen dem DH- und dem HM-Modell aufgeführt.

ROMAT Ro56 mit DH-Modell, Gewicht 2:

Sigma 0 (S0) = 0.02733
Rang (p) = 25 (Berechnung)
[vvP] aus den Verbesserungen = 0.18970

					DH - Parameter:					
Achse	theta		k		l		alpha		beta	
B-1:	0.000+-	x	0.000+-	x	0.577+-	0.039	0.005+-	0.002	0.000+-	x
1-2:	-0.182+-	0.006	895.346+-	0.045	0.195+-	0.056	-89.980+-	0.004	0.000+-	x
2-3:	0.034+-	0.006	0.000+-	x	430.131+-	0.043	0.034+-	0.004	0.000+-	x
3-4:	-0.031+-	0.012	0.520+-	0.100	-0.136+-	0.097	-89.993+-	0.010	0.000+-	x
4-5:	-0.535+-	0.009	430.105+-	0.028	0.168+-	0.023	-89.929+-	0.016	0.000+-	x
5-6:	-0.208+-	0.015	0.102+-	0.048	-0.123+-	0.045	89.958+-	0.018	0.000+-	x
6-W:	0.355+-	0.022	57.450+-	0.022	0.037+-	0.024	0.065+-	0.012	0.000+-	x

ROMAT Ro56 mit HM-Modell, Gewicht 2:

Sigma 0 (S0) = 0.02595
Rang (p) = 27 (Berechnung)
[vvP] aus den Verbesserungen = 0.16969

					DH - Parameter:					
Achse	theta		k		l		alpha		beta	
B-1:	0.000+-	x	0.000+-	x	-0.004+-	0.114	0.003+-	0.002	0.031+-	0.006
1-2:	-0.161+-	0.010	895.345+-	0.043	0.242+-	0.054	-89.985+-	0.004	0.000+-	x
2-3:	0.007+-	0.007	0.000+-	x	430.179+-	0.042	0.038+-	0.004	0.017+-	0.007
3-4:	-0.028+-	0.011	0.333+-	0.107	-0.117+-	0.093	-90.000+-	0.009	0.000+-	x
4-5:	-0.537+-	0.008	430.102+-	0.027	0.186+-	0.023	-89.918+-	0.015	0.000+-	x
5-6:	-0.202+-	0.014	0.101+-	0.046	-0.132+-	0.043	89.950+-	0.018	0.000+-	x
6-W:	0.349+-	0.021	57.433+-	0.021	0.054+-	0.023	0.058+-	0.011	0.000+-	x

Tabelle 5.3.3 Ergebnisauszug Auswertung Cloos ROMAT Ro56 mit DH- und HM-Modell, Gewicht 2.

Die verschiedenen Parametrierungen zeigen, daß die Unterschiede zwischen dem DH-Modell und der HM-Vereinbarung, im Fall paralleler Achsen, nur sehr gering sind (β-Werte < 0.03°). Die Winkelkorrektur der Parallelität zwischen beiden Achsen fällt auch sehr klein aus.

6 Zusammenfassung

Der Einsatz von Industrierobotern wird weltweit stark vorangetrieben. Damit wird es möglich, industrielle Fertigungs- und Handhabungsaufgaben automatisch bzw. automatisiert ablaufen zu lassen. Durch die Erhöhung des Zeitdrucks, der für die Umsetzung von Prozessen vorgegeben wird, muß zwangsläufig die Zahl der Simulationen und Optimierungen von Arbeitsabschnitten in Rechnersystemen steigen. Abweichungen zwischen dem theoretischen Robotermodell und seiner Wirklichkeit führen dabei zu Poseabweichungen. Treten Poseabweichungen auf, müssen diese vor Ort manuell korrigiert werden und es kommt zu Verzögerungen im Fertigungsprozeß. Damit sind Bestimmungen der verschiedenen individuellen Robotergeometrien unumgänglich, wenn Nacharbeiten am Arbeitsprozeß entfallen sollen.

In der Literatur sind zahlreiche Möglichkeiten (siehe Kapitel 3.4) zur Parameteridentifikation beschrieben. Vielfach werden nur die geometrischen Parameter als Hauptverursacher der Poseabweichungen zitiert (siehe Kapitel 2.5). In manchen Veröffentlichungen werden auch die physikalischen Eigenschaften mit geeigneten Parametern versehen. Eine Prüfung der bestimmten Parameter erfolgt bisher nur über die erhaltenen Differenzen aus eingeführten und berechneten Posekoordinaten, aber ohne Berücksichtigung der Gewichte aus den erhaltenen Genauigkeiten und der Möglichkeiten der statistischen Tests. Nur in seltenen Fällen werden für die Modellparameter selbst die Genauigkeiten mit angegeben, aber eine Prüfung des eingeführten Beobachtungsmaterials auf Ausreißer entfällt. Weiterhin werden mit Wiederholungsmessungen zwar die Parameter regelmäßig untersucht, aber nicht deren Veränderbarkeit in Bezug auf die vermessenen Posen im Arbeitsraum. Alle Modelle haben dabei gemeinsam, daß die eingehenden Beobachtungen als gleichgewichtet in die Parameteridentifikation eingeführt werden.

Das vorgestellte Verfahren bietet die Möglichkeit, die Geometrie eines Industrieroboters seinen speziellen Anwendungsfällen optimal anzupassen. Eventuelle Modellschwächen, wie sie beispielsweise im DH-Modell bei aufeinanderfolgenden parallelen Achsen auftreten können, werden durch den Wechsel zur HM-Vereinbarung behoben. Damit kann dann anschließend die kinematische Kette des Roboters nach der DH- und der HM-Vereinbarung zusammengesetzt werden. Konnte das BKS des Roboters nicht ausreichend gut während der Kalibrierungsmessung aufgefunden werden, bietet eine vorgeschaltete 3D-Transformation die Möglichkeit, die Meßdaten besser in das BKS zu zentrieren. Die eingeführten Koordinaten können mit vier verschiedenen Gewichtsansätzen eingeführt werden:

- einfach (die Gewichtskoeffizientenmatrix entspricht der Einheitsmatrix),
- punktweise mit gleichen Anteilen für jede Koordinatenrichtung,
- punktweise mit verschiedenen Anteilen für jede Koordinatenrichtung (die Gewichtskoeffizientenmatrix entspricht einer Diagonalmatrix) und schließlich
- vollständig (die Gewichtkoeffizientenmatrix ist die vollbesetzte Varianz-Kovarianzmatrix).

Die Einführung der Gewichte hat das Ziel, daß bei der Vermessung schlechter bestimmte Punktkoordinaten bei der Parameteridentifikation ein geringes Gewicht erhalten und damit einen geringeren Einfluß auf die Parameter selbst. Es hat sich jedoch bei der Auswertung der Beispiele gezeigt, daß die unterschiedlichen Gewichte keinen signifikanten Einfluß auf die Ergebnisse haben. Die Berechnung der Standardabweichungen ermöglicht die Beurteilung der berechneten Parameter und der eingeführten Koordinaten. Damit läßt sich die Frage beantworten, inwieweit das Modell mit den Beobachtungen übereinstimmt und in welcher Größenordnung der Grad der Verbesserung zwischen dem theoretischen Urmodell und dem optimierten Real-Modell nach der Ausgleichung liegt. Die Statistik liefert einen wichtigen Beitrag zur Überprüfung der Signifikanz der Ergebnisse. Nicht signifikante Veränderungen der Parameter können bei der Schätzung entfallen. Ebenso lassen sich Ausreißer aus dem Datenmaterial herausfiltern, die in die folgenden Berechnungen nicht mit eingeführt werden.

Es hat sich gezeigt, daß ein unkalibrierter Roboter große Poseabweichungen aufweisen kann. Diese können bis zu 5 Millimetern betragen. Der erreichte Grad der Verbesserungen aus dem geometrischen Robotermo-

dell kann im allgemeinen mit größer als 90% angegeben werden. Nach einer Kalibrierung lassen sich die Restverbesserungen somit auf Beträge besser als 10% verkleinern.

Ferner wurde deutlich, daß unterschiedliche Roboterposen zu unterschiedlichen Roboterparametern führen können. Hier muß unterschieden werden, ob der Roboter für seine Arbeiten den gesamten Arbeitsraum benötigt und daher die Posen dann auch über den gesamten Arbeitsraum verteilt werden müssen. Anderenfalls sind die Posen nur in einem eingeschränkten Arbeitsbereich, entsprechend der Arbeitsschritte des Roboters, zu vermessen. Eine Roboterkalibrierung muß jedoch nicht immer so ausführlich, wie in dieser Arbeit beschrieben, durchgeführt werden, denn bereits eine geringe Anzahl (20) von vermessenen Posen liefert merkliche Verbesserungen in der Übereinstimmung von Robotermodell und Pose. Damit kann ein Industrieroboter individuell für seinen jeweiligen Arbeitseinsatz mit seinem Parametersatz optimiert werden. Je umfangreicher der genutzte Arbeitsraum des Roboters vermessen wird, desto genauer kann das erforderliche individuelle Robotermodell darauf abgestimmt werden. Es ist jedoch darauf zu achten, daß ein Roboter, der für einen kleinen Arbeitsraum kalibriert wurde, in keinem Fall mit dieser Paramatrierung ausserhalb dieses Arbeitsraumes eingesetzt werden darf. Die Auswertungen zeigen, daß eine Parameteridentifikation das mittlere Genauigkeitsniveau der Roboter unter $1/10$ mm senken kann.

Dank

Diese Arbeit soll mit dem Dank an all diejenigen enden, die Anteil am gelingen dieser Dissertation haben. Insbesondere gilt dieser Dank Herrn Professor Dr.-Ing. Klaus Schnädelbach, der die Anregung zu dieser Arbeit gab, während der Ausarbeitung immer wieder begleitende Bemerkungen fand und schließlich den ersten Bericht übernommen hat.

Weiter danke ich den Herren Professor Dr.-Ing. habil. Thomas Wunderlich und Professor Dr.-Ing. habil. Harald Schlemmer für die Übernahme der weiteren Berichte.

Mein Dank gilt auch meinem Kollegen Herrn Dr.-Ing. Wolfgang Schirmer, der gerade am Anfang der Arbeit viele Ideen und Gedanken beisteuerte.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei den Mitarbeitern des Geodätischen Instituts der Technischen Universität München, besonders bei Herrn Dipl.-Ing. Glennfried Preuß für die Fragen zu den Institutsprogrammen, bei Herrn Dr.-Ing. Robert Kube für sein stets offenes Ohr zur Netzausgleichung und Herrn Dr.-Ing. Robert Roschlaub für die zahlreichen freundschaftlich-fachlichen Diskussionen. Weiterhin möchte ich mich bei meinem langjährigen Weggefährten und Büropartner Herrn Dr.-Ing. Oliver Friede für seine Anregungen und Kommentare bedanken.

Meine Frau Andrea hat mich zu jeder Zeit unterstützt und motiviert und hat damit entscheidend zur Vollendung dieser Arbeit beigetragen. Ausserdem danke ich meinen beiden Kindern Janina und Amelie, daß sie soviel Geduld bei der Entbehrung ihres Vaters hatten. Und last but not least danke ich meinen Eltern Christoph und Siegrun Nitschke mir diesen Weg ermöglicht zu haben.

Diese Arbeit ist meiner Mutter gewidmet, leider konnte sie den Abschluß nicht mehr erleben.

Glossar und Abkürzungen

AKS	Achskoordinatensystem
Arbeitsraum	Bereich aller erreichbaren Punkte durch den Roboter
BKS	Bezugskoordinatensystem
CAD	computer aided design
CCD	charge coupled device
CIM	computer integrated manufacturing
DH	Denavit-Hartenberg
FFG	Fehlerfortpflanzungsgesetz
HM	Hayati-Mirmirani
inline	in eine bestehende Linie (z.B. Fertigungslinie) integriert
INS	inertiales Navigationssystem
IR	Industrieroboter
kinematische Kette	Beschreibung der Folge von Gelenken eines Industrieroboters
Kollisionsraum	gesamter Arbeitsraum einschließlich dem Raum des Roboterstandpunkts
MKS	Meßkoordinatensystem
offline	zeitversetzt, nacheinander
OKS	Objektkoordinatensystem
online	in Echtzeit, gleichzeitig
on-the-flight	während einer Bewegung in Echtzeit
Pose	orientierte Position des Roboters
RMS	root mean square error
Rückwärtsrechnung	aus vorgegebenen Posen die Gelenkstellungen berechnen
SCARA-Roboter	selective compliance assembly robot arm - Montageroboter mit ausgewählter Nachgiebigkeit
Vorwärtsrechnung	aus vorgegebenen Gelenkstellungen die Posen berechnen
WKS	Werkzeugkoordinatensystem
Zielhand	Zielhilfsmittel an der Roboterhand zur Vermessung
ZKS	Zellenkoordinatensystem

Literatur

Ahlers, R.-J.: *Industrieroboter Messen und Prüfen*, in VDI-GMA Bericht 14, 1987.

Angerer, T., Bongardt, T.: *Perfektion in greifbare Nähe gerückt – Entwicklung flexibler, robotergestützter Inline-Meßzellen in greifbare Nähe gerückt*, Produktion Nr. 45, Seite 3, 11.11.1999.

Behrens, A., Berg, J.O.: *Positioniergenauigkeit von Industrierobotern – Geodätische Methodeneröffnen Wege zu ihrer Verbesserung*, VDI-Z, 129, Nr. 3, S. 57-62, 1987.

Behrens, A., Thater, G.: *Offline programmierte Bewegungsplanung für Industrieroboter auf der Grundlage eines fehlerkompensierten Identifikationsverfahren*, Robotersysteme 8, S. 209-219, 1992.

Bennet, D.J., Hollerbach, J.M., Henri, P.D.: *Kinematic calibration by direct estimation of the Jacobian matrix*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 1, S. 351-357, 1992, Nice.

Bernard, R., Albright, S.L. (eds.): *Robot Calibration*, Chapman & Hall, London, 1993.

Bill, R., Staiger, R.: *The surveying of industrial robots*, Allgemeine Vermessungs Nachrichten Int. Edition, 2, S. 2-10, 1985.

Bjerhammar, A.: *Theory of errors and generalized matrix inverses*, Elsevier scientific publishing company, Amsterdam 1973.

Brunk, W.: *Industriegestützte Meß- und Prüftechnik im Überblick*, in VDI-GMA Bericht 14, 1987.

Caenen, J.L., Angue, J.C.: *Identification of geometric and non geometric parameters of robots*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 2, S. 1032-1037, 1990, Cincinatti.

CAMELOT.: Produktinformation aus dem Internet, 1999.

Caspary, W., Wichmann, K.: *Lineare Modelle*, Oldenbourg Verlag München, 1994.

Denavit J., Hartenberg S.: *A kinematic notation for lower-pair mechanisms based on matrices*, Journal of Applied Mechanics 22, S. 215-221, 1955.

Diewald, B., Godding, R., Henrich, A.: *Robot calibration with a photogrammetric on-line system using reseau-scanning-cameras*, Optical 3-D Measurement Techniques II, S. 594-605, Zürich, 1993.

DIN 1319, Blatt 1: *Grundlagen der Meßtechnik - Grundbegriffe*, Beuth Verlag Berlin, 1995.

DIN 1319, Blatt 2: *Grundlagen der Meßtechnik - Begriffe für die Anwendung von Meßgeräten*, Beuth Verlag Berlin, 1996.

DIN 1319, Blatt 3: *Grundlagen der Meßtechnik - Auswertung von Messungen einer einzelnen Meßgröße*, Meßunscherheit, Beuth Verlag Berlin, 1996.

DIN 1319, Blatt 4: *Grundlagen der Meßtechnik - Auswertung von Messungen, Meßunsicherheit*, Beuth Verlag Berlin, 1997.

DIN 66217: *Koordinatenachsen und Bewegungsrichtungen für numerisch gesteuerte Arbeitsmaschinen*, Beuth Verlag Berlin, 1975.

Drixler, E.: *Analyse der Form und Lage von Objekten im Raum*, DGK Reihe C, Nr. 409, 1993.

Ebner, H.: *Ausgleichungsrechnung*, Vorlesungsskript, 1997

EUROBTEC: Produktinformation OPTIS®, 1999.

Eusemann, B.: *Know-how aus der Wehrtechnik fließt in die zivile Fertigung*, in VDI-Nachrichten, S. 12, vom 4.11.1994

FARO: *FaroArm Bronze und Silver Series - Portable 3D/6D Digitalisiergeräte und Koordinatenmeßmaschinen*, Produktinformation, 1996.

Filz, K.M., Vincze, M., Krautgartner, P., Spiess, S.: *The design of a concise beam deflection unit for external 6D Robot measurements,* Optical 3-D Measurement Techniques III, Wien, S. 49-58, 1995.

Gerstmann, U.: *Robotergenauigkeit*, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

Godding, R., Lehmann, M., Rawiel, G.: *Robot adjustment and 3d calibration - photogrammetric quality control in daily use*, Optical 3-D Measurement Techniques IV, Zürich, S. 157-165, 1997.

Gossel, O.: *Steigerung der Programmierbarkeit von Industrierobotern*, Arbeitsbereich Fertigungstechnik II TU Hamburg-Harburg, 1996.

Hayati, S.A., Mirmirani, M.: *Improving the absolute positioning accuracy of robot manipulators*, Journal of Robotic Systems, Vol. II No.IV, 1985.

Henneke, F., Müller, G., Werner, H.: *Handbuch Ingenieurvermessung Bd. 6 - Maschinen- und Anlagenbau*, Wichmann Verlag Karlsruhe, 1992.

Heiss, H.: *Die explizite Lösung der kinematischen Gleichung für eine Klasse von Industrierobotern*, Fachbereich Informatik, Technische Universität Berlin, 1985.

Heiss, H.: *Grundlagen der Koordinatentransformation bei Industrierobotern*, Robotersysteme 2, S. 65-71, 1986.

Heiss, H.: *Konstruktionskriterien und Lösungsverfahren für Industrieroboter mit explizit lösbarer kinematischer Gleichung*, Robotersysteme 2, S. 129-137, 1986.

Hesse, S.: *Industrieroboter Praxis – Automatisierte Handhabung in der Fertigung*, Vieweg Verlag, Braunschweig, 1998.

Hoffmann, Chr.: *Lasergestützte Bahnvermessung von Industrierobotern in 6 Freiheitsgraden*, in VDI-Bericht 921, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

Höpcke, W.: *Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung*, de Gruyter Lehrbuch, Walter de Gruyter Verlag Berlin, 1980.

Hsu, T.W., Everett, L.J.: *Identification of the kinematic parameters of a robot manipulator for positional accuracy improvement*, Proceedings Computers in Engineering Conference, S. 263-267, 1985.

Ishii, M.: *Kinematic model and calibration of a robot manipulator*, Advanced Robotics Vol. 5, No. 3, S. 337-347, 1991.

Ishii, M., Sakane, S., Kakikura, M., Mikami, Y.: *A new approach to improve absolute positioning accuracy of robot manipulators*, Journal of Robotic Systems Vol. 4(1), S. 145-156, 1987.

ISO 9283: *Manipulating industrial robots - Performance criteria and related test methods*, 1999.

ISO 9787: *Manipulating industrial robots - Coordinate systems and motions*, 1990.

ISO 9946: *Manipulating industrial robots - Presentation of characteristics*, 1998.

ISO TR 13309: *Manipulating industrial robots – informative guide on test equipment and metrology methods of operation for robot performance evaluation in accordance with ISO 9283, first edition, Genf 1995.*

ISRA Vision Systems, *Machine vision for factory automation*, Produktinformation, 1999.

Janocha, H., Diewald, B.: *Von der Industrieroboterkalibrierung zur 3D-Koordinatenmessung*, in VDI-Bericht 921, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

Janocha, H., v. Hienüber, E.L., Diewald, B., Godding, R.: *Photogrammetrically aided inertial measurement system for static and dynamic calibration of industrial robots*, 3rd International Workshop on high precision navigation at University of Stuttgart, 1995.

Joachimsthaler, R.: *Automatische TCP-Vermessung bei Schweißrobotern*, Maschinen Markt, Nr. 44, S. 52-54, 1997.

Judd, R.P., Knasinski, A.B.: *A technique to calibrate industriel robots with experimental verification*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. 351-357, 1987.

Kahmen, H.: *Optische 3D-Meßverfahren mit Meßrobotern*, in AVN 11-12, S. 395-402, 1993.

Katalinic, B.: *Industrieroboter und flexible Fertigungsmaschinen für Drehteile*, VDI Verlag Düsseldorf, 1990.

Keferstein, C., Frick, O.: *Applikationsspezifischer Abgleich und Kalibrierung eines sechsachsigen Knickarm-Präzisionsroboters*, in VDI-Bericht 921, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

Khalil, W., Garcia, G., Delgarde, J.-F.: *Calibration of the geometric parameters of robots without external sensors*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 3, S. 3039-3040, 1995, Nagoya.

Kist, G., Roschlaub, R.: *Computation of the Pseudo-Inverse via orthogonal projections and its application to least squares problems*, Beiträge zur Geometrie und Algebra, Nr. 32, Mathematisches Institut TU München, 1995.

Koch, K.R.: *Parameterschätzung und Hypothesentests in linearen Modellen*, Dümmlerbuch 7892, Dümmler Verlag Bonn, 1980.

Kondo, M., et. al.: *Automatic measuring system for body fit on the automobile assembly line*, IEEE International Conference on Robotics and Automation, S. , Nagoya, 1995.

Kovac , I., Frank, A.: *Eine neue Kalibriervorrichtung für Knickarmroboter*, in VDI-Bericht 921, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

Kovac , I.: *Messen mit dem Industrieroboter. Entwicklung eines robotergeechten Meßgeätes*, Technische Universität Graz, Institut für Fertigungstechnik, 1992.

Kovac , I., Frank, A.: *Neues mobiles Meßgerät zur fertigungsintegrierten Geometrieprüfung*, VDI-Z Nr. 5, S. 36-38, 1998.

Kreis, W., Bönker, T., Albers, S.: *Montage- und Handhabungstechnik*, Industrieroboter, VDI-Z, Nr. 4, S.44-50, 1997.

Kroh, R.: *Virtuelle Welt*, Maschinen Markt, Nr. 36, S. 206-209, 1997.

Kroh, R.: *Auf neuen Wegen*, Maschinen Markt, Nr. 38, S. 22-24, 1997.

KRYPTON, *Lösungen der Robotertechnik*, Produktinformation, 1999.

Kuang, L.: *Einsatz von Theodoliten zum Vermessen von Gelenkarmrobotern*, VDI-Fortschrittberichte Reihe 8 Meß-, Steuerungs- und Regeleungstechnik, Nr. 325, VDI-Verlag Düsseldorf, 1993.

KUKA: *Produktinformation, 1990 und 1998.*

Kyle, S.: *Measuring systems for complete calibration*, Calibration Applied to Quality Control and Maintenance in Robot Production, ESPRIT CAR-Project 5220, IPK Berlin, 1994.

LEICA, *Lasertracker*, Produktinformation, 1998.

LEICA, *V-STARS*, Produktinformation, 1998.

Liu, T.S., Wang, J.D.: *A reliability approach to evaluating robot accuracy performance*, Mechanical Machine Theory, Vol. 29, No. 1, S. 83-94, 1994.

Lotze, W.: *Das Gelenkarmmeßgerät - Ein neues Koordinatenmeßgerät*, in VDI-Bericht 1258, VDI Verlag Düsseldorf, 1996.

Maas, H.-G.: *Photogrammetrische Kalibrierung von Industrierobotern*, XII. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung Graz 1996, A6, Dümmler Verlag Bonn, 1996.

Matthias, H.-J.: *Bedeutung und Konstruktion von Kovarianzen in der Meßtechnik,* Mitteilungen aus dem Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der ETH Zürich, Nr. 41, 1986.

McCloy, D. Harris, D.M.J.: *Robotertechnik*, VCH Verlag Weinheim, 1989.

METRONOR, *Metrology norway measuring system*, Produktinformation, 1997.

Meyer, R.: *Einsatz geodätischer Meßtechnik bei der Roboter- und Fertigungszellenmessung*, in VDI-Bericht 921, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

Meyer, R.: *Der Einsatz automatisierter Theodolite zur Parameteridentififation bei Industrierobotern*, Wissenschaft-lche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 203, 1994.

Meyer, R.: *Analyse eines Industrieroboters für Fertigungs- und Meßaufgaben*, in Festschrift Univ. Prof. Dr.-Ing. habil. Dr. hc. mult. Hans Pelzer zum 60. Geburtstag, Wissenschaftliche Arbeiten der Fachrichtung Vermessungswesen der Universität Hannover Nr. 209, 1996.

Mooring, B.W., Roth, Z.S., Driels, M.R.: *Fundamentals of manipulator calibration*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1991.

Müller, S., Schweizer, M.: *Robotertechnik - Einführung mit Anwendungsbeispielen für die Praxis*, Bibliothek der Technik Band 1, Verlag moderne Industrie, Landsberg/Lech 1990.

Nitsch, H.: *Ermittlung der Bahngenauigkeit von Industrierobotern mit Hilfe unkonventioneller Meßsysteme*, in VDI-Bericht 921, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

Nitschke, H.: *Ein Ausgleichungsverfahren zu Bestimmung der Denavit-Hartenberg-Parameter von Industrierobotern*, unveröffentlichte Diplomarbeit am Geodätischen Institut der TU München, 1991.

Nitschke, H.: *Anforderungen an eine Meßkombination bestehend aus einem optoelektronischen Sensor und einem Koordinatenmeßgerät,* VDI/VDE-GMA DGZfP Fachtagung optische Formerfassung, Langen, 1997.

Nitschke, H., Schirmer, W., Schnädelbach, K.*: Bestimmung geometrischer Parameter von Industrierobotern*, in XI. Internationaler Kurs für Ingenieurvermessung Zürich 1992, Dümmler Verlag Bonn, 1992.

N.N.: *Die Millionen Grenze ist bald erreicht*, Produktion Nr. 50-51, 1997.

N.N.: *Industrieroboter in Japan*, ZWF, Nr. 6, S. 277, 1997.

N.N.: *Der Höhenflug hält weiter an*, Roboter-Markt, S. 10-24, 1997.

N.N.: *Robotereinsatz*, KEM – Konstruktion, Elektronik, Maschinenbau, S. 24, 2000.

OPTIS®: Allgemeine Informationen und Praxisberichte, Institut für Konstruktions- und Fertigungstechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg, 1999.

Peipe, J.: *Photogrammetrische Verfahren zur Vermessung von Roboterbewegungen*, Vortrag beim 26. DVW-Seminar "Geodätische Meßverfahren im Maschinenbau", München, März 1991.

Pelzer, H.: *Geodätische Netze in Landes- und Ingenieurvermessung*, Konrad Wittwer Verlag Stuttgart, 1980.

Perceptron, *Machine Vision*, Produktinformation 1999.

Pope, A.J.: *The statistics of residuals and the detection of outliers*, NOAA Technical Report NOS 65 NGS 1, Rockville 1976.

Preuss, G.: *Die Bündelausgleichung als Hilfsmittel zur Orientierung von Industriemeßsystemen*, Diplomarbeit am Geodäötischen Institut der TU München, 1988.

Profos, P., Pfeifer T.: *Handbuch der industriellen Meßtechnik*, Oldenbourg Verlag München, 1992.

Rall, K., Wollnack, J., Schwill, C.: *Roboterkoordinatensystem-Ursprungbestimmung mit Hilfe der robotereigenen Sensorik unter Berücksichtigung des Genauigkeitsverhaltens*, Robotersysteme 8, S. 171-181, 1992.

Ränky, P.G., Ho, C.Y.: *Robot modelling - control and applications with software*, Springer Verlag Heidelberg, 1985.

Reichling, B.: *Lasergestützte Positions- und Bahnvermessung von Industrierobotern*, Forschungsberichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik der Universität Karlsruhe, Band 12, 1988.

Renders, J.-M., Rossignol, E., Becquet, M., Hanus, R.: *Kinematic calibration and geometrical parameter identification for robots*, IEEE Transactions on Robotics and Automation, Vol. 7, No. 6, S.721-732, 1991.

REGELTRON, *Powercube*, Produktinformation, 1999.

ROBOSCAN: *Kooperationsprojekt micromeasure, Stäubli und LK,* 1998.

ROMER: *System 6 - Portable 3D-Meßmaschinen*, Produktinformation 1996.

Roos, E.: *Anwendungsorientierte Meß- und Berechnngsverfahren zur Kalibrierung offline programmierter Roboterapplikationen*, VDI-Fortschrittberichte Reihe 8 Meß-, Steuerungs- und Regeleungstechnik, Nr. 709, VDI-Verlag Düsseldorf, 1998.

Roschlaub, R.: *Ein Algoritmus zur Berechnung der Pseudoinversen über Projektionen,* unveröffentlichte Diplomarbeit am Geodätischen Institut der TU München. 1993.

Roschlaub, R.: *Klassifikation und Interpolation mittels affin invarianter Voronoidiagramme auf der Basis eines Wahrscheinlichkeitsmaßes zur Fortführung großmasstäbiger GIS,* persönlicher Vorabdruck, Kap. 2.2, 2.3., 1999.

Rosenbauer, T.: *Getriebe für Industrieroboter-Beurteilungskriterien, Kenndaten, Einsatzhinweise,* Berichte aus der Produktionstehnik WZL TH Aachen und IPT Aachen, Shaker Verlag, 1994.

Rzeznik, T.: *In-line laser measurement in the assembly process*, Industrial robot No. 1, S. 16-23, 1997.

Schirmer, W.: *Zur Vermessung von Robotern mit geodätischen Methoden*, Robotersysteme 6, S.153-160, Springer Verlag Heidelberg, 1990.

Schirmer, W.: *Vermessung der Achsgeometrie von Robotern mit Industriemeßsystemen*, Vortrag beim 26. DVW-Seminar "Geodätische Meßverfahren im Maschinenbau", München, März 1991.

Schlaich, G., Kaufmann, H.*: Roboter für die Montage - Geräte, Steuerungen, Prozesse, Verknüpfung*, Bibliothek der Technik Band 43, Verlag moderne Industrie, Landsberg/Lech 1990.

Schnädelbach, K.: *Geodäsie im Maschinenbau am Beispel der Robotervermessung*, Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 5+6, 1993.

Schmid, H.H., Heggli, S.: *Räumliche Koordinatentransformation - Eine Pseudolineare Formulierung als Näherungslösung und eine strenge Ausgleichung mit entsprechendem Fortran Programm*, Institut für Geodäsie und Photogrammetrie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule, Mitteilungen Nr. 23, 1978.

Schmidt, H.: *Was ist Genauigkeit? - Zum Einfluß systematischer Abweichungen auf Meß- und Ausgleichungsergebnisse*, Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 4, 1997.

Schmidt, H. G.: *Identifikation kinematischer Roboter-Parameter auf der Grundlage klassischer geodätischer Meß- und Rechenverfahren*, Vermessungswesen und Raumordnung, Heft 2, 1996.

Schröer, K.: *Identifikation von Kalibrationaparametern kinematischer Ketten,* Produktionstechnik - Berlin; Forschungsberichte für die Praxis Nr. 126, Hanser Verlag München, 1993.

Schröer, K., Grethlein, M., Lisounkin, A.*: Parameter identifikation and robot calibration system*, Calibration Applied to Quality Control and Maintenance in Robot Production, ESPRIT CAR-Project 5220, IPK Berlin, 1994.

Schüßler, H.H.: *Meßverfahren zur Prüfung der Genauigkeit von Industrierobotern*, in VDI-GMA-Bericht 14, 1987.

Schwarz, W. (Hrsg.): *Vermessungsverfahren im Maschinen- und Anlagenbau,* Wittwer Verlag Stuttgart, 1995.

Schweizer, M.: *HOW / WHERE / WHEN / WHY / WHAT DOES R&A CONTINUE / STOP TO DEVELOP?*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 1, S. 26-30, 1995, Nagoya.

Sciavicco, L., Siciliano, B.: *Modeling and control of robot manipulators*, McGraw-Hill Companies Inc., New York, 1996.

Shen, J.: *Entwicklung eines dreidimensionalen Online-Meßsystems*, Schriftenreihe der Fachrichtung Vermessungswesen der Technischen Hochschule Darmstadt, Nr. 1, 1996.

SLV Halle, *3D-Vermessung von Robotern und Bauteilen*, Produktinformation aus dem Internet 1998.

SLV Halle, *3D-Vermessung und Kalibrierung von automatischen Fertigungseinrichtungen*, Produktinformation aus dem Internet 1998.

SMX, *Tracker4000*, Produktinformation 1996.

Snyder, W.E.: *Industrial robots - computer interfacing and control*, Prentice-Hall Inc., Englwood Cliffs, New Jersy, 1985.

Spur, G., Schröer, K.: *Kalibrierung von Industrierobotern (Kapitel 7),* in Vorschubantriebe in der Fertigungstechnik, Hanser Verlag München, 1987.

Staiger, R.: *Theoretische Untersuchungen zum Einsatz von Industriemeßsystemen*, DGK Reihe C, Nr. 340, 1988.

Stoer, J.: *Numerische Mathematik 1,* Springer Lehrbuch, Springer Verlag Berlin, 1989.

Stone, H.W.: *Kinematic modeling, identification, and control of robotic manipulators,* Kluwer Academic Publishers Gruop, Dordrecht, 1987

Strubecker, K.: *Einführung in die höhere Mathematik,* Band IV, S. 120f., Oldenbourg Verlag München Wien, 1984.

Stryk, v. O., Pesch, H.J., Bulirsch, R.: *Zeit ist Geld? Nicht nur für Roboter*, in Sonderheft der TU München, Fakultät für Mathematik, S.22-23, 1993.

Thater, G., Behrens A.: *Minimierung der Poseabweichung von Industrierobotern durch eine fehlerkompensierende Modellierung und Simulation der kinematischen Kette*, in VDI-Bericht 1024, VDI Verlag Düsseldorf, 1993.

Tradt, H.R.: *Stand der Meßtechnik für die Ermittlung der Kenngrößenvon Industrierobotern*, in VDI-Bericht 921, VDI Verlag Düsseldorf, 1991.

VDI-Richtlinie 2860 Entwurf, Blatt 1*: Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe, Definitionen, Symbole*, VDI Verlag Düsseldorf, 1982.

VDI-Richtlinie 2861, Blatt 1: *Kenngrößen für Industrieroboter - Achsbezeichnungen*, VDI Verlag Düsseldorf, 1998.

VDI-Richtlinie 2861, Blatt 2*: Kenngrößen für Industrieroboter - Einsatzspezifische Kenngrößen*, VDI Verlag Düsseldorf, 1998.

VDI-Richtlinie 2861, Blatt 3: *Kenngrößen für Industrieroboter - Prüfung der Kenngrößen*, VDI Verlag Düsseldorf, 1998.

VDI/VDE-Richtlinie 2617, Blatt 2.1: Genauigkeit von Koordinatenmeßgeräten – *Kenngrößen und deren Prüfung*, VDI Verlag Düsseldorf, 1986.

Veitschegger, W:K:, Wu, C:H.: *Robot calibration and compensation,* IEEE Journal of Robotics and Automation, S.643-656, 1985.

Volmer, J.: *Industrieroboter Entwicklung*, Hüthig Verlag, 1986.

Weiss, C., Beuthner, A.: *Aus einem Guss*, Wirtschaftswoche Nr. 12, S.178ff, 2000.

Westkämper, E., Wietfeld, T.: *Grafisch-interaktive Systeme zur Offline-Preogrammierung von Industrierobotern*, CIM Mangment, Nr. 3, S. 13-16, 1994.

Winkler, L.: *Bestimmung der Achsgeometrie von Robotern mit dem Industriemeßsystem KERN ECDS 2,* unveröffentlichte Diplomarbeit am Geodätischen Institut der TU München 1988.

Xi, F.: *Effect of non-geometric errors on manipulator inertial calibration*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 2, S. 1808-1813, 1995, Nagoya.

ZETTMESS: *Mobiles Koordinatenmeßgerät*, Produktinformation 1998.

Zhong, X.-L., Lewis, J.M.: *A new method for autonomous robot calibration*, Proceedings IEEE International Conference on Robotics and Automation Vol. 23, S. 1790-1793, 1995, Nagoya.