





Lehrstuhl für  
Werkzeugmaschinen  
der Technischen Universität München

## **Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**

Thomas Bongardt

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Udo Lindemann

**Prüfer der Dissertation:**

1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
  2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jens Peter Wulfsberg,  
Universität der Bundeswehr Hamburg

Die Dissertation wurde am 02.09.2003 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 11.12.2003 angenommen.



# **Forschungsberichte**

The logo consists of the lowercase letters "iwb" in a bold, white, sans-serif font, enclosed within a solid black square.

***Band 184***

*Thomas Bongardt*

***Methode zur Kompensation  
betriebsabhängiger Einflüsse  
auf die Absolutgenauigkeit  
von Industrierobotern***

---

*herausgegeben von*  
*Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh*  
*Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart*

---

*Herbert Utz Verlag*



# Forschungsberichte iwb

Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen  
und Betriebswissenschaften  
der Technischen Universität München

herausgegeben von

Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh

Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Technische Universität München

Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (iwb)

## Bibliografische Information Der Deutschen Bibliothek

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation  
in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte  
bibliografische Daten sind im Internet über  
<http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Zugleich: Dissertation, München, Techn. Univ., 2003

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die der Übersetzung, des Nachdrucks, der Entnahme von Abbildungen, der Wiedergabe auf photomechanischem oder ähnlichem Wege und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten.

Copyright © Herbert Utz Verlag GmbH 2004

ISBN 3-8316-0332-4

Printed in Germany

Herbert Utz Verlag GmbH, München

Tel.: 089/277791-00 - Fax: 089/277791-01

## **Geleitwort der Herausgeber**

Die Produktionstechnik ist für die Weiterentwicklung unserer Industriegesellschaft von zentraler Bedeutung, denn die Leistungsfähigkeit eines Industriebetriebes hängt entscheidend von den eingesetzten Produktionsmitteln, den angewandten Produktionsverfahren und der eingeführten Produktionsorganisation ab. Erst das optimale Zusammenspiel von Mensch, Organisation und Technik erlaubt es, alle Potentiale für den Unternehmenserfolg auszuschöpfen.

Um in dem Spannungsfeld Komplexität, Kosten, Zeit und Qualität bestehen zu können, müssen Produktionsstrukturen ständig neu überdacht und weiterentwickelt werden. Dabei ist es notwendig, die Komplexität von Produkten, Produktionsabläufen und -systemen einerseits zu verringern und andererseits besser zu beherrschen.

Ziel der Forschungsarbeiten des *iwb* ist die ständige Verbesserung von Produktentwicklungs- und Planungssystemen, von Herstellverfahren sowie von Produktionsanlagen. Betriebsorganisation, Produktions- und Arbeitsstrukturen sowie Systeme zur Auftragsabwicklung werden unter besonderer Berücksichtigung mitarbeiterorientierter Anforderungen entwickelt. Die dabei notwendige Steigerung des Automatisierungsgrades darf jedoch nicht zu einer Verfestigung arbeitsteiliger Strukturen führen. Fragen der optimalen Einbindung des Menschen in den Produktentstehungsprozess spielen deshalb eine sehr wichtige Rolle.

Die im Rahmen dieser Buchreihe erscheinenden Bände stammen thematisch aus den Forschungsbereichen des *iwb*. Diese reichen von der Entwicklung von Produktionssystemen über deren Planung bis hin zu den eingesetzten Technologien in den Bereichen Fertigung und Montage. Steuerung und Betrieb von Produktionssystemen, Qualitätssicherung, Verfügbarkeit und Autonomie sind Querschnittsthemen hierfür. In den *iwb*-Forschungsberichten werden neue Ergebnisse und Erkenntnisse aus der praxisnahen Forschung des *iwb* veröffentlicht. Diese Buchreihe soll dazu beitragen, den Wissenstransfer zwischen dem Hochschulbereich und dem Anwender in der Praxis zu verbessern.

*Gunther Reinhart*

*Michael Zäh*



## **Vorwort**

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften (*iwb*) der Technischen Universität München.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh und Herrn Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, den Leitern dieses Instituts, gilt mein besonderer Dank für die wohlwollende Förderung und großzügige Unterstützung meiner Arbeit.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Jens Wulfsberg, dem Leiter des Laboratoriums Fertigungstechnik der Universität der Bundeswehr Hamburg, möchte ich mich für die Übernahme des Korreferates und die aufmerksame Durchsicht der Arbeit sehr herzlich bedanken.

Darüber hinaus bedanke ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Instituts sowie allen Studenten, die mich bei der Erstellung meiner Arbeit unterstützt haben, recht herzlich.

München, im Dezember 2003

*Thomas Bongardt*



## **Inhaltsverzeichnis**

<b>0 Definitionen, Abkürzungen und Formelzeichen</b>	<b>I</b>
0.1 Definitionen	I
0.2 Abkürzungen	IV
0.3 Formelzeichen	V
<b>1 Einführung</b>	<b>1</b>
1.1 Einleitung	1
1.2 Zielsetzung	2
1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit	4
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>7</b>
2.1 Kinematischer Aufbau von Industrierobotern	7
2.1.1 Roboter mit offenem kinematischem Aufbau	8
2.1.2 Roboter mit geschlossenem kinematischem Aufbau	10
2.1.3 Zusammenfassung	12
2.2 Genauigkeit von Industrierobotern	12
2.2.1 Genauigkeitskategorien	13
2.2.2 Bestimmung der Robotergenauigkeit	16
2.2.3 Typische Genauigkeitskennwerte von Standardindustrierobotern	18
2.2.4 Zusammenfassung	19
2.3 Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Industrierobotern	19
2.3.1 Mechanische Einflussgrößen	20
2.3.2 Steuerungstechnische Einflussgrößen	21
2.3.3 Einflüsse aus dem Roboterumfeld sowie dem aktuellen Erwärmungszustand	22
2.3.4 Zusammenfassung	23
2.4 Messsysteme zur Bestimmung der Robotergenauigkeit	23
2.4.1 Roboteradaptierte Messsysteme	24
2.4.2 Externe Messsysteme	26
2.4.3 Einsatzbereiche der vorgestellten Messsysteme	27
2.4.4 Zusammenfassung	28

## Inhaltsverzeichnis

---

2.5	Maßnahmen zur Optimierung der Robotergenauigkeit	29
2.5.1	Optimierung mechanischer Komponenten	30
2.5.2	Optimierung der Antriebe	33
2.5.3	Optimierung der Sensorik	34
2.5.4	Optimierung der Steuerungs- und Regelungstechnik	35
2.5.5	Zusammenfassung	36
2.6	Verfahren zur Roboterkalibrierung	37
2.6.1	Datengestützte Kalibrierung auf der Basis von Korrekturwerten	38
2.6.2	Kalibrierung mittels Abgleich von Koordinatensystemen	39
2.6.3	Modellbasierte Kalibrierung	40
2.6.4	Zellenkalibrierung	49
2.6.5	Zusammenfassung	50
2.7	Verfahren zur Roboterkompensation	50
2.7.1	Verfahren zur Temperaturdriftkompensation	51
2.7.2	Betriebsabhängige Programmauswahl	52
2.7.3	Zyklischer Abgleich von Koordinatensystemen	53
2.7.4	Roboterführung	53
2.7.5	Temperaturverformungsmodelle	54
2.7.6	Modellbasierte Kompensation	55
2.7.7	Zusammenfassung	57
2.8	Defizite und Potenziale bestehender Kalibrier- und Kompensationsverfahren	58
<b>3</b>	<b>Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse</b>	<b>61</b>
3.1	Konzept	61
3.1.1	Anforderungen an kompensierte Roboteranwendungen	61
3.1.2	Merkmale des Kompensationsmethode	65
3.1.3	Vorgehensweise zur Umsetzung	67
3.1.4	Zusammenfassung	68
3.2	Aufbau einer Versuchsumgebung für Industrieroboter	69
3.2.1	Anforderungen an die Versuchsumgebung	69

3.2.2 Konzept und Realisierung der Versuchsumgebung	71
3.2.3 Zusammenfassung	74
3.3 Auswahl einer Kalibriersoftware	74
3.3.1 Anforderungen an die einzusetzende Kalibriersoftware	75
3.3.2 Zusammenfassung	77
3.4 Modellierung des Roboters	77
3.5 Verfahren zur Parameterreduktion	78
3.5.1 Generierung eines Posensatzes zur Parameteridentifikation	79
3.5.2 Vermessung der Positionierabweichungen des Roboters bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen	80
3.5.3 Aussagen zur grundsätzlichen Kompensierbarkeit	81
3.5.4 Parameteridentifikation und Vergleich der Parametersätze unterschiedlicher Betriebszustände	81
3.5.5 Modelloptimierung für die Kompensation	85
3.5.6 Zusammenfassung	90
3.6 Entwicklung einer Referenzumgebung	90
3.6.1 Anforderungen an die Referenzumgebung	91
3.6.2 Auswahl von Geometrievarianten	93
3.6.3 Auswahl des Werkstoffes für die Referenzumgebung	94
3.6.4 Ermittlung der optimalen Lage des Referenzkörpers sowie der Referenzposen durch Simulation	95
3.6.5 Zusammenfassung	103
3.7 Aufbau eines Kommunikationskreises	103
3.7.1 Prinzipieller Ablauf	103
3.7.2 Inbetriebnahme	104
3.7.3 Überprüfung der aktuellen Anlagengenauigkeit	107
3.7.4 Durchführung der Kompensation	109
3.7.5 Durchführung der Bearbeitungsaufgabe	113
3.7.6 Zusammenfassung	113
3.8 Absolutgenaue Roboterapplikationen	114
3.8.1 Voraussetzungen für den Aufbau einer absolutgenauen Roboterapplikation	115

## **Inhaltsverzeichnis**

---

3.8.2	Grundkalibrierung	115
3.8.3	Kompensation	117
3.8.4	Zusammenfassung	118
3.9	Einflüsse auf die Genauigkeit	118
3.9.1	Zusammenfassung und erzielbare Genauigkeit	121
<b>4</b>	<b>Anwendungsbeispiel</b>	<b>123</b>
4.1	Auswahl der Testapplikation	123
4.2	Verwendete Kalibriersoftware	125
4.2.1	Roboterkalibrierung mit RoboCal	127
4.3	Entwicklung eines Referenzkörpers	131
4.4	Umsetzung des Kommunikationskreises	132
4.5	Kompensationsergebnisse und Übertragung des Verfahrens auf unterschiedliche Robotertypen	133
4.6	Wirtschaftliche Bewertung	135
4.6.1	Vergleich mit anderen Verfahren zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse	136
4.6.2	Anwendungsspezifischer Kostenvergleich	137
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>141</b>
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>144</b>
<b>7</b>	<b>Anhang</b>	<b>151</b>
7.1	Abbildungsverzeichnis	151
7.2	Tabellenverzeichnis	153
7.3	Formelverzeichnis	153
7.4	Verwendete Software	154

## 0 Definitionen, Abkürzungen und Formelzeichen

### 0.1 Definitionen

<b>Achsarbeitsraum:</b>	Verfahrbereich einer Roboterachse vom unteren bis zum oberen (Software-) Endanschlag.
<b>Achsen:</b>	Bewegungssachsen eines Roboters. Die Nummerierung der Achsen erfolgt vom Sockel zum TCP, beginnend mit 1 (1. Achse bis n-te Achse).
<b>Arm:</b>	Roboterarm. Der Roboterarm gliedert sich (in Anlehnung an den menschlichen Arm) in die Roboterhand, den Unterarm und den Oberarm. Er befindet sich auf dem Roboterfuß oder Sockel.
<b>Gauß-Newton-Algorithmus:</b>	Mathematisches Näherungsverfahren zur numerischen Lösung nicht linearer Ausgleichsprobleme.
<b>Gelenkarbeitsraum:</b>	siehe Achsarbeitsraum.
<b>Identifikation:</b>	Ermittlung der realen Werte von Modellparametern mittels mathematischer Näherungsverfahren anhand von gemessenen Positionierabweichungen.
<b>Jacobi-Matrix:</b>	Die Jacobi-Matrix ist die lokale Linearisierung einer Funktion in einem Punkt. Sie beschreibt im Rahmen der Roboterkalibrierung die lokale Ableitung der Übertragungsfunktion bzw. Transformation nach ihren Parametern. Mit ihrer Hilfe lässt sich beispielsweise die Veränderung eines Positionierergebnisses im Falle kleiner Parameteränderungen ermitteln. Umgekehrt stellt sie die Basis für die Parameteridentifikation dar.
<b>Kondition der Jacobi-M.:</b>	Die Kondition der Jacobi-Matrix ist der Quotient des größten Singulärwertes der Jacobi-Matrix durch den kleinsten. Im Falle von Rangverlusten der Jacobi-Matrix geht die Kondition gegen unendlich, da in diesem Fall der oder die kleinsten Singulärwerte den Wert Null annehmen. In diesem Fall ist der Einfluss eines oder mehrerer Parameter identisch mit dem jeweils eines anderen Parameters im

Sinne einer Singularität. Der oder die betroffenen Parameter sind in diesem Fall mangels Unterscheidbarkeit nicht identifizierbar. Die Kondition ist somit ein Maß für die Identifizierbarkeit eines Parametersatzes. Eine ausreichende Identifizierbarkeit aller Parameter ist laut SCHRÖER (1993) gewährleistet, wenn die Kondition unter 100 bis 120 liegt (Erfahrungswerte). Bei einer Kondition von 1 wäre das Gleichungssystem analytisch lösbar und somit alle Parameter eindeutig identifizierbar.

**Modell (eines Roboters im engeren Sinne):**

Mathematische Beschreibung des Verhaltens einer kinematischen Kette in Abhängigkeit von Eingangsdaten in Form von Gelenk- oder Achsstellungen. Zur Darstellung des Modells dienen Parameter, die in Zusammenhang mit bestimmten Größen der kinematischen Kette stehen.

**Modell, kalibriertes:**

Mit realen Werten belegtes Modell, das Fertigungs- und Montagetoleranzen berücksichtigt.

**Modell, nominales:**

Mit Nominalwerten, das heißt Zeichnungsdaten belegtes Modell, das keine Fertigungs- und Montagetoleranzen berücksichtigt.

**Modell, vollständiges:**

Modell, das alle Parameter berücksichtigt, die Einfluss auf das Positionierverhalten der kinematischen Kette haben. Hierzu gehören neben der Vektorkette auch Parameter, die beispielsweise das Übertragungsverhalten der Getriebe sowie Steifigkeiten, Achsschiefstände, etc. beschreiben.

**Motorarbeitsraum:**

Arbeitsraum des eine Achse antreibenden Motors. Dieser kann anhand des Achsarbeitsraumes und der Getriebübersetzung berechnet werden.

**Oberarm:**

siehe Arm.

**Offline-Programmierung:**

Erstellung eines Roboterprogramms beziehungsweise von Bewegungsabläufen beispielsweise im Rahmen einer 3D-Simulation. Das fertige Programm wird anschließend auf den realen Roboter übertragen. Positionierabweichungen aufgrund von Unterschieden zwischen Modell und realer Anwendung werden dann entweder durch Kalibriermaßnahmen

	oder Nachteachen der Einzelpositionen korrigiert.
<b>Parameter:</b>	Größen, die Eigenschaften der kinematischen Kette repräsentieren. Dies sind beispielsweise Achslängen, Getriebübersetzungen, Kopplungsfaktoren zwischen Antrieben, etc.
<b>Pose:</b>	Stellung eines Roboters im Arbeitsraum, festgelegt durch Position und Orientierung des Tool Center Points (TCP). Gegebenenfalls sind ergänzend hierzu sogenannte Stellungsparameter, die die Stellung der Einzelachsen zueinander beschreiben, erforderlich, um die Roboterstellung eindeutig festzulegen.
<b>Position (eines Roboters im engeren Sinne):</b>	Punkt im (kartesischen) Arbeitsraum des Roboters, festgelegt durch drei translatorische Verschiebungen.
<b>PTP-Bewegung (synchronisierte PTP-Bew.):</b>	Bewegung eines Roboters von einer Pose zur nächsten, wobei alle hierfür notwendigen Achsen mit gleichmäßiger bzw. konstanter Geschwindigkeit bewegt werden. Die Verfahrgeschwindigkeit der Einzelachsen orientiert sich hierbei an der jeweils langsamsten Achse, so dass alle Achsen gleichzeitig mit ihrer Bewegung beginnen und wieder aufhören.
<b>Residuum:</b>	Hier: Restabweichung zwischen der mit Hilfe des kalibrierten Modells berechneten und der gemessenen Lage einer Referenzposition. Der Messwert diente hierbei als Eingangsinformation für die Kalibrierung.
<b>Rückwärtstransformation:</b>	Berechnung der notwendigen Gelenk- oder Achsstellungen, um mit einer kinematischen Kette eine vorgegebene Lage und Orientierung im kartesischen Arbeitsraum zu erreichen.
<b>Steuerungsmodell:</b>	Von der Robotersteuerung zur Bahnplanung verwendetes Modell.
<b>Unterarm:</b>	siehe Arm.
<b>Vorwärtstransformation:</b>	Berechnung der Lage und Orientierung des Tool Center Points einer kinematischen Kette im kartesischen Arbeitsraum anhand vorgegebener Gelenk- oder Achsstellungen.

### **0.2 Abkürzungen**

<b>CFK:</b>	Carbon-Faser verstärkter Kunststoff
<b>nD:</b>	n-dimensional: 1D: x-, y-, oder z-Abstand; 2D: Lage eines Punktes in einer Ebene, 3D: x-, y- und z-Position im Arbeitsraum; 6D: x-, y-, z-Position und Orientierung (z. B. Rz-Ry-Rz)
<b>FEM:</b>	Finite Elemente Methode
<b>i.O.:</b>	in Ordnung
<b>n.i.O.:</b>	nicht in Ordnung
<b>PTP:</b>	Point to Point (engl.: Punkt zu Punkt)
<b>SCARA:</b>	Selective Compliance Assembly Robot Arm
<b>SPS:</b>	Speicher-Programmierbare Steuerung
<b>TCP:</b>	Tool Center Point: Arbeitspunkt des Endeffektors einer kinematischen Kette

## 0.3 Formelzeichen

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
a, d	Strecken	[mm]
b	Getriebespiel	[°]
C	Kopplungsmatrix (Übersetzungs- und Kopplungsfaktoren)	
$D_p \bar{T}(p, \bar{h})$	Jacobi-Matrix (Ableitung der Modellfunktion nach den Parametern)	
e	Elastizitätskoeffizient	[°/Nm]
E	Elastizitätstransformation	
f	Fourierkoeffizienten	hier: [°]
F	Reaktionskraft	[N]
F	Zielfunktional	
G(h)	Übertragungsverhalten eines Antriebs	
G(p*)	Gradient des Zielfunktionals	
h	Positionsgeberwerte (Drehgeber, Glasmaßstab, etc.)	Inkременте [incr]
k	Anzahl	
L	Transformation (als Produkt von Elementartransformationen)	
M	Reaktionsmoment	[Nm]
M	gemessene Position	
p	Kinematikparameter	
P	Menge der Elementartransformationen	
q	Gelenkstellung (rotatorische oder translatorische Verschiebung)	[mm] oder [°]
Rx, Ry, Rz	Rotation: z. B. Rx: Rotation um die x-Achse	
Tx, Ty, Tz	Translation: z. B. Tx: Translation entlang der x-Achse	

## 0 Definitionen, Abkürzungen und Formelzeichen

---

Bezeichnung	Beschreibung	Einheit
T	Modellfunktion	
$\Gamma$	Gelenkbelastung (als Tensor)	
$\theta, \alpha, \beta$	Winkel	[°]
$\sigma p$	Skalierungsfaktor	
$\sigma p_i$	Extremaler Skalierungsfaktor	
$\bar{\sigma p}_i$	Gemittelter Skalierungsfaktor	
$\lambda$	skalarer Faktor	

# 1 Einführung

## 1.1 Einleitung

Die Preisentwicklung im Bereich der Standardindustrieroboter sowie massive Leistungs- und Genauigkeitssteigerungen haben in den letzten Jahren dazu geführt, dass eine Vielzahl neuer Bereiche für den Robotereinsatz erschlossen wurden.

Bis in die 70er Jahre wurden Roboter aufgrund ihrer Wiederholgenauigkeit überwiegend in Bereichen, wie z. B. Pick-and-Place-, Punktschweiß- oder Lackierapplikationen eingesetzt, in denen eine Wiederholgenauigkeit von zum Teil einem Millimeter ausreichend war. In den 80er Jahren traten dann immer mehr auch Montage- und Bearbeitungsaufgaben mit höheren Genauigkeitsanforderungen in den Vordergrund.

In den 90er Jahren war die Entwicklung der Roboter dann erstmals soweit fortgeschritten, dass neben den mittlerweile klassischen Montageanwendungen auch Aufgaben im Bereich von Prozessen mit hohen Genauigkeitsanforderungen in den Bereich der technischen und wirtschaftlichen Machbarkeit rückten. Roboter mit einer Wiederholgenauigkeit von zum Teil deutlich unter einem zehntel Millimeter schienen prinzipiell z. B. auch für Aufgaben, wie beispielsweise einen Einsatz als flexibles Messwerkzeug, geeignet zu sein (REINHART ET AL. 1998 B).

Bis dahin wurden viele dieser Anwendungen vor allem aufgrund des notwendigen Investitionsaufwandes für flexible Lösungen entweder von vornherein manuell oder, die technische Machbarkeit, ausreichende Stückzahlen und niedrige Variantenvielfalt vorausgesetzt, starr automatisiert gelöst. Mit der Aussicht auf die Möglichkeit eines wirtschaftlichen Robotereinsatzes rückten jedoch auch neue Probleme in den Vordergrund.

Während starr automatisierte Prozesse meist mit einfach konzipierten Kinematiken umgesetzt werden und manuelle Lösungen als quasi selbstregelnd eingestuft werden können, erwies sich das Prozessverhalten bei Einsatz eines Roboters oftmals aufgrund seines komplexen, kinematischen Verhaltens in der Praxis als kaum beherrschbar. Gerade im Bereich hochgenauer Anwendungen wurde oftmals übersehen, dass sich die Herstellerangaben hinsichtlich Wiederhol- und Absolutgenauigkeit auf einen quasi stationären Zustand des Roboters ohne nennenswerte Einflüsse aus dem Prozess, dem Umfeld oder dem Roboter selbst beziehen und mit dem Alltag im Fertigungsumfeld nur wenig gemeinsam haben (IRIS 1998). Viele geplante Anwendungen erwiesen sich infolgedessen als praktisch nicht realisierbar.

Als Ergebnis wurden für eine Vielzahl von Problemen Sonderlösungen geschaffen, die zwar oft zum gewünschten Erfolg führten, in der Regel jedoch kaum oder nur bedingt

## **1 Einführung**

---

auf andere Bereiche übertragbar waren. Hinzu kam ein oftmals enormer Sensorikaufwand, der viele robotergestützte Prozesse letztendlich in den Bereich der Unwirtschaftlichkeit rücken ließ.

Neben diesen Sonderlösungen wurden auch Kalibrierverfahren entwickelt, die eine steuerungstechnische Korrektur der Genauigkeitsdefizite hinsichtlich der Absolutgenauigkeit ermöglichen (z. B. SCHRÖER 1993, DIEWALD 1995, ROOS 1998). Die von SCHRÖER (1993) vorgestellte Kalibriersoftware RoboCal bot erstmals auch eine vom Robotertyp unabhängige Kalibrierlösung an. Durch diese Maßnahmen traten jedoch auch zunehmend betriebsabhängige Einflüsse, wie beispielsweise die Temperaturdrift, als Probleme in den Vordergrund (REINHART ET AL. 1998 A).

Zur Behebung dieser Defizite daraufhin entwickelte Verfahren, wie beispielsweise das von GRÄSER (1999), verzichteten auf die aufwendige Modellierung, wie sie zur Absolutkalibrierung eingesetzt wurde und waren wieder an bestimmte Robotertypen gebunden, so dass in diesem Bereich nach wie vor keine vom Roboter- und Steuerungstyp unabhängige Lösung existierte.

### **1.2 Zielsetzung**

Ziel dieser Arbeit ist es daher, systemimmanente Probleme hinsichtlich der Absolutgenauigkeit aufgrund von systematischen Einflüssen aus dem Roboterbetrieb mit Hilfe einer standardisierbaren Vorgehensweise zu lösen. Hierzu sollen die Bereiche der modellbasierten Roboterkalibrierung und –kompensation zusammengeführt werden (Bild 1.1). Die Arbeit setzt daher methodisch die Untersuchungen von GRÄSER (1999) zur Kompensation thermischer Einflüsse auf Industrieroboter fort und kombiniert diese mit dem von SCHRÖER (1993) vorgestellten Verfahren zur Absolutkalibrierung. Hierdurch soll eine Methode geschaffen werden, die eine Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf Industrieroboter unter Verwendung vollständiger, mit Hilfe einer standardisierten Kalibriersoftware erstellter Robotermodelle ermöglicht.

Ausgehend vom vollständigen Robotermodell sollen systematisch betriebsabhängige Parameter bestimmt und in einem Modell zusammengefasst werden. Mittels einer geeigneten Modellreduktion soll dann eine Methode zur gezielten Nachkalibrierung betriebsabhängiger Parameter entwickelt werden.

Hier von sind folgende Vorteile zu erwarten:

- Durch die Übernahme von im Bereich der modellbasierten Roboterkalibrierung verwendeten Modellierungs- und Berechnungswerkzeugen kann die Implementierung des Kompensationsverfahrens bei neuen Robotern auf einen Bruchteil der bislang notwendigen Zeitspanne reduziert werden.

- Es können alle betriebsabhängigen Parameter des vollständigen Robotermodells bei der Kompensation ohne Mehraufwand bei der Modellierung berücksichtigt werden. Hierdurch ist eine Genauigkeitssteigerung gegenüber den bekannten Kompensationsverfahren zu erwarten, die entweder auf die gezielte Ermittlung dieser Parameter ganz verzichten oder nur auf der Verwendung eines gegebenenfalls geringfügig erweiterten, nominalen Modells basieren.
- Durch den Aufbau eines Systems auf der Basis einer standardisierten Kalibriersoftware kann im gleichen Schritt die Absolutgenauigkeit und somit auch die Offline-Programmierfähigkeit kompensiert betriebener Anlagen verbessert werden.
- Durch die Methode besteht prinzipiell die Möglichkeit, jeden beliebigen Robotertyp in einer kompensierten Anwendung zu betreiben.
- Es kann eine Standardschnittstelle für kompensierte Roboter entwickelt werden.

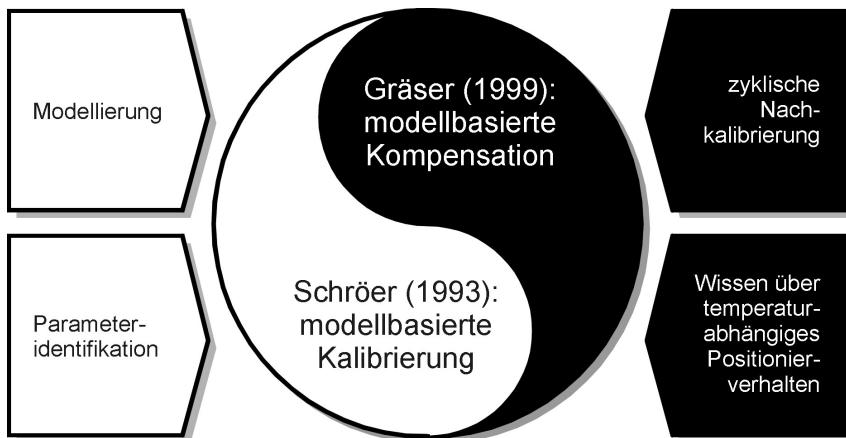


Bild 1.1: Zusammenführung der Bereiche der modellbasierten Kalibrierung und Kompensation

Als Ergebnis der Arbeit soll

- eine allgemein bei Industrierobotern gültige Methode zur Ermittlung betriebsabhängiger Parameter vorliegen, die eine Implementierung der Kompensation bei neuen Robotertypen innerhalb kürzester Zeit ermöglicht,
- ein Verfahren zur Kompensation betriebsabhängiger Parameter, das eine Wiederholgenauigkeit auch unter Betriebseinflüssen nahe der systemimmanrenten Wiederholgenauigkeit sicherstellt, zur Verfügung stehen sowie

## **1 Einführung**

---

- die Allgemeingültigkeit und Übertragbarkeit des Ansatzes durch die Anwendung auf mehrere Robotertypen unterschiedlicher Hersteller überprüft worden sein.

### **1.3 Vorgehensweise und Gliederung der Arbeit**

Die Arbeit gliedert sich in insgesamt 5 Kapitel (Bild 1.2).

Nach der Einführung (Kap. 1) wird in Kap. 2 der Stand der Technik hinsichtlich Grundlagen (Abschn. 2.1 bis 2.4) und Möglichkeiten zur Genauigkeitssteigerung bei Industrierobotern (Abschn. 2.5 bis 2.7) beschrieben. Daraus werden in Abschn. 2.8 Defizite bestehender Verfahren zur Roboterkompensation sowie der daraus resultierende Handlungsbedarf abgeleitet.

Zur Ausschöpfung dieser Potenziale wird in Kap. 3 eine Methode vorgeschlagen und zunächst konzeptioniert. Zu deren Umsetzung wird eine speziell auf das Verfahren abgestimmte Testumgebung in Form einer Temperaturkammer entwickelt (Abschn. 3.2). Danach folgt eine Beschreibung der zur Umsetzung der Methode notwendigen Teilschritte (Abschn. 3.3 bis 3.8). Anschließend wird erörtert, durch welche Einflüsse die erreichbare Genauigkeit des Systems bei der Anwendung der Methode begrenzt wird (Abschn. 3.9).

Kap. 4 beschreibt als Anwendungsbeispiel den Einsatz der Methode in einer robotergestützten Inline-Messzelle in der Automobilindustrie. Die Arbeit schließt mit der Zusammenfassung und dem Ausblick (Kap. 5).

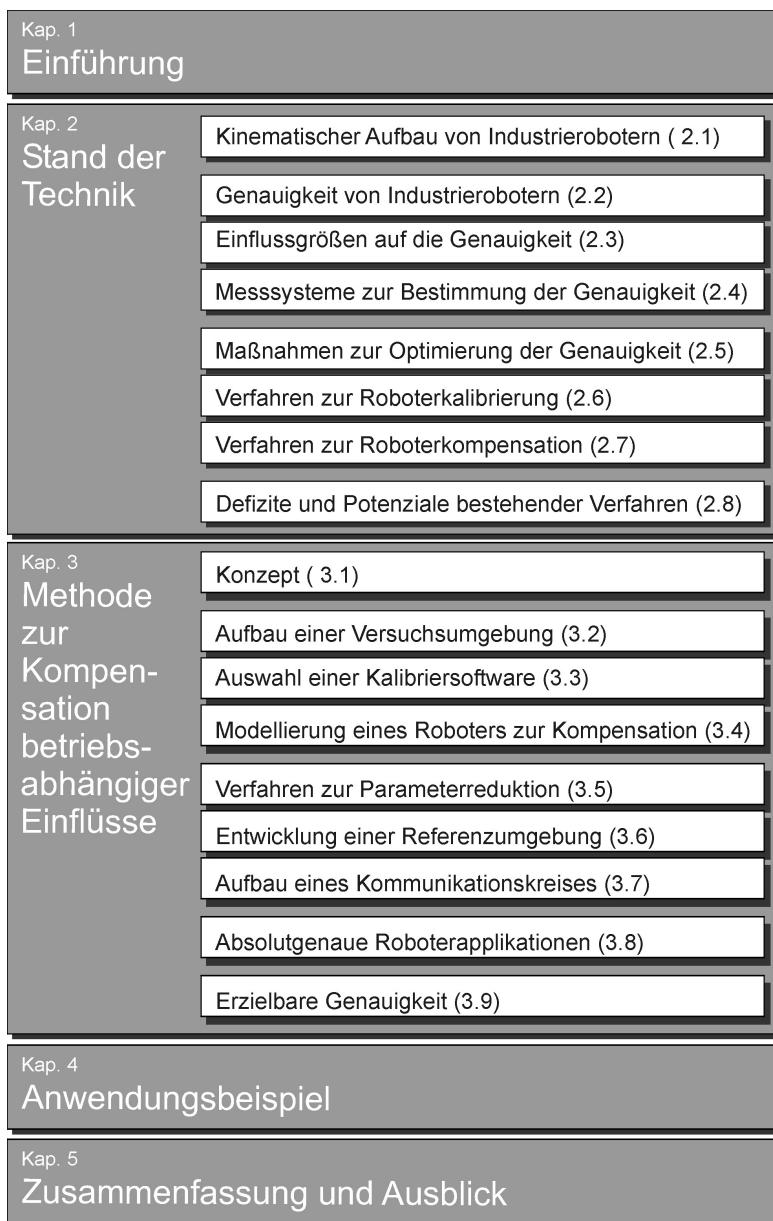


Bild 1.2: Gliederung der Arbeit

## **1 Einführung**

---

## 2 Stand der Technik

Nach einer allgemeinen Beschreibung kinematischer Grundlagen (Abschn. 2.1) sowie üblicher Beschreibungsweisen der Robotergenauigkeit (Abschn. 2.2) werden Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Industrierobotern aufgezeigt (Abschn. 2.3). Abschn. 2.4 beschäftigt sich mit Messsystemen zur Genauigkeitssteigerung und –erfassung. Anschließend werden in Abschn. 2.5 allgemeine Ansätze zur Genauigkeitssteigerung bei Industrierobotern beschrieben.

Danach werden Methoden zur Roboterkalibrierung (Abschn. 2.6) und Kompensation (Abschn. 2.7) vorgestellt. Hierbei wird jeweils besonders ausführlich auf modellbasierte Verfahren eingegangen.

Die gefundenen Verbesserungsmöglichkeiten hinsichtlich Kompensation und Kalibrierung werden in Abschn. 2.8 zusammengefasst.

### 2.1 Kinematischer Aufbau von Industrierobotern

Industrieroboter sind mittlerweile in vielfältigen Ausführungen verfügbar. Unterscheidungen sind bezüglich der Form des Arbeitsraumes (kartesisch, kugel- oder zylinderförmig), der Anzahl der Achsen sowie in Bezug auf den kinematischen Aufbau möglich.

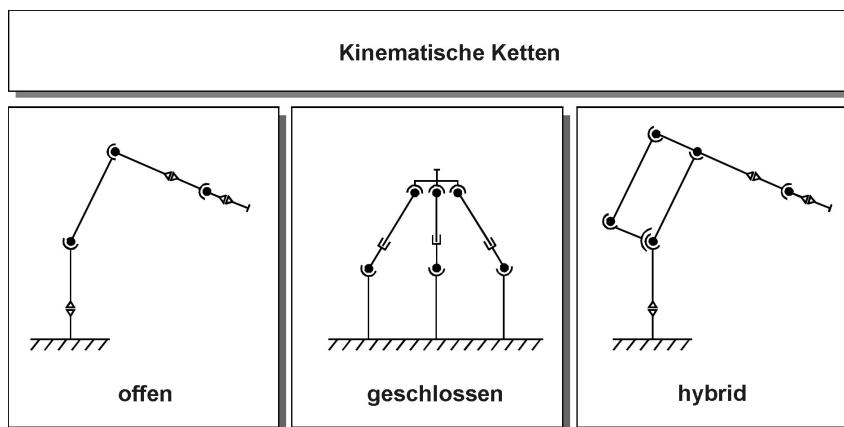


Bild 2.1: Offene, geschlossene und hybride kinematische Ketten (Roboterdarstellung nach VDI 2861 1989)

Hinsichtlich des kinematischen Aufbaus (Bild 2.1) können zunächst zwei Arten unterschieden werden: Roboter mit offenen und mit geschlossenen kinematischen Ketten. Daneben existieren Hybride, bei denen jeweils Teile der kinematischen Kette offen und andere geschlossen ausgeführt sind. Diese Mischformen werden auch als komplexe kinematische Ketten bezeichnet (HESSE 1993).

Prinzipiell unterscheiden sich alle Kinematikvarianten hinsichtlich Anzahl, Art und Anordnung der Bewegungssachsen. Zum Einsatz kommen sowohl lineare als auch rotatorische Gelenke. Bei letzteren kann weiter zwischen Dreh- und Schwenkachsen unterschieden werden (Bild 2.2).

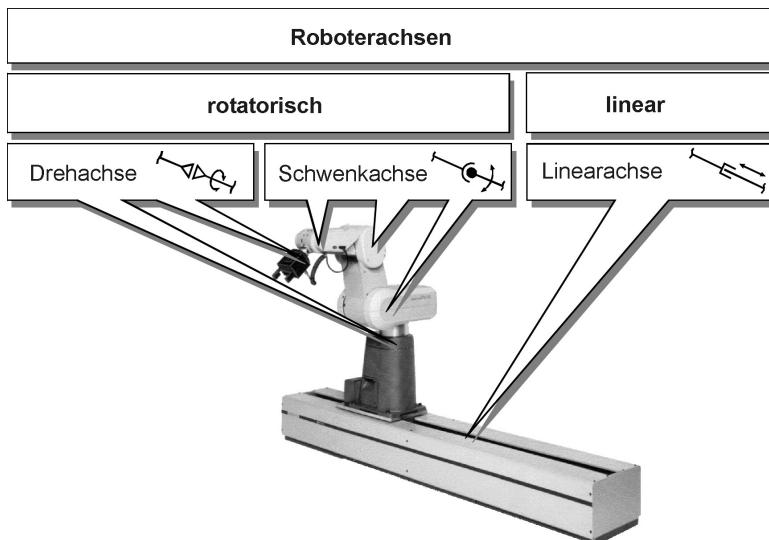


Bild 2.2: Arten von Bewegungssachsen [Bildnachweis: Roboter: Mitsubishi]

### 2.1.1 Roboter mit offenem kinematischem Aufbau

Die meisten am Markt befindlichen Industrieroboter sind 4-, 5- oder 6-Achs-Systeme mit offenem kinematischem Aufbau. Zu ihnen zählen die überwiegend für Pick-and-Place-Aufgaben eingesetzten vierachsigen SCARA-Roboter sowie fünfachsige oder die am weitesten verbreiteten sechsachsigen Vertikalknickarmroboter (Bild 2.3).

Bei letzteren kann man zwischen Typen mit symmetrischem oder asymmetrischem Aufbau unterscheiden (Bild 2.4). Bei symmetrischem Aufbau weisen alle wesentlichen

Elemente des Roboters bezüglich der x-z-Ebene eine weitgehende Symmetrie auf. Asymmetrische Konstruktionen setzen sich jedoch aufgrund ihres einfacheren und somit kostengünstigeren Aufbaus immer mehr durch (z. B. von den Herstellern Kuka, Stäubli und ABB).

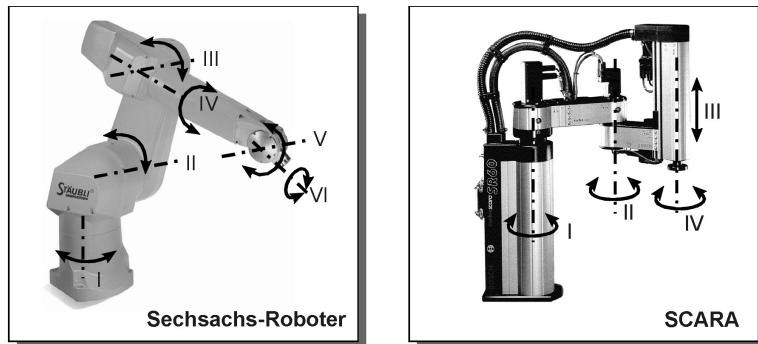


Bild 2.3: Roboter mit offenem kinematischem Aufbau (links: Sechsachs-Roboter, rechts: SCARA) [Bildnachweis: Roboter: Stäubli (links); Bosch (rechts)]

Lagerungen der Bewegungssachsen können hier einseitig auf der Antriebsseite ausgeführt werden, die Ankopplung der Antriebe vereinfacht sich und es wird zusätzliche Bewegungsfreiheit dadurch gewonnen, dass mitunter ein Durchschlagen der Achsen möglich wird.

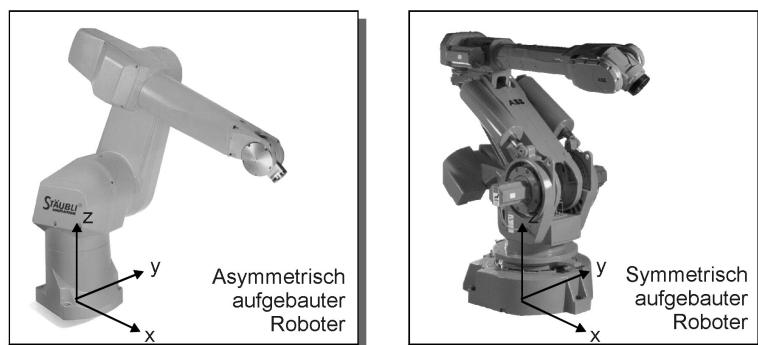


Bild 2.4: Symmetrisch und asymmetrisch aufgebauter Roboter [Bildnachweis: Roboter: Stäubli (links); ABB (rechts)]

Ein weiteres wichtiges Merkmal zur Unterscheidung von Sechsachs-Robotern ist die Art der Ankopplung des Antriebs der dritten Achse. Während bei asymmetrischen Konstruktionen der Antrieb meist direkt an der dritten Achse angebracht ist, wird bei vielen symmetrisch aufgebauten Robotern die dritte Achse über ein Parallelogrammgetriebe (z. B. bei den Herstellern ABB, Comau und Motoman) angesteuert. Der eigentliche Antrieb ist dann koaxial zum Antrieb der zweiten Achse angeordnet. Diese Kinematikvariante wird häufig auch zu den Hybriden gerechnet (Bild 2.1), da das Parallelogramm als geschlossene kinematische Teilkette angesehen werden kann. Über das Parallelogramm ist es ferner möglich, auf Höhe der zweiten Achse Ausgleichsgewichte anzukoppeln, um den Antrieb der dritten Achse zu entlasten. Die zweite Achse wird in diesem Fall durch das Ausgleichsgewicht und das Gewicht des Antriebes der dritten Achse nicht belastet. Bei Konstruktionen ohne Parallelogramm wird das Ausgleichsgewicht, wenn nicht darauf verzichtet wird, in Höhe der dritten Achse als unmittelbares Gegengewicht zum Unterarm des Roboters angebracht. In diesem Fall wird ein leistungsstärkerer Antrieb der zweiten Achse notwendig, da sich andernfalls die Dynamik des Roboters verringert.

Zur Entlastung des Antriebs der zweiten Achse werden vielfach Federn (z. B. bei den Herstellern Comau und Stäubli) oder Druckzylinder (z. B. bei den Herstellern ABB und Kuka) eingesetzt.

Roboter mit offenem kinematischem Aufbau können in 6D vorgegebene Positionen (3 Translationen, 3 Rotationen) in der Regel mit mehreren unterschiedlichen Achsstellungen und Orientierungen erreichen. Die Lösung des Gleichungssystems zur Bestimmung der hierfür notwendigen Achsstellungen (Rückwärtstransformation) ist somit nicht eindeutig. Zur eindeutigen Definition der Roboterpose anhand der Punkt- und Orientierungsinformation sind zusätzliche Informationen, Vorgaben oder Randbedingungen, z. B. in Form der Achskonfiguration, notwendig. Umgekehrt lässt sich jedoch bei gegebenen Achswinkeln die Position und Orientierung am TCP eindeutig berechnen (Vorwärtstransformation).

### 2.1.2 Roboter mit geschlossenem kinematischem Aufbau

Zu den Robotern mit geschlossenem kinematischem Aufbau werden Hexapoden, Deltaroboter sowie Tripoden gerechnet (Bild 2.5).

Eine Unterscheidung ist sowohl nach der Anzahl und Anordnung der Achsen, als auch nach der Art der Antriebe möglich. Bekannt sind Antriebe über Kugelrollspindeln, Hydraulikzylinder sowie Schwenkantriebe in Verbindung mit Zug-/Druckstäben. Darüber hinaus werden derzeit Untersuchungen an mit Linear-Direkt-Antrieben ausgestatteten Kinematiken durchgeführt. Neben Entwicklungen, die lediglich die Kugelrollspindeln durch ein alternatives Antriebskonzept ersetzen, sind auch Linear-

direktantriebe mit zwei Freiheitsgraden Betrachtungsgegenstand aktueller Forschungsvorhaben. Bei diesen sind die Lager der verwendeten Stäbe auf einer horizontalen Antriebsplatte in x- und y-Richtung beweglich gelagert (LÜCKEL ET AL. 2001).

Ein neues Antriebskonzept stellen die sogenannten Spreizbandkinematiken dar (HESSELBACH ET. AL. 2000). Bei diesen wird durch drei planar oder sechs in Form eines Hexapoden angeordnete, flexible Bänder eine Roboterkinematik erzeugt. Ihre Steifigkeit erhalten diese Kinematiken durch den aufgrund innerer Spannungen leicht gewölbten Querschnitt der Bänder. Angetrieben werden sie durch geregeltes Auf- und Abwickeln derselben. Aufgrund ihres niedrigen Gewichts bieten sich derartige Roboter vor allem für den Einsatz überall dort an, wo hohe Steifigkeiten bei extrem niedrigem Eigengewicht gefordert sind. Die derzeitigen Untersuchungen an Spreizbandkinematiken beschäftigen sich neben möglichen Einsatzbereichen mit der Auslegung der Bänder, Steuerungsalgorithmen sowie dem notwendigen Sensorikeinsatz. Über erreichbare Genauigkeiten sowie das Betriebsverhalten derartiger Roboter ist somit bislang nur wenig bekannt.

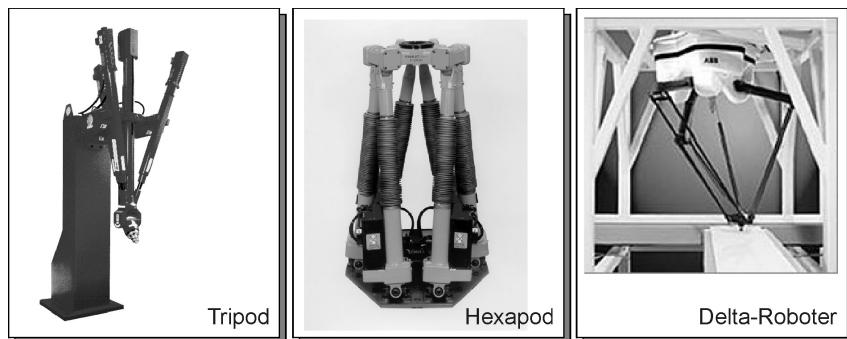


Bild 2.5: Roboter mit geschlossenem kinematischem Aufbau [Bildnachweis:  
Roboter: Comau (links); Fanuc (Mitte); ABB (rechts)]

Durch einen geschlossenen kinematischen Aufbau lassen sich deutlich größere Steifigkeiten des Roboters und somit verhältnismäßig hohe Nutzlasten bei niedrigem Eigengewicht erreichen (PRITSCHOW 1997). Dies hat in den letzten Jahren zu einer verstärkten Entwicklung von Tripod-Kinematiken geführt, die mittlerweile auch im Werkzeugmaschinenbereich eingesetzt werden (z. B. bei den Herstellern Heller und Heckert). Jedoch werden diese praktisch nur in Verbindung mit weiteren Achsen als hybride Kinematiken verwendet, da allein mit der Tripodkinematik, im Gegensatz zum Hexapoden, keine gezielte Veränderung der Orientierung des TCP möglich ist. Der vermehrte Einsatz von Tripoden ist auch darauf zurückzuführen, dass bei diesen, durch

eine geeignete Ankopplung der Nebenachsen an die Tripodkinematik, im Gegensatz zum Hexapoden, eine eindeutige Vorwärts- und Rückwärtstransformation für die als Tripod gestaltete kinematische Teilkette realisierbar ist. Tripoden sind somit steuerungstechnisch vergleichsweise einfach beherrschbar. Bei Hexapoden ist gerade umgekehrt gegenüber offenen kinematischen Ketten die Rückwärtstransformation eindeutig und somit analytisch lösbar, während die Vorwärtstransformation numerisch gelöst werden muss (HESSELBACH 1996). Das heißt, dass für jede in 6D definierte Pose im Arbeitsraum des Roboters zwar eine eindeutige Achsstellung existiert, mit der diese Position mit der gewünschten Orientierung erreicht werden kann, zu dieser Achsstellung jedoch mehrere Positionen existieren, die mit dieser gleichen Achsstellung erreicht werden können (z. B. durch ein Durchschlagen von Kinematikkomponenten). Dieser Umstand ist steuerungstechnisch nur schwer zu beherrschen, da allein anhand der Lagesensoren der Achsen keine eindeutige Poseinformation gewonnen werden kann. Das Problem wird häufig durch den Einsatz zusätzlicher Sensorik sowie durch Bewegungssimulationen gelöst.

### 2.1.3 Zusammenfassung

Roboterkinematiken sind mittlerweile in vielen unterschiedlichen Varianten hinsichtlich Art und Anordnung der Antriebe sowie der Gestalt des Arbeitsraumes verfügbar. Steuerungstechnisch relevant ist insbesondere die Unterscheidung zwischen offenen und geschlossenen kinematischen Ketten. Offene kinematische Ketten, wie beispielsweise Standard-Sechsachs-Roboter, besitzen in der Regel eine eindeutige Vorwärtstransformation, während die Rückwärtstransformation nur numerisch lösbar ist. Bei geschlossenen kinematischen Ketten ist dies gerade umgekehrt. Dieser Umstand macht für die beiden Varianten getrennte, steuerungstechnische Ansätze hinsichtlich Modellierung und Lageregelung erforderlich.

## 2.2 Genauigkeit von Industrierobotern

Seit der Entwicklung der ersten Industrieroboter lag eines ihrer Hauptverbesserungspotentiale immer im Bereich der Genauigkeit, da diese über einen großen Bereich der Einsatzmöglichkeiten unmittelbar entscheidet.

Ob beispielsweise eine Montageaufgabe mit einem Roboter lösbar ist, hängt unter anderem davon ab, ob der Roboter in der Lage ist, die Fügepartner innerhalb der geforderten Montagegenauigkeit relativ zueinander zu positionieren. Je größer hierbei die Kluft zwischen der geforderten Genauigkeit und der Robotergenauigkeit ist, desto aufwendiger sind die notwendigen Maßnahmen zum Toleranzausgleich. Die Umsetzung einer solchen Aufgabe mit einem Roboter kann damit sehr schnell in den Bereich der Unwirtschaftlichkeit rücken.

Der nachfolgende Abschnitt beschreibt daher, welche Genauigkeitskenngrößen oder -kategorien bei Industrierobotern existieren, wodurch diese beeinflusst und wie sie gemessen werden.

### 2.2.1 Genauigkeitskategorien

In erster Linie wird bei Industrierobotern zwischen Absolut- und Wiederholgenauigkeit unterschieden. In der klassischen Betrachtungsweise (Bild 2.6 links) ist die Ist-Position hierbei das Ergebnis der Summe der Vektorkette aus Sollposition, Absolutgenauigkeit und Wiederholgenauigkeit. Der Einfluss der Absolut- und Wiederholgenauigkeit wird hierbei jeweils als Kugel dargestellt, wobei der Mittelpunkt der Kugel der Absolutgenauigkeit gleich der Sollposition der Roboterhand ist und der Mittelpunkt der Kugel der Wiederholgenauigkeit auf der Oberfläche der Kugel der Absolutgenauigkeit liegt. Neuere Betrachtungsweisen unterscheiden weiter zwischen stationären und instationären Größen. Letztere sind in Bild 2.6 (rechts) als Drifteffekte dargestellt.

Je nach Einsatzbereich ist eine weitere Unterscheidung hinsichtlich Bahn- und Positioniergenauigkeit notwendig. Die Bahngenaugkeit sei hier nur der Vollständigkeit halber erwähnt, da das Ziel der Arbeit in erster Linie in einer Steigerung der Positioniergenauigkeit liegt und der Bereich der Bahngenaugkeit nur bedingt berührt wird.

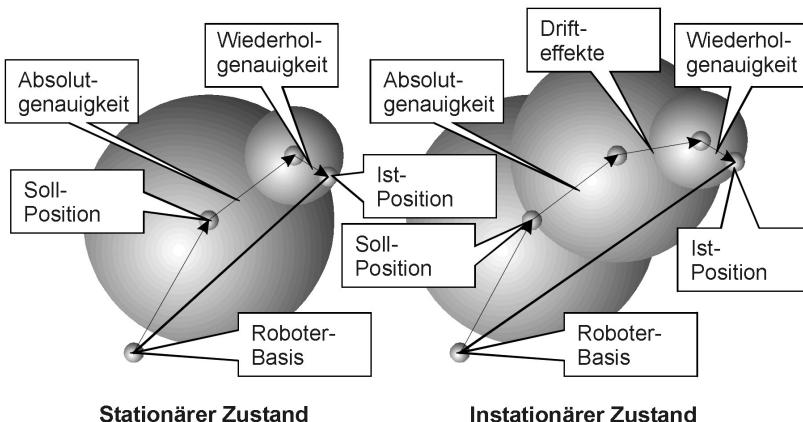


Bild 2.6: *Absolut und Wiederholgenauigkeit sowie Drifteffekte (nach GRÄSER 1999)*

### 2.2.1.1 Absolutgenauigkeit

#### Posegenauigkeit:

Unter Absolut- oder auch Posegenauigkeit versteht man die Fähigkeit eines Industrieroboters, seinen Tool Center Point an einem in kartesischen Koordinaten gegebenen Raumpunkt innerhalb eines bestimmten Kugelradius als Toleranzfeld aus einer vorgegebenen Richtung zu positionieren. Die Posegenauigkeit beschreibt hierbei die mittlere Abweichung des Tool Center Points und seiner Orientierung in allen sechs Freiheitsgraden zu einem vorgegebenen Arbeitsraumpunkt und einer vorgegebenen Orientierung (DIN EN ISO 9283).

In der Praxis ist die Absolutgenauigkeit eines Roboters immer dann relevant, wenn zur Programmierung des Roboters oder zur Positionsbestimmung der kartesische Arbeitsraum genutzt werden soll. Dies ist z. B. beim Einsatz von Offline-Programmiermethoden der Fall, da die Übertragbarkeit des Roboterprogramms von der Simulation auf den realen Roboter nur dann möglich ist, wenn dieser sich ausreichend genau wie das zur Simulation eingesetzte Modell verhält (ROOS 1998). Die Vergleichsgröße ist hierbei in der Regel der kartesische Arbeitsraum. Ähnliches gilt auch im Falle des Austausches eines Roboters oder wenn der Roboter beispielsweise als Messmaschine im Sinne einer Koordinatenmessmaschine eingesetzt werden soll.

Auswirkungen auf die Absolutgenauigkeit haben nach THATER (1993) und GOSSEL (1996) unterschiedliche Einflussgrößen. Zu betrachten sind alle Robotereigenschaften, die aufgrund einer konstanten, systematischen Abweichung von Ihrem Sollwert geeignet sind, eine systematische Abweichung der TCP-Position des Roboters vom Vorgabewert zu bewirken. In der Regel sind dies sämtliche Größen, die durch Fertigungs- und Montagetoleranzen sowie Schwankungen in den Materialeigenschaften beeinflusst werden. Vielfach werden diese Größen auch durch Einwirkungen aus dem Roboterumfeld, wie z. B. insbesondere die Temperatur, verändert. Die Norm (DIN EN ISO 9283) unterscheidet hier zwischen stationären und instationären Genauigkeitskenngrößen. Unter instationären Kenngrößen werden Drifteffekte der Posegenauigkeit und der Posewiederholgenauigkeit unter Betriebseinflüssen zusammengefasst.

Neben Fertigungs- und Montagetoleranzen können auch Einflüsse aus der Steuerung zu einer verschlechterten Absolutgenauigkeit führen. Mögliche Einflussgrößen sind hier in erster Linie Parameter innerhalb des zur Steuerung verwendeten Robotermodells, die die Robotermechanik beschreiben.

#### Bahngenaugkeit (Schleppfehler)

Die oben genannten Einflüsse wirken sich auch auf die Bahngenaugkeit aus, d. h. sie beeinflussen sie die Fähigkeit eines Roboters, seinen Tool Center Point (TCP) auf

einer im kartesischen Arbeitsraum definierten Bahn mit einer definierten Geschwindigkeit innerhalb eines bestimmten Radius um die vorgegebene Bahn (Schleppfehler) und innerhalb eines bestimmten Geschwindigkeitsbereiches um die Sollgeschwindigkeit zu bewegen.

Neben den mechanischen Einflussgrößen spielen hier verstärkt steuerungstechnische Gesichtspunkte eine Rolle, wie z. B. die Art und Gestaltung des Bahnreglers (ZELLER 1995), die Bahnplanung, die Berechnungsalgorithmen für auftretende dynamische Kräfte und die Vorausschau auf auftretende statische oder dynamische Prozesskräfte (DAUSTER 2001).

### 2.2.1.2 Wiederholgenauigkeit

#### Posewiederholgenauigkeit

Die Posewiederholgenauigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Industrieroboters, seinen Tool Center Point an einem programmierten Punkt im Arbeitsraum innerhalb eines bestimmten Kugelradius auf einem vorgegebenen Pfad mit einer definierten Pose unter gleichen Bedingungen beliebig oft wieder zu positionieren (DIN EN ISO 9283).

In der Praxis ist die Wiederholgenauigkeit immer dann relevant, wenn der Tool Center Point eines Roboters wiederholt an einem auf eine beliebige Art und Weise programmierten Punkt, z. B. im Rahmen einer Serienproduktion, positioniert werden muss.

Einfluss auf die Wiederholgenauigkeit haben alle Roboterseigenschaften, die zufälligen und daher nicht vorhersagbaren Schwankungen unterworfen sind und somit eine nicht systematische Fehlpositionierung des TCP bewirken. Mögliche Einflussgrößen sind hier in erster Linie im Bereich der Mechanik und der Sensorik zu suchen.

Mechanische Einflussgrößen sind nach THATER ET AL. (1994) und GOSSEL (1996) z. B. Spiel in den Getrieben und Gelenken sowie Stick-Slip-Effekte in den Getrieben. Der wichtigste sensorische Einfluss ist die Auflösung der Drehgeber sowie die Art der Ankopplung an den jeweiligen Antrieb.

Zufällige Einflüsse aus dem Roboterumfeld sind z. B. Schwingungseinflüsse aufgrund von benachbarten Maschinen. Schwingungen können jedoch auch durch den Roboter selbst angeregt werden, beispielsweise im Falle eines nicht ausreichend bedämpften Unterbaus der Roboterzelle.

Auch betriebsbedingte Störgrößen, wie beispielsweise Temperaturschwankungen, wirken sich in der Praxis scheinbar auf die Wiederholgenauigkeit aus, obwohl sie eigentlich zu den systematischen Einflussgrößen gehören. Dies ist jedoch ausschließlich in der mangels Erfassung schwierigen Vorhersagbarkeit ihrer Auswirkungen begründet.

### Bahnwiederholgenauigkeit (Bahnstreuubreite, Bahnabstand)

Die Bahnwiederholgenauigkeit beschreibt die Fähigkeit eines Roboters, seinen Tool Center Point auf einer programmierten Bahn unabhängig von der Programmiermethode unter gleichen Bedingungen beliebig oft innerhalb eines bestimmten Radius um die gemittelte Bahn zu bewegen (nach DIN EN ISO 9283).

Die Einflussgrößen sind hierbei wiederum zunächst die gleichen wie die bei der Positionierwiederholgenauigkeit genannten. Auch hier spielen, ähnlich wie bei der absoluten Bahngenaugkeit, verstärkt steuerungstechnische Gesichtspunkte eine Rolle.

#### 2.2.2 Bestimmung der Robotergeraugigkeit

Methoden und Kriterien zur Bestimmung der Robotergeraugigkeit werden in unterschiedlichen Normen und Richtlinien beschrieben (DIN EN ISO 9283, VDI 2860). Allen gemeinsam ist die Einführung einer Mess- und Prüfebene (Bild 2.7), in der die einzelnen Genauigkeitskenngrößen über alle Normen hinweg nach ähnlichen Kriterien hinsichtlich ausgewählter Referenzposen ermittelt werden. Die Anordnung und Ausdehnung der Ebene ist von der Robotergröße abhängig.

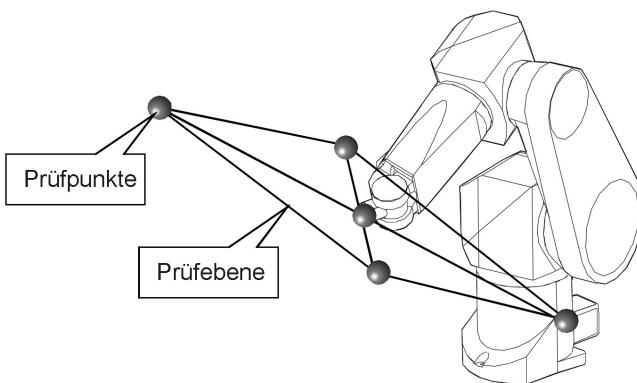


Bild 2.7: Roboter mit Prüfebene

Da in der Norm nicht festgelegt ist, welche Roboterkenngroßen im Einzelnen zu ermitteln sind, entscheiden Hersteller und Anwender darüber, welche Testverfahren im jeweiligen Fall anzuwenden sind. Dies führte dazu, dass die Norm DIN EN ISO 9283 in den letzten Jahren zunehmend kritisiert wurde, da hierdurch ein direkter Vergleich

von Leistungsdaten von Robotern unterschiedlicher Hersteller kaum möglich ist (DUELEN ET AL 1992) und weiter da nach IRIS (1998)

- sie in der Industrie kaum bekannt ist,
- nur 10% der Unternehmen Erfahrungen im Umgang mit ihr haben,
- nur 20% der Unternehmen diese Norm für nützlich oder sinnvoll halten,
- sie die Anforderungen der Roboteranwender nicht berücksichtigt,
- die meisten Roboteranwender mit der Leistung ihrer Roboter ohnehin sehr zufrieden sind und
- Roboteranwender Leistungstests von Industrierobotern als nicht relevant für Kaufentscheidungen ansehen.

Um dem zu begegnen, wurde im Rahmen des IRIS-Projektes (**I**mprovement of **R**obot **I**ndustrial **S**tandardisation) ein Entwurf für eine Verbesserung der Norm erarbeitet, der sich vor allem an den Bedürfnissen der Anwender orientiert.

Vor allem wurden nachfolgende Mängel der Norm DIN EN ISO 9283 erkannt:

- Eine Bestimmung der Robotergenauigkeit an nur fünf Punkten ist nicht ausreichend.
- Erfahrene Roboterprogrammierer können Pfade und Testwürfel entsprechend DIN EN ISO 9283 so programmieren, dass eine Vielzahl von Roboterfehlern beim Test nicht zum Tragen kommen und die Testergebnisse somit deutlich besser als die tatsächliche Robotergenauigkeit ausfallen.
- Die DIN EN ISO 9283 ist auf Untersuchungen im kartesischen Arbeitsraum beschränkt. Dieser gibt die wahren Verhältnisse am Roboter, der sich eigentlich im Gelenkarbeitsraum bewegt, nur bedingt wieder.
- Die Untersuchung eines Roboters unter Beschränkungen, die weitaus enger gefasst sind als der normale Anwendungsbereich eines Roboters, ist nicht im Interesse der Anwender.

Um diesen Mängeln zu begegnen, entstand zunächst ein Konzept, das sich am Lebenszyklus eines Industrieroboters orientiert und für jedes durchlaufene Stadium von der Entwicklung bis zum Einsatz und zur Wartung in der Produktion an die jeweiligen Anforderungen angepasste Leistungskriterien und zugehörige Testverfahren bereitstellt. Hierzu wurden zunächst unterschiedliche Applikationen hinsichtlich der jeweils relevanten Leistungskriterien untersucht. Zu deren Überprüfung wurden dann entweder bekannte Testverfahren ausgewählt und gegebenenfalls modifiziert oder vollständig neue entwickelt.

Hierbei wurden folgende Grundsätze berücksichtigt:

## 2 Stand der Technik

---

- Die Untersuchung eines Roboters soll unter maximaler Belastung erfolgen. Dies betrifft die Posenwahl, die Geschwindigkeit, die Beschleunigung und die Nutzlast des Roboters.
- Es dürfen keine festen Pfade oder Posensätze durch die Norm vorgegeben werden. Vielmehr werden Richtlinien vorgestellt, die es dem Anwender ermöglichen, die für ihn relevanten und somit aussagekräftigen Posen und Pfade selbst zu definieren.

### 2.2.3 Typische Genauigkeitskennwerte von Standardindustrierobotern

Nachfolgend findet sich eine Übersicht über typische Genauigkeitskennwerte von gegenwärtig am Markt verfügbaren Standardindustrierobotern (zusammengestellt aus den Datenblättern unterschiedlicher Roboterhersteller: ABB 2000, KUKA 2003, COMAU 2001, STAUBLI 2003, FANUC 2003, MOTOMAN 2003; Tabelle 2.1):

	Kleine Roboter Nutzlast < 15kg	Mittelgroße Roboter Nutzlast < 60kg	Große Roboter Nutzlast > 60kg
Posewiederholgenauigkeit	0,02 bis 0,15 mm	0,04 bis 0,2 mm	0,1 bis 0,3 mm
Posegenauigkeit	0,3* bis 1 mm	0,4* bis 1,3 mm	0,5* bis 2 mm
Bahnwiederholgenauigkeit	0,10 bis 0,3 mm	0,2 bis 0,4 mm	0,3 bis 1,0 mm
Bahngenauigkeit	0,4 bis 1 mm	0,5 bis 1,5 mm	1,0 bis 2,2 mm

\*) Absolutgenauer Roboter

Tabelle 2.1: Typische Genauigkeitskennwerte aktueller Industrieroboter

Die Angaben der Roboterhersteller beziehen sich auf Prüfverfahren entsprechend DIN EN ISO 9283. Einige Hersteller verzichten auf die Angabe der Posegenauigkeit. Die hier angegebenen Maximalwerte sind Erfahrungswerte aus eigenen Untersuchungen.

Insbesondere die Posewiederholgenauigkeit kann als „natürliche Schranke“ für softwarebasierte Verfahren zur Genauigkeitssteigerung angesehen werden, da diese maßgeblich bestimmt, mit welcher Genauigkeit systematische Abweichungen erfasst werden können.

### 2.2.4 Zusammenfassung

Hinsichtlich der Genauigkeit von Industrierobotern muss insbesondere zwischen Wiederholgenauigkeit und Absolut- oder Posegenauigkeit unterschieden werden. Die Wiederholgenauigkeit wird hierbei durch zufällige Einflüsse, wie beispielsweise Spiel in den Antrieben, bestimmt, während die Absolutgenauigkeit das Ergebnis aller systematischen Einflüsse auf die Robotergenauigkeit ist. Vor allem die Absolutgenauigkeit unterliegt stationären und instationären Einwirkungen. Drifteffekte, die im Mittelpunkt der Betrachtungen dieser Arbeit stehen, sind die Folge derartiger instationärer Einwirkungen sowohl aus dem Betrieb des Roboters selbst heraus als auch aus dem Umfeld.

Moderne Industrieroboter weisen mittlerweile Wiederholgenauigkeiten im Bereich weniger zehntel Millimeter auf, während die Absolutgenauigkeit, insbesondere unkalibrierter Roboter, immer noch mehrere Millimeter betragen kann. Hinsichtlich der Erfassung dieser Leistungsmerkmale besteht derzeit noch eine große Diskrepanz zwischen den Bedürfnissen der Anwender und den Vorgaben der Normung. Dem entsprechend kann aus einer Herstellerangabe nur bedingt auf die Eignung eines Roboters für eine bestimmte Aufgabe geschlossen werden.

## 2.3 Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Industrierobotern

Industrieroboter als komplexe, mechatronische Systeme unterliegen nach THATER (1993) und GOSSEL (1996) einer Vielzahl von Einflüssen, die auf die erreichbare Pose- und Posewiederholgenauigkeit einwirken. Sie lassen sich generell in mechanische und steuerungstechnische Einflussgrößen untergliedern, die sich wiederum in Form von stochastischen oder systematischen Fehlern äußern können (Tabelle 2.2). Darüber hinaus ist eine weitere Unterscheidung hinsichtlich ihrer Herkunft, das heißt ob sie fertigungs- oder betriebsbedingt sind, sinnvoll. Klassische, fertigungsbedingte Einflüsse auf die Positioniergenauigkeit sind beispielsweise Fertigungs- und Montagetoleranzen. Als typisch betriebsbedingt hingegen können Temperatureinwirkungen angesehen werden (GRÄSER 1999).

Die Auswirkungen fertigungs- und betriebsbedingter Einflüsse sind in der Praxis häufig kaum unterscheidbar. Für das Positionierergebnis ist es schließlich nicht relevant, ob eine Abweichung der Länge eines Armelementes eine Folge des Fertigungsprozesses oder des aktuellen Erwärmungszustandes ist. Eine Unterscheidung ist jedoch insofern sinnvoll, als die möglichen Gegenmaßnahmen mitunter unterschiedlicher Natur sind.

		Einflussgrößen auf die Genauigkeit von Industrierobotern		
		mechanische Einflüsse	steuerungstechnische Einflüsse	
			Software	Hardware
fertigungsbedingt	stochastisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Spiel in Gelenken</li> <li>▶ Getriebelose</li> <li>▶ Stick-Slip-Effekte in Getrieben</li> </ul>	▶ Rundungsfehler	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Auflösung der Sensorik</li> </ul>
	systematisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Geometrieabweichungen/Verzug</li> <li>▶ Steifigkeiten/Elastizitäten</li> <li>▶ Getriebeabweichungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Parameterabweichungen</li> <li>▶ Modellvereinfachungen</li> <li>▶ Abweichungen in Last- oder Werkzeugdaten</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Linearität der Sensorik</li> <li>▶ Abtastrate der Sensorik</li> <li>▶ Nulllagenfehler</li> <li>▶ Interpolationstaktrate</li> </ul>
betriebsbedingt	stochastisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Spielveränderungen in Gelenken und Getrieben unter Temperatureinfluss oder verschleißbedingt</li> <li>▶ Schwingungseinflüsse</li> </ul>		
	systematisch	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Geometrieabweichungen aufgrund innerer oder äußerer Erwärmung</li> <li>▶ temperatur- oder verschleißbedingte Änderungen von Steifigkeiten/Elastizitäten</li> <li>▶ temperaturbedingte Getriebeabweichungen</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>▶ Parameterabweichungen</li> <li>▶ vereinfachte Modelle</li> </ul>	

Tabelle 2.2: Einflussgrößen bezüglich der Genauigkeit von Industrierobotern

### 2.3.1 Mechanische Einflussgrößen

Jede Form einer Abweichung des Positionierergebnisses eines Roboters vom Sollwert ist die Folge mangelnder Übereinstimmung des zur Steuerung verwendeten Modells mit der realen Kinematik (Bild 2.8) oder der realen Steuerung, der Regelung bzw. anderen Systemkomponenten.

Die mechanischen Größen im Steuerungsmodell sollen hierbei die Roboterkinematik, wie sie in der Realität vorhanden ist, darstellen. Zu Positionierfehlern führen somit alle

Eigenschaften und Merkmale der realen Kinematik, die von der entsprechenden Größe des korrespondierenden Modells abweichen oder in diesem nicht berücksichtigt werden (EHRENSTRASSER UND BONGARDT 2002).

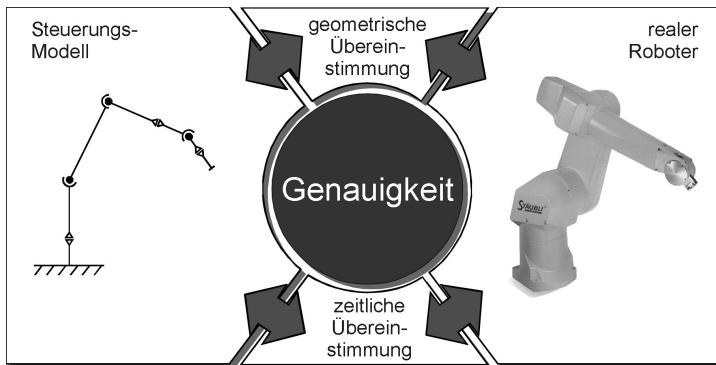


Bild 2.8: Genauigkeit als Maß für die Übereinstimmung von realem Roboter und Steuerungsmodell [Bildnachweis: Roboter: Stäubli]

Zu den mechanischen Einflussgrößen gehören:

- Geometrische Abweichungen der Kinematischelemente (z. B. Längenabweichungen, Achsschiefstände),
- Abweichungen der Steifigkeiten der Kinematischelemente mit Auswirkung auf das Biegeverhalten unter Last,
- Positionierfehler der Antriebe bedingt durch Schwankungen im Übertragungsverhalten der Getriebe (Abweichungen an den Zahnrädern: Teilung, Rundheit, Wälzkreisdurchmesser, Zahngometrie, etc.; Schmiermitteleinflüsse, Reibung, Umkehrspanne, Getriebesteifigkeiten) sowie durch messtechnische Fehler (Drehgeber-Offsets, systematische Messabweichungen der Drehgeber) und
- Abweichungen der Steifigkeiten von unter Druck stehenden Lastausgleichszylindern z. B. durch Abweichungen vom Nenndruck.

### 2.3.2 Steuerungstechnische Einflussgrößen

Steuerungstechnische Einflüsse können weiter in solche aus der Sensorik sowie der Steuerungshard- und -software untergliedert werden. Einflüsse aus der Hardware betreffen hierbei hauptsächlich die Rechengeschwindigkeit und somit die Bahngenaugkeit des Roboters. Sie sind bei modernen Robotern hinsichtlich der Positionier-

genauigkeit, vorausgesetzt es wirken keine Prozesskräfte, praktisch vernachlässigbar. Die Bahngenauigkeit wird insbesondere durch die Interpolationstaktrate bestimmt (GÖLLNITZ 2002), da von dieser maßgeblich die zeitliche Übereinstimmung von Modell und Realität abhängt. Die Interpolationstaktrate wird sowohl von der Leistungsfähigkeit der Hardware, als auch von der Steuerungssoftware beeinflusst, da von deren Gestaltung die Taktrate aller Berechnungen abhängt.

Für die Positioniergenauigkeit relevante Einflussgrößen sind insbesondere in der Software und den darin verwendeten Modellen zu finden. Zu diesen gehören:

- Abweichungen der Parameter des Steuerungsmodells gegenüber den entsprechenden Größen des realen Roboters, wie beispielsweise falsch eingestellte Nulllagedefinitionen sowie nicht exakt eingegebene Geometrie-, Last- oder Werkzeugdaten und
- im Modell unberücksichtigte Einflüsse, wie z. B. aus Modellierungs- oder Vereinfachungsgründen vernachlässigte Steifigkeiten.

Hinsichtlich der Sensorik ist insbesondere die Auflösung, die Abtastrate sowie die Linearität des generierten Signals für die Positioniergenauigkeit relevant (THATER ET AL. 1994; GOSSEL 1996).

### 2.3.3 Einflüsse aus dem Roboterumfeld sowie dem aktuellen Erwärmungszustand

Betriebsbedingte Einflüsse aus dem Roboterumfeld sind mittlerweile als ganz wesentliche Haupteinwirkungen auf die Genauigkeit eines Industrieroboters anzusehen (GRÄSER 1999). Insbesondere die Mechanik wird durch diese in der Weise verändert, dass Abweichungen zum Steuerungsmodell, beispielsweise durch Wärmeausdehnung der Kinematischelemente, auftreten. Daneben existieren Einflussgrößen, wie z. B. äußere Krafteinwirkungen aus dem Prozess, die mitunter im Steuerungsmodell unberücksichtigt bleiben.

In der Praxis relevant sind insbesondere:

- Abweichungen von der üblichen Betriebstemperatur (z. B. Einsatz in einem extrem heißen oder kalten Umfeld) sowie Aufwärm- und Abkühlvorgänge beim Betriebsstart oder im Aussetzbetrieb,
- systematische Krafteinflüsse auf die Roboterstruktur (z. B. durch unter Zug stehende Verkabelungen, Anbauten an der Roboterstruktur, Prozesskräfte, Schwerkrafteinflüsse durch von der Normallage abweichende Einbausituationen),
- durch den Roboter selbst oder Anlagen in der Peripherie des Roboters verursachte Vibrationen sowie

## 2.4 Messsysteme zur Bestimmung der Robotergenauigkeit

- in seltenen Fällen Feuchtigkeit beispielsweise durch Veränderung der Materialeigenschaften von Bauelementen aus faserverstärkten Kunststoffen.

### 2.3.4 Zusammenfassung

Hinsichtlich der möglichen Einflussgrößen auf die Posegenauigkeit eines Roboters ist zwischen mechanischen, steuerungstechnischen und umfeld- beziehungsweise betriebsbedingten Ursachen zu unterscheiden. Die von einem Roboter erzielbare Genauigkeit lässt sich hierbei als Maß für die Übereinstimmung zwischen Steuerungsmodell und realem Roboter beschreiben. Relevant sind somit alle Faktoren, die diese Übereinstimmung beeinflussen. Bezüglich betriebsbedingter Abweichungen sind dies in erster Linie mechanische Einflussgrößen.

## 2.4 Messsysteme zur Bestimmung der Robotergenauigkeit

Mittlerweile wird eine Vielzahl unterschiedlicher Messsysteme und Messprinzipien zur Bestimmung der Genauigkeit von Robotern eingesetzt (Bild 2.9).

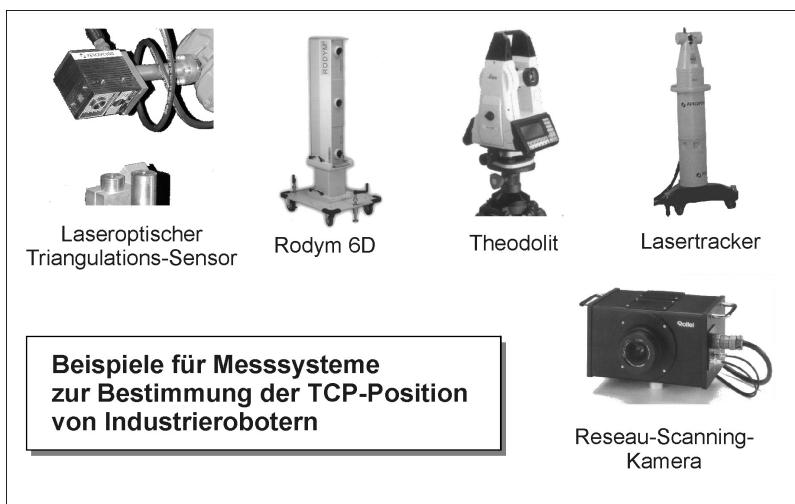


Bild 2.9: Messsysteme zur Bestimmung der TCP-Position von Industrierobotern  
[Bildnachweis: Triangulations-Sensor: Perceptron; Theodolit: Leica;  
Rodym 6D: Krypton; Lasertracker: Leica; Reseau Scanning Kamera:  
Rollei]

Die nachfolgend beschriebenen Verfahren stellen einen Ausschnitt aus dem großen Spektrum der zur Positionsbestimmung derzeit verwendeten Messtechnik dar.

Je nach Messprinzip dienen die unterschiedlichen Verfahren zur ein- oder mehrdimensionalen Bestimmung der Lage des Tool Center Points im Raum oder relativ zu einem Werkstück im Sinne einer Roboterführung. Zum Einsatz kommen sowohl roboteradaptierte (Abschn. 2.4.1) als auch externe (Abschn. 2.4.2) Messsysteme.

### **2.4.1 Roboteradaptierte Messsysteme**

Um der Abhängigkeit eines Roboters von der Genauigkeit seiner Drehgeber zu entgehen, wird mittlerweile in vielen Anwendungen zusätzliche Sensorik zur Ermittlung von Positionierfehlern oder Bahnabweichungen herangezogen. Diese ist jedoch meist anwendungsspezifisch und dient in der Regel im Sinne einer Roboterführung nur zur lokalen Ermittlung eines Korrekturvektors beispielsweise zur Werkzeug- oder Werkstückausrichtung, meistens an einer Vorrichtung oder direkt an einem Werkstück. Zum Einsatz kommen hier oftmals einfache, induktive oder kapazitive Sensoren, jedoch mitunter auch laseroptische Messtechnik in Verbindung mit einer Bildverarbeitung, um ein Roboterwerkzeug, z. B. entlang von Schweißnahtverläufen, zu führen. Nachfolgend wird ein kurzer Überblick über mögliche Messprinzipien und -systeme gegeben.

#### **Lasertriangulation zur Roboterführung**

Bei diesen laseroptischen Systemen handelt es sich um auf dem Lasertriangulationsprinzip in Verbindung mit einer Bildverarbeitung basierende Messsysteme zur Roboterführung (z. B. SCOUT-System: SCOUT 2003). Anhand von auf das Werkstück projizierten Laserlinien kann durch Auswertung mittels Methoden der Bildverarbeitung der Verlauf von Blechüberlappungen, Blechstößen und Kerben verfolgt werden. Entsprechende Sensoren werden häufig zur Nahtverfolgung bei Schweißprozessen eingesetzt.

#### **Lasertriangulation zur 3D-Positionsbestimmung**

Diese (laser-)optischen Systeme werden zur 3D-Vermessung diskreter Merkmale verwendet. Sie basieren in der Regel auf einem zweistufigen Messverfahren. Zunächst wird das zu erfassende Merkmal, z. B. eine Bohrung, mit Hilfe eines Leuchtdiodenfeldes ausgeleuchtet und das Bild mit einer CCD-Kamera aufgenommen. Durch Auswertung des Kontrastes mittels Methoden der Bildverarbeitung wird so zunächst die Lage in einer zur Bildebene der Kamera parallelen Ebene bestimmt. In einem zweiten Schritt wird unter einem definierten Winkel zur Normalen der Bildebene mit Hilfe eines Lasers eine Linie auf die Oberfläche des Messmerkmals oder den das Messmerkmal umgebenden Bereich projiziert. Das Bild der Laserlinie wird ebenfalls

mit der CCD-Kamera aufgenommen. Über die Lage der Linie im Kamera-Bild wird mittels Triangulation der zugehörige Abstand des Messmerkmals vom Sensor bestimmt. Durch Auswertung des Verlaufs der Laserlinie lassen sich Messwerte für weitere Merkmale, wie Kanten, Bolzen und ähnliches, ermitteln. Entsprechende Sensoren werden festinstalliert in einer Messanlage oder auch robotergestützt beispielsweise zur Messung von Maßabweichungen bei Karosserieteilen oder auch zur Lagebestimmung von Bauteilen eingesetzt (z. B. Perceptron AutoGauge; PERCEPTRON 2003).

### Mechanische Taster

Mechanische Taster, vergleichbar mit den bei Koordinatenmessmaschinen eingesetzten Tastköpfen, können auch an Robotern eingesetzt werden. Der Messwert wird im Moment der Berührung einer Oberfläche durch die Tastspitze aus der aktuellen TCP-Position des Roboters ermittelt. Taster werden überwiegend zur Erkennung einer Endlage eingesetzt. Ähnlich wie in der Koordinatenmesstechnik lässt sich die Lage eines Merkmals nur durch Kombination mehrerer Einzelmessungen, gegebenenfalls mit mehreren Tastern gleichzeitig, bestimmen.

### Induktive Sensoren

Bei induktiven Sensoren wird die Änderung der Induktivität einer Spule bei Annäherung an eine Oberfläche als Signal genutzt. Hieraus kann der Abstand des Sensors von der Oberfläche berührungslos bestimmt werden. Induktive Sensoren werden, ähnlich wie mechanische Taster, überwiegend zum Erkennen einer Endlage bzw. Position eingesetzt.

### Prüfkopfmessverfahren

Prüfkopfmessverfahren basieren auf der gleichzeitigen, taktilen oder berührungslosen Vermessung der Lage eines Referenzwürfels mittels mehrerer Abstandssensoren. Durch die gleichzeitige Vermessung des Abstandes des Prüfkopfes von den drei Seiten eines im Raum vermessenen Würfels an je zwei Punkten kann eine 6D-Information über die Lage des TCP gewonnen werden. Entsprechende Anordnungen beschreiben LOMBARD UND PERROT (1983) sowie RICHTER (1997). Kommerziell erhältlich ist das auf Laserfernsehern basierende System REFCUBE 6D der Firma Krypton (KRYPTON 1998).

Neben diesen Messsystemen befinden sich zur Zeit Inertialmesssysteme auf der Basis von Trägheitsnavigationsmesssystemen in der Entwicklung, mit deren Hilfe es ermöglicht werden soll, Abweichungen von der Roboterbahn anhand der dynamischen Kräfte zu berechnen und z. B. zur Bahnkalibrierung einzusetzen (ALBAN UND JANOWSKI 2000).

### 2.4.2 Externe Messsysteme

Für eine Positionskorrektur oder -bestimmung im gesamten Arbeitsraum sind roboteradaptierte Sensoren meist ungeeignet, da der unmittelbare Bezug zu einem gemeinsamen Koordinatensystem für unterschiedliche Messmerkmale in der Regel nicht vorhanden ist. Hierfür müssen aufwendigere, externe Messmittel zum Einsatz kommen.

#### Theodoliten

Theodoliten im klassischen Sinne dienen zur Bestimmung von Positionen eines Objektes im Raum mittels Winkelmessung, ausgehend von mindestens zwei bekannten, das heißt vorab vermessenen, Positionen. In Verbindung mit einem lasergestützten Entfernungsmesssystem ist bereits eine einzige bekannte Position ausreichend.

Theodoliten werden in der Robotik neben der Vermessung von Roboterzellen auch zur Kalibrierung des Roboters selbst eingesetzt (DRIELS UND PATHRE 1994, MEYER 1994).

#### Lasertracker

Lasertracker (z. B. Leica LTD500) basieren ähnlich wie Theodoliten auf dem Prinzip der Winkelmessung, kombinieren dieses jedoch mit einem Entfernungsmesssystem auf der Basis eines Laserinterferometers. Der Laserstrahl verfolgt hierbei über motorisch angetriebene Spiegel automatisch einen speziellen, am zu vermessenden Objekt angebrachten Reflektor. Ausgewertet wird die Entfernung sowie die Stellung der Spiegel. Mit einem Lasertracker lässt sich die Lage des Reflektors je nach Abstand zum Messsystem auf wenige hundertstel Millimeter genau bestimmen (LEICA 1997). Entsprechende Systeme werden in der Robotik, neben den von Theodoliten bekannten Einsatzbereichen, auch zur Vermessung von Roboterbahnen eingesetzt. Der Genauigkeit von Lasertrackern steht der Nachteil der Notwendigkeit ununterbrochener Sicht zum Reflektor gegenüber, da nach Strahlunterbrechungen die automatisierte Herstellung des Sichtkontaktes zum Reflektor nur bedingt möglich ist.

#### Photogrammetrische Verfahren

Eine weitere verbreitete Methode zur messtechnischen Bestimmung der TCP-Position eines Roboters sind photogrammetrische Verfahren. Hierbei werden mehrere Messmerkmale, die in unmittelbarem, definiertem Zusammenhang mit dem TCP des Roboters stehen, von mindestens zwei Kameras aus gleichzeitig erfasst. Die Lage und Orientierung der Kameras zueinander muss hierbei bekannt sein. Durch gemeinsame Auswertung der beiden Kamerabilder erhält man anhand der Position eines Messmerkmals in den beiden Kamerabildern die Lage des Merkmals im Raum. Durch Auswertung mehrerer unterschiedlicher Messmerkmale können Lage und Orientierung des TCP bestimmt werden. Als Messmerkmale können beispielsweise Leuchtdioden dienen, die auf einer am Roboterflansch befestigten Kalibrierplatte angebracht sind

## **2.4 Messsysteme zur Bestimmung der Robotergenauigkeit**

---

(z. B. Reseau-Scanning-Kameras (SLV 1996) oder das auf der Kombination dreier CCD-Zeilenkameras basierende Rodym 6D-Messsystem: KRYPTON 2000).

### **μ-GPS**

Das zur Zeit noch in der Entwicklung befindliche Messsystem  $\mu$ -GPS der Fa. Zeiss bestimmt ähnlich einem GPS-System (**Global Positioning System**) die TCP-Position einer Werkzeugmaschine oder eines Roboters in 3D oder je nach Ausführung auch in 6D. Ermittelt wird hierbei die Entfernung von ein bis drei definierten Punkten am Roboterflansch zu drei exakt vermessenen, raumfesten Reflektoren mittels Laserinterferometrie. Bislang ist jedoch der nutzbare Arbeitsraum noch zu klein für den tatsächlichen Einsatz mit Industrierobotern, so dass diese Anwendung bislang lediglich in der Simulation existiert. Eingesetzt werden soll das ursprünglich für den Werkzeugmaschinensektor konzipierte System im Rahmen einer Roboterführung (WERNER 2002).

All diese Messsysteme sind prinzipiell geeignet, die TCP-Position eines Roboters vorrichtungs- und werkstückunabhängig mit hoher Genauigkeit zu bestimmen, haben jedoch den entscheidenden Nachteil, dass der Preis für die Sensorik den heutigen Einkaufspreis eines Industrieroboters mitunter um ein Vielfaches übersteigt, so dass ihr Einsatz bislang Spezialanwendungen vorbehalten bleibt oder nur der einmaligen Kalibrierung einer Roboterzelle dient.

### **2.4.3 Einsatzbereiche der vorgestellten Messsysteme**

Die Tabelle 2.3 gibt eine Übersicht über die bislang bekannten Einsatzbereiche der vorgestellten Messsysteme.

## 2 Stand der Technik

---

Messsystem	Absolutkali-brierung	Roboter-führung	Kompen-sation	Erfasste Freiheits-grade	Koordinaten-system
Theodolit	ja	nein	nein	3	Welt <sup>5</sup>
Lasertracker	ja	nein	nein	3	Welt <sup>5</sup>
Photogrammetrische Verfahren	ja	ja	nein <sup>1</sup>	3-6	Welt <sup>5</sup>
$\mu$ -GPS	nein	ja	nein	3-6	Welt <sup>5</sup>
Lasertriangulation/ 3D Positionsbestim-mung	nein	ja	ja <sup>2</sup>	3	Sensor / Roboter <sup>3</sup> , Welt <sup>4,5</sup> , Werkstück <sup>4</sup>
Lasertriangulation/ Roboterführung	nein	ja	nein	3	Sensor / Roboter <sup>3</sup>
Mechanische Taster	nein	ja	nein	1	Sensor / Roboter <sup>3</sup>
Induktive Sensoren	nein	ja	nein	1	Sensor / Roboter <sup>3</sup>
Prüfkopfmess-verfahren	ja	nein	nein	6	Sensor / Roboter <sup>3</sup>
Inertialmesssysteme	ja (Bahn)	nein	ja (Bahn)	3	Welt <sup>4,5</sup> , Roboter

1 Die Firma Amatec stellte ein entsprechendes Verfahren vor (VERL UND PIETERS 1999), das jedoch nicht weiter verfolgt wurde.  
 2 Das Messsystem kann in Verbindung mit in das Weltkoordinatensystem eingemessenen Referenzpunkten zur Kompensation verwendet werden.  
 3 Die Messdaten können anhand der Poseinformationen des Roboters unmittelbar in das Roboterkoordinatensystem transformiert werden.  
 4 Zur Auswertung der Messdaten im entsprechenden Koordinatensystem ist das Einmessen des Sensors oder des (Referenz-) Messmerkmals in das Zielkoordinatensystem mit Hilfe eines externen Messsystems erforderlich.  
 5 Welt: Das Weltkoordinatensystem entspricht einem übergeordneten Anlagenkoordinatensystem.

Tabelle 2.3: Bekannte Einsatzbereiche der vorgestellten Sensoren und Messsysteme

### 2.4.4 Zusammenfassung

Zur Genauigkeitssteigerung bei Industrierobotern werden je nach Anwendungsfall unterschiedliche Messsysteme herangezogen. Bei diesen muss zwischen einem Einsatz zur Kalibrierung, zur Roboterführung oder zu Kompensationszwecken unterschieden werden. Prinzipiell sind zwar sämtliche Messsysteme, die zur Kalibrierung eingesetzt werden können, auch zur Bestimmung der Ist-Position im Rahmen einer Kompensation geeignet, letztendlich ist dies jedoch eine Frage der Wirtschaftlichkeit. Weit verbreitet ist der Einsatz von sogenannten Roboterführungssystemen. Bei diesen wird die jeweils aktuelle Abweichung unmittelbar erfasst und über einen Regelkreis korrigiert. Erst wenn dies nicht möglich ist, weil beispielsweise Bezugsgrößen in unmittelbarer Nähe des zu erfassenden Merkmals fehlen, müssen Kalibrier- und Kompensationsmethoden angewandt werden. Gerade für den zuletzt genannten Bereich ist die Auswahl an geeigneten und insbesondere preisgünstigen Messsystemen

bislang noch gering. Kompensationsverfahren bieten sich somit für Anwendungen an, in denen einerseits bereits eine geeignete Sensorik vorhanden ist, andererseits die Möglichkeit einer Roboterführung nicht gegeben ist.

### 2.5 Maßnahmen zur Optimierung der Robotergenauigkeit

Entsprechend der Vielzahl vorhandener Einflussfaktoren existiert ein breites Spektrum an Verbesserungsmöglichkeiten. Ziel sämtlicher Optimierungsmaßnahmen ist es, eine größtmögliche Übereinstimmung zwischen Roboter und Steuerungsmodell zu erreichen. Die Umsetzung erfolgt je nach Betrachtungsobjekt in unterschiedlichen Phasen des Entwicklungsprozesses (Bild 2.10).

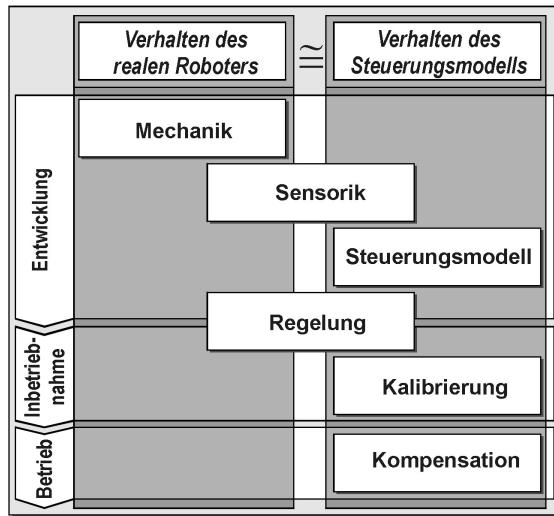


Bild 2.10: Mögliche Stellschrauben zur Genauigkeitssteigerung

Optimierungen an der Mechanik werden zum großen Teil bereits in den frühen Phasen des Entwicklungsprozesses umgesetzt. In erster Linie wird hier das Verhalten der Strukturkomponenten und der Antriebe betrachtet. An der Schnittstelle zwischen Mechanik und Regelung wird die Sensorik optimal auf die Genauigkeitsanforderungen abgestimmt. Auf der Steuerungsseite werden eine Reihe regelungstechnischer Maßnahmen getroffen:

- Regler werden optimal auf das Verhalten der Mechanik abgestimmt.

- Das Steuerungsmodell wird bereits in der Entwicklungsphase so erweitert, dass wichtige, bekannte Einflüsse berücksichtigt werden können.
- Die Parameter des Steuerungsmodells werden durch eine Kalibrierung bei der Erstinbetriebnahme mit der Realität abgeglichen.
- Betriebsabhängige Einflüsse werden mit Hilfe unterschiedlicher Kompressionsmaßnahmen im Betrieb minimiert.

### 2.5.1 Optimierung mechanischer Komponenten

Bei Industrierobotern ist das Spannungsfeld zwischen Kosten und Leistungsanforderungen sehr stark ausgeprägt. Einer der Hauptgründe hierfür ist, dass Standardindustrieroboter im Bereich der Fertigungstechnik zunehmend zu einem Massenartikel werden, der in den 90er Jahren einem enormen Preisverfall ausgesetzt war. Dementsprechend ist jede Veränderung an der Kinematik von Industrierobotern eine Gratwanderung zwischen Kostensenkung und Leistungssteigerung. Prinzipiell lässt sich das Ziel jeder in der Praxis tatsächlich umgesetzten Veränderung wie folgt beschreiben: Mit weniger, kostengünstiger herstellbaren und montierbaren sowie optimierten Bauteilen eine bessere Leistung erzielen. Dieses Ziel wird, vergleicht man die heutigen Produktpaletten führender Roboterhersteller mit Vorgängerversionen, durch folgende Methoden erreicht:

1. Die Anzahl der an einer Baugruppe beteiligten Komponenten wird dadurch gesenkt, dass mehr Funktionen in die einzelnen Teile integriert werden. Als Beispiel sei hier die Lagerung der zweiten Achse aufgeführt. Während die meisten älteren Industrieroboter den Oberarm des Roboters beidseitig lagern, wird dies mittlerweile überwiegend mit einer einseitigen Lagerung auf der Antriebsseite gelöst.
2. Die Anzahl der benötigten Baugruppen wird durch eine Vereinfachung des kinematischen Aufbaus gesenkt. Die Bestrebungen zielen darauf ab, die jeweiligen Antriebe möglichst direkt den einzelnen Achsen zuzuordnen. Hierdurch werden Kopplungen zwischen den Achsen, sei es über Zahnrad- oder Parallelogrammgetriebe, vermieden. Begrenzende Faktoren sind die Energiezuführung zu den Antrieben sowie der zur Verfügung stehende Bauraum. Insbesondere im Bereich des Handgelenks kann durch die Kopplung der fünften und sechsten Achse eine deutliche Verkleinerung erreicht werden.
3. Darüber hinaus wird durch den Verzicht auf Ausgleichsgewichte die bewegte Masse reduziert. Diese werden meist durch hydraulische oder pneumatische Druckzylinder, Federn oder lediglich durch entsprechend stärkere Antriebe ersetzt. Bei Robotern ohne entsprechende Ausgleichseinrichtungen ist gerade im Bereich

von Extremstellungen oft ein deutlicher Geschwindigkeitsabfall zu beobachten, da hier die Antriebe am stärksten belastet werden und mitunter an ihre Leistungsgrenzen geraten.

4. Die Einzelemente der Roboterstruktur werden hinsichtlich ihrer Steifigkeit durch den Einsatz von Simulationsmethoden optimiert. Mittels FEM-Simulation (Finite Elemente Methode) werden die Bauteile belastungsgerecht gestaltet und somit hinsichtlich ihrer Geometrie und ihres Gewichtes verbessert.
5. Neben rein konstruktiven Maßnahmen spielen die eingesetzten Fertigungsverfahren eine weitere wichtige Rolle bei der Optimierung der Mechanik des Roboters. Da diese im Laufe der Zeit kontinuierlich verbessert wurden, erhöhte sich dementsprechend auch die Genauigkeit der Einzelemente des Roboters.

Die jeweiligen Auswirkungen auf die Genauigkeit des Roboters hängen von Art und Umfang der umgesetzten Maßnahmen ab. Die Summe der Auswirkungen der mittlerweile in der Industrie umgesetzten Maßnahmen lässt sich wie folgt beschreiben: Die heutigen Industrieroboter haben eine niedrigere Anzahl an Bauelementen und Baugruppen als frühere Konstruktionen. Bei niedrigerem Eigengewicht können dank belastungsgerechterer Konstruktion höhere Nutzlasten realisiert werden. Durch die geringere bewegte Masse sind auch höhere Bahngeschwindigkeiten realisierbar.

Der mitunter ambivalente Einfluss dieser Veränderungen auf die Genauigkeit des Roboters lässt sich wie folgt beschreiben:

- Durch die geringere Anzahl von Bauelementen wurde eine Verkürzung der Toleranzketten erreicht, was in Verbindung mit höheren Fertigungs- und Montagegenauigkeiten zunächst zu einer höheren Absolutgenauigkeit führt.
- Durch die gewichtsreduzierte Konstruktion haben viele Industrieroboter an Biegesteifigkeit verloren. Dies führt, soweit dem Effekt nicht durch Optimierungsmethoden, wie beispielsweise belastungsgerechte Konstruktion mittels FEM-Analyse, entgegengewirkt wurde, zu einer stärkeren Durchbiegung unter Last (statische und dynamische Belastungen) und somit zu einer leichten Verringerung der absoluten Positioniergenauigkeit als auch der Bahngenaugkeit. Durch die stärkere Neigung von weniger steifen Konstruktionen zu Schwingungen steigt die Anfälligkeit gegen selbst- oder fremderregte Schwingungen. Dies führt zunächst zu einer Verringerung der Wiederholgenauigkeit.
- Durch die geringere Anzahl von an der Kinematik beteiligten Komponenten sind auch weniger Schnittstellen mit Spiel zwischen den einzelnen Verbindungs partnern involviert. Zusätzlich wurden die Lagerungen verbessert, so dass hier ebenfalls weniger Spiel auftritt. Dies führt insgesamt zu einer Verbesserung der Wiederholgenauigkeit.

In Summe existieren somit zum Teil scheinbar gegenläufige Einflüsse der einzelnen konstruktiven Änderungen auf die Robotergenauigkeit. Da es sich bei Industrierobotern jedoch um mechatronische Systeme handelt, haben die scheinbar negativen Einflüsse einiger konstruktiver Veränderungen nur dann eine tatsächliche Verschlechterung der Genauigkeit zur Folge, wenn ihre Auswirkungen nicht im Gegenzug im Steuerungsmodell berücksichtigt werden.

Neben den oben aufgeführten, in der Praxis tatsächlich umgesetzten Veränderungen existieren im Bereich der Forschung weitere Ansätze zur Steigerung der Genauigkeit. Die hier vorgeschlagenen Veränderungen führen letztendlich alle zu einer temperaturstabileren, „kompensationsgerechten“ Konstruktion der Kinematik. Hierbei werden vor allem folgende Ansätze verfolgt (RICHTER 1997):

- Verwendung von Materialien mit geringeren Temperaturausdehnungskoeffizienten:  
Vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt wurde beispielsweise ein entsprechender Roboter in Leichtbauweise aus CFK vorgestellt (DLR 2003).
- Aufbau der Roboterstruktur aus kastenartigen oder fachwerkähnlichen Bauelementen:  
Ziel hierbei ist es, das Verformungsverhalten der Roboterstruktur unter Last oder Temperatureinfluss zu vereinfachen und somit eine Kompensation der Effekte mit nur geringem Aufwand zu ermöglichen.
- Vermeidung von Wärmeentstehung und Wärmespeicherung durch
  - gezielte Temperierung der Roboterstruktur z. B. durch Gas- oder Flüssigkeitskreisläufe,
  - Vergrößerung der wärmeabgebenden Flächen beispielsweise durch Verripungen,
  - Vergrößerung der Wärmeübergangskoeffizienten sowie
  - Verringerung der Wärmekapazitäten.
- Vermeidung von Wärmetransport in verformungswirksame Elemente der kinematischen Kette durch
  - Anbringung der Antriebe außerhalb der Struktur und Entkopplung von der kinematischen Kette durch Trenn- bzw. Isolierschichten und
  - Schutz der kinematischen Kette vor dem Einfluss von Wärmestrahlung und äußeren Wärmequellen in der Umgebung des Roboters.
- Vermeidung instationärer Temperaturfelder in den Achsverbindungselementen durch
  - Vergrößerung der Wärmekapazitäten der Achsverbindungselemente und

- Isolation verformungswirksamer Elemente der kinematischen Kette (hierdurch soll ein Auskühlen im Aussetzbetrieb verhindert werden).
- Vermeidung thermischer Biegung durch
  - thermosymmetrische Konstruktion,
  - Einsatz von Materialien mit hoher Wärmeleitfähigkeit,
  - Anbringung von Querverrippungen sowie
  - Vergrößerung der Wärmeübergangsquerschnitte.

Diese Ansätze fanden bislang noch kaum Anwendung im Bereich der Standard-industrieroboter, da sie zum Teil mit Zielkonflikten verbunden sind und oftmals zu einer enormen Verteuerung der Roboterstruktur führen würden.

### 2.5.2 Optimierung der Antriebe

Hinsichtlich der Optimierung der Antriebe gelten bezüglich des Kostendrucks die gleichen Randbedingungen wie im Bereich der Mechanik. Dementsprechend wird auch hier versucht, bei allen Verbesserungsmaßnahmen gleichzeitig eine Kosten-senkung zu erzielen. Die Maßnahmen, die im Einzelnen getroffen werden, sind von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich. Prinzipiell lassen sich jedoch folgende Trends erkennen:

- Verkleinerung des benötigten Bauraumes:  
Durch Gewichtsreduzierungen bei der Roboterkinematik sowie den Ersatz von Ausgleichsgewichten durch hydraulische und pneumatische Druckzylinder oder auch Zugfedern kann die Größe der einzelnen Antriebe reduziert werden.
- Entkopplung der einzelnen Achsen:  
Durch die Verwendung kleinerer Antriebe ist es insbesondere im Bereich der Handgelenksachsen möglich, diese unmittelbar an der jeweiligen Achse anzubringen. Hierdurch entfällt die Notwendigkeit, Bewegungen über mehrere Gelenke hinweg zu übertragen und es kann auf eine Kopplung der Achsen untereinander verzichtet werden. Dies führt darüber hinaus insgesamt zu weiteren Gewichtseinsparungen.
- Modularisierung:  
Durch die Entkopplung der einzelnen Achsen vereinfacht sich die Modularisierung der Achselemente, da nachfolgende Achsen somit von Art und Aufbau vorhergehender Achsen unabhängig sind.
- Vermeidung translatorischer Achsen und Antriebe:  
Aus Kostengründen wird auf translatorische Achsen soweit wie möglich verzichtet.

Rotatorische Achsen sind konstruktiv einfacher zu realisieren und benötigen weniger Bauraum.

- Präzisere Getriebe:  
Speziell beim Bau von Präzisionsrobotern wird durch den Einbau hochpräziser Getriebe mit selektierten Passungen eine hohe Übertragungsgenauigkeit erreicht. (z. B. Stäubli-Cyclo-Getriebe, Harmonic Drive Getriebe)
- Erhöhung des Wirkungsgrades der Antriebe:  
Hierdurch sinkt als Nebeneffekt auch die thermische Belastung der Struktur durch die Antriebe.
- Thermische Entkopplung der Antriebe von der Roboterstruktur:  
Durch eine Anbringung der elektrischen Antriebe an der Außenseite der Roboterstruktur ist es möglich, den Wärmeübergang vom Motor auf diese zu erschweren. Dies setzt jedoch voraus, dass die Oberfläche der Antriebe für einen Wärmeaustausch mit der Umgebung ausreicht. Von einer zusätzlichen Kühlung beispielsweise durch angeflanschte Lüfter wird im Allgemeinen abgesehen.

Der Einfluss auf die Genauigkeit ergibt sich hierbei in erster Linie durch die Verkürzung der Toleranzketten vom Motor zur angetriebenen kinematischen Kette und die somit ebenfalls verbesserte Antriebssteifigkeit aufgrund des kürzeren Übertragungsweges des Kraftflusses vom Motor zur Achse.

Alternative Antriebskonzepte, beispielsweise in Form direkt angetriebener Achsen, sind derzeit bei Industrierobotern noch nicht im Einsatz, werden jedoch im Rahmen von Forschungsprojekten untersucht. Als Beispiel sei hier der sphärische Antrieb der RWTH Aachen (KAHLEN 2001) angeführt, der mit nur einem Antrieb eine Bewegung in drei Freiheitsgraden ermöglicht.

### 2.5.3 Optimierung der Sensorik

Gerade auf der mechanischen und sensorischen Seite sind viele Verbesserungsmöglichkeiten, die bei Werkzeugmaschinen üblich sind, bei Industrierobotern zwar technisch möglich, aus Kostengründen jedoch bislang nicht realisiert worden. Angeführt sei hier nur das Beispiel der Anordnung der Drehgeber. Während bei der Werkzeugmaschine die äquivalente Sensorik (z. B. ein Glasmaßstab) unmittelbar an den tatsächlichen Achsen angebracht ist (direkte Messung), sind die Drehgeber beim Roboter, abgesehen von wenigen Ausnahmen, unmittelbar an den Motoren angeflanscht (indirekte Messung). Abweichungen aus den Getrieben, die bei Werkzeugmaschinen von der Sensorik erfasst werden und damit praktisch keinen Einfluss mehr haben, wirken sich beim Roboter direkt auf das Positionierergebnis aus und werden je nach kinematischem Aufbau zum Teil noch verstärkt. Die Drehgeber beim Roboter

ebenfalls direkt an den Achsen oder am Getriebeausgang anzubringen, würde die Positioniergenauigkeit erheblich verbessern. Dies ist jedoch vor allem bei Standardrobotern unwirtschaftlich, da hierfür Sensoren mit einer erheblich höheren Auflösung benötigt würden und die Kosten für diese exponentiell mit der Auflösung steigen.

Dementsprechend werden bei den meisten Industrierobotern die Drehgeber nach wie vor unmittelbar an den Motoren angeflanscht. Lediglich bei Präzisionsrobotern wurde mitunter dazu übergegangen, mehrere Drehgeber auf unterschiedlichen Getriebestufen oder zusätzliche Drehgeber unmittelbar am Getriebeausgang zu platzieren (GÖLLNITZ 2002). Hierdurch ist es möglich, einerseits Getriebeeinflüsse messtechnisch auszugleichen, andererseits durch Vergleich der einzelnen Drehgeberwerte höheren Sicherheitsanforderungen, wie sie beispielsweise im Bereich der Medizintechnik gestellt werden, gerecht zu werden.

Die Genauigkeit der Sensorik ist somit weiterhin direkt von der Getriebeübersetzung, der Getriebestufigkeit sowie der Präzision des verwendeten Getriebes (Getriebispiel, Stick-Slip-Effekte bei der Positionierung) abhängig.

Bei genauigkeitskritischen Anwendungen ist nach wie vor der Einsatz externer Sensorik oder von in den Greifer integrierten Vorrichtungen zum Toleranzausgleich unabdingbar (ZELLER 1995, MILBERG ET AL. 1997, KUGELMANN 1993).

### 2.5.4 Optimierung der Steuerungs- und Regelungstechnik

Die größten Fortschritte hinsichtlich einer Optimierung der Robotergenauigkeit wurden seit Anfang der achtziger Jahre im Bereich der Steuerungs- und Regelungstechnik erreicht.

Viele der heute in Robotersteuerungen üblicherweise vorhandenen Funktionen sind erst durch die rasante Entwicklung der Mikroelektronik möglich geworden. Hierzu gehört insbesondere auch die immer schnellere Verarbeitung immer aufwendigerer Modelle.

Die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit ermöglicht zunächst eine Erhöhung der Interpolationstaktrate. Heutige Industrieroboter arbeiten mit Interpolationstakten von weniger als 10 ms (WECK 1999). Hierdurch ist die Generierung einer hohen Anzahl von Zwischenpunkten möglich, was zu einer Verringerung des Schleppfehlers und damit wiederum zu einer Erhöhung der Bahngenaugkeit führt. Darüber hinaus konnte durch die Erhöhung der Rechengeschwindigkeit die Achssynchronisation verbessert werden. Im Bereich der Präzisionsroboter werden mitunter sogar 2 ms Interpolationstaktzeit erreicht (GÖLLNITZ 2002).

Zur Bahnplanung wird zwar immer noch ein Robotermodell auf der Basis des nominalen Modells verwendet, jedoch wird dieses mittlerweile bei einigen Herstellern neben der Berücksichtigung von Drehgeber-Offsets um Maßabweichungen der einzelnen Achselemente in Form von Kalibrierdaten (z. B. bei den Herstellern ABB, Kuka und Stäubli) erweitert. Dies führt sowohl zu einer Erhöhung der Bahngenaugkeit als auch der Absolutgenauigkeit, da hierdurch die Übereinstimmung des Verhaltens des Robotermodells mit dem Verhalten des realen Roboters verbessert wird.

Neben dem zur Bahnplanung eingesetzten nominalen Modell wird mittlerweile vielfach ein zusätzliches, dynamisches Modell eingesetzt, das Achs- und Gelenksteifigkeiten sowie Massen und Trägheitsmomente berücksichtigt. Die mit diesem Modell separat berechneten Werte werden zur Bahnkorrektur unter Last und Geschwindigkeitseinfluss verwendet (ABB 2000) und führen somit zu einer weiteren Verbesserung der Bahngenaugigkeit. Bei vielen älteren Robotertypen war die Berücksichtigung dieser Einflüsse nicht notwendig, da diese vielfach zu langsam waren, um nennenswerte Abweichungen aufgrund dynamischer Kräfte zu erfahren (PFEIFFER UND REITHMEIER 1987).

Darüber hinaus werden derzeit Verfahren entwickelt, die eine Kompensation externer Prozesskräfte, wie sie beispielsweise bei Montagevorgängen auf den Roboter einwirken, mittels lernender, vorausschauender Regelalgorithmen ermöglichen (DAUSTER 2001). Voraussetzung hierfür ist jedoch immer, dass die zu erwartende Abweichung zum Ausführungszeitpunkt immer bekannt oder berechenbar ist, da andernfalls für die Regelung notwendige Eingangsdaten fehlen.

### 2.5.5 Zusammenfassung

Industrieroboter befinden sich als eine Automatisierungskomponente, die an der Schwelle zum Massenprodukt steht, zunehmend im Spannungsfeld zwischen betriebswirtschaftlichen und Leistungsanforderungen. Dementsprechend wurde in den letzten Jahren versucht, Leistungssteigerungen möglichst nur in Verbindung mit Kostensenkungen zu realisieren. Insbesondere im Bereich der Mechanik und der Antriebe konnte erreicht werden, dass durch weniger, besser aufeinander abgestimmte Komponenten die Wiederholgenauigkeit deutlich verbessert wurde. Sämtliche mit Zusatzkosten verbundenen Ansätze blieben somit Spezialanwendungen vorbehalten oder haben das Forschungsstadium nicht überschritten.

Ebenso hat sich hinsichtlich des Sensorkeinsatzes, abgesehen von partiell verbesserten Komponenten, wenig verändert. Bei genauigkeitskritischen Anwendungen ist nach wie vor der Einsatz externer Sensorik oder von in den Greifer integrierten Vorrichtungen zum Toleranzausgleich unabdingbar.

Die größten Fortschritte hinsichtlich einer Genauigkeitssteigerung sind im Bereich der Steuerungstechnik zu verzeichnen. Durch verbesserte Rechenleistung können aufwendigere Modelle mit höheren Interpolationstakten verarbeitet werden. Weitere Verbesserungen sind durch den Einsatz von Kalibriermethoden zur Parameteridentifikation der verwendeten Modelle erzielt worden.

### **2.6 Verfahren zur Roboterkalibrierung**

Um die Umsetzbarkeit komplexer Roboteranwendungen bereits im Vorfeld, das heißt bereits in der Anlagenplanungsphase, überprüfen zu können, werden zunehmend Simulationsverfahren eingesetzt. Diese erlauben darüber hinaus von vornherein eine Optimierung der geplanten Abläufe. Entsprechende Simulationsverfahren sind meistens an Offline-Programmiersysteme gekoppelt, die eine Verfahrprogrammerstellung unmittelbar auf der Basis der Simulationsdaten erlauben (KUGELMANN 1999).

Bislang gehen derartige Simulationen immer von der idealen Gestalt des Roboters aus (HEINEMEIER 1993) und stellen die Abläufe daher anhand des nominalen Robotermodells dar. Da der reale Roboter und somit auch sein Verhalten Abweichungen gegenüber diesem Modell und somit gegenüber der gesamten Simulation aufweist, treten bei der Übertragung von offline generierten Programmen auf den realen Roboter Positionierfehler auf, die dann entweder manuell nachgeteacht oder durch messtechnische oder mechanische Maßnahmen zum Toleranzausgleich kompensiert werden müssen. Dieser Arbeitsschritt soll durch den Einsatz von Kalibrierverfahren vermieden werden (vgl. BERNHARDT 1995).

Kalibrierverfahren übernehmen in diesem Zusammenhang zwei Aufgaben (ROOS 1998):

- Sie adaptieren entweder das Steuerungsmodell so, dass es den realen Roboter möglichst gut beschreibt, oder sie verändern das Roboterprogramm mit Hilfe eines extern berechneten Modells derart, dass die Fehler aufgrund der Abweichungen zwischen realem Roboter und Simulationsmodell deutlich reduziert werden. Hierdurch wird der Nachteach-Aufwand bei der Erstinbetriebnahme einer Anlage deutlich reduziert und somit Kosten und Zeit gespart.
- Sie vereinfachen den Austausch eines Roboters im Störungsfall, wodurch Stillstandszeiten deutlich reduziert werden, da der Robotertausch im Idealfall ohne Nachteachen der Programme vorgenommen werden kann.

Neben den Standardanwendungen, bei denen es in erster Linie darum geht, durch eine Reduzierung des Nachteach-Aufwandes Kosten zu sparen, existieren immer mehr Anwendungen, deren Umsetzung durch genauigkeitssteigernde Kalibriermaßnahmen

erst möglich wird. Hierzu gehören beispielsweise Anwendungen in der Medizintechnik oder hochflexible Handlingaufgaben, die darauf aufbauen, dass die endgültigen Roboterposen und -bahnen erst unmittelbar vor der Ausführung individuell in einer Simulation geplant werden (GÖTTE 2002). Der Roboter erhält dadurch die Fähigkeit, auf Änderungen in seinem Umfeld oder der Bearbeitungsaufgabe individuell zu reagieren.

Im Bereich der Roboterkalibrierung kann im Wesentlichen zwischen drei Verfahren unterschieden werden:

- Datengestützte Kalibrierung durch Sammlung von Korrekturdaten und Interpolation zwischen abgespeicherten Korrekturwerten,
- Abgleich von Koordinatensystemen mittels Koordinaten-Best-Fit für kleine Arbeitsraumbereiche mit überwiegend ähnlichen Posen sowie die
- Modellbasierte Kalibrierung des Steuerungsmodells anhand gemessener oder berechneter Parameterabweichungen.

Da der Roboter nur ein Bestandteil einer Roboterzelle ist, existieren darüber hinaus Verfahren, die Kombinationen der oben genannten Verfahren für eine Zellenkalibrierung nutzen (z. B. ROOS 1998).

### 2.6.1 Datengestützte Kalibrierung auf der Basis von Korrekturwerten

Dieses eigentlich überwiegend bei Werkzeugmaschinen eingesetzte Verfahren basiert zunächst darauf, dass es prinzipiell möglich ist, Positionierfehler an Punkten zwischen zwei Positionen mit jeweils bekannten Abweichungen zu interpolieren. Hierzu werden die Positions- und gegebenenfalls Orientierungsabweichungen an definierten Punkten vermessen und in Form von Tabellenwerten einmalig in der Steuerung hinterlegt. Soll die Kinematik im Betrieb eine bestimmte Position anfahren, so werden zunächst diejenigen bekannten Stellungen gesucht, die der anzufahrenden Position am nächsten liegen. Anschließend wird der Korrekturwert für die Zwischenposition dadurch ermittelt, dass zwischen den bekannten Abweichungen an den beiden ähnlichen Positionen interpoliert wird (SHAMMA UND WHITNEY 1987).

Hierzu muss jedoch die Voraussetzung erfüllt sein, dass Betrag und Richtung der Korrektur sich tatsächlich auf die anzufahrende Position übertragen lassen. Bei Werkzeugmaschinen mit in der Regel genau definierten, am kartesischen Koordinatensystem ausgerichteten Achsrichtungen, ist dies meist ohne weiteres möglich, da sich die Achsorientierung der Hauptachsen nicht ändern kann.

Bei Industrierobotern mit Knickarm-Kinematiken gestaltet sich dies deutlich schwieriger, da Bewegungen hier nicht im kartesischen Arbeitsraum, sondern im

(meist) sechsdimensionalen Achsarbeitsraum ausgeführt werden. Hier kann bereits die Umorientierung einer einzelnen Achse zu einem vollkommen veränderten Verhalten führen.

Für kleine, eingeschränkte Arbeitsräume oder wenige, vorgegebene Bahnen (z. B. DAUSTER 2001) kann die datengestützte Kalibrierung ein geeigneter Ansatz sein, soll jedoch der gesamte Arbeitsraum eines Roboters berücksichtigt werden, ist bereits die Erstellung der Datenbasis unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ausgeschlossen. Dies sei anhand des folgenden Beispiels verdeutlicht:

Bei einer kartesischen Kinematik mit drei Achsen kann die Datenbasis im günstigsten Fall auf drei ein- bis sechsdimensionale Korrekturtabellen reduziert werden. Voraussetzung hierfür ist, dass das Verhalten der einzelnen Achsen nicht nennenswert von der Stellung der Einzelachsen zueinander abhängt. Sollen für jede Achse Korrekturwerte in x-, y- und z-Richtung für nur 10 Einzelpositionen ermittelt werden, so sind hierzu je Achse 10 dreidimensionale Messungen notwendig. Bei einer angenommenen Messdauer von nur 2 s je Position ist eine Vermessung der Kinematik in 60 Sekunden möglich. Ist das Verhalten der Einzelachsen, ähnlich wie bei einem Knickarmroboter, von der Stellung der Einzelachsen zueinander abhängig, so muss jede mögliche Kombination der Achspositionen vermessen werden. In diesem Fall wären  $10^3 = 1000$  Messungen notwendig. Die Vermessung würde somit etwa 34 Minuten dauern. Bei einer Sechsachskinematik wären bereits  $10^6 = 1$  Million Messungen erforderlich. Dies entspricht einer Messdauer von ungefähr 556 Stunden. Abgesehen von der hierbei generierten und zu verarbeitenden Datenmenge, wäre dies allein schon unter wirtschaftlichen Gesichtspunkten ein sinnloses Unterfangen.

Der größte Vorteil des Verfahrens liegt im extrem begrenzten mathematischen Aufwand und somit, ausreichend schneller Datenzugriff vorausgesetzt, niedrigen Rechenzeiten. Auf größere Arbeitsraumbereiche ist das Verfahren jedoch bei Robotern kaum anwendbar.

### 2.6.2 Kalibrierung mittels Abgleich von Koordinatensystemen

Bei einer Kalibrierung mittels Abgleich von Koordinatensystemen wird durch Einmessen mehrerer bekannter Punkte des Werkstückkoordinatensystems in das Roboterkoordinatensystem und anschließender Näherungsrechnung die zugehörige Transformation ermittelt. Eine exakte Lösung ist aufgrund der in der Regel zwar kleinen, jedoch nicht vollständig auszuschließenden Messabweichungen nicht möglich.

Zum Einsatz kommt dieses Verfahren, wenn offline generierte Programme auf eine reale Zelle übertragen werden sollen oder wenn sich die Lage des Werkstückkoordinatensystems im Raum ändern kann. Die Einflüsse unterschiedlicher Achs-

konfigurationen des Roboters auf die Genauigkeit bleiben hierbei unberücksichtigt. Eine tatsächliche Verbesserung der Positioniergenauigkeit des Roboters wird somit nur dann erreicht, wenn alle vom Roboter angefahrenen Positionen sowohl bei der Vermessung als auch im späteren Betrieb möglichst ähnlich zueinander sind. Ist dies nicht der Fall, unterliegt die Positioniergenauigkeit innerhalb des eingemessenen Werkstückkoordinatensystems nach wie vor der Absolutgenauigkeit des Roboters. Tatsächliche Verbesserungen lassen sich mit diesem Verfahren somit nur für sehr begrenzte Arbeitsraumbereiche und bei Verwendung insgesamt zueinander ähnlicher Posen erreichen.

Eine Unterform dieses Verfahrens ist die Aufnahme des Nullpunktes eines vorgegebenen Koordinatensystems an einer eingemessenen Position im Arbeitsraum des Roboters. Hierbei wird lediglich der Versatz zwischen Roboter- und Werkstückkoordinatensystem ermittelt. Eventuelle Orientierungsfehler bleiben unberücksichtigt.

### 2.6.3 Modellbasierte Kalibrierung

Die effektivste, bekannte Methode, um die Absolutgenauigkeit eines Industrieroboters im gesamten Arbeitsraum zu verbessern, ist die modellbasierte Kalibrierung (Bild 2.11). Bei dieser wird ein Robotermodell verwendet, das in der Lage ist, das Verhalten des realen Roboters sehr genau im gesamten Arbeitsraum nachzuvollziehen. Hierzu wird zunächst ein Modell des Roboters auf der Basis des nominalen Robotermodells erzeugt, das dann schrittweise um weitere Einflussparameter auf die Positioniergenauigkeit, wie Achsabstände und -schiefstände, Kopplungen von Antrieben, Elastizitäten und Schwerpunktlagen, erweitert wird. Als Basis für die Modellierung dienen Modelle nach DENAVIT UND HARTENBERG (1955), HAYATI UND MIRMIRANI 1985 sowie Mischformen und Modifikationen beider Modelltypen, wie sie beispielsweise von VEITSCHEGGER UND CHI-HAUR (1986) beschrieben wurden. Entsprechende Kalibrierverfahren berücksichtigen zwischen 30 und 80 Einzelparameter bei einer Standard-Sechsachs-Kinematik (SCHRÖER 1993, ROOS 1998, WIEST 2001).

Nach der Modellierung erfolgt ein Abgleich des Modells mit dem realen Roboter. Hierzu werden die Positionierabweichungen des Roboters gegenüber dem nominalen Modell an über den gesamten Arbeitsraum des Roboters verteilten Positionen gemessen. Zur Ermittlung eines Modells mit etwa 60 bis 80 Parametern sind hierzu etwa 100 in 3D vermessene Punkte notwendig (SCHRÖER 1993). Anschließend werden mit Hilfe eines Näherungsverfahrens die Parameter des Robotermodells so angepasst, dass sich die gemessenen Abweichungen mit dem kalibrierten Modell innerhalb vorgegebener Schranken berechnen lassen (Parameteridentifikation). Man erhält somit ein Modell, das das Verhalten des realen Roboters in seinem Arbeitsraum besser beschreibt, als das im Allgemeinen zur Steuerung verwendete nominale Modell.

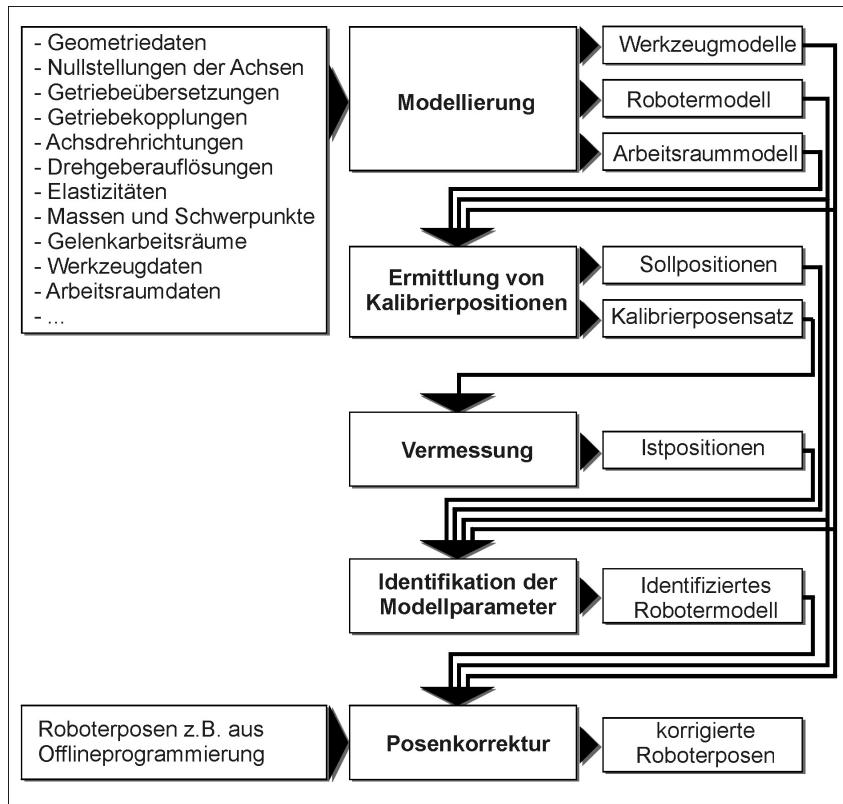


Bild 2.11: Ablauf der modellbasierten Kalibrierung

Die ermittelten, d. h. identifizierten Modellparameter können nun entweder unmittelbar in der Steuerung hinterlegt werden, wodurch eine Steigerung der Absolut- und der Bahngenaugigkeit erzielt wird, oder zur Offline-Posenkorrektur verwendet werden. Hierbei werden sämtliche Roboterposen mit Hilfe einer Kalibriersoftware einmalig so korrigiert, dass der Roboter die gewünschte Position im Arbeitsraum erreicht.

Roboter, bei denen die ermittelten Parameter unmittelbar in das Steuerungsmodell übertragen wurden, werden als absolutgenaue Roboter bezeichnet (z. B. bei den Herstellern ABB und Kuka). Mit ihnen lassen sich Absolutgenauigkeiten von etwa 0,5 mm, im Fall von Präzisionsrobotern (z. B. Stäubli) von bis zu 0,25 mm erreichen. Unkalibrierte Roboter weisen im Gegensatz hierzu Absolutgenauigkeiten auf, die im Bereich von mehreren Millimetern liegen können.

### 2.6.3.1 Mathematische Grundlagen der Modellierung und Parameteridentifikation

SCHRÖER (1993) beschreibt das Übertragungsverhalten eines Roboters durch drei Modelle, das Antriebsmodell, das kinematische Modell und das Elastizitätsmodell. Die nachfolgenden Abschnitte geben einen Überblick über die mathematische Beschreibung der drei angeführten Modelle nach SCHRÖER (1993) sowie die zugehörige Parameteridentifikation.

#### Antriebsmodell

Das Übertragungsverhalten  $G$  eines einzelnen Antriebs kann vereinfachend wie folgt beschrieben werden:

$$G(h) = q = C h + \Delta q$$

*Formel 1: Übertragungsverhalten eines Antriebs*

mit

$q$ : Gelenkstellung (rotatorische oder translatorische Verschiebung)

$h$ : Positionsgeberwerte (Drehgeber, Glasmaßstab, etc.)

$C$ : Kopplungsmatrix (Übersetzungs- und Kopplungsfaktoren)

$\Delta q$ : Übertragungsabweichung

Da die Gelenkstellung jedoch nicht nur Übersetzungs- und Kopplungsfaktoren unterliegt, sondern auch durch andere Größen, wie beispielsweise Spiel und Getriebekoeffizienten, beeinflusst wird, müssen diese ebenfalls bei der Modellierung berücksichtigt werden.

Das Getriebespiel wirkt sich hierbei als Offset der Gelenkposition gegenüber dem spielfreien Zustand aus:

$$\Delta q_s = b \cdot \text{sign}(\Gamma)$$

*Formel 2: Modellierung des Getriebespieldes*

mit:

$\Gamma$ : Gelenkbelastung

$b$ : Getriebespiel

Die Gelenkelastizität wird linear-elastisch modelliert:

$$\Delta q_E = e \cdot \Gamma$$

*Formel 3: Modellierung der Gelenkelastizität*

mit:

e: Elastizitätskoeffizient

Außer durch Spiel und Elastizität wird das Übertragungsverhalten auch noch durch Fertigungstoleranzen der Zahnräder beeinflusst. Diese können sich in Form von Schwankungen im Übersetzungsverhältnis auswirken. Zu deren Berücksichtigung wird eine Fourier-Approximation eingeführt, die periodische Positionierabweichungen des Antriebsrades abbilden kann:

$$\Delta q_F = f_0 + f_1 \cos(q) + f_2 \sin(q)$$

*Formel 4: Fourier-Approximation*

mit:

f: Fourierkoeffizienten

Das Gesamtübertragungsverhalten eines Gelenks ergibt sich aus der Summe der Einzeleinflüsse:

$$q = Ch + \Delta q_S + \Delta q_E + \Delta q_F$$

*Formel 5: Gesamtübertragungsverhalten eines Gelenks*

### Kinematisches Modell

Das kinematische Modell beschreibt das Übertragungsverhalten der kinematischen Kette aufgrund ihrer geometrischen Eigenschaften auf der Basis von Elementartransformationen.

Die Menge der Elementartransformationen **P** ist hierbei definiert als die Menge der Rotationen R um die und Translationen T entlang der Koordinatenachsen (SCHRÖER 1993):

$$P = \{T_x, T_y, T_z, R_x, R_y, R_z\}$$

*Formel 6: Menge der Elementartransformationen*

Da bei Robotern durch die Gestaltung der Gelenke bestimmte Freiheitsgrade festgelegt sind, werden zur Beschreibung der Transformation einer Roboterachse oder auch der

gesamten kinematischen Kette nicht alle Elementartransformationen benötigt. Entsprechende Vereinfachungen wurden von DENAVIT UND HARTENBERG (1955) und HAYATI UND MIRMIRANI (1985) beschrieben. Daneben existieren noch mehrere Mischformen und Weiterentwicklungen (z. B. PAUL 1981, CRAIG 1986, VEITSCHEGGER UND WU 1985).

Entsprechend der Konvention von DENAVIT UND HARTENBERG (1955) (DH-Konvention) ergibt sich:

$$T = R_z(\theta)T_z(d)T_x(a)R_x(\alpha)$$

*Formel 7: Denavit-Hartenberg-Konvention*

mit den Denavit-Hartenberg-Parametern (DH-Parameter)  $\theta$ ,  $d$ ,  $a$  und  $\alpha$ .

Da eine Transformation um parallele Achsen hierdurch nicht beschrieben werden kann, sei hier noch die Hayati-Konvention (HAYATI UND MIRMIRANI 1985) angeführt, die diesen Sonderfall beschreibt:

$$T = R_z(\theta)T_x(a)R_x(\alpha)R_y(\beta)$$

*Formel 8: Hayati-Konvention*

mit den Parametern  $\theta$ ,  $a$ ,  $\alpha$  und  $\beta$ .

Welche Konvention bzw. Kombination von Elementartransformationen ausgewählt wird, hängt dann von der Orientierung der z-Achse des Ausgangskoordinatensystems relativ zur Orientierung der z-Achse des Zielkoordinatensystems ab.

### Elastizitätsmodell

Beim Elastizitätsmodell wird, ebenso wie bei den anderen Modellen auch, mit möglichst wenigen Einzelparametern versucht, alle relevanten elastischen Deformationen zu beschreiben. Zur Darstellung der elastischen Eigenschaften der Kinematik werden daher lediglich drei Grundelemente betrachtet:

- Starre Elemente (z. B. Ausgleichsgewichte ohne elastische Deformation),
- Balkenelemente (z. B. Armelement) und
- Plattenelemente (z. B. Befestigung der Roboterbasis am Fundament).

Um Informationen über das Biegeverhalten des Roboters zu bekommen, werden Daten über die Einzelmassen der Roboterkomponenten sowie über von außen wirkende Kräfte, wie beispielsweise die Schwerkraft, benötigt.

Der Einfluss der auf die Elemente wirkenden Kräfte und Momente ist abhängig von der jeweiligen Roboterstellung. Deshalb werden die Einzelemente der Kinematik an

den Gelenken freigeschnitten und beginnend mit dem äußersten Glied der kinematischen Kette die Reaktionskräfte und Momente in den einzelnen Schnitten in Abhängigkeit von der Stellung der Gelenke berechnet.

Diese werden in einem Vektor (Tensor) zusammengefasst:

$$\Gamma = (F_0, M_0, \dots, F_n, M_n)^T$$

*Formel 9: Tensor der Reaktionskräfte und Momente in den Robotergelenken*

mit:

$F$ : Reaktionskraft

$M$ : Reaktionsmoment

Um ein optimiertes, vom Kinematikmodell unabhängiges Elastizitätsmodell zu erhalten, wird dieses als eigenständiges Modell aus Elementar- und Elastizitätstransformationen aufgebaut.

Für jeden Teilkörper  $i$  einer Kinematik existiert damit eine Transformation  $L_i$  mit:

$$L_i \in \{R_x, R_y, R_z, T_x, T_y, T_z, E\}$$

*Formel 10: Transformation eines Teilkörpers ( $I$ )*

mit:

$E$ : Elastizitätstransformation

Eine Rotation  $R$  kann hierbei, sofern eine Gelenkelastizität zu berücksichtigen ist, eine Funktion der Gelenkstellung  $q$  und des Belastungsvektors  $\Gamma$  sein:

$$R = R(q, \Gamma)$$

*Formel 11: Rotation*

Die Elastizitätstransformation  $E$  ist immer eine Funktion von  $\Gamma$ :

$$E = E(\Gamma)$$

*Formel 12: Elastizitätstransformationen*

In Abhängigkeit vom jeweils betrachteten Einzelement (Balken oder Platte) kann die Elastizitätstransformation weiter in Elementartransformationen zerlegt werden, deren Einzelanteile (z. B. Verschiebungsanteile aufgrund von Durchbiegungen oder

## 2 Stand der Technik

---

Rotationsanteile um Torsionswinkel) anhand des Belastungsvektors  $\Gamma$ , der Kinematikparameter  $p$  und der jeweiligen Elastizitäten berechnet werden können.

Für eine Transformation  $L_i$  erhält man beispielsweise für den i-ten Teilkörper einen Term folgender Art:

$$L_i = R_z(q_i, \Gamma) \cdot T_x \cdot R_x \cdot R_y \cdot T_z \cdot E_i(\Gamma)$$

*Formel 13: Transformation eines Teilkörpers (II)*

Die Modellfunktion  $T$  in Form einer Transformation von der Roboterbasis zum Flansch kann dann als Produkt der Transformationen aller Teilkörper betrachtet werden:

$$T(p, h, \Gamma) = \prod_{i=1}^k L_i$$

*Formel 14: Modellfunktion*

mit:

$p$ : Kinematikparameter

$h$ : Positionsgeberwerte

### Parameteridentifikation

Zur eigentlichen Parameteridentifikation kommen numerische Verfahren zum Einsatz. Als Eingangsdaten für die Parameteridentifikation dienen der Modellparametersatz  $p$ , eine vorgegebene Anzahl  $k$  Roboterstellungen, gegeben durch die jeweiligen Positionsgeberwerte  $h$ , die (nicht lineare) Modellfunktion  $T(p, h)$  sowie die für die jeweils gegebene Roboterstellung gemessene TCP-Position  $M(h)$ .

Gesucht wird dann eine Lösung  $p^*$  des nicht linearen Gleichungssystems

$$\bar{T}(p^*, \bar{h}) = \bar{M}(\bar{h})$$

*Formel 15: Gleichungssystem zur Parameteridentifikation*

Da es, beispielsweise aufgrund von Messstreuungen an den TCP-Positionen, keine exakte Lösung geben kann, handelt es sich bei der Parameteridentifikation um eine Optimierungsaufgabe mit dem Ziel, einen Parametersatz  $p^*$  zu finden, so dass das Modell möglichst gut mit den gemessenen Werten übereinstimmt. Zur Lösung des Problems wird das Minimum der Summe der Quadrate der Differenzen zwischen den gemessenen Positionen  $M(h_i)$  und den mit Hilfe der Modellfunktion für alle  $k$  Roboterstellungen berechneten Positionen  $T(p, h_i)$  gesucht:

$$F(x) = \|x\|^2 = \sum_i x_i^2 \quad \text{mit: } x = \bar{M}(\bar{h}) - \bar{T}(p, \bar{h})$$

$$\|\bar{M}(\bar{h}) - \bar{T}(p^*, \bar{h})\|^2 = \min(F(x))$$

*Formel 16: Ziel der Parameteridentifikation*

Bedingung dafür, dass  $F(x)$  minimal wird, ist, dass der Gradient  $G(p^*)$  des Zielfunktionalen  $F(x)$  gleich Null wird:

$$G(p^*) = -\left(D_p \bar{T}(p^*, \bar{h})\right)^T \left(\bar{M}(\bar{h}) - \bar{T}(p^*, \bar{h})\right) = 0$$

*Formel 17: Zielfunktional*

Der Gradient gibt die Richtung des steilsten Anstiegs des Zielfunktionalen an. Die Richtung, in der sich das gesuchte Minimum befindet, ist somit über die „Gegenrichtung“  $-G(p^*)$  bestimmbar.

Als numerisches Lösungsverfahren für dieses Zielfunktional kommt das Gauß-Newton-Verfahren zum Einsatz. Für dieses wird zunächst folgende Linearisierung durchgeführt:

$$\bar{M}(\bar{h}) - \bar{T}(p, \bar{h}) = D_p \bar{T}(p, \bar{h}) \cdot \Delta p$$

*Formel 18: Linearisierung für das Gauß-Newton-Verfahren*

mit der Jacobi-Matrix  $D_p \bar{T}(p, \bar{h})$ . Diese ist die Ableitung der Modellfunktion  $T(p, h)$  nach den Parametern  $p$  für alle durch die Drehgeberwerte  $h_i$  gegebenen Roboterpositionen.

Um die Lösbarkeit des Gleichungssystems zu verbessern, werden nun Skalierungsfaktoren für  $\Delta p$  benötigt. Hierzu wird für jeden Parameter  $p_i$  die minimale Parameterdifferenz  $\Delta p_i$  berechnet, die zu einer Verlagerung des TCP um 1 mm ( $=10^{-3}$  m) führt. Diese kann anhand einer partiellen Differenzierung der Modellfunktion ermittelt werden:

$$\frac{\delta}{\delta p_i} \bar{T}(p, \bar{h}) \cdot \Delta p_i = \bar{T}(p + \Delta p_i, \bar{h}) - \bar{T}(p, \bar{h})$$

*Formel 19: Partielle Differenzierung der Modellfunktion*

Für eine Positionsabweichung von 1 mm wird dann die von der Gelenkstellung  $h$  abhängige Größe  $\sigma p_i(h)$  definiert:

$$\sigma_{p_i}(h) = \frac{10^{-3}}{\left\| \frac{\delta}{\delta p_i} T(p, h) \right\|}$$

*Formel 20: Skalierungsfaktor*

Da es praktisch immer Roboterstellungen gibt, in denen ein Parameter keinen oder nur einen sehr geringen Einfluss auf das Positionierergebnis hat, besitzt  $\sigma_{p_i}(h)$  zwar eine untere, aber keine obere Schranke. Diese untere Schranke ist zugleich der maximale Einfluss, den ein Parameter im Arbeitsraum haben kann. Sie kann als von der Gelenkstellung  $h$  unabhängige Größe  $\bar{\sigma}_{p_i}$  definiert werden und sie wird auch als extremaler Skalierungsfaktor bezeichnet:

$$\bar{\sigma}_{p_i} := \min\{\sigma_{p_i}(h)\}$$

*Formel 21: Extremaler Skalierungsfaktor*

Überschreitet  $\sigma_{p_i}$  eine vorgegebene obere Grenze, so wird der Parameter  $p_i$  von der Identifikation ausgeschlossen, da er mangels Einfluss auf das Positionierergebnis nicht oder nur schwer identifizierbar ist. Neben dem extremalen Skalierungsfaktor spielt auch der über alle anhand der Positionsgeberwerte  $h$  gegebenen Roboterposen gemittelte Skalierungsfaktor  $\bar{\sigma}_{p_i}$  eine Rolle:

$$\bar{\sigma}_{p_i} := \sum_{k=1}^n \frac{\sigma_{p_i}(h_k)}{n}$$

*Formel 22: Gemittelter Skalierungsfaktor*

mit:

n: Anzahl der berücksichtigten, unterschiedlichen Gelenkstellungen

Mit seiner Hilfe kann der mittlere Einfluss einer Parameterdifferenz auf die TCP-Position  ${}^{TCP}\Delta p_i$  berechnet werden:

$${}^{TCP}\Delta p_i := \frac{\Delta p_i}{\bar{\sigma}_{p_i}}$$

*Formel 23: Mittlerer Einfluss einer Parameterdifferenz auf die TCP-Position*

Zur Lösung des eigentlichen linearen Ausgleichsproblems mit Hilfe des Gauß-Newton-Verfahrens wird nun iterativ, ausgehend vom Startwert  $p^{(0)}$ , unter Verwendung der Lösungen der jeweils vorhergehenden  $i$  Schritte ein Beitrag  $\Delta p^{(i+1)}$

ermittelt. Der Startparametersatz  $p^{(0)}$  entspricht den aus Konstruktionsunterlagen bekannten Nominalwerten der Roboterkinematik. Reine Fehlerparameter erhalten den Startwert Null:

$$D_p \bar{T} \left( p^{(0)} + \sum_{k=1}^j \Delta p^{(k)}, \bar{h} \right) \cdot \Delta p = M(\bar{h}) - \bar{T} \left( p^{(0)} + \sum_{k=1}^j \Delta p^{(k)}, \bar{h} \right)$$

*Formel 24: Lösung des linearen Ausgleichsproblems*

Um die Konvergenz des Verfahrens sicherzustellen, wird ein skalarer Faktor  $\lambda > 0$  bestimmt, für den folgendes gilt:

$$\left\| M(\bar{h}) - \bar{T} \left( p^{(0)} + \sum_{k=1}^j \Delta p^{(k)} + \lambda \Delta p^{(j+1)}, \bar{h} \right) \right\| < \left\| M(\bar{h}) - \bar{T} \left( p^{(0)} + \sum_{k=1}^j \Delta p^{(k)}, \bar{h} \right) \right\|$$

*Formel 25: Sicherstellung der Konvergenz des Näherungsverfahrens*

Das Iterationsverfahren für den Parametersatz  $p$  wird abgebrochen, wenn die maximale, in einem Schritt ermittelte Parameterdifferenz  $\Delta p^{(j)}$  einen Einfluss von weniger als 0.0001 mm auf das Positionierergebnis am TCP hat:

$$\max \left\{ \frac{|\Delta p_i^{(j)}|}{\sigma p_i} \right\} \leq 10^{-4}$$

*Formel 26: Abbruchkriterium*

Die Parameteridentifikation ist damit abgeschlossen.

### 2.6.4 Zellenkalibrierung

Um alle wesentlichen Einflüsse auf die Genauigkeit in einer Roboterzelle zu berücksichtigen, wurde das Verfahren der Zellenkalibrierung eingeführt. Hierzu wird die Genauigkeit in der Zelle in mehreren Einzelschritten gesteigert. Das Verfahren umfasst das Einmessen der Werkstückkoordinatensysteme in das Roboterkoordinaten- system mit Hilfe eines Koordinatensystemabgleichs, die Vermessung des Roboterkwanzugs oder Greifers sowie eine modellbasierte Kalibrierung des Roboters (ROOS 1998).

### 2.6.5 Zusammenfassung

Im Bereich der Roboterkalibrierung existieren drei voneinander vollkommen unabhängige Ansätze:

1. Die sogenannte datengestützte Kalibrierung, bei der für eine vordefinierte Anzahl von Einzelposen Korrekturwerte bereitgestellt werden. Zwischenwerte werden durch Interpolation gewonnen. Der Hauptvorteil des Verfahrens liegt in der mathematisch einfachen Realisierbarkeit, der größte Nachteil in dem enormen Messaufwand zur Erfassung der Korrekturdaten.
2. Eine Kalibrierung in begrenzten Arbeitsraumbereichen ermöglicht die Methode des Koordinatensystemabgleichs. Hierbei wird die Transformation zwischen Roboter- und Werkstückkoordinatensystem für den genutzten Arbeitsraumbereich mit Hilfe eines Best-Fit-Verfahrens ermittelt. Der Vorteil des Verfahrens liegt in der mathematisch verhältnismäßig einfachen Realisierbarkeit sowie dem niedrigen Messaufwand. Nachteilig ist, dass die Kalibrierung nur für Posen gilt, die denen, mit deren Hilfe die Koordinatentransformation ermittelt wurde, sehr ähnlich sind, da sonst, bedingt durch die Absolutgenauigkeit des Roboters, Genauigkeitsverluste in Kauf genommen werden müssen.
3. Die mathematisch aufwendigste Methode stellt die modellbasierte Kalibrierung dar. Diese basiert auf Geometrie-, Kinematik- und Elastizitätsmodellen der zu kalibrierenden Roboter, deren Parameter dann anhand von Messungen der Positionierfehler an über den gesamten Arbeitsraum verteilten Kalibrierposen mittels mathematischer Näherungsverfahren identifiziert werden. Aufgrund der erreichbaren Genauigkeiten ist dies die mittlerweile am weitesten verbreitete Form der Kalibrierung.

### 2.7 Verfahren zur Roboterkompensation

Kompensationsverfahren dienen in erster Linie dazu, die Auswirkungen sich verändernder Einflüsse auf den Roboter auszugleichen.

Viele in der Industrie etablierte Roboteranwendungen sind nur dadurch möglich, dass die notwendige Genauigkeit nicht unmittelbar durch den Roboter bereitgestellt wird, sondern durch prozessnahe Komponenten wie Greifer, Spannvorrichtungen, Sensorik oder die zu fügenden oder zu bearbeitenden Bauteile selbst.

Die meisten dieser Lösungen gehen allerdings auf Kosten der Flexibilität des Gesamtsystems, da der Prozess das Vorhandensein bestimmter Merkmale an den Bauteilen oder den Vorrichtungen, wie beispielsweise Einführschrägen oder Messmarken voraussetzt, die als Prozessvoraussetzung oftmals erst geschaffen werden

müssen. Der Toleranzausgleich erfolgt somit nicht durch den Roboter selbst sondern durch die Vorrichtung, die so ausgelegt wird, dass betriebsbedingte Abweichungen des Roboters ausgeglichen werden können.

In einigen Bereichen wie beispielsweise der robotergestützten Inline-Messtechnik im Automobilrohbau gibt es hier bislang noch keine zufriedenstellende Lösung. Mögliche Bezugspunkte an der Karosserie sind den gleichen Einflüssen ausgesetzt, wie die zu vermessenden Merkmale und würden somit das Messergebnis verfälschen. Bezugspunkte außerhalb der Karosserie setzen voraus, dass das Verhalten des Roboters eindeutig von diesen auf den Messpunkt übertragbar ist, was sich in der Praxis ebenfalls nur schwer realisieren lässt. Der Aufbau eines Roboterführungs-systems ist nur bei Inkaufnahme von sehr hohen Zusatzkosten für geeignete, zusätzliche Messsysteme (z. B. Reseau-Scanning-Kameras) möglich. Die Wirtschaftlichkeit der Anwendung wäre damit in den meisten Fällen nicht mehr gegeben.

Dementsprechend muss die Genauigkeit in dem oben beschriebenen Fall unmittelbar vom Roboter bereitgestellt werden, was bei Genauigkeitsanforderungen von etwa 0,2 mm für das Gesamtsystem, bestehend aus Roboter und Sensor, bei einer Temperaturdrift von mitunter weit über 0,5 mm nur durch Kompensationsmethoden realisierbar ist.

### **2.7.1 Verfahren zur Temperaturdriftkompensation**

Zur Reduzierung der Temperaturdrift kommen bei Industrierobotern prinzipiell zwei Ansätze in Frage (HEISEL ET AL.1997):

1. Minimierung der Ursachen von Störeinflüssen
2. Reduzierung der Auswirkungen von Störeinflüssen.

Die Umsetzung kann durch konstruktive sowie kompensatorische Maßnahmen erfolgen. Da konstruktive Maßnahmen, wie beispielsweise thermosymmetrische Konstruktion oder der Einsatz thermorobuster Werkstoffe die Temperaturdrift zwar verringern, jedoch nie vollständig beseitigen (RICHTER 1997), müssen diese Verfahren durch kompensatorische Maßnahmen (Bild 2.12) unterstützt werden.

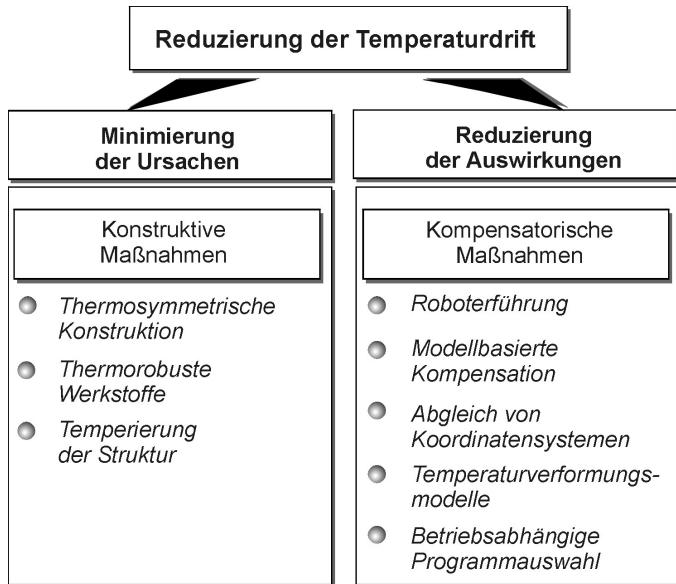


Bild 2.12: Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturdrift

### 2.7.2 Betriebsabhängige Programmauswahl

Das in der Industrie mitunter eingesetzte Verfahren der betriebsabhängigen Programmauswahl sieht die Bereitstellung unterschiedlicher Verfahrprogramme für jeden Betriebs- bzw. Erwärmungszustand vor. Voraussetzungen hierfür sind zum einen ein reproduzierbar ablaufender Erwärmungsprozess des Roboters, zum anderen eindeutige Kriterien für die Auswahl des jeweiligen Programms (z. B. Temperatur der Roboterstruktur, Betriebszeit seit Systemanlauf, etc.). Eigentlich handelt es sich hierbei um eine Form der datengestützten Kompensation, bei der die zur Korrektur verwendeten Daten in Form vorbereiteter, korrigierter Posen bereitgestellt werden.

Bei der Erstellung der temperaturabhängigen Programme müssen die Abweichungen an allen relevanten Posen bei den jeweiligen Betriebszuständen bekannt sein. Der größte Vorteil dieses sehr pragmatischen Verfahrens liegt in der relativ einfachen Umsetzbarkeit bei der Erstimplementierung. Die Nachteile überwiegen jedoch:

1. Das Verfahren ist nur in Umgebungen mit exakt definierten Umgebungs-zuständen beziehungsweise Änderungen derselben zuverlässig. Jede ungeplante

Veränderung, die den Roboter im Betrieb z. B. unerwarteten thermischen Belastungen aussetzt, führt zwangsweise zu einem Genauigkeitsverlust.

2. Bei der Erstellung und jeder Änderung des Programms müssen alle zu erwartenden Betriebsbedingungen berücksichtigt werden, so dass das Verfahren nur bei einer geringen Anzahl zu betrachtender Betriebszustände, wenigen zu korrigierenden Posen und geringen Genauigkeitsanforderungen kostengünstig umsetzbar ist. Dies schränkt auch die Flexibilität ein.

### **2.7.3 Zyklischer Abgleich von Koordinatensystemen**

Ähnlich wie bei der Anwendung eines Koordinatensystemabgleichs zur Kalibrierung (siehe Abschnitt 2.6.2) werden bei dieser Methode die jeweils aktuellen Transformationen zwischen Roboterkoordinatensystem und Werkstückkoordinatensystemen ermittelt. Im Gegensatz zur Kalibrierung erfolgt jedoch im Falle eines Einsatzes zu Kompensationszwecken eine regelmäßige Aktualisierung.

Hierzu werden mit Hilfe eines in der Regel am Roboter angebrachten Sensors die Positionen mehrerer, im Werkstückkoordinatensystem ausreichend genau bekannter Punkte des zu bearbeitenden Werkstückes im Roboterkoordinatensystem gemessen. Anhand dieser Daten wird dann die aktuelle Transformation berechnet.

Neben eventuellen Positionierungs- und Orientierungsfehlern des Werkstückes können so auch betriebsbedingte Abweichungen des Roboters am Werkstück ausgeglichen werden. Die ermittelten Korrekturwerte lassen sich jedoch nur dann sinnvoll auf das Verfahrprogramm übertragen, wenn die Ähnlichkeit zwischen den zur Ermittlung der Transformation verwendeten und den zu korrigierenden Posen ausreichend groß ist.

Das in der Industrie verbreitete Verfahren wird beispielsweise bei der robotergestützten Vermessung relativ kleiner Bauteile (z. B. Türen und Klappen) im Automobilrohbau und zur Korrektur der Bauteilpositionierung in Klappen- und Scheibenmontageanlagen eingesetzt.

Der Vorteil des Verfahrens liegt in der einfachen Implementierbarkeit und der weitgehenden Unabhängigkeit von zusätzlicher Berechnungssoftware. Es ist jedoch durch die Beschränkung auf ähnliche Posen in nur kleinen Bereichen des kartesischen Arbeitsraumes des Roboters eher unflexibel.

### **2.7.4 Roboterführung**

Eng verwandt mit dem Verfahren des Abgleichs von Koordinatensystemen ist die sogenannte Roboterführung. Bei diesem Verfahren wird die Positionsabweichung während des Prozesses mit Hilfe von an den Endeffektor gekoppelten Sensoren

möglichst nah an der zu korrigierenden Größe vermessen. Die Korrektur erfolgt dann über einen Regelkreis, der die Messdaten an die Robotersteuerung übermittelt, die diese dann bei der Bahnplanung berücksichtigt. Positionierfehler aufgrund betriebsbedingter Abweichungen des Roboters oder durch Lagefehler des Werkstücks werden somit unmittelbar ausgeglichen.

Das Verfahren ermöglicht eine hochpräzise Positionierung des Roboters, ist robust gegen Störeinflüsse und kann bei ähnlichen Bearbeitungs- oder Handlingaufgaben leicht übertragen werden. Voraussetzung für den Einsatz einer Roboterführung ist jedoch zum einen das Vorhandensein eines geeigneten Sensors sowie geeigneter Merkmale am Bauteil.

Eingesetzt wird diese Methode beispielsweise bei der Nahtverfolgung beim Laserschweißen (vgl. Abschn. 2.4.1).

### 2.7.5 Temperaturverformungsmodelle

Beim Verfahren der Kompensation mittels Temperaturverformungsmodellen (RICHTER 1997) handelt es sich um einen methodisch, mathematisch und sensorisch aufwendigen Ansatz, bei dem der jeweils aktuelle Verformungszustand des Roboters offline im Rahmen einer FEM-Simulation berechnet wird. Als Eingangsdaten für die Berechnung dienen anhand von an der Roboterstruktur angebrachten Sensoren ermittelte Temperaturdaten. Voraussetzung für den Einsatz von Temperaturverformungsmodellen ist unter anderem eine kompensationsgerechte Konstruktion des Roboters. Diese schließt temperaturbedingte Veränderungen der kinematischen Kette soweit wie möglich aus oder beschränkt diese zumindest auf lineare Anteile. Außerdem sieht sie geeignete Kopplungsmöglichkeiten für Mess- und Kompensationssysteme vor. Darüber hinaus wird ein annähernd isothermes Umfeld, d. h. ohne große Temperaturgradienten gefordert.

Zur Umsetzung des Verfahrens werden in einer ersten Phase Umgebungsbedingungen sowie deren Einflüsse, innere Wärmequellen des Roboters, Abweichungen am TCP, die Einflüsse von Betriebsbedingungen und die daraus resultierenden Abweichungen an den Hauptachsen messtechnisch untersucht.

Auf der Basis der Erkenntnisse aus der ersten Phase wird dann in einer zweiten Phase ein Temperaturverformungsmodell des Roboters generiert und unbekannte Parameter dieses Modells identifiziert.

Die dritte Phase sieht den Abgleich des Temperaturverformungsmodells mit der Realität anhand vorhandener Messdaten oder erneuter Versuche vor.

In der vierten und letzten Phase wird die Kompensation in der Robotersteuerung oder auf einem externen Rechner implementiert und hinsichtlich ihrer Funktion überprüft.

Mit Hilfe des Verfahrens konnten unter Laborbedingungen gute Ergebnisse erzielt werden (RICHTER 1997).

### **2.7.6 Modellbasierte Kompensation**

Die modellbasierte Kompensation ist die am häufigsten angewandte Methode im Bereich der Industrieroboter. Sie ist sehr eng mit der modellbasierten Kalibrierung (siehe Abschn. 2.6.4) verwandt, arbeitet aber bislang entweder mit stark vereinfachten Modellen, die sich weitgehend am nominalen Modell des Roboters orientieren (z. B. GRÄSER 1999), oder beschränkt sich auf eng miteinander verwandte Robotertypen (z. B. WIEST 2001). Auf das Verfahren der modellbasierten Kompensation und seine Implementierung wird aufgrund seiner besonderen Bedeutung für diese Arbeit nachfolgend ausführlich eingegangen.

#### **2.7.6.1 Vorgehensweise zur modellbasierten Kompensation**

Zur Implementierung einer modellbasierten Kompensation bei Industrierobotern ist die folgende Vorgehensweise üblich (GRÄSER 1999):

Nach der Montage werden zunächst die temperaturabhängigen Parameter des Roboters im Rahmen einer „Grundkalibrierung“ bestimmt. Im nächsten Schritt wird das Steuerungsmodell des Roboters um die entsprechenden thermischen Parameter in Form variabler Parameteranteile erweitert. Die notwendigen Berechnungsalgorithmen zur Ermittlung der variablen Anteile werden auf der Basis dieser erweiterten Transformation erstellt und in die Bewegungsplanung des Roboters integriert. Anschließend erfolgt die Auswahl- und Integration des Messsystems sowie der Referenzumgebung.

Im Betrieb wird dann anhand der Referenzumgebung die aktuelle Positionsabweichung aufgrund der Temperaturdrift gemessen. Mit Hilfe der Messwerte werden die variablen Parameteranteile identifiziert. Das so aktualisierte Steuerungsmodell kann entweder unmittelbar zur Bahnplanung oder zur Berechnung von Korrekturwerten für Einzelposen herangezogen werden.

WIEST (2001) beschreibt ein ähnliches Verfahren für Roboter des Herstellers Kuka, das jedoch nicht auf dem nominalen Modell basiert, sondern auch Achsschiefstände und Elastizitäten im Modell berücksichtigen kann. Jedoch wird ohne Überprüfung, lediglich aufgrund von Annahmen, das Modell für die Kompensation um Parameter reduziert, die hinsichtlich thermisch bedingter Einflüsse für irrelevant gehalten werden. Es fehlt somit eine gezielte, nachprüfbare Methode zur Parameterreduktion. Eine Methode zur Übertragung des Verfahrens auf Robotertypen mit anderen Kinematiken fehlt vollständig.

### Untersuchung des Verformungsverhaltens des Roboters

Ähnlich wie bei den Temperaturverformungsmodellen wird zunächst der Roboter aufwendig messtechnisch untersucht (MEYER 1992, MEYER 1994, GRÄSER 1999). Hierzu werden die Verformungen der einzelnen Strukturelemente der Roboterkinematik sequentiell auf temperaturinduzierte Deformationen hin überprüft, indem am jeweils betrachteten Einzelement Sensoren montiert und dann unter Temperatureinfluss (Eigen- oder Fremderwärmung) die Verformungen direkt gemessen werden.

Der Versuch wird so oft wiederholt, bis alle Elemente des Roboters in kaltem Zustand und unter Temperatureinfluss vermessen worden sind. Mit dem Verfahren lassen sich Längenänderungen der Einzelemente, Drehgeber-Offsets der Einzelachsen sowie thermischer Verzug ermitteln. Anhand der Messergebnisse wird dann das sogenannte „thermische Fehlermodell“ ermittelt, das bei GRÄSER (1999), entgegen dem allgemeinen theoretischen Ansatz, in der Anwendung annähernd dem nominalen Modell entspricht. So werden lediglich die Längen der Strukturelemente vom Roboterfuß zum TCP sowie die Drehgeber-Offsets der drei Hauptachsen, insgesamt also 9 Parameter, um einen variablen Anteil erweitert. In der Umsetzung unberücksichtigt bleiben Gelenk- und Getriebesteifigkeiten sowie das Übertragungsverhalten der Antriebe. Dies betrifft auch das im Fall des von GRÄSER (1999) untersuchten ABB IRB 6400L vorhandene Viergelenk (Parallelogramm), das in REINHART UND GRÄSER (1998) als eindeutig temperaturabhängig erkannt wurde.

### Ermittlung der temperaturabhängigen Parameter im Betrieb

Die Berechnung der variablen Anteile der Parameter des „thermischen Fehlermodells“ erfolgt mit Hilfe eines Näherungsverfahrens (Gauss-Newton-Algorithmus; GRÄSER 1999). Zur Gewinnung von Eingangsdaten wird die aktuelle Temperaturdrift des Roboters an im Arbeitsraum des Roboters verteilten Referenzmarken gemessen. Durch die Berechnung erhält man einen Parametersatz, der den aktuellen Verformungszustand beschreibt (identifiziertes Robotermodell) und mit dessen Hilfe man dann die im jeweiligen Roboterverfahrprogramm verwendeten Posen korrigieren kann. Zur Korrektur wird der Differenzvektor aus der mit Hilfe des nominalen Robotermodells berechneten Roboterposition und der mit Hilfe des identifizierten Modells vorwärts-transformierten Achswinkelposition des Roboters herangezogen.

### Ermittlung von Kalibrierpositionen

Die Festlegung der Position der Referenzmarken erfolgt in einem experimentellen Verfahren. Zunächst wird hierzu bei GRÄSER (1999) nach identischen Gleichverteilungs- und Verschiedenheitskriterien wie bei SCHRÖER (1993) eine Vielzahl von möglichen Kalibrierposen generiert. Aus diesen werden dann experimentell diejenigen ausgewählt, an denen die größte Temperaturdrift gemessen wird. Hierzu müssen zunächst in einem Versuchsaufbau alle eingangs generierten Referenzpositionen in

Form von Messmerkmalen (Würfel mit allseitigen Bohrungen an Stangen aus Invarstahl) realisiert und vermessen werden.

Im nächsten Schritt wird anhand der Kondition der Jacobi-Matrix die prinzipielle Identifizierbarkeit der als temperaturabhängig deklarierten Parameter anhand der ausgewählten Kalibrierposen überprüft. Übersteigt die Kondition der Jacobi-Matrix einen Wert von 120, werden weitere Referenzposen nach demselben Kriterium (maximale Temperaturdrift) wie die zunächst ausgewählten Posen hinzugenommen, bis die gewünschte Kondition erreicht ist. Die eingangs zur Posenvorauswahl verwendeten Gleichverteilungs- und Verschiedenheitskriterien bleiben hierbei jedoch unberücksichtigt.

Anschließend wird ein Kompensationsversuch durchgeführt und der Optimierungseffekt überprüft. Ist die erzielte Genauigkeit ausreichend, so wird der ermittelte Referenzposensatz übernommen. Andernfalls werden weitere Referenzposen hinzugefügt.

Der gesamte Vorgang muss bei jeder späteren Anwendung erneut wiederholt werden, da hierzu der gesamte, nicht durch die Anwendung genutzte Arbeitsraum verwendet werden soll. Da dieser von Anwendung zu Anwendung unterschiedlich ist, ist eine anwendungsspezifische Implementierung des Verfahrens ohne entsprechende Vorversuche sogar bei Verwendung des gleichen Roboters praktisch ausgeschlossen.

GRÄSER (1999) erreicht mit dem von ihm getesteten ABB IRB 6400L eine Genauigkeit von mindestens  $\pm 0,25$  mm an 90% der Testpunkte und bis zu  $\pm 0,5$  mm bei den restlichen 10% bei einer unkompenzierten Temperaturdrift von maximal 1 mm.

### **2.7.7 Zusammenfassung**

Temperaturbedingte Positionierabweichungen können entweder durch konstruktive Maßnahmen näherungsweise vermieden oder durch Kompensationsmethoden reduziert werden. Bei letzteren sind im Bereich der Industrieroboter derzeit folgende Verfahren bekannt:

- Betriebsabhängige Programmauswahl:

Bei diesem Verfahren wird immer ein auf den jeweiligen Betriebszustand abgestimmtes Verfahrprogramm eingesetzt. Das Verfahren ist zwar sehr einfach zu realisieren, erweist sich in der Praxis jedoch als unflexibel und ist insbesondere hinsichtlich ungeplanter Umgebungsänderungen störungsanfällig.

- Koordinaten-Best-Fit:

Die zyklische Anpassung der Transformation zwischen Werkstück- und Roboterkoordinatensystem liefert nur für kleine Arbeitsraumbereiche und zueinander ähnliche Posen zuverlässige Kompensationsergebnisse.

- Roboterführung:  
Hierbei wird durch einen zusätzlichen Regelkreis ein unmittelbarer Abgleich zwischen der aktuellen Roboter- und der Sollposition geschaffen. Betriebsabhängige Störeinflüsse werden somit ebenfalls ausgeglichen. Die Roboterführung ist die zuverlässigste bekannte Methode, um eine geforderte Genauigkeit sicherzustellen. Die Wirtschaftlichkeit hingegen ist stark vom Angebot geeigneter Messsysteme zur Erfassung des Positionierfehlers abhängig.
- Temperaturverformungsmodelle:  
Dieses mathematisch aufwendige Verfahren ermittelt die Verformung der Roboterstruktur anhand eines FEM-Modells auf der Basis gemessener Temperaturen. Es wurde bislang nur unter Laborbedingungen erfolgreich realisiert und setzt eine kompensationsgerechte Roboterkonstruktion voraus.
- Modellbasierte Kompensation:  
Diese ist hinsichtlich ihrer prinzipiellen Vorgehensweise weitgehend deckungsgleich mit der modellbasierten Kalibrierung. Um die Anzahl der notwendigen Eingangsdaten für die Kompensation zu reduzieren, werden meist nur stark vereinfachte, an das nominale Robotermodell angelehnte Modelle verwendet. Diese, sowie die zur Parameteridentifikation erforderliche Mathematik, werden bislang individuell auf jeden zu kompensierenden Robotertyp abgestimmt. Typunabhängig einsetzbare Softwarewerkzeuge zur Modellierung und Parameteridentifikation fehlen bislang. Die Ermittlung der zu berücksichtigenden Parameter erfolgt experimentell durch sequentielle Vermessung der Roboterstruktur bei unterschiedlichen Betriebszuständen. Ebenso ist die Ermittlung der notwendigen Referenzpositionen an ein aufwendiges, experimentelles Auswahlverfahren gebunden.

### 2.8 Defizite und Potenziale bestehender Kalibrier- und Kompensationsverfahren

Im Bereich der Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern wurden in den letzten Jahren sehr viele, mitunter sehr unterschiedliche Ansätze verfolgt. Die meisten hiervon konzentrieren sich auf einen jeweils eng abgegrenzten Bereich. Systemübergreifende Vorgehensweisen sind praktisch nicht zu beobachten. Gerade im Bereich der steuerungstechnischen Maßnahmen wird nach wie vor zwischen regelungstechnischen Ansätzen, Kalibrierung und Kompensation unterschieden, obwohl gerade im Bereich der Kalibrierung und Kompensation mitunter eng miteinander verwandte Verfahren zum Einsatz kommen.

## **2.8 Defizite und Potenziale bestehender Kalibrier- und Kompensationsverfahren**

---

Es existieren sowohl im Bereich der Roboterkalibrierung als auch der Roboterkompensation Teillösungen, mit denen sich im jeweiligen Bereich gute Ergebnisse erzielen lassen.

Im Bereich der modellbasierten Roboterkalibrierung sind die Verfahren mittlerweile soweit ausgereift, dass Softwarelösungen existieren, die den Benutzer von der Modellierung eines vollständigen Modells bis hin zur Kalibrierung unterstützen. Eine umfangreiche, nicht an ein bestimmtes Messsystem gebundene Lösung wird in SCHRÖER (1993) beschrieben. Diese beschränkt sich jedoch auf offene kinematische Ketten. Verfahren zur Kalibrierung geschlossener kinematischer Ketten befanden sich zu Beginn der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit erst in der Entwicklung. Eine an ein photogrammetrisches Messsystem gebundene Lösung wurde im Jahr 2002 mit dem System ROSY (**R**obot **O**ptimization **S**ystem, UNIBW 2002) erstmals vorgestellt.

Methoden, wie beispielsweise die lokale Kalibrierung mittels Abgleich der Koordinatensysteme haben nur für einen kleinen Teil des Arbeitsraumes Gültigkeit und sind somit für Anwendungen, die eine hohe Genauigkeit im gesamten Arbeitsraum voraussetzen, nicht von Bedeutung. Ähnliches gilt für die Kalibrierung mittels bahn- oder posenspezifischer, in einer Datenbank abgelegter Korrekturwerte, da sich diese nicht auf den gesamten Arbeitsraum übertragen lassen und für jede neu programmierte Bahn erst ermittelt werden müssen, was zu einem enormen Defizit an Flexibilität führt.

Im Bereich der modellbasierten Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse existieren bislang ausschließlich Verfahren, die an bestimmte Roboter- oder Kinematiktypen gebunden sind und sich nur mit erheblichem Aufwand übertragen lassen (z. B. Wiest 2001, Gräser 1999). Die einzelnen Verfahren unterscheiden sich hierbei überwiegend im Modellierungsaufwand. Eine Kopplung mit Verfahren zur modellbasierten Roboterkalibrierung fehlt entweder ganz (z. B. Gräser 1999) oder ist nur für einen einzigen Kinematiktyp realisiert (z. B. Wiest 2001).

Vergleichbare Verfahren wurden zwischenzeitlich bereits von den Roboterherstellern Stäubli (Göllnitz 2002) und Kuka (Verl und Pieters 1999) aufgegriffen und speziell für die Roboter der genannten Hersteller zum Zweck des Einsatzes in Inline-Messzellen weiterentwickelt. Die mathematische Modellierung sowie die zugehörige Parameteridentifikation ist jedoch in keinem der Fälle unmittelbar auf andere Kinematiktypen übertragbar, so dass es sich hierbei letztendlich immer um roboterspezifische Sonderlösungen mit jeweils hohem Entwicklungsaufwand handelt. Anwender, die nicht auf Roboter mit existierenden Kompensationsverfahren zurückgreifen wollen, sind somit bislang vom Einsatz kompensierter Applikationen ausgeschlossen.

Ein Verfahren zur Modellreduktion wird erstmals bei Gräser (1999) vorgestellt. Hierbei wird jedes Element des Roboters einzeln mit Messsensorik ausgestattet und

unter Temperatureinfluss auf sein Verhalten hin untersucht. Betrachtet werden Winkelfehler der Gelenke, Achslängenänderungen und Verbiegung und Verdrehung der einzelnen Elemente. GRÄSER (1999) betrachtet somit das tatsächliche Verhalten des Roboters. Als Ergebnis erhält er in der tatsächlichen Umsetzung ein Modell, das auf sechs Achslängen und die drei Drehwinkel-Offsets der Hauptachsen beschränkt ist und sich somit nur unwesentlich vom nominalen Modell unterscheidet. Das beschriebene Verfahren liefert zwar eine Modellreduktion, ist jedoch zum einen mit einem sehr großen Versuchsaufwand verbunden und, da nur an der Struktur unmittelbar messbare Veränderungen betrachtet werden können, auf einfache Modelle beschränkt. Darüber hinaus wurden in den Voruntersuchungen als relevant eingestufte Größen in der späteren Anwendung im Modell nicht berücksichtigt (vgl. hierzu REINHART UND GRÄSER 1998, GRÄSER 1999).

Ferner wird derzeit noch keine Unterstützung des Benutzers bei der Modellierung und Untersuchung neuer Robotertypen angeboten, so dass im Falle der Einbindung eines neuen Roboters in die Kompensation, angefangen von der Modellierung bis hin zur Programmierung der mathematischen Algorithmen zur Berechnung der Parameter, alles vollständig neu entwickelt werden müsste. Dies wird insbesondere dann sehr aufwendig, wenn Parameter betrachtet werden sollen, die über das nominale Modell hinausgehen.

Verbesserungsmöglichkeiten ergeben sich mit Blick auf die Zielsetzung der vorliegenden Arbeit insbesondere durch die Kombination der Verfahren zur modellbasierten Kalibrierung und Kompensation. Durch Einbindung der Modellierungs- und Berechnungswerkzeuge der modellbasierten Kalibrierung kann eine Kompensation anhand standardisierter, vollständiger Robotermodelle realisiert werden. Dies ermöglicht, neben einer Steigerung der Leistungsfähigkeit der Kompensation hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit, eine einfache Übertragbarkeit auf andere Kinematiktypen. Neue Robotertypen können dann innerhalb kürzester Zeit für einen Einsatz in kompensierten Anwendungen vorbereitet werden.

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

Gegenstand dieses Kapitels ist zunächst die Erstellung eines Konzepts für die zu realisierende Methode (Abschn. 3.1). Als Testumgebung steht eine Temperaturkammer zur Verfügung, deren Aufbau in Abschnitt 3.2 beschrieben wird. Anschließend werden Spezifikationen für die Auswahl einer geeigneten Kalibriersoftware festgelegt (Abschn. 3.3) und es folgt eine Beschreibung der zur Umsetzung der Methode notwendigen Teilschritte. Hierbei wird zunächst kurz auf Besonderheiten bei der Modellierung eingegangen (Abschn. 3.4) und das Modell im weiteren Verlauf auf Temperaturabhängigkeiten hin untersucht (Abschn. 3.5), um eine gezielte Parameterreduktion zu ermöglichen. Zur Identifikation der als temperaturabhängig erkannten Parameter im Betrieb wird eine geeignete Referenzumgebung entwickelt (Abschn. 3.6) und der Roboter in einen Kompensations- und Kommunikationsablauf eingebunden (Abschn. 3.7). In Abschnitt 3.8 werden die notwendigen Maßnahmen beschrieben, um das System um die Funktion der Absolutgenauigkeit zu erweitern. Anschließend wird erörtert, durch welche Einflüsse die erreichbare Genauigkeit des Systems begrenzt wird (Abschn. 3.9).

#### **3.1 Konzept**

Zur Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse müssen zunächst alle relevanten Anforderungen definiert werden. Da Kompensationsverfahren nur prozessunterstützend eingesetzt werden und somit einen Fertigungs-, Montage-, Mess- oder Prüfprozess zwar einerseits erst möglich machen, andererseits jedoch nicht unmittelbar in den Ablauf des Prozesses eingreifen sollen, sind die meisten Anforderungen direkt aus den Bedingungen der jeweiligen Anwendung abzuleiten. Andernfalls scheitern entsprechende Verfahren in der späteren, industriellen Umsetzung erfahrungsgemäß an der fehlenden Akzeptanz durch den Anwender, der in erster Linie sein Produkt, die zur Herstellung unmittelbar notwendigen Prozesse sowie die damit verbundenen Kosten vor Augen hat.

##### **3.1.1 Anforderungen an kompensierte Roboteranwendungen**

Die industriellen Anforderungen an kompensierte Roboteranwendungen sind insbesondere aus dem Bereich der robotergestützten Inline-Messzellen in der Automobilindustrie bekannt (Bild 3.1). Diese werden im Folgenden näher erläutert.

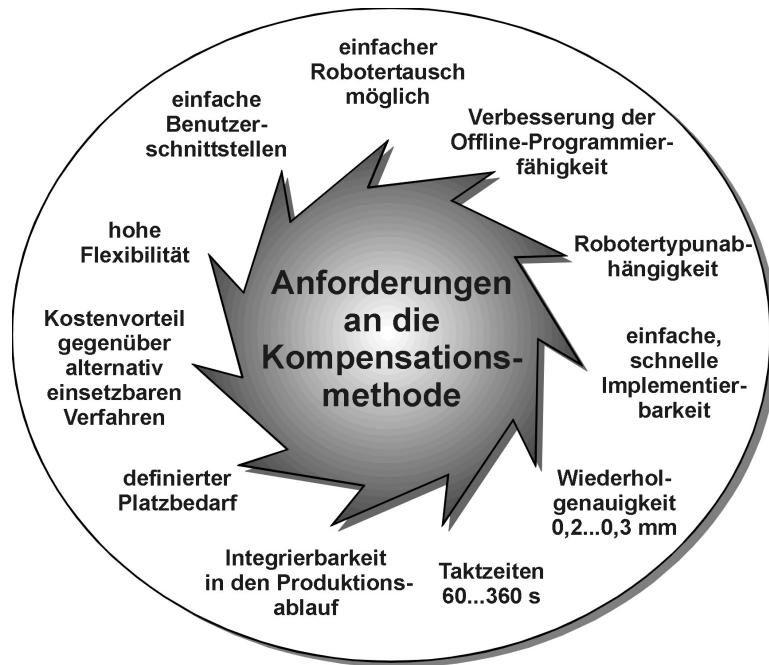


Bild 3.1: Anforderungen an das Kompensationsverfahren bei Robotereinsatz in Inline-Messzellen

#### Genauigkeit

Standardindustrieroboter weisen mittlerweile Wiederholgenauigkeiten in der Größenordnung von  $\pm 0,1$  mm auf. Hinzu kommt die Streuung der zur Kompensation notwendigen Sensorik (z. B.  $\pm 0,05$  mm) sowie der Aufnahmen für das jeweilige Werkstück in der Anlage. Unter diesen Gesichtspunkten wird als Zielgröße eine Restabweichung (Temperaturdrift und Wiederholgenauigkeit) von etwa  $\pm 0,2$  mm vorgegeben, die angesichts der in industriellen Applikation vorhandenen Toleranzketten bereits ohne Berücksichtigung der Temperaturdrift des Roboters eine Herausforderung darstellt.

#### Taktzeiten

In der Serienfertigung, beispielsweise in der Automobilindustrie, liegen gängige Taktzeiten je nach Stückzahl zwischen einer und sechs Minuten. Innerhalb dieser Zeit muss es zugleich möglich sein, notwendige Messungen und Berechnungen für die Kompensation und die eigentliche Handling- oder Bearbeitungsaufgabe durchzu-

führen. Da die zur Kompensation notwendige Erfassung der aktuellen Temperaturdrift innerhalb der jeweils vorgegebenen Taktzeit erfolgen soll, muss die Anzahl notwendiger Referenzpunkte so gering wie möglich gehalten werden. Pro Messpunkt ist hierbei eine Messdauer von etwa 2,5 s anzusetzen. Diese setzt sich beispielsweise in robotergestützten Inline-Messanlagen aus durchschnittlich 1,5 s für die Roboterbewegung, 0,5 s für eventuelle Ausschwingvorgänge sowie weiteren 0,5 s für die eigentliche Messung zusammen.

#### **Einbindung in die Fertigungsline**

Robotergestützte Applikationen müssen in der Regel vollständig in eine Fertigungsline integriert werden. Insbesondere sind Kollisionen mit anderen Komponenten der Anlage sowie Werkstücken zuverlässig auszuschließen. Dies ist besonders dann zu beachten, wenn für Referenzmessungen Nebenzeiten genutzt werden und parallel hierzu Werkstückbewegungen durchgeführt werden sollen.

Da die meisten Anwender über eigene, hausinterne Standards verfügen, sowohl was die Anbindung von Anlagenkomponenten an die Linien-SPS als auch die Benutzerprogramme auf der Robotersteuerung angeht, müssen derartige Schnittstellen auch bei der Einbindung einer Kompensation berücksichtigt werden. Dies ist vor allem auch hinsichtlich der Wartbarkeit der Systeme ein wichtiger Gesichtspunkt, da jede Komponente außerhalb des Standards, egal ob auf Hard- oder Softwareseite, zusätzliche Kosten durch gegebenenfalls notwendiges, speziell geschultes Personal oder zusätzlich erforderliche Ersatzteilvorräte verursacht.

#### **Robotertypunabhängigkeit**

Jeder Anwender versucht innerhalb einer Linie möglichst nur einen einzigen Robotertyp einzusetzen. Dementsprechend wird dieser immer so gewählt, dass mit ihm alle notwendigen Prozesse zuverlässig umgesetzt werden können, idealerweise auch die Anwendungen mit besonderen Genauigkeitsanforderungen. Die Bereitschaft, hier auf spezielle Robotertypen zurückzugreifen, die möglicherweise für hochgenaue Aufgaben besser geeignet sind, ist äußerst gering. Die einfache und schnelle Übertragbarkeit des Kompensationsverfahrens, das eine wichtige Voraussetzung für den Einsatz eines bestimmten Robotertyps in einer hochgenauen Anwendung ist, ist daher eines der Hauptziele und damit auch eine der Hauptanforderungen.

#### **Platzbedarf**

Der Platzbedarf einer Applikation ist ein Kriterium, das bereits im frühen Planungsstadium einer Anlage bekannt sein sollte. Der größte zusätzliche Platzbedarf bei kompensierten Roboterapplikationen entsteht durch die zusätzlich notwendige Referenzumgebung. Ziel muss es also sein, diese auf einen möglichst kleinen, zusammenhängenden Bereich des Roboterarbeitsraumes zu beschränken, dessen Lage und Größe relativ zum Roboter soweit definiert ist, dass dieser bei der Anlagen-

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

planung von Anfang an, unabhängig vom später eingesetzten Robotertyp und somit auch ohne Vorversuche, berücksichtigt werden kann. Hierbei muss sichergestellt werden, dass durch die Lage der Referenzpunkte die Zugänglichkeit zum Werkstück nicht behindert wird.

#### **Kosten**

Die Anforderungen hinsichtlich der Kosten sind sehr einfach zu beschreiben. Angesichts existierender Alternativen zur Genauigkeitssteigerung sowie der Möglichkeit, viele Prozesse mit starr automatisierten Lösungen umzusetzen, müssen die Gesamtkosten für eine kompensierte Roboteranwendung niedriger sein, als diejenigen für eine vergleichbare, mit einem anderen Verfahren ausgestattete oder starr automatisierte Anlage. Hierbei kann auch der Flexibilitätsgewinn durch den Roboter-einsatz als nicht unmittelbar monetär bewertbarer Nutzen berücksichtigt werden.

#### **Flexibilität**

Die Flexibilität der jeweiligen Applikation darf durch die Kompensation nicht beeinträchtigt werden. Es muss problemlos möglich sein, die Lage von anzufahrenden Punkten zu verändern oder neue hinzuzufügen. Darüber hinaus darf die Zugänglichkeit zu diesen nicht durch für die Kompensation notwendige Vorrichtungen beeinträchtigt werden.

#### **Benutzerschnittstellen**

Für das Kompensationsverfahren sind zwei unterschiedliche Benutzerschnittstellen relevant:

- Robotersteuerung

Die roboterseitige Benutzerschnittstelle muss soweit wie möglich auf den jeweiligen Standard eines Anwenders adaptierbar sein. Nur wenn der Benutzer seine gewohnte Software-Umgebung auch auf der Robotersteuerung wiederfindet, ist sichergestellt, dass hier nicht durch Unwissenheit oder Fehlinterpretation Fehler begangen werden, die dann im schlimmsten Fall zu Kollisionen führen können. Kompensations- und kommunikationsspezifische Programmteile müssen als solche zwar erkennbar sein, dürfen aber den Anwender im Betrieb oder bei der Bahnprogrammierung nicht irritieren.

- Messsystem

Das Messsystem soll einem industrietauglichen Standardmesssystem entsprechen und idealerweise auf der Plattform aufgebaut sein, die auch für den Betrieb der Kompensationssoftware erforderlich ist. Anwenderrelevante Schnittstellen müssen sich soweit möglich auf die Informationen beschränken, die zur Bewältigung der eigentlichen Bearbeitungsaufgabe notwendig sind. Der Ablauf der Kompensation

muss im Betrieb, abgesehen von Referenzmessungen, vollkommen im Hintergrund erfolgen. Bei der Einrichtung ist die wiederholte Eingabe gleicher Daten an mehreren Stellen unbedingt zu vermeiden, da bereits kleine Fehler zu Dateninkonsistenzen führen können, die das Kompensationsergebnis nachhaltig beeinträchtigen können. Darüber hinaus sollte die Schnittstelle so gestaltet werden, dass auch bei Einsatz unterschiedlicher Robotertypen keine Unterschiede in der Einrichtung der Kompensation festzustellen sind.

#### **Einfacher Austausch eines Roboters im Störungsfall**

Im Fall eines Defektes an einem Roboter muss es möglich sein, diesen innerhalb kürzester Zeit gegen einen beliebigen Ersatzroboter des gleichen Typs auszutauschen. Der Aufwand hierzu darf keinesfalls größer als beispielsweise bei einem für Punktschweißaufgaben eingesetzten Roboter sein. Dies setzt voraus, dass an der Steuerung weder aufwendige Hard- noch Softwareinstallationen notwendig sind und der Roboter auch sonst hinsichtlich der Kompensation keiner größeren Veränderungen bedarf.

#### **Verbesserung der Offline-Programmierfähigkeit des Roboters**

Eine Verbesserung der Offline-Programmierfähigkeit des Roboters in der Zelle durch das Kalibrier- und Kompensationsverfahren vereinfacht zum einen den Roboteraustausch und reduziert zum anderen die Zeit zur Erstinbetriebnahme.

#### **Standardisierte Kompensationssoftware**

Grundlage der zu entwickelnden Methode soll eine existierende, standardisierte Kalibriersoftware für Industrieroboter sein, die möglichst alle relevanten Einflüsse auf die Robotergenauigkeit berücksichtigt, messsystemunabhängig ist und umfangreiche Modellierungsmöglichkeiten bietet. Mit Hilfe dieser Software, einem geeigneten Verfahren zur Parameterreduktion sowie Standardvorgaben für die hard- und softwareseitige Schnittstellengestaltung, soll eine kurzfristige Implementierung des Verfahrens bei jedem beliebigen Robotertyp möglich werden.

### **3.1.2 Merkmale des Kompensationsmethode**

Um die oben genannten Anforderungen zu erfüllen, muss die Kompensationsmethode bestimmte Merkmale aufweisen. Nachfolgend werden die wichtigsten hiervon beschrieben:

#### **Einsatz einer standardisierten Kalibriersoftware**

Alle bislang zur modellbasierten Kompensation von Industrierobotern eingesetzten Methoden basieren auf der Verwendung stark vereinfachter Modelle in Verbindung mit einer speziell auf das jeweils verwendete Modell abgestimmten Berechnungs-

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

software. Da hierdurch nicht alle betriebsabhängigen Effekte berücksichtigt werden können, ist es mit diesen Verfahren bislang nicht möglich, die Auswirkungen betriebsabhängiger Einflüsse, wie beispielsweise die Temperaturdrift, an allen Positionen im Arbeitsraum des Roboters ausreichend zu kompensieren.

Sogenannte vollständige Robotermodelle, die dies theoretisch ermöglichen, werden bislang nur zur Absolutkalibrierung von Industrierobotern eingesetzt. Geht man von der Annahme aus, dass nur ein kleiner Teil der Parameter dieser Modelle sich tatsächlich unter der Einwirkung von Betriebseinflüssen verändert, so ist es möglich, eine Nachkalibrierung ausschließlich anhand dieser Parameter durchzuführen.

Bei der Umsetzung der hier zu entwickelnden Methode wird daher auf eine standardisierte Kalibriersoftware zurückgegriffen, mit der es möglich ist, beliebige Standardindustrieroboter zu modellieren und zu kalibrieren. Die Berechnungswerzeuge der Software werden dann in einen Kompensationsablauf eingebunden.

#### **Erkennung betriebsabhängiger Parameter (Parameterreduktion)**

Da bislang noch keine Methode zur gezielten Parameterreduzierung vollständiger Robotermodelle auf nur im Sinne einer Temperaturabhängigkeit betriebsbeeinflusste Parameter existiert, muss diese zunächst im Rahmen dieser Arbeit entwickelt werden. Hierzu wird das gesamte Robotermodell im Rahmen einer einzigen Messreihe untersucht. Die zu bestimmende Größe ist ausschließlich die TCP-Position. Eine einzelne Messung umfasst, wie bei einer normalen Kalibrierung, jeweils eine zuvor festgelegte Anzahl von Einzelposen, die über den gesamten Arbeitsraum verteilt sind. In diesem Fall wird jedoch zwischen den Messungen die Temperatur variiert. Anhand der Messdatensätze kann dann für jede Temperatur ein Parametersatz berechnet werden. Durch Vergleich der Parametersätze für die unterschiedlichen Temperaturen werden dann die jeweils temperaturbeeinflussten Parameter herausgefiltert.

#### **Ermittlung der Referenzposen**

Die Ermittlung der zur Kompensation notwendigen Referenzposen erfolgt ausschließlich im Rahmen einer Simulation. Die Referenzposen werden auf einen definierten Bereich des kartesischen Arbeitsraumes des Roboters beschränkt und die zugehörigen Messpunkte anhand eines für unterschiedliche Robotertypen einsetzbaren Referenzaufbaus dargestellt.

#### **Ablauf der Kompensation im Betrieb**

Der Ablauf der Kompensation im Betrieb orientiert sich an dem von GRÄSER (1999) beschriebenen Ablauf:

Bei der Inbetriebnahme der Anlage wird zunächst das „Nullniveau“ festgelegt. Dies ist der Zustand, in dem der Roboter zum einen keinerlei Temperaturdrift aufweist, zum anderen an einem quasi idealen Werkstück (Masterbauteil) keinerlei Abweichungen

zeigt. Nach dem Anlagenstart sowie vor jeder Bearbeitung wird zunächst die aktuelle Genauigkeit der Anlage durch eine kompensierte Messung an zuvor definierten Punkten an der Referenz überprüft. Wird hierbei keine oder nur eine unwesentliche Abweichung gemessen, so kann auf eine Nachkalibrierung verzichtet werden. Ist die Abweichung unzulässig groß, so muss zunächst eine Nachkalibrierung des Roboters erfolgen. Die eigentliche Bearbeitung beginnt im Anschluss an diese.

Dieser Ablauf soll in Form eines Kommunikationskreises, in den die Kalibriersoftware eingebunden ist, realisiert werden.

#### Möglichkeiten zur Steigerung der Absolutgenauigkeit

Prinzipiell existieren mehrere Möglichkeiten, die Absolutgenauigkeit des Roboters in Verbindung mit einer Kompensation zu erhöhen. Diese unterscheiden sich hinsichtlich des Ablaufs der Grundkalibrierung, der im Betrieb verwendeten Modelle und der Verwendung der jeweils gewonnenen Korrekturdaten. Im Rahmen der Arbeit sollen zwei Ansätze näher betrachtet werden:

- Einmalige Grundkalibrierung des Roboters bei der Inbetriebnahme mit Hilfe eines externen Messsystems (entsprechend Abschn. 2.6.3).
- Einmalige oder zyklische Grundkalibrierung des Roboters im Rahmen der Inbetriebnahme sowie von Wartungsintervallen mit Hilfe der in der Roboterzelle vorhandenen Messtechnik.

#### Sicherstellung der Übertragbarkeit des Verfahrens

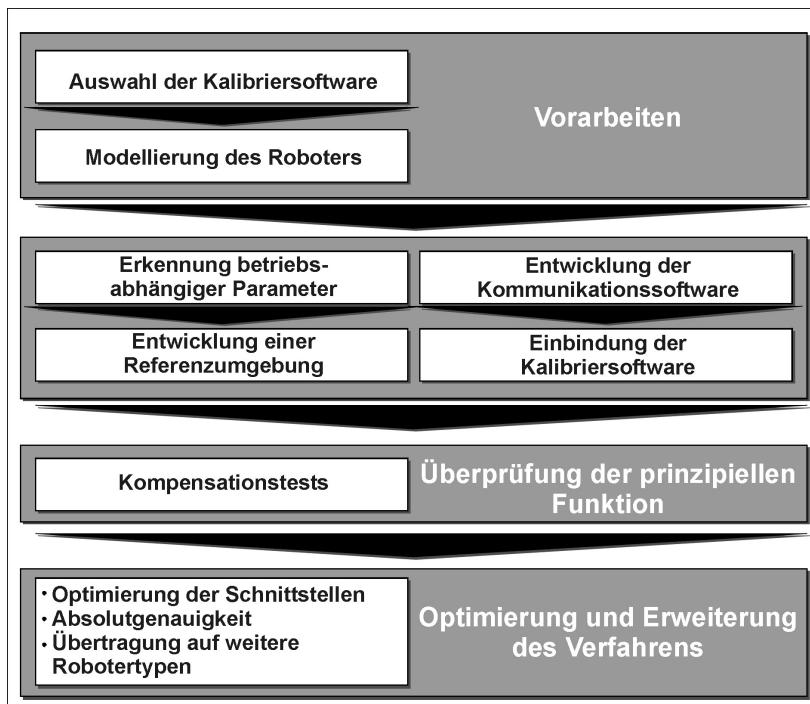
Um die Übertragbarkeit des Verfahrens sicherzustellen, sollen mehrere Robotertypen mit unterschiedlichen Kinematiken untersucht werden.

#### 3.1.3 Vorgehensweise zur Umsetzung

Die Methode soll anhand der in Bild 3.2 dargestellten Vorgehensweise umgesetzt werden. Nach der Auswahl der Kalibriersoftware wird mit dieser der Roboter zunächst modelliert. Im nächsten Schritt erfolgt die Parameterreduktion durch Erkennung betriebsabhängiger Parameter im Robotermodell. Zur Gewinnung der Eingangsdaten für deren Identifikation muss anschließend eine Referenzumgebung gestaltet werden. Parallel hierzu wird die Kommunikationssoftware zur Kompensation entwickelt und die zuvor ausgewählte Kalibriersoftware in den Kommunikationskreis eingebunden. Danach folgen bereits erste Kompensationstests, die auch zur weiteren Modell-optimierung genutzt werden können. Abschließend kann die Methode hinsichtlich der Schnittstellen optimiert und auf weitere Robotertypen übertragen werden. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit, weitere Funktionen, wie beispielsweise Maßnahmen zur Absolutkalibrierung, zu ergänzen. Für alle Untersuchungen und Tests, die un-

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

mittelbar am Roboter durchgeführt werden müssen, ist eine geeignete Versuchsumgebung erforderlich, die eine gezielte Änderung der Umgebungsbedingungen zulässt.



*Bild 3.2: Vorgehensweise zur Umsetzung der Kompensationsmethode*

#### **3.1.4 Zusammenfassung**

Bei der Entwicklung der Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern sollen folgende Anforderungen berücksichtigt werden:

- Mit Hilfe des Verfahrens soll es möglich sein, bei Robotern mit einer systemimmanenten Wiederholgenauigkeit von 0,1 mm unter Betriebseinflüssen eine Wiederholgenauigkeit von 0,2 mm im gesamten Arbeitsraum sicherzustellen.
- Taktzeiten von einer Minute sollen auch mit Kompensation noch sinnvoll realisierbar sein.

- Die Methode soll auf jeden Standardindustrieroboter einfach und schnell übertragbar sein.
- Die Kompensation soll mit Hilfe von Standardschnittstellen realisierbar sein, die üblicherweise in der Industrie verwendet werden und für jeden gängigen Robotertyp verfügbar sind.
- Es soll möglich sein, bereits zu Beginn einer Anlagenplanung Aussagen über die für die spätere Referenzumgebung zu reservierenden Bereiche im Arbeitsraum des Roboters zu treffen.
- Die Wirtschaftlichkeit soll gegeben und nachweisbar sein.
- Der Roboter soll nicht in seiner Bewegungsfreiheit eingeschränkt werden.
- Für den Benutzer soll der Einsatz der Kompensation keinen Mehraufwand bedeuten. Sie soll daher vollständig im Hintergrund ablaufen.
- Ein defekter Roboter soll einfach austauschbar sein.
- Die Offline-Programmierungsfähigkeit des Roboters soll verbessert werden.

Um den oben genannten Anforderungen gerecht zu werden, soll eine Methode entwickelt werden, die eine Kompensation auf der Basis einer standardisierten Roboterkalibriersoftware erlaubt. Die Methode umfasst ein Verfahren zur systematischen Parameterreduktion des vollständigen Robotermodells sowie eine simulationsbasierte Vorgehensweise zur Gestaltung einer Referenzumgebung. Der Ablauf der Kompensation im Betrieb orientiert sich weitgehend an dem bereits von GRÄSER (1999) beschriebenen Kompensationszyklus. Neben der Behandlung betriebsbedingter Positionierabweichungen werden Möglichkeiten zur Steigerung der Absolutgenauigkeit in Verbindung mit der Kompensation betrachtet. Abschließend soll die Übertragbarkeit auf unterschiedliche Robotertypen nachgewiesen werden.

### 3.2 Aufbau einer Versuchsumgebung für Industrieroboter

Um zuverlässige und aussagekräftige Ergebnisse bei der Untersuchung von Robotern unter Betriebseinflüssen zu erhalten, wird eine geeignete, praxisnahe Versuchsumgebung benötigt, in der sichergestellt ist, dass Messergebnisse nicht durch Störeinflüsse aus dem Aufbau selbst verfälscht werden. Eine solche Versuchsumgebung besteht aus einer Temperaturkammer, weshalb eine solche vor Beginn der Untersuchungen aufzubauen war. Die entsprechenden Arbeiten werden nachfolgend beschrieben.

#### 3.2.1 Anforderungen an die Versuchsumgebung

Der Haupteinfluss, dem Roboter im realen Fertigungsumfeld ausgesetzt sind, sind Temperaturschwankungen aufgrund innerer und äußerer Erwärmung. Daneben wirken Luftfeuchtigkeit, Vibrationen, Prozesskräfte, Personen, Schmutz, Licht, Verschleiß

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

sowie anlagen- und umgebungsspezifische Randbedingungen auf die Kinematik ein.

Die **Luftfeuchtigkeit** spielt erfahrungsgemäß, solange der Roboter im vom Hersteller angegebenen zulässigen Bereich betrieben wird, bei Standardrobotern mit einer Guss-, Stahl- oder Aluminiumstruktur keine Rolle. Sie kann jedoch dann zu einem relevanten Einfluss werden, wenn wichtige Elemente der Roboterkinematik aus feuchtigkeitsempfindlichen Kunststoffen oder Faserverbundwerkstoffen hergestellt werden. In der Praxis ist die Verwendung derartiger Materialien bei Standardindustrierobotern bislang jedoch unwirtschaftlich, so dass auf eine eingehende Untersuchung derzeit verzichtet werden kann.

**Vibrationen** können zwar auftreten, müssen jedoch, sofern sie fremdinduziert sind, entkoppelt werden, da im Bereich der Industrieroboter bislang kein Verfahren zu ihrer Kompensation bekannt ist. Die hier untersuchte Kompensationsmethode kann prinzipiell auch nur solche Störungen zuverlässig ausgleichen, die erst im Bereich von mehreren Minuten einen erkennbaren Einfluss auf das System ausüben. Selbst-induzierte Schwingungen, z. B. aufgrund der Roboterbewegung, müssen durch einen geeigneten Unterbau sowie, falls sie nicht ohnehin bereits steuerungstechnisch weitgehend ausgeglichen werden, durch angepasste Programmierung des Roboters (Vermeidung ruckartiger Bewegungen sowie starker Beschleunigungen, Berücksichtigung von Ausschwingzeiten) vermieden oder in ihrer Auswirkung minimiert werden. Aus Untersuchungen im Vorfeld dieser Arbeit ist bekannt, dass fremd-induzierte Schwingungen, abgesehen von Bereichen beispielsweise in der Umgebung von Presswerken, meist gegenüber selbstinduzierten Schwingungen aus dem Roboterbetrieb vernachlässigbar sind.

**Prozesskräfte** aus der Interaktion von Roboter und Werkstück sollen, obwohl sie in vielen Applikationen das Positionierergebnis maßgeblich beeinflussen, in der Versuchsumgebung ausgeschlossen werden. Es ist derzeit keine standardisierte Kalibriersoftware bekannt, die Prozesskräfte, abgesehen von Schwerkrafteinwirkungen, berücksichtigen kann. Da Prozesskräfte applikationsspezifisch hinsichtlich Betrag, Wirkrichtung und Zeitverhalten stark variieren, ist eine Betrachtung im Einzelfall erforderlich. Gegebenenfalls müssen regelungstechnische Ansätze verfolgt werden, wie sie beispielsweise in DAUSTER (2001) beschrieben sind. Einflüsse durch das Werkstück- oder Greifergewicht auf den Roboter hingegen können durch Variation der entsprechenden Massen untersucht werden.

Wie in der Praxis auch, müssen Einwirkungen durch **Personen** auf genauigkeits-relevante Bestandteile der Versuchsumgebung entweder durch Absperrungen oder konstruktive Maßnahmen ausgeschlossen werden.

Die in der Versuchsumgebung unmittelbar zu berücksichtigenden Einflüsse beschränken sich somit auf Temperatur, Schmutz in Form von Staubablagerungen sowie Licht.

**Schmutz** stellt nur dann ein Problem dar, wenn er sich beispielsweise auf optischen Sensoren oder zu vermessenden Merkmalen an der Referenzumgebung ablagert, da hierdurch der Kontrast von Messmerkmalen sowie Reflexionseigenschaften von Oberflächen verändert werden. Dementsprechend müssen diese zumindest so stabil und abriebfest ausgelegt sein, dass eine regelmäßige Reinigung ohne Genauigkeitsverluste möglich ist. Im Falle zu großer Staubbelaustung kann es auch notwendig sein, geeignete Filteranlagen vorzusehen.

Die Versuchseinrichtung muss vor direkter **Sonneneinstrahlung** geschützt werden. Da insbesondere optische Sensoren häufig Licht im sichtbaren Bereich verarbeiten, kann es ansonsten hierdurch ebenfalls zu Veränderungen des Kontrastes am Messmerkmal und somit zu Messabweichungen kommen. Eine Einhausung des Versuchsstandes ist daher unumgänglich. Als Lichtquellen im Versuchsstand sollen Neonlicht sowie natürliches Streulicht eingesetzt werden, da dies den in der Praxis vorhandenen Bedingungen am ehesten entspricht.

Der zu kompensierende Haupteinfluss sind **Temperaturschwankungen** in der Umgebung. Raumtemperatur-Messungen in realen Produktionsanlagen in ausgewählten deutschen Unternehmen im Frühjahr und Sommer haben Temperaturschwankungen zwischen 20° und 28°C gezeigt. Aus ausländischen Produktionsanlagen sind mitunter größere Schwankungen bekannt. Ein Temperaturbereich von 15° bis 35°C wird eigenen Umfragen zufolge von den meisten Automobilherstellern für praxisnah erachtet. In der Versuchsumgebung soll es daher möglich sein, mehrstündige Zyklen in diesem Temperaturbereich zu durchlaufen, wobei Temperaturänderungen annähernd linear über mehrere Stunden hinweg vollzogen werden sollen.

Eine weitere wichtige Anforderung an den Versuchsaufbau ist, dass es möglich sein muss, in der Versuchsumgebung Informationen über das Verhalten des Roboters im gesamten Arbeitsraum zu erhalten. Eine nach DIN EN ISO 9283 gewonnene Aussage an nur fünf Arbeitsraumpunkten, die noch dazu alle in einer Ebene liegen, wird entsprechend IRIS (1998) für nicht ausreichend erachtet (vergleiche hierzu Abschn. 2.2.2).

In der Versuchsumgebung soll es darüber hinaus möglich sein, Messobjekt und Referenzumgebung räumlich zu trennen. Nur so ist die Übertragbarkeit der anhand von Messdaten an einer räumlich begrenzten Referenzumgebung berechneten Kinematikdaten des Roboters auf den gesamten Arbeitsraum zuverlässig überprüfbar.

#### 3.2.2 Konzept und Realisierung der Versuchsumgebung

Um den beschriebenen Anforderungen gerecht zu werden, wurde ein Versuchsaufbau in Form einer Temperaturkammer (Bild 3.3) entworfen. Diese besteht aus einer betonierten Grundplatte und einer Einhausung in Form eines Stahlrahmens mit einer

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

100 mm starken Styroporfüllung. Die Kammer bietet mit Außenmaßen von 6 m in der Länge und Breite sowie 4 m in der Höhe ausreichend Platz für Roboter mit einem Arbeitsraumdurchmesser von etwa 6 m. Um den Versuchsablauf beobachten zu können, wurde eine Schiebetür aus Plexiglas vorgesehen. Spezielle Vorrichtungen zur Abschirmung gegen Vibrationen sind nicht erforderlich, da das Umfeld des Versuchsstandes ohnehin ausreichend vibrationsarm ist. Durch die Einhausung ist überdies ein ausreichender Schutz vor direkter Sonneneinstrahlung gewährleistet.



*Bild 3.3: Temperaturkammer als Versuchsumgebung*

Temperaturänderungen werden durch eine handelsübliche Klimaanlage, bestehend aus einem Wasserkühler sowie zwei Wärmetauschern (je 5 kW) mit integrierten Heizelementen (je 4 kW), ermöglicht. Diese gestatten über die geforderten 35°C hinausgehende Maximaltemperaturen bis 42°C. Die minimal erreichbare Temperatur liegt bei 14°C. Die Steuerung der Klimaanlage wird durch eine SPS mit zwei Temperatursensoren ersetzt, welche die Temperatur im Inneren der Kammer in ausreichendem Abstand von der Außenwand in 1 m und 3 m Höhe erfassen. Die Temperatur wird über eine Terminalverbindung auf einem PC aufgezeichnet. Um den Roboterbetrieb mit dem Temperaturverlauf synchronisieren zu können, besitzt die SPS einen Ausgang, der an einen digitalen Eingang der jeweils verwendeten Robotesteuerung angeschlossen werden kann. Mit Hilfe der SPS werden vier unterschiedliche Temperaturprogramme gesteuert:

- Temperaturzyklus mit geregelter Temperaturänderung:  
Abkühlen von Raumtemperatur auf 15°C in 30 Minuten, Halten der Temperatur über 240 Minuten hinweg, Aufheizen von 15°C auf 35°C in 120 Minuten, Halten von 35°C über 360 Minuten hinweg, Abkühlen auf 20°C in 90 Minuten. Danach beginnt automatisch ein neuer Zyklus.
- Kühlen mit maximaler Leistung auf 15°C und zeitlich unbegrenztes Halten der Temperatur.
- Heizen mit maximaler Leistung auf 35°C und zeitlich unbegrenztes Halten der Temperatur.
- Schnellstmögliche Erreichen und zeitlich unbegrenztes Halten einer Temperatur von 20°C.

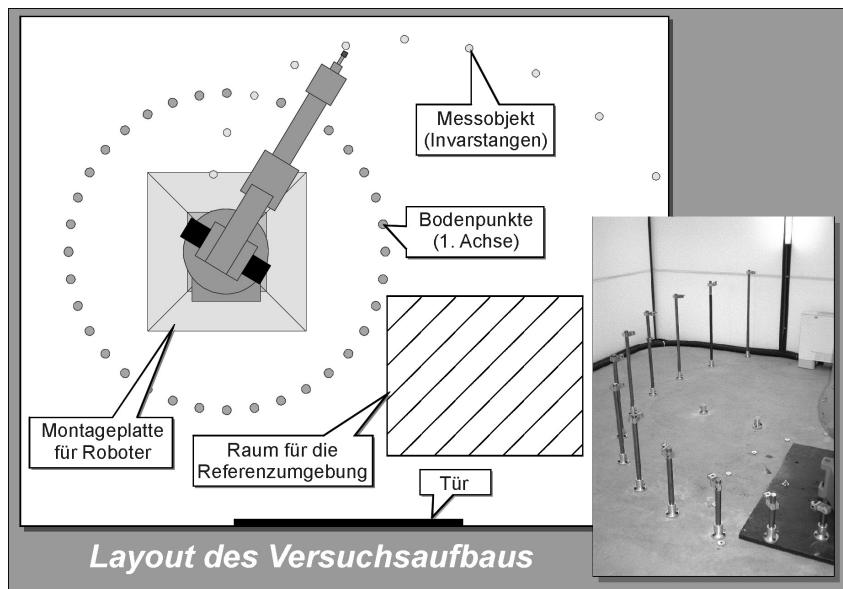


Bild 3.4: Layout des Versuchsaufbaus in der Temperaturkammer

Der zu untersuchende Roboter wird über eine Stahlplatte, auf der beliebige Bohrbilder für unterschiedliche Robotertypen gefertigt werden können, mit dem Betonboden verschraubt. Der in der realen Produktion für das Werkstück genutzte Arbeitsraum des Roboters wird durch an Invarstangen (Ni36) befestigte Messmerkmale (Aluminiumwürfel mit einer Bohrung) aufgespannt, die orgelpfeifenartig in unterschiedlichen Abständen (250 mm-Schritte von 500 mm bis 3500 mm) und Höhen (100 mm-Schritte von 100 mm bis 1000 mm) angeordnet sind.

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

von 300 mm bis 1400 mm) in 10°-Schritten um den Roboter herum aufgestellt sind (Bild 3.4). Durch diese Anordnung ist es möglich, den gesamten Arbeitsraum des Roboters von sockelnah bis sockelfern sowie einen großen Bereich der ersten Achse abzudecken. Dadurch, dass die Messpunkte mehrfach angefahren werden können, wird es möglich, ausreichend viele, unterschiedliche Achskonfigurationen zu überprüfen. Durch die Verwendung von Invarstahl mit einem niedrigen Wärmeausdehnungskoeffizienten ( $\alpha=1,5 \cdot 10^{-6} \text{K}$ ) ist die Temperaturstabilität der Messmerkmale in guter Näherung sichergestellt.

Durch die Anordnung ist es darüber hinaus möglich, den Roboter ohne Umbaumaßnahmen am Versuchsaufbau mit einem externen Messsystem, wie beispielsweise einem Lasertracker, zu vermessen. Neben dem Messaufbau bleibt seitlich des Roboters ausreichend Platz zum Aufbau der späteren Referenzumgebungen.

Der Aufbau orientiert sich somit weitgehend an einem Layout, wie es auch in Anwendungen in der Industrie denkbar ist. Die Invarstangen repräsentieren hierbei den Arbeitsraum für die eigentliche Bearbeitungs- oder Handhabungsaufgabe. Räumlich getrennt davon befindet sich neben dem Roboter auf dem gemeinsamen Betonfundament die Referenzumgebung.

#### **3.2.3 Zusammenfassung**

Zur Untersuchung des Roboters wird eine Versuchsumgebung benötigt, in der relevante Betriebseinflüsse, wie beispielsweise die Umgebungstemperatur, gezielt verändert werden können. Hierfür wurde eine Temperaturkammer aufgebaut, in der mehrstündige Zyklen mit Temperaturen zwischen 15°C und 35°C realisiert werden können. Das Messobjekt wird durch an Invarstangen befestigte Messmerkmale temperaturstabil repräsentiert und ermöglicht eine ausreichende Abdeckung des kartesischen und des Achsarbeitsraums des zu untersuchenden Roboters. Der Raum für die spätere Referenzumgebung befindet sich vom Messobjekt räumlich getrennt neben dem Roboter.

### **3.3 Auswahl einer Kalibriersoftware**

Um eine Kompensation auf der Basis einer Standardkalibriersoftware aufzubauen, muss diese diverse zusätzliche Anforderungen erfüllen, damit:

- die notwendigen Schnittstellen realisiert werden können,
- die geplante Parameterreduktion realisierbar ist,
- die Übertragbarkeit auf beliebige Robotertypen möglich ist und
- die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen eingehalten werden können.

Auf die daraus abzuleitenden Einzelanforderungen wird nachfolgend eingegangen.

#### 3.3.1 Anforderungen an die einzusetzende Kalibriersoftware

Um die geplante Kompensationsmethode realisieren zu können, müssen bei der Auswahl der Kalibriersoftware insbesondere die nachfolgend beschriebenen Punkte beachtet werden:

##### **Einfache Modellbildung und Robotertypunabhängigkeit**

Die Software muss über ein Werkzeug verfügen, mit dem es einfach möglich ist, beliebige Roboter zu modellieren. Hierfür müssen entsprechende Bibliotheken mit vordefinierten Kinematikelementen vorhanden sein, die durch den Anwender beliebig kombiniert und parametriert werden können.

##### **Offene Schnittstellen**

Sämtliche Daten, die von der Software als Eingangsdaten (nominale Modelle, Pose-daten, Messdaten) benötigt oder als Ausgangsdaten (identifizierte Modelle, korrigierte Posedaten) generiert werden, müssen automatisiert und unverschlüsselt editierbar sein.

##### **Möglichkeit der Überwachung einzelner Parameter**

Jeder mit Hilfe des Modellierungstools generierte Roboterparameter muss einzeln überwachbar sein, um eventuelle Betriebseinflüsse auf seinen Wert überprüfen zu können. In diesem Zusammenhang sind nicht nur Änderungen des Absolutwertes relevant, sondern auch deren Wirkung auf das Positionierergebnis (TCP-Effekt). Nur anhand dieser z. B. mit Hilfe von Skalierungsfaktoren berechenbaren Information kann entschieden werden, ob ein Parameter einen relevanten Einfluss auf die Genauigkeit der TCP-Positionierung nimmt.

##### **Freie Auswahl zu kalibrierender Parameter**

Da eine Parameterreduktion nur dann sinnvoll ist, wenn nach der Reduktion auch die Möglichkeit besteht, ausschließlich die übrig gebliebenen Parameter gezielt zu identifizieren, muss die Kalibriersoftware dem Anwender die Möglichkeit bieten, jeden beliebigen Parameter unabhängig von anderen zur Parameteridentifikation freizuschalten, d. h. in die Liste der zu identifizierenden Parameter aufzunehmen. Damit ist auch sichergestellt, dass die Berechnung von Veränderungen im Robotermodell aufgrund von Betriebseinflüssen auf tatsächlich beeinflusste Parameter beschränkt werden kann.

##### **Hohe Rechengeschwindigkeit**

Während es bei der einmaligen Kalibrierung eines Roboters im Rahmen der Inbetriebnahme innerhalb weitläufiger Grenzen irrelevant ist, wie lange die Parameter-

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Identifikation und die Posenkorrektur dauern, müssen bei der Kompensation Taktzeiten eingehalten werden. Sämtliche notwendigen Berechnungen dürfen hierbei insgesamt nur wenige Sekunden in Anspruch nehmen.

#### **Genauigkeit**

Bei einer Kalibrierung zur Steigerung der Absolutgenauigkeit eines Roboters ist es in der Regel ausreichend, ein Modell zu identifizieren, das im gesamten Arbeitsraum noch Abweichungen gegenüber dem realen Roboter im Bereich weniger zehntel Millimeter aufweist. Im Falle einer Kompensation hingegen müssen die maximalen, temperaturbedingten Abweichungen im Bereich der Wiederholgenauigkeit des Roboters liegen. Dementsprechend muss die Software sowohl in der Lage sein, bei geeigneten Ausgangsdaten maximale Residuen an den Messpunkten bei der Parameterermittlung von unter 0,1 mm einzuhalten, als auch Korrekturposen in der maximal vom Roboter auflösaren Genauigkeit (etwa 0,01 mm) zu berechnen. Andernfalls ist bereits von vorne herein ausgeschlossen, dass das Ziel einer Wiederholgenauigkeit inklusive Temperaturdrift von maximal 0,2 mm erreicht werden kann.

#### **Zuverlässigkeit**

Die Kalibriersoftware muss in dreierlei Hinsicht zuverlässig sein:

- Sie muss im Betrieb stabil laufen und darf nicht zu Systemabstürzen bzw. -ausfällen neigen.
- Sie muss bei der Parameteridentifikation zuverlässig konvergieren.
- Bei der Berechnung von Korrekturposen dürfen keine Fehler auftreten.

Ist eine dieser Bedingungen nicht erfüllt, kann es zu Bandstillständen, Messfehlern oder im ungünstigsten Fall zu Kollisionen des Roboters mit dem Messobjekt oder mit Anlagenkomponenten kommen.

#### **Unabhängigkeit vom Messsystem**

Hier spielen vor allem folgende Aspekte eine Rolle:

- Die Übergabe von Messdaten darf nicht an eine spezielle Hardwareschnittstelle gebunden sein, die nicht von allen in Frage kommenden Messsystemen bereitgestellt werden kann. Andernfalls entstehen bei jeder Ankopplung an ein neues Messsystem Zusatzkosten für die Hardwareadaptierung. Ebenso sind nicht offene Softwareschnittstellen zu vermeiden.
- Messdaten sollten in beliebigen Koordinatensystemen bereitgestellt werden können, idealerweise in dem des Roboters. Bereits geringe Abweichungen in einer Koordinatentransformation können zu großen Abweichungen bei der späteren Parameterberechnung führen. Durch die Ermittlung sämtlicher Transformationen

mit Hilfe eines einzigen Systems verringert sich zum einen die Anzahl möglicher Fehlerquellen, zum anderen werden die Berechnungen leichter nachprüfbar.

- Es sollten Messdaten mit beliebigen Freiheitsgraden zwischen 1D und 6D verarbeitet werden können, mindestens jedoch 3D-Daten.

Sind diese Punkte nicht erfüllt, so reduziert sich die angestrebte allgemeine Anwendbarkeit des Kompensationsverfahrens auf beliebige Applikationen in erheblichem Maße.

### Lizenzgebühren

Durch die Höhe der Lizenzgebühren für die eingesetzte Kalibriersoftware darf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens nicht in Frage gestellt werden.

#### 3.3.2 Zusammenfassung

Bei der Auswahl einer Kalibriersoftware müssen insbesondere folgende Punkte beachtet werden:

- einfache Modellbildung,
- Unabhängigkeit vom Robotertyp und vom Messsystem,
- offene Schnittstellen,
- die Möglichkeit zur Überwachung einzelner Parameter,
- eine freie Auswahl zu kalibrierender Parameter,
- hohe Rechengeschwindigkeit,
- ausreichende Genauigkeit,
- große Zuverlässigkeit sowie
- niedrige Lizenzgebühren.

## 3.4 Modellierung des Roboters

Jede Kompensation, ebenso wie jede Kalibrierung eines neuen Robotertyps, beginnt mit der Modellierung. Voraussetzung für deren Durchführung ist, dass alle benötigten Informationen verfügbar sind (vgl. hierzu Abschn. 2.6.3, Abb. 2.11).

Die Modellierung des Roboters zu Kompensationszwecken unterscheidet sich grundsätzlich nicht von derjenigen zur Absolutkalibrierung. Jedoch kann durch vorherige Festlegung von Konventionen, die den Datenaustausch einer Applikation mit der Kalibriersoftware beeinflussen, die Übertragbarkeit auf neue Robotertypen und Anwendungen vereinfacht werden. Dies betrifft im einfachsten Fall die Wahl definierter Pfade und Bezeichnungen für Dateien, die als Schnittstelle dienen. Diese Konventionen können nur im jeweiligen Einzelfall festgelegt werden.

#### 3.5 Verfahren zur Parameterreduktion

Da die Anzahl der notwendigen Eingangsdaten unmittelbar von der Menge der zu identifizierenden Parameter abhängig ist, muss eine Parameter- oder Modellreduktion durchgeführt werden. Das Ziel ist es hier, eine Methode zu finden, die möglichst anhand einer einzigen Messreihe einen Überblick über das Temperaturverhalten aller Parameter liefert.

Die im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Vorgehensweise zur Parameterreduktion gliedert sich in folgende Schritte (Bild 3.5):

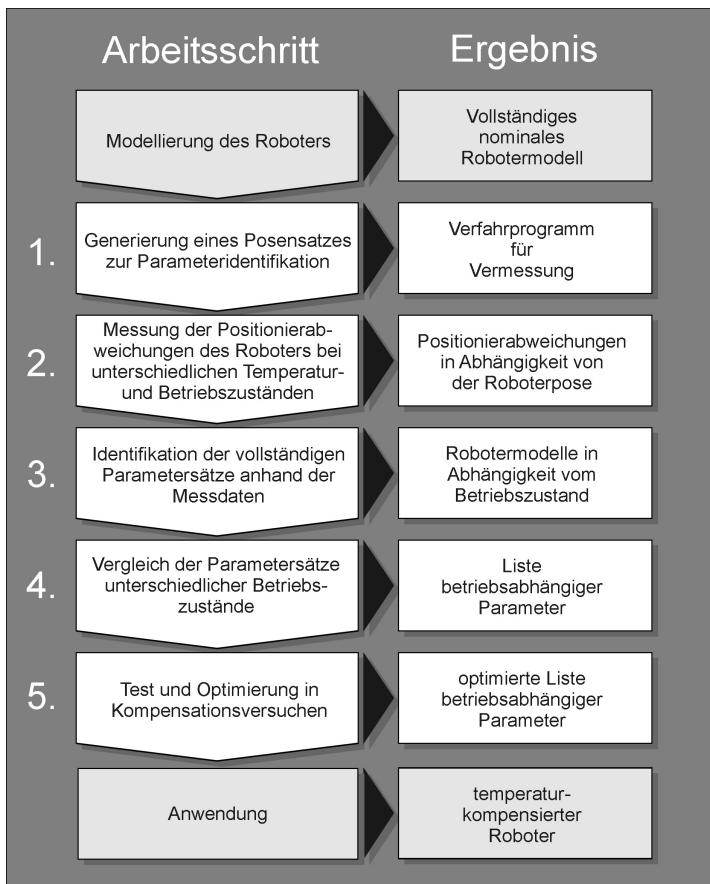


Bild 3.5: Vorgehensweise zur Parameterreduktion

1. Aufbauend auf der Modellierung des Roboters wird für diesen, wie im Rahmen einer modellbasierten Roboterkalibrierung üblich, ein Posensatz zur Parameteridentifikation des vollständigen Modells generiert.
2. Mit Hilfe dieses Posensatzes wird der Roboter in einer Temperaturkammer bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen vermessen.
3. Anhand der Messdaten erfolgt mit Hilfe der Kalibrersoftware eine Parameteridentifikation für die unterschiedlichen Betriebszustände.
4. Die Parametersätze werden anschließend (zum Teil mit statistischen Methoden) miteinander verglichen. Als Ergebnis liegt eine Liste der Parameter vor, die sich in Abhängigkeit vom Betriebszustand verändert haben.
5. Im letzten Schritt wird bereits im Rahmen von Kompensationsversuchen der ermittelte Parametersatz optimiert.

Die einzelnen Schritte dieser Vorgehensweise werden nachfolgend detailliert beschrieben.

#### **3.5.1 Generierung eines Posensatzes zur Parameteridentifikation**

Zunächst wird ein Posensatz mit einer für die Kalibrierung ausreichenden Anzahl von Einzelposen (ca. 100 bis 120, vgl. hierzu Abschnitt 2.6.3) generiert. Diese müssen hierbei den in SCHRÖER (1993) definierten Gleichverteilungs- und Verschiedenheitskriterien (vgl. hierzu Abschnitt 3.6.4.3) genügen. Soll die anschließende Vermessung mit einem externen Messsystem (z. B. einem Lasertracker) erfolgen, so kann dieser Schritt mit Unterstützung durch die Kalibrersoftware umgesetzt werden.

Soll der auch zur Kompensation eingesetzte Referenzkörper in Verbindung mit einem am Roboter angebrachten Sensor verwendet werden, so kann die in Abschnitt 3.6.4 beschriebene Simulation sowohl zur Ermittlung der Position des Referenzkörpers im Arbeitsraum als auch zur Generierung der Referenzposen herangezogen werden. Dies ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn am Referenzkörper auch genügend unterschiedliche Posen darstellbar sind und diese eine ausreichende Identifizierbarkeit des für eine herkömmliche Kalibrierung verwendeten Parametersatzes sicherstellen, was wiederum anhand der Kondition der Jacobi-Matrix überprüft werden kann (vgl. hierzu Abschn. 3.6.4.4). Sind diese Grundvoraussetzungen nicht erfüllt, muss zwingend auf ein externes Messsystem zurückgegriffen werden.

Die Kalibrierung am Referenzkörper hat den Vorteil, dass die Untersuchungen unter betriebsnahen Bedingungen erfolgen, da ausschließlich Komponenten zum Einsatz kommen, die auch im späteren Betrieb vorhanden sind. Erfolgt die Untersuchung mit Hilfe eines externen Messsystems, so kann sich das Betriebsverhalten des Mess-

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

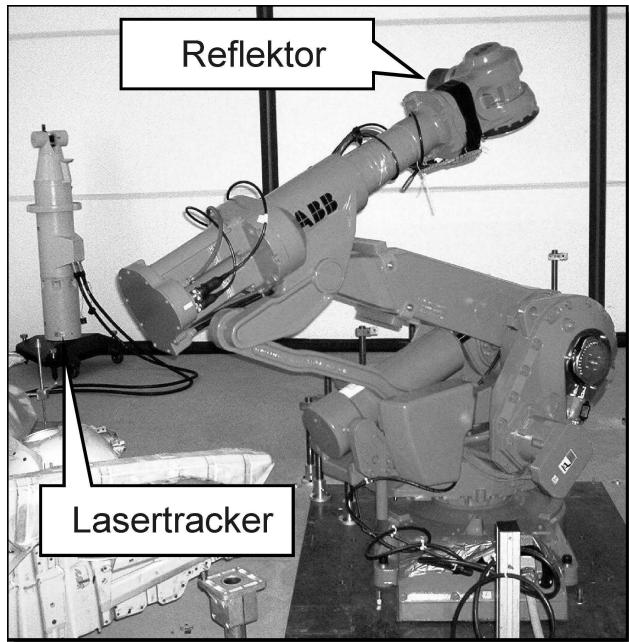
---

systems beispielsweise unter Temperatureinfluss störend auf das Versuchsergebnis auswirken.

#### **3.5.2 Vermessung der Positionierabweichungen des Roboters bei unterschiedlichen Betriebsbedingungen**

Um die zur Ermittlung der betriebsabhängigen Parameter notwendigen Eingangsdaten zu erhalten, wird die TCP-Position des Roboters an den zuvor ermittelten Messposen mehrfach bei unterschiedlichen Betriebszuständen vermessen (Bild 3.6).

Zur Vermessung des TCP hat sich, unabhängig vom verwendeten Messsystem, eine Vorgehensweise bewährt, bei der der Roboter in der Temperaturkammer kontinuierlich ein Messprogramm durchläuft. Die Temperatur in der Kammer wird hierbei zwischen 15° und 35°C entsprechend Abschn. 3.2.2 variiert.



*Bild 3.6: Messung der Positionierabweichungen eines Roboters mit einem Lasertracker*

Nach der Vermessung müssen die Messdaten, entsprechend der Anzahl der verwendeten Kalibrierpositionen, zu Messdatensätzen zusammengefasst und in ein von der verwendeten Kalibriersoftware lesbares Format konvertiert werden.

#### **3.5.3 Aussagen zur grundsätzlichen Kompensierbarkeit**

Anhand der Messdatensätze können zunächst Aussagen über die prinzipielle Kompensierbarkeit des Roboters getroffen werden. Eine der wichtigsten Voraussetzungen für ein gutes Kompensationsergebnis ist die Wiederholgenauigkeit des Roboters und des Messsystems. Durch entsprechende Auswertung der Messdaten kann auch auf diese Größen geschlossen werden. Hierzu muss der Verlauf der Messungen an den einzelnen Messpunkten betrachtet werden. Da in die Wiederholgenauigkeit keine systematischen Fehler aufgrund beispielsweise von Temperaturschwankungen eingehen dürfen, muss ein Messzeitraum gefunden werden, in dem sich der Roboter in einem stationären Zustand befand und somit keine Veränderungen der systematischen Abweichungen mehr aufgetreten sind. Ideal ist eine Messreihe mit 30 aufeinanderfolgenden Messungen (entsprechend DIN EN ISO 9283 und IRIS 1998) in stationärem Zustand, da hierdurch eine ausreichende, statistische Sicherheit gewährleistet ist. Grundsätzlich gilt: Um überhaupt sinnvoll kompensieren zu können, muss der systematische Anteil der betriebsbedingten Abweichungen deutlich größer sein als die Streubreite, d. h. die zufälligen Anteile der Abweichungen.

#### **3.5.4 Parameteridentifikation und Vergleich der Parametersätze unterschiedlicher Betriebszustände**

Mit Hilfe der Messdatensätze können nun im Rahmen einer Parameteridentifikation mit der Kalibriersoftware (vgl. hierzu Abschn. 2.6.3.1, Formeln 15ff) die einzelnen Parametersätze für die unterschiedlichen Betriebszustände berechnet werden. Diese müssen in einer Tabelle zusammengefasst werden, in der die zeitliche Entwicklung jedes Einzelparameters nachverfolgt werden kann. Abgesehen von Achslängen ist eine unmittelbare Auswertung der Absolutbeträge der Parameter nicht sinnvoll, da diese den Einfluss eines Parameters auf das Positionierergebnis nicht berücksichtigt. Dementsprechend müssen die Parameter noch normiert werden. Zur Normierung wird die über alle bei der Vermessung berücksichtigten Posen gemittelte Ableitung der Vorwärstransformation des Roboters nach dem jeweils betrachteten Parameter herangezogen, da diese den gemittelten Einfluss eines Parameters im betrachteten Arbeitsraum (vgl. hierzu: Abschn. 2.6.3.1, Formel 22: Gemittelter Skalierungsfaktor) darstellt (SCHRÖER 1993). Der Wert des Skalierungsfaktors wird dann mit der Differenz des Absolutwertes des jeweiligen Parameters zu seinem Nominalwert multipliziert, wodurch man einen Überblick über die Auswirkung der

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Parameteränderungen der Einzelparameter in Form des TCP-Effektes erhält (vgl. hierzu: Abschn. 2.6.3.1, Formel 23: Mittlerer Einfluss einer Parameterdifferenz auf die TCP-Position). Die Kalibriersoftware RoboCal beispielsweise gibt sowohl diesen Wert als auch den zugehörigen Skalierungsfaktor jeweils in einer Datei aus.

Wird die Normierung nicht berücksichtigt, so führt dies zwangsläufig zu Fehlinterpretationen: In fast jedem RobotermodeLL sind Parameter enthalten, die in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebszustand zwar um ein Vielfaches ihres Ausgangswertes schwanken, jedoch hinsichtlich der zugehörigen Veränderung des Positionierergebnisses praktisch kaum einen Einfluss haben. Als Beispiel seien hier die Elastizitäten der Armelemente angeführt. Kommt es zu einer Durchbiegung eines Armelements beispielsweise um 1/1000 mm, so ist dieser Wert in der Regel gegenüber anderen Parametern vernachlässigbar, insbesondere wenn er deutlich unter der Auflösung des verwendeten Messsystems liegt. Sowohl durch Messstreuungen als auch durch das verwendete, mathematische Näherungsverfahren kann es vorkommen, dass diesem Parameter aufgrund der Berechnung in einer Folgemessung ein Effekt von beispielsweise ebenfalls vernachlässigbaren 5/1000 mm zugeschrieben wird, obwohl er sich in der Realität möglicherweise überhaupt nicht verändert hat. Die zugehörige Steifigkeit hätte sich somit aufgrund der Berechnung scheinbar auf 1/5 reduziert und würde damit fälschlicherweise als extrem betriebsabhängig eingestuft, obwohl sie eigentlich irrelevant ist. Im Gegensatz hierzu würde die Längenausdehnung beispielsweise eines 1000 mm langen Elements einer Viergelenkkette unterbewertet. Verändert diese ihren Absolutwert beispielsweise um nur 1/100 mm und hätte sich somit nur um 0,001% verändert, so kann dies dennoch aufgrund der Übersetzungsverhältnisse bis zum TCP (Hebelwirkung) zu nicht mehr vernachlässigbaren Positionierfehlern von mitunter weit über 0,1 mm führen.

In der somit auf die Auswertung des TCP-Effektes beschränkten Tabelle mit Parametersätzen werden ausschließlich die Abweichungen von einem für jeden Parameter zu ermittelnden Bezugswert betrachtet. Als Bezugswert eignet sich insbesondere das Minimum eines identifizierten Parameters, da hierdurch die Streubreite des Parameters unmittelbar als maximale Abweichung auch in graphischen Darstellungen erkennbar ist.

Aus einer graphischen Darstellung der einzelnen Parameter über der Zeit, wie sie exemplarisch in Bild 3.7 dargestellt ist, können mehrere Informationen gewonnen werden:

- Anhand des Gesamtbildes ist erkennbar, ob die Identifizierbarkeit der Parameter anhand des bei der Vermessung verwendeten Posensatzes ausreichend war. War der Posensatz zur Ermittlung der zur Identifikation freigegebenen Parameter ungeeignet oder sind zu viele Parameter freigegeben, so sind bei Parametern mit ähnlichem Einfluss auf das Positionierergebnis starke Streuungen zu beobachten.

Dieser Effekt ist bei ausreichender Konditionierung (Kondition der Jacobi-Matrix < 120) nicht mehr zu beobachten.

- Parameter mit stark systematisch beeinflusstem Verhalten können unmittelbar der Graphik entnommen werden. Ihr Verlauf entspricht einer Aufwärmkurve. In Verbindung mit den Maximalwerten ist hierbei sehr einfach feststellbar, welche Parameter den größten Einfluss haben.
- Gegebenenfalls vorhandene Fehlidentifikationen können leicht erkannt werden, da diese bei allen Parametern zu ungewöhnlichen Abweichungen führen und somit auch optisch auffällig aus dem Bild hervortreten.

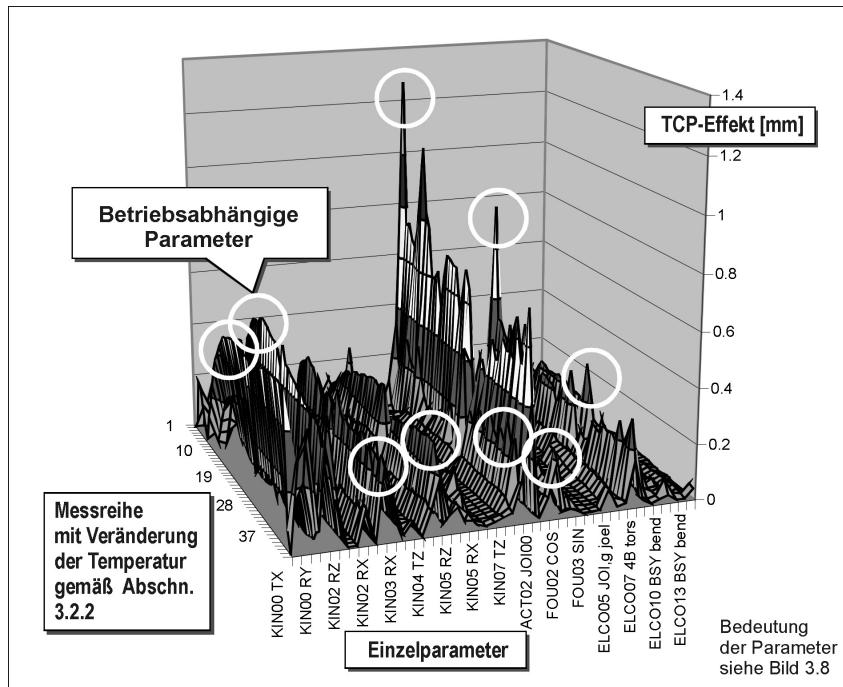


Bild 3.7: Beispiel einer graphischen Darstellung des Parameterverlaufs in Abhängigkeit vom Erwärmungszustand

Da die rein optische Auswertung stark subjektiv beeinflusst ist, muss neben der graphischen Beurteilung auch eine quantitative Auswertung der Daten erfolgen. In Versuchen hat sich eine Auswertung der Streubreite sowie der Standardabweichung

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

und der mittleren Abweichung von einem Bezugswert (z. B. Wert eines Parameters im Ausgangszustand) bewährt. Diese sollte mit betrachtet werden, um Parameter auszuschließen, die beispielsweise aufgrund einer einzigen Identifikationsabweichung eine große Streubreite aufweisen. Um einen Überblick über die Temperaturabhängigkeit zu bekommen, können die Parameter dann einfach nach den oben genannten Kriterien sortiert werden. Bei der späteren Kompensation werden nur diejenigen berücksichtigt, deren TCP-Abweichungen einen festgelegten prozentualen Anteil des Effektes des am stärksten betriebsabhängigen Parameters überschreiten.

Wie groß dieser Prozentsatz ist, hängt unter anderem auch von den Versuchsbedingungen ab. Je kontrollierter die Umgebungsbedingungen bei der Vermessung des Roboters sind, desto deutlicher grenzen sich stark betriebsabhängige Parameter von weniger betriebsabhängigen ab. Bei einem Vergleich der Auswertungen zweier konstruktiv sehr ähnlicher Roboter, die in der späteren Kompensation mit annähernd identischen Parametersätzen kompensiert wurden, zeigte sich, dass bei dem in Vorversuchen in einem unisolierten Zelt mit Hilfe eines Heizlüfters erwärmten Roboter beinahe 70% der Parameter scheinbar stark betriebsabhängig waren. Der Temperaturverlauf im Zelt war einerseits von großen Schwankungen aufgrund der Ein- und Ausschaltzyklen des Heizlüfters in Verbindung mit der fehlenden Isolierung sowie einem großen Temperaturgradienten zwischen Boden und Decke (bis zu  $5^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) bestimmt. Viele der auffälligen Parameter wiesen jedoch kein systematisches Verhalten auf, sondern streuten lediglich sehr breit, was in diesem Fall aufgrund einer guten Konditionierung nicht auf eine schlechte Identifizierbarkeit der Parameter zurückzuführen war. Bei dem in der Temperaturkammer untersuchten Roboter hingegen zeigten nur 20% der Parameter eine ausgeprägte Betriebsabhängigkeit. Diese äußerte sich jedoch in diesem Fall als überwiegend systematischer Effekt. Ein instationäres Umfeld führt somit ebenfalls zu einer schlechteren Identifizierbarkeit der Einzelparameter und erschwert somit auch die Erkennung stark betriebsabhängiger Parameter.

Bei den in der Temperaturkammer untersuchten Robotern konnten in den meisten Fällen diejenigen Parameter vernachlässigt werden, die weniger als 10% des maximalen Effektes des am stärksten betriebsabhängigen Parameters aufwiesen. Bei dem im unisolierten Zelt untersuchten Roboter lag die entsprechende Schranke bei 30% (Ziel war eine Reduzierung auf maximal 15 der insgesamt 80 Parameter).

Temperatureinflüsse auf Messsysteme wie beispielsweise Lasertracker wirken sich in der Parameterauswertung hauptsächlich wie eine Veränderung der Transformation vom Roboterfuß zur ersten Achse aus. Sie verfälschen das Ergebnis zwar quantitativ, haben jedoch qualitativ kaum Auswirkungen.

Die als Ergebnis der Auswertung vorliegende Liste betriebsabhängiger Parameter wird anschließend genutzt, um die entsprechenden Parameter im Robotermodell zur

Identifikation freizuschalten. Die Werte freigeschalteter Parameter werden dann von der Identifikationssoftware bei der Parameteridentifikation neu berechnet. Bei nicht freigeschalteten Parametern wird grundsätzlich der jeweils eingetragene Start- oder Nominalwert verwendet.

#### 3.5.5 Modelloptimierung für die Kompensation

In Versuchen hat sich gezeigt, dass eine alleinige Berücksichtigung der in Abschn. 3.5.4 als stark betriebsabhängig identifizierten Parameter nur unzureichende Kompensationsergebnisse liefert. Durch die gewählte Vorgehensweise wird eine Vielzahl von Parametern mit jeweils geringem, betriebsbedingtem Einfluss auf das Positionierverhalten (unterhalb der vorgegebenen Schwelle) für die Parameteridentifikation gesperrt und steht somit für die Zuordnung von Abweichungen nicht mehr zur Verfügung. In ihrer Summe haben diese Parameter dennoch einen nennenswerten, betriebsbedingten Effekt auf das Positionierverhalten des Roboters am TCP. Um ihre Anteile insgesamt berücksichtigen zu können, muss daher eine ausreichende Durchgängigkeit der im Rahmen der Kompensation zu identifizierenden Parameter vom Robotersockel bis zum TCP sichergestellt werden. Dies kann realisiert werden, indem hierzu fehlende Parameter im Modell zur Identifikation zusätzlich freigeschaltet werden. Hierfür genügt eine Betrachtung der Vektorkette einschließlich eventuell vorhandener, geschlossener Teilketten.

Als hilfreich für die oben beschriebene Ergänzung des Modells hat sich eine eigens entwickelte, graphische Darstellung des RobotermodeLLs (Bild 3.8) erwiesen, bei der alle im Modell vorhandenen Parameter den als Vektorkette dargestellten Kinematikelementen zugeordnet werden. Ohne dieses Hilfsmittel ist die Modelloptimierung, beispielsweise bei Verwendung der Kalibriersoftware RoboCal, äußerst schwierig, da sich die Belegung der Koordinatenachsen im Modell von Kinematik-Element zu Kinematik-Element ändert und hierdurch die Zuordnung der Parameter zum Kinematikmodell teilweise nur sehr umständlich möglich ist. Die Verwendung entsprechender graphischer Hilfsmittel ist auch bei der Modellierung des Roboters empfehlenswert, da hierdurch die bei der Modelloptimierung für die Grundkalibrierung durchzuführende Parameterreduktion transparenter gestaltet werden kann. Die Modelloptimierung nach SCHRÖER (1993) ist grundsätzlich erforderlich, um nicht oder schlecht identifizierbare Parameter für die Identifikation zu sperren.

Nach der Erweiterung des Modells um die zur Sicherstellung der Durchgängigkeit notwendigen Parameter muss die Identifizierbarkeit des überarbeiteten Parametersatzes anhand des noch zu ermittelnden Referenzposensatzes (Abschn. 3.6.4) überprüft werden.

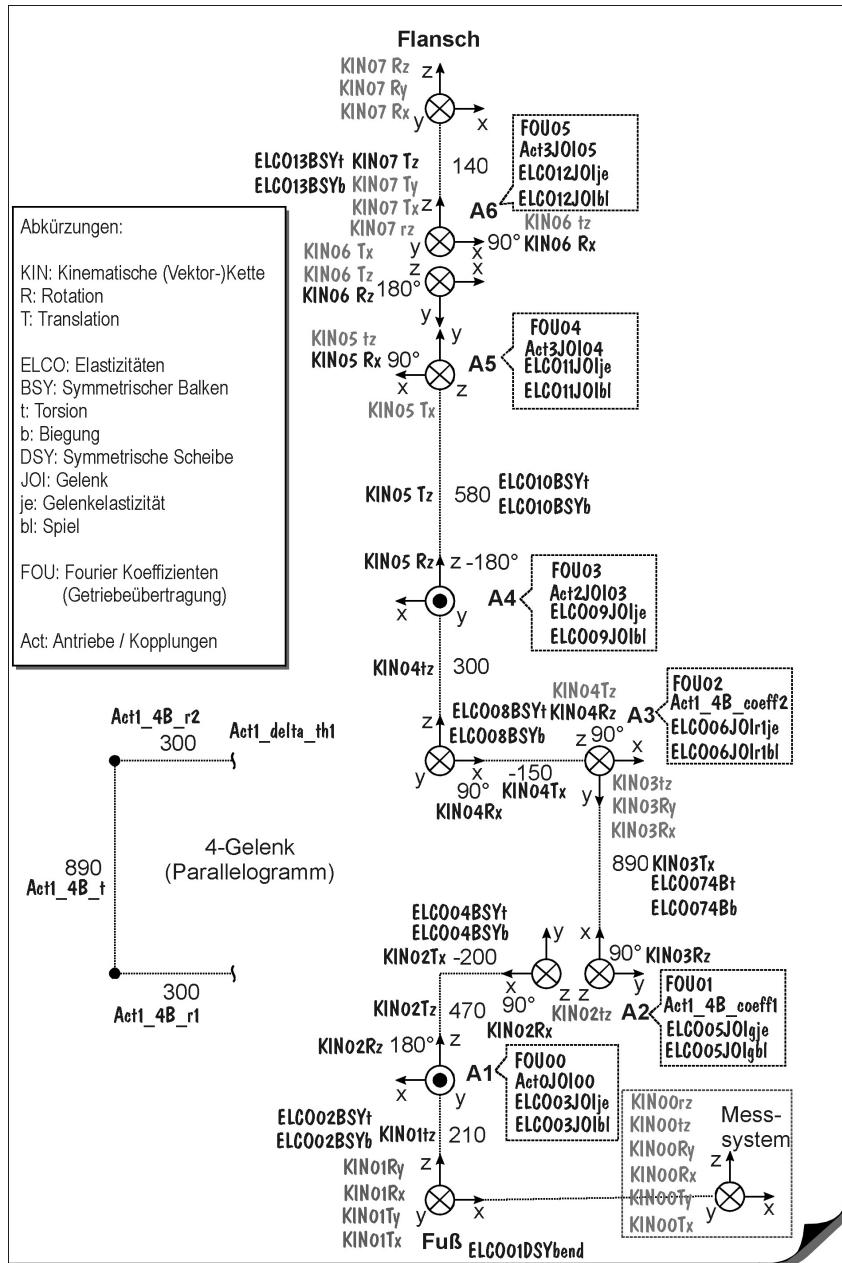


Bild 3.8: Beispiel einer graphischen Darstellung aller Roboterparameter

Als Bewertungskriterium dient die Kondition der Jacobi-Matrix (vgl. hierzu Abschn. 2.6.3.1, Formel 18). Diese ist definiert als der Quotient aus dem größten und dem kleinsten Singulärwert. Sie kann als Maß für die Konvergenz der Zielfunktion (Abschn. 2.6.3.1, Formel 17) gesehen werden. Liegt die Kondition der Jacobi-Matrix unter 120 (dies ist ein von Mathematikern empirisch ermittelter Erfahrungswert; SCHRÖER 1993), so kann der Parametersatz für erste Kompensationsversuche verwendet werden. Ist dies nicht der Fall, so müssen gegebenenfalls einzelne Parameter, die zu der schlechten Identifizierbarkeit geführt haben, wieder für die Identifikation gesperrt werden. Die sinnvolle Auswahl der zu sperrenden Parameter muss experimentell überprüft werden.

Durch die Erweiterung des Modells um die für die Durchgängigkeit fehlenden Parameter können auch Einflüsse, die bei der Untersuchung eines Roboters nicht betrachtet wurden, zuverlässig aufgefangen werden.

Die abschließende Überprüfung der Eignung des Modells erfolgt unmittelbar in Kompensationstests in der Temperaturkammer (Bild 3.9). Hierzu wird mit dem Roboter ein temperaturstabil aufgebautes Objekt vermessen und regelmäßig eine Nachkalibrierung anhand der am Referenzkörper gemessenen, aktuellen Temperaturl drift durchgeführt. Um die Umgebungsbedingungen zu verändern, kann in der Temperaturkammer das gleiche Programm verwendet werden wie für die in Abschnitt 3.5.2 beschriebene Vermessung des Roboters.



Bild 3.9: Kompensationstest in der für die vorliegende Arbeit zur Verfügung stehenden Temperaturkammer

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Zeigt sich hierbei, dass die Kompensation ausreichend genaue Werte liefert, so kann die Untersuchung abgeschlossen werden. Andernfalls muss das Modell experimentell weiter optimiert werden. Zu diesem Zeitpunkt sollte jedoch zumindest eine deutliche Reduzierung der betriebsabhängigen Abweichungen erkennbar sein. Ist dies nicht der Fall, so muss die gesamte Einrichtung der Kompensation überprüft werden.

#### **3.5.5.1 Experimentelle Optimierung**

Zur weiteren Optimierung des Parametersatzes empfiehlt es sich, den Roboter maximal zu erwärmen und anschließend zu überprüfen, an welchen Messpunkten und in welcher Koordinatenrichtung zu große Abweichungen aufgetreten sind.

Anschließend kann anhand des graphisch dargestellten Roboter-Modells (Bild 3.8) überlegt werden, welche Parameter prinzipiell zu den beobachteten Abweichungen führen können. Diese werden nun während des Betriebes abwechselnd zur Identifikation freigeschaltet, bis die Ursachen für die Abweichungen gefunden sind. Hierbei muss jedes Mal auch die Identifizierbarkeit des Parametersatzes geprüft werden. Wichtig ist, dass unter allen Umständen vermieden wird, mehrere Parameter mit ähnlicher Wirkung auf das Verhalten des Roboters im Arbeitsraum gleichzeitig freizuschalten, da dies in den meisten Fällen zu einer Verschlechterung des Kompensationsergebnisses führt.

Lässt sich hierdurch keine eindeutige Verbesserung erzielen, so kann dies ein Hinweis darauf sein, dass bereits Überschneidungen hinsichtlich der Wirkungen einzelner Parameter vorliegen. Es empfiehlt sich dann, zunächst zu überprüfen, welche Parameter am schlechtesten identifizierbar sind und diese abwechselnd für die Identifikation zu sperren. Ob die Sperrung erfolgversprechend ist, lässt sich durch die gleichzeitige Überwachung der Veränderung der Kondition der Jacobi-Matrix abschätzen. Sinkt der Wert der Kondition deutlich, so ist dies ein Hinweis auf einen Schritt in die richtige Richtung.

Diese Vorgehensweise kann folgendermaßen begründet werden:

Durch das zur Parameteridentifikation verwendete mathematische Näherungsverfahren kann es zu Fehlidentifikationen dergestalt kommen, dass einzelne, am Roboter auftretende Effekte, die eigentlich auf das Zusammenwirken mehrerer Parameter zurückzuführen sind, einem einzelnen Parameter zugerechnet werden. Dies ist insbesondere dann möglich, wenn anhand des verwendeten Referenzposensatzes die Gelenkarbeitsräume der einzelnen Achsen oder auch der kartesische Arbeitsraum nur unzureichend abgedeckt werden. Posen, die eine exaktere Zuordnung der Effekte zu den einzelnen Parametern ermöglichen würden, sind dann als Eingangsdaten für die Kompensation nicht verfügbar. Geht der vom Roboter für die eigentliche Bearbeitungsaufgabe genutzte Gelenkarbeitsraum nicht über den durch die Referenzposen

abgedeckten Bereich hinaus, so hat dieser Umstand keine Auswirkung auf die erreichbare Genauigkeit. Sollen jedoch auch Posen kompensiert werden, die deutlich außerhalb des durch die Referenzposen erfassten Bereiches liegen, so kann dies zu unerwünschten Abweichungen führen.

In diesem Fall hat es sich häufig als sinnvoll erwiesen, den Parameter, dem bei der Parameteridentifikation der Haupteffekt zugeschlagen wird, für die Identifikation zu sperren. Hiervon sind in erster Linie solche Parameter betroffen, die eine unmittelbare Verschiebung oder Rotation des Roboter-Basiskoordinatensystems gegenüber der Referenzumgebung oder vergleichbare Effekte beschreiben. In der Regel ist dies die Transformation vom Roboter-Basiskoordinatensystem zur ersten Achse.

Sollen beispielsweise die Parameter einer Sechsachs-Kinematik anhand von Messdaten, die an einem neben dem Roboter angebrachten Referenzkörper gemessen wurden, identifiziert werden, so kann folgendes passieren: Durch beispielsweise die elastische Verformung der Armelemente aufgrund von Gravitationseinflüssen kommt es an den Messpunkten am Referenzkörper zu Positionierabweichungen. Aufgrund der Lage des Referenzkörpers treten diese Abweichungen an allen Referenzpunkten in etwa gleicher Ausprägung auf und haben, wie nicht anders zu erwarten, grundsätzlich einen großen Anteil in Wirkrichtung der Schwerkraft. Diese entspricht meistens der negativen z-Richtung des Roboter-Basiskoordinatensystems. Ist ein entsprechender Modellparameter (z. B. z-Transformation von der Roboterbasis zur ersten Achse) zur Identifikation freigegeben, so wird mindestens der z-Anteil, der an allen Referenzpunkten vorhanden ist, unmittelbar diesem Parameter zugeschrieben und steht somit für die Identifikation der eigentlich verantwortlichen Elastizitätsparameter nicht mehr zur Verfügung.

Durch das Sperren des Parameters wird erreicht, dass andere, an dem Effekt beteiligte Parameter, stärker berücksichtigt werden. Dies wiederum führt dann häufig zu einem ausgeglicheneren Kompensationsverhalten im gesamten Arbeitsraum und somit zu besseren Ergebnissen insbesondere in den Randbereichen. Das Ergebnis ist in jedem Fall ein Kompromiss. Um dem Problem zu begegnen, sollte daher zunächst immer versucht werden, die betroffenen Achswinkel- und Arbeitsraumbereiche durch geeignete Referenzposen abzudecken.

Sobald ein geeigneter Parametersatz gefunden ist, muss dieser in einem normalen Zyklus überprüft werden. Hierdurch kann nachgewiesen werden, dass die gefundenen Parametersätze auch in der Aufwärm- und Abkühlphase und somit unter instationären Bedingungen gültig sind.

#### **3.5.6 Zusammenfassung**

Die Modellreduktion erfolgt in einem dreistufigen Verfahren:

Zunächst wird der Roboter bei unterschiedlichen Betriebszuständen kalibriert. Durch Vergleich der Parametersätze miteinander können diejenigen Parameter herausgefiltert werden, die sich unter den Betriebseinflüssen verändert haben. Betrachtet werden muss hierbei die Veränderung des Absolutwertes eines Parameters in Verbindung mit der Auswirkung dieser Veränderung auf das Positionierergebnis des Roboters. Die als stark betriebsabhängig erkannten Parameter werden anschließend im Modell zur Identifikation freigeschaltet.

Im zweiten Schritt wird das Modell um Parameter erweitert, die notwendig sind, um eine ausreichende Durchgängigkeit des Modells vom Roboterfuß bis zum Tool Center Point sicherzustellen.

Im letzten Schritt wird bereits im Rahmen von Kompensationsversuchen der ermittelte Parametersatz experimentell optimiert.

### **3.6 Entwicklung einer Referenzumgebung**

Zur Messung der für die Kompensation erforderlichen Eingangsdaten ist eine Messumgebung in Form einer vom Betriebs- oder Erwärmungszustand des Roboters und der Umgebung unabhängigen Referenz erforderlich. An dieser soll mit Hilfe einer möglichst geringen Anzahl von Messpunkten die aktuelle betriebsbedingte Drift des Roboters mit dem am Roboter angeflanschten Messsystem erfasst werden.

Um mit niedrigem Aufwand eine funktionstüchtige Referenzumgebung samt zugehörigem Posensatz zu erhalten, soll, ausgehend von einem vordefinierten, mechanischen Aufbau, ausschließlich durch Simulation ein geeigneter Referenzposensatz generiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird dazu die folgende Vorgehensweise gewählt:

Zunächst werden Anforderungen an die zu erstellende Referenzumgebung definiert. Danach werden unterschiedliche Geometrien auf ihre prinzipielle Eignung als zusammenhängende Referenzkörper untersucht. Kriterien, die hierbei insbesondere berücksichtigt werden müssen, sind die Anzahl der möglichen, unterschiedlichen Orientierungen in Form ebener Flächen sowie die Darstellbarkeit auch von Extremstellungen des Roboters auf engstem Raum. Im nächsten Schritt wird untersucht, welche Ausrichtung die gewählte Geometrie idealerweise im Raum haben muss, um sowohl für kleine als auch große Roboter gleichermaßen gut zugänglich zu sein. Anschließend werden mögliche Materialien sowie die zugehörigen Fertigungsverfahren und Kosten betrachtet.

Nach der Auswahl zu realisierender Referenzkörpertypen soll mit Hilfe einer Simulation die optimale Position des Referenzkörpers relativ zum Roboter bestimmt und ein geeigneter Posensatz generiert werden.

#### **3.6.1 Anforderungen an die Referenzumgebung**

Wie bereits bei den Anforderungen an die gesamte Kompensationsmethode beschrieben, ist die Referenzumgebung in Verbindung mit der zugehörigen Messtechnik zum einen die einzige Zusatzhardware, die das Kompensationsverfahren prinzipiell erfordert, zum anderen ist sie auch für den größten, zusätzlichen Platzbedarf verantwortlich. Dementsprechend sind auch besondere Anforderungen an den mechanischen Aufbau zu erfüllen. Um eine funktionstaugliche Referenzumgebung zu erhalten, sind folgende Punkte zu berücksichtigen:

- **Temperaturstabilität:**

Der Referenzkörper muss mindestens so temperaturstabil sein, dass eventuelle temperaturbedingte Geometrieänderungen kleiner sind als die Messgenauigkeit des verwendeten Messsystems.

- **Preisgünstige, einfach zu verarbeitende Werkstoffe:**

Die Forderung nach einem den Wirtschaftlichkeitsanforderungen entsprechend preisgünstigen Werkstoff ist in Verbindung mit der geforderten Temperaturstabilität eigentlich nur schwer zu erfüllen. Welche Materialien verwendet werden können, hängt prinzipiell davon ab, wie groß die Referenzumgebung letztendlich dimensioniert ist und welche Zusatzkosten in Kauf genommen werden können. Liegen die bei den erwarteten Umgebungstemperaturen bei einem bestimmten Temperaturausdehnungskoeffizienten an den Referenzpunkten maximal möglichen Abweichungen deutlich unterhalb der Wiederholgenauigkeit des Roboters, so kommt prinzipiell jeder Werkstoff, der diese und alle anderen Anforderungen erfüllt, in Frage. Zu beachten ist hierbei somit zunächst die Erfüllbarkeit der technischen Randbedingungen. Die Kosten stehen in diesem Fall erst an zweiter Stelle.

- **Große mechanische Stabilität:**

Diese ist vor allem zur Sicherstellung einer ausreichenden Stabilität gegen leichte Kollisionen oder Eingriffe durch Wartungspersonal erforderlich. Darüber hinaus müssen Anforderungen wie eine ausreichende Dämpfung gegen Schwingungseinflüsse sowie die Vermeidung von Setzungerscheinungen berücksichtigt werden.

- **Niedrige Gesamtkomponentenanzahl:**

Je geringer die Gesamtkomponentenanzahl ist, desto niedriger ist auch der Montage- und Einrichtaufwand. Ideal ist eine Referenzumgebung, die aus einem einzigen Teil besteht.

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

- **Einfache Montierbarkeit:**

Die Montierbarkeit der Referenzumgebung in einer Anlage muss innerhalb kürzester Zeit möglich sein, da nur dann auch eine einfache Austauschbarkeit im Beschädigungsfall sichergestellt ist. Darüber hinaus sollten auch aufwendige Vormontagearbeiten aus Kostengründen vermieden werden können.

- **Einfache Wartbarkeit bzw. einfacher Austausch defekter Komponenten beispielsweise nach einer Kollision:**

Hier spielt neben dem Montageaufwand auch der Einrichataufwand eine große Rolle. Im Idealfall sollte ein Austausch des Referenzkörpers ohne Neuvermessen oder Nachteachen von Roboterprogrammen möglich sein.

- **Geringer Platzbedarf:**

Es muss sichergestellt sein, dass sich die Referenzumgebung auf einen Bereich mit definierter Größe im Arbeitsraum des Roboters beschränken lässt. Als Ziel wird eine maximale Grundfläche von einem Quadratmeter angestrebt. Bei der Gestaltung ist außerdem darauf zu achten, dass auch Einflüsse durch Personen (z. B. Wartungs- und Reinigungspersonal) dahingehend ausgeschlossen werden können, dass sich die Referenzumgebung nicht mit Bereichen der Anlage überschneidet, die zwingend für Wartungsarbeiten zugänglich sein müssen.

- **Einfaches Unterbaukonzept:**

Um einen gemeinsamen Bezug ohne zusätzliche, das Verhalten der Gesamtapplikation beeinflussende mechanische Schnittstellen zu erhalten, sollten Roboter, Referenzumgebung und möglichst auch das Messobjekt auf dem selben, möglichst temperaturstabilen und schwingungsfreien Unterbau stehen.

- **Ausreichende Stabilität gegen Umgebungseinflüsse (Staub, Licht):**

Neben der bereits erwähnten mechanischen Stabilität und den entsprechenden Werkstoffeigenschaften sind auch Einflüsse, die auf das verwendete Messsystem einwirken, von Bedeutung. Insbesondere ist ein ausreichender, auch bei wechselnden Lichtverhältnissen oder leichter Verschmutzung eindeutiger Kontrast der Messmerkmale zu gewährleisten.

- **Einfache Programmierung der Referenzposen und der Roboterbahnen:**

Um den Zeitaufwand für die Programmierung der Referenzposen und Roboterbahnen niedrig zu halten, ist darauf zu achten, dass diese im Rahmen einer Simulation erfolgen kann. Voraussetzung hierfür ist eine einfache Modellierbarkeit der Referenzumgebung. Ein zerklüfteter, von Anlage zu Anlage wechselnder Aufbau scheidet somit aus. Des Weiteren muss es möglich sein, die Referenzposen an sich als ausschließliches Ergebnis einer Simulation zu erhalten.

- **Ausreichende Abdeckung des Achsarbeitsraumes:**

Bei der Gestaltung der Referenzumgebung muss sichergestellt sein, dass sich an

ihr ein ausreichend großer Bereich des Achsarbeitsraumes jeder Einzelachse des jeweiligen Roboters darstellen lässt, da andernfalls kein verwertbares Kalibrier- oder Kompensationsergebnis möglich ist.

- **Robotertypunabhängige Gestaltung:**

Ideal ist ein vordefinierter Aufbau, der auf alle in Frage kommenden Robotertypen änderungsfrei übertragen werden kann.

- **Verwendung optimaler Messmerkmale:**

Je nach verwendetem Messsystem müssen geeignete Messmerkmale auf dem Referenzkörper angebracht werden, die ein optimales Messergebnis garantieren. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass keine der sonstigen Eigenschaften des Referenzkörpers, wie beispielsweise das Material oder die Farbe, das Messergebnis negativ beeinflussen können.

- **Niedrige Kosten:**

Betrachtet werden müssen hier die Gesamtkosten, die sich aufgrund der möglichen konstruktiven Varianten ergeben. Hierbei sind Material-, Fertigungs-, Montage-, Planungs-, Simulations-, Einrichte- und Einmesskosten gemeinsam zu betrachten.

#### **3.6.2 Auswahl von Geometrievarianten**

Um die oben beschriebenen Anforderungen zu erfüllen, wird idealerweise eine möglichst aus einem einzigen, geometrisch einfachen Körper bestehende Referenzumgebung benötigt. Durch die Beschränkung auf einfache Grundformen kann erreicht werden, dass eine Herstellung des Referenzkörpers aus einem einzigen Stück möglich wird. Hierdurch werden Genauigkeitsbeeinträchtigende Schnittstellen zwischen einzelnen Bauteilen vermieden und die Gefahr thermischen Verzugs reduziert. Durch geeignete Dimensionierung kann ein Referenzkörper mitunter in unveränderter Form für alle Roboter eines Kinematiktyps eingesetzt werden.

Für Sechsachsroboter kommen drei prinzipielle Geometrievarianten in Frage:

- **Flache, planparallele, ebene Körper:**

Flache, planparallele Körper ermöglichen einen sehr einfachen Aufbau, da entsprechendes Plattenmaterial in beinahe beliebig vielen unterschiedlichen Materialien und Größen verfügbar ist. Darüber hinaus lässt es sich in der Regel verhältnismäßig einfach verarbeiten. Durch entsprechende Dimensionierung lassen sich auch bei großen Robotern ausreichend große Arbeitsraumbereiche abdecken. Nachteilig wirkt sich in erster Linie die geringe Anzahl möglicher Orientierungen am Referenzkörper aus: Bei entsprechender Zugänglichkeit stehen zwei einander entgegengesetzte Hauptorientierungen zur Verfügung. Die Anzahl der weiteren, eventuell zusätzlich möglichen Orientierungen ist davon abhängig, ob die Seiten-

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

flächen ebenfalls genutzt werden können. Durch diese Einschränkung können Probleme bei der Generierung größerer Posenanzahlen auftreten, da es mitunter schwierig ist, für jede zur Verfügung stehende Orientierung eine vergleichbare Anzahl ausreichend unterschiedlicher Posen zu finden. Darüber hinaus weisen plattenförmige Strukturen oftmals eine nur geringe Eigensteifigkeit auf, wodurch bei zu geringen Materialstärken erhebliche Verformungen zum Teil bereits aufgrund des Eigengewichtes nicht auszuschließen sind. Hinzu kommt eine starke Neigung zu Verzug beispielsweise bei einseitiger thermischer Belastung durch Wärmestrahlung.

- **Punktsymmetrische Hohl- oder Vollkörper:**

Diese ermöglichen prinzipiell beliebig viele, unterschiedliche Grundorientierungen. Bei Verwendung einer Kugel ist darauf zu achten, dass die Krümmung keinen Einfluss auf das Messergebnis hat, indem beispielsweise ein ausreichend großer Durchmesser gewählt wird oder geeignete, ebene Flächen durch Bearbeitungsmaßnahmen geschaffen werden. Nachteilig wirkt sich die bei sinnvoller Größe geringe räumliche Ausdehnung derartiger Körper aus, so dass gerade im Bereich der Hauptachsen des Roboters (erste, zweite und dritte Achse) mitunter nur verhältnismäßig kleine Bereiche des Achsarbeitsraumes abgedeckt werden können. Dies ist andererseits aber insbesondere deshalb wichtig, weil die Kompensation verfahrensbedingt den größten Optimierungseffekt in dem Achswinkelbereich ermöglicht, der auch durch Referenzposen abgedeckt ist. Darüber hinaus sind entsprechende Körper in ausreichender Größe nur für wenige, oft ungeeignete Materialien (z. B. Glas, Hartschaum, Granit) als Standardform verfügbar und auch fertigungstechnisch sehr anspruchsvoll und teuer.

- **Langgestreckte Körper wie runde oder vieleckige Stäbe oder Rohre:**

Diese ermöglichen zwar insgesamt weniger unterschiedliche Grundorientierungen als kugelförmige Grundkörper, erlauben aber aufgrund ihrer Streckung eine bessere Abdeckung des gesamten Achsarbeitsraumes der Grundachsen. Darüber hinaus weisen sie formbedingt eine gute Eigensteifigkeit auf. Sie sind in vielen unterschiedlichen Materialien entweder standardmäßig verfügbar oder, verglichen mit kugelförmigen Körpern, vergleichsweise einfach herstellbar.

Prinzipiell kann die Entscheidung für eine bestimmte Geometrie auf Basis einer Simulation erfolgen. Eine entsprechend adaptierbare Methode wird in Abschn. 3.6.4 vorgestellt.

#### **3.6.3 Auswahl des Werkstoffes für die Referenzumgebung**

Hinsichtlich der Erfüllung der in Abschnitt 3.6.1 genannten Anforderungen kommen zunächst prinzipiell, insbesondere aufgrund ihrer Temperaturstabilität, Materialien wie

z. B. Invarstahl (Ni36), kohlefaser verstärkte Kunststoffe (CFK), Quarzglas, wie es zur Herstellung von Glasmaßstäben eingesetzt wird, sowie keramische Werkstoffe in Frage. Keramische sowie Glaswerkstoffe scheiden jedoch je nach Einsatzbedingungen bei näherer Betrachtung aufgrund ihrer meist hohen Stoßempfindlichkeit aus.

#### **3.6.4 Ermittlung der optimalen Lage des Referenzkörpers sowie der Referenzposen durch Simulation**

Die Ermittlung der optimalen Lage des Referenzkörpers erfolgt zweckmäßiger Weise anhand einer Simulation. Diese basiert darauf, dass in mehreren Schleifen die Lage des Referenzkörpers zum Roboter verändert und in jeder Lage mit einer vorgegebenen Anzahl von Versuchen ein Referenzposensatz generiert wird, der die von SCHRÖER (1993) definierten Kriterien für Kalibrierposensätze erfüllt (siehe Abschn. 3.6.4.3). Je mehr Posen gefunden werden können, desto günstiger ist die Lage des Referenzkörpers.

Zur Generierung des eigentlichen Referenzposensatzes wird dann in einem zweiten Schritt mit einer zunächst nicht definierten Anzahl von Versuchen eine vorgegebene Anzahl von Referenzposen für die ermittelte, optimale Lage des Referenzkörpers generiert.

Die Simulation kann durch Veränderung des Roboter- sowie des Referenzkörpermodells auf die jeweils betrachtete Applikation adaptiert werden. Hierdurch können auch unterschiedliche Referenzkörpergeometrien miteinander verglichen werden.

##### **3.6.4.1 Ablauf der Simulation**

Insgesamt setzt sich das im Rahmen dieser Arbeit am Beispiel der Kalibriersoftware RoboCal entwickelte Simulationswerkzeug aus vier Komponenten zusammen:

1. Einem Modul zur Veränderung der Lage des Referenzkörpers,
2. einem Tool zur Generierung eines Referenzposensatzes,
3. einer Komponente zur Überprüfung des Referenzposensatzes sowie
4. einer Anbindung an eine 3D-Simulationssoftware zur Überprüfung der Kollisionsfreiheit.

Zur Ermittlung der optimalen Lage des Referenzkörpers wird auf das Modul zur Veränderung der Lage und das Tool zur Generierung eines Referenzposensatzes zurückgegriffen. Sollen unterschiedliche Geometrievarianten miteinander verglichen werden, so muss dieser Schritt für jede zu untersuchende Variante durchgeführt

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

werden. Die notwendigen Softwarewerkzeuge wurden mit Hilfe des Tools Matlab der Fa. The Math Works Inc. erstellt.

Zur Generierung eines endgültigen Referenzposensatzes wird unmittelbar mit der Generierung der Posen begonnen, anschließend die grundsätzliche Eignung und danach die Erreichbarkeit der Posen überprüft (Bild 3.10). Die Überprüfung der grundsätzlichen Eignung erfolgt durch einen Aufruf der Kalibriersoftware (RoboCal) aus der Mathematik-Software (Matlab) heraus, die Überprüfung der Kollisionsfreiheit der Referenzposen mit Hilfe einer 3D-Simulationssoftware (hier: AnySim der Fa. Tecnomatix).

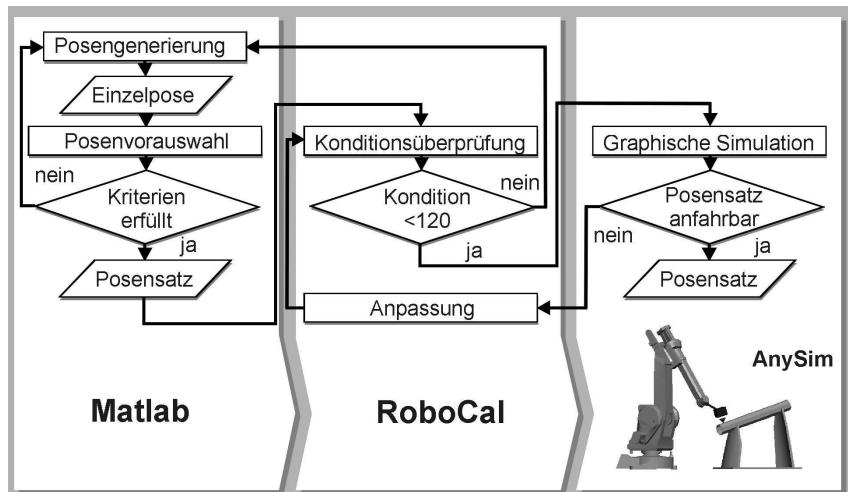


Bild 3.10: Vorgehensweise zur Generierung eines Referenzposensatzes

#### **3.6.4.2 Softwarewerkzeug zur Veränderung der Lage des Referenzkörpers**

Grundsätzlich könnte ein Referenzkörper in allen sechs Freiheitsgraden verschoben und rotiert werden, bis die optimale Lage gefunden ist. Unter dem Aspekt der hierfür notwendigen Rechenzeit ist dies jedoch nicht sinnvoll. Die Anzahl der zu variierenden Freiheitsgrade lässt sich meistens bereits anhand weniger, einfacher Überlegungen reduzieren:

- Welche Freiheitsgrade sind bereits durch konstruktive Maßnahmen festgelegt?

Ist der Referenzkörper beispielsweise ohne weitere Einstellmöglichkeiten auf einer

Grundplatte montiert, so sind bei Bodenmontage lediglich eine Drehung um die Hochachse sowie translatorische Verschiebungen der Grundplatte innerhalb ihrer Ebene möglich. Ebenso können durch die Kinematik des Roboters bedingte Einschränkungen hinsichtlich möglicher Ausrichtungen vorhanden sein.

- Welche Symmetrien liegen am Referenzkörper und am jeweiligen Roboter sowie in dessen Arbeitraum vor und wie beeinflussen diese die Anordnung?

Bei Verwendung einer Kugel erübrigts sich beispielsweise die Überprüfung rotatorischer Lageveränderungen, sofern keine Unterschiede durch eine vorgegebene Verteilung fester Messmerkmale auf der Kugeloberfläche existieren. Bei Robotern mit um die Hochachse rotationssymmetrischen Arbeitsräumen (z. B. bei Standard-Sechсachsrobotern) entspricht eine tangentiale Verschiebung einer radialen Verschiebung in Verbindung mit einer Drehung um die Hochachse, so dass nur letztere Freiheitsgrade überprüft werden müssen.

Nachdem der zu untersuchende Bereich durch entsprechende Überlegungen eingeschränkt wurde, muss noch die Schrittweite, in der der Bereich überprüft werden soll, festgelegt werden. Als Anhaltswert kann davon ausgegangen werden, dass durch Verschiebungen unter 5% der maximalen Gesamtverschiebung und Rotationen von weniger als 2% der zu untersuchenden Gesamtrotation jeder Achse keine erkennbaren Verbesserungen mehr im Sinne des Kriteriums der Anzahl gefundener Posen bei einer vorgegebenen Anzahl von Versuchen erzielt werden können. Die Anzahl der insgesamt notwendigen Schritte kann nochmals reduziert werden, indem zunächst mit einem größeren Raster der Suchbereich eingeschränkt wird und erst in einem zweiten Schritt die Suche verfeinert wird.

Das Tool zur Veränderung der Lage des Referenzkörpers durchläuft systematisch alle möglichen Lagen und Orientierungen und ruft nach jeder Veränderung von Lage oder Orientierung das Tool zur Generierung von Referenzposen (Abschn. 3.6.4.3) auf. Die gefundene Anzahl von Referenzposen wird mit der bislang größten gefundenen Anzahl verglichen. Ist sie größer, so wird die aktuelle Lage und Orientierung abgespeichert. Nach dem Durchlaufen aller Positionen und Orientierungen wird die Position und Orientierung mit der maximalen Anzahl gefundener Referenzposen ausgegeben.

#### **3.6.4.3 Softwarewerkzeug zur Generierung von Referenzposen**

Dieses Softwarewerkzeug bildet den Kern der Simulation. Als Eingangsdaten benötigt es:

- ein **Roboter-** und ein **Werkzeugmodell**,
- Informationen über Grenzen des kartesischen Arbeitsraumes sowie der

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Achsarbeitsräume des Roboters (**Arbeitsraummodell**),

- ein **Referenzkörpermodell** mit der Beschreibung der Lage und der Orientierung der einzelnen Messmerkmale sowie des Referenzkörperkoordinatensystems relativ zum Roboter-Basiskoordinatensystem,
- die Anzahl der zu ermittelnden Referenzposen sowie
- Informationen über das **Suchvorgehen**.

Nach dem Aufruf des Tools werden zunächst unter Berücksichtigung der Vorgaben für das Suchvorgehen ein Messmerkmal am Referenzkörper sowie eine zugehörige Werkzeugorientierung ausgewählt. Anhand der Transformationen vom Ursprung des Referenzkörperkoordinatensystems zum Messmerkmal sowie in das Roboterkoordinatensystem werden die gewählte Lage und Orientierung in das Roboterkoordinatensystem übertragen. Für die hiermit vorgegebene Pose werden mit Hilfe des RobotermODELLS sowie der Werkzeugtransformation die zur Erreichung der Position und Orientierung notwendigen Achswinkel durch eine **Rückwärtstransformation** berechnet. Die Roboterpose wird dann anhand vordefinierter **Restriktionskriterien** auf ihre Eignung als Referenzpose hin überprüft. Sind alle Kriterien erfüllt, so wird sie zu dem Referenzposensatz hinzugefügt. Andernfalls wird sie verworfen. Anschließend wird das nächste Referenzmerkmal ausgewählt und der Vorgang beginnt erneut. Wird ein Abbruchkriterium erreicht, so wird der bis dahin ermittelte Referenzposensatz als Datei ausgegeben. Mögliche Abbruchkriterien sind das Erreichen der maximalen Posenanzahl, das Überschreiten der maximalen Versuchsanzahl bei zufallsgesteuerter Suchreihenfolge sowie der Abschluss der Überprüfung aller Messmerkmale bei systematischem Suchvorgehen.

#### **Roboter- und Werkzeugmodell:**

Die Beschreibung des RobotermODELLS kann mit Hilfe der Denavit-Hartenberg-Konvention (DENAVIT UND HARTENBERG 1955) auf der Basis des nominalen RobotermODELLS in Form von Denavit-Hartenberg-Parametern (DH-Parameter) erfolgen. Eine Berücksichtigung des vollständigen Modells ist im Rahmen der Simulation nicht erforderlich, da es hier in erster Linie um die Generierung voneinander möglichst verschiedener Achswinkelkombinationen geht und die zu erwartenden Positionierfehler aufgrund der Parameterabweichungen eines realen Roboters zum Zeitpunkt der Simulation noch unbekannt sind.

Die endgültige Ermittlung der Positionsdaten der Messmerkmale als Eingangsdaten für die Kompensation muss unter allen Umständen mit Hilfe der jeweils verwendeten Kalibriersoftware erfolgen. Eine Ermittlung mit Hilfe des in der Simulation verwendeten Referenzkörper- und RobotermODELLS würde zu Kompensationsfehlern führen, wenn Unterschiede in der Berechnung der Positionen, beispielsweise aufgrund der Verwendung bereits identifizierter Modelle, auftreten.

Die DH-Parameter für das Simulationsmodell sowie die in einem separaten Modell abgelegte Werkzeugtransformation können prinzipiell unmittelbar den entsprechenden Modellen der Kalibriersoftware entnommen werden.

#### **Referenzkörpermodell:**

Aufwendiger als die Einbindung des Robotermodells ist die Beschreibung des Referenzkörpers, da diese, sollen auch unterschiedliche Referenzkörper so einfach wie möglich beschrieben werden, aufgrund der Vielfalt möglicher Geometrien nur schwer zu vereinheitlichen ist. Grundsätzlich besteht im vorliegenden Fall die Beschreibung des Referenzkörpers jedoch aus einer Matrix, für deren Felder eine Transformation vom Ursprung des Referenzkörperkoordinatensystems zum jeweiligen Messmerkmal hinterlegt ist. Im Idealfall ist dies ein für alle Felder der Matrix gültiger mathematischer Zusammenhang. Im ungünstigsten Fall muss die Transformation für Lage und Orientierung für jedes einzelne Feld hinterlegt werden.

Bei rotationssymmetrischen Messmerkmalen kann die Sensororientierung um den auf dem Messmerkmal senkrecht stehenden Orientierungsvektor, d. h. um die Symmetrieachse, beliebig gewählt werden. Somit sind an jedem Messpunkt dieser Art theoretisch unendlich viele unterschiedliche Einzelposen darstellbar.

Die Transformation vom Roboterkoordinatensystem in das Referenzkörperkoordinatensystem wird separat abgelegt, da diese bei der Suche nach der optimalen Referenzkörperposition zwangsläufig variiert werden muss.

#### **Arbeitsraummodell:**

Das Arbeitsraummodell gliedert sich in die Beschreibung des Achsarbeitsraums der Roboterachsen in Form von unteren und oberen Grenzwerten sowie eine Beschreibung der Grenzen des kartesischen Arbeitsraumes im Roboterkoordinatensystem. Diese Angaben sind notwendig, um die Generierung von Posen, die außerhalb der angegebenen Grenzen liegen, von vornherein ausschließen zu können. Neben der Betrachtung der Lage des TCP muss auch die Lage der einzelnen Gelenke des Roboters berücksichtigt werden. Über die Überprüfung der prinzipiellen Darstellbarkeit einer Pose hinaus wird hierdurch außerdem eine einfache Visualisierung für eine erste Überprüfung mit Hilfe von Matlab realisierbar. Angesichts der Möglichkeit, Kollisionsüberprüfungen und aussagekräftigere Visualisierungen mit Simulationsprogrammen wie beispielsweise AnySim oder RobCAD durchzuführen, kann, nicht zuletzt aus Rechenzeitgründen, auf eine detailliertere Beschreibung des Arbeitsraumes verzichtet werden.

#### **Suchvorgehen:**

Zur Durchführung der Suche nach Referenzposen werden über die Modelle hinaus

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Informationen darüber benötigt, ob systematisch oder zufallsgesteuert vorgegangen werden soll. Außerdem muss die Anzahl der benötigten Referenzposen definiert werden.

Eine zufallsgesteuerte Suche verbessert die statistische Ausgewogenheit des zu generierenden Posensatzes, da hierbei mit Hilfe eines Zufallsgenerators die Messmerkmale am Referenzkörper sowie die Orientierung des Roboterwerkzeugs um den Orientierungsvektor des Messmerkmals ausgewählt werden. Nachteilig ist die mitunter große Anzahl von Versuchen, die in diesem Fall zur Generierung eines Posensatzes notwendig sind. Es ist daher bei diesem Verfahren ein zusätzliches, zuverlässiges Abbruchkriterium in Form einer maximalen Versuchsanzahl erforderlich, um Endlosschleifen zu vermeiden.

Die zufallsgesteuerte Suche wird auch zur Ermittlung der optimalen Referenzkörperposition eingesetzt, wobei je Position nur eine geringe Anzahl von Versuchen (z. B. 200) durchgeführt und anschließend für jede Lage des Referenzkörpers die hierbei gefundene Anzahl von Referenzposen ausgewertet wird. Es wäre auch eine umgekehrte Vorgehensweise denkbar, bei der überprüft wird, wie viele Versuche notwendig sind, um bei einer vorgegebenen Referenzkörperposition eine definierte Anzahl von Posen zu generieren. Dies ist zwar prinzipiell noch aussagekräftiger, jedoch aufgrund der hierfür erforderlichen Anzahl von Versuchen, der großen Wahrscheinlichkeit von Endlosschleifen sowie der daraus resultierenden Rechenzeit nicht empfehlenswert.

Bei einer systematischen Suche werden die Messmerkmale sowie mögliche Einzelorientierungen in einer vordefinierten Reihenfolge solange durchlaufen, bis die vorgegebene Anzahl von Kalibrierposen erreicht ist. Die maximale Anzahl möglicher Einzelorientierungen am Messmerkmal im Sinne einer Rasterung ist bei einer systematischen Suche zusätzlich vorzugeben. Diese Vorgehensweise ist aus Rechenzeitgründen insbesondere dann sinnvoll, wenn sehr viele Posen benötigt werden oder wenn die mögliche Abdeckung des Achsarbeitsraumes der einzelnen Achsen in Abhängigkeit von der Referenzkörperposition überprüft werden soll.

#### **Rückwärtstransformation:**

Die Rückwärtstransformation ist zur Ermittlung der notwendigen Achswinkelkombination eines Roboters an einer vorgegebenen Position und Orientierung erforderlich. Hierzu wird zunächst mit Hilfe der Werkzeugtransformation die erforderliche Lage des Flanschkoordinatensystems ermittelt. Anschließend muss ein nichtlineares Gleichungssystem gelöst werden, das die Transformation vom Roboterkoordinaten- system in das Flanschkoordinatensystem anhand der zu ermittelnden Achswinkel beschreibt. Im vorliegenden Fall wird dies mit Hilfe einer Matlab-Funktion über ein Näherungsverfahren gelöst. Als Startwerte für das Näherungsverfahren dienen

Zufallswerte. Konvergiert das Verfahren nicht, so wird mit Hilfe neuer Startwerte ein neuer Lösungsversuch unternommen. Wird auch nach mehrfacher Wiederholung keine Lösung gefunden, so wird die Suche abgebrochen und eine Fehlermeldung an das Posengenerierungstool übergeben, das daraufhin das nächste Messmerkmal auswählt.

#### **Restriktionskriterien:**

Restriktionskriterien dienen zur Überprüfung der Eignung einer anhand der Rückwärtstransformation ermittelten Roboterpose als Referenzpose. Hierbei müssen neben sogenannten mechanischen Restriktionen auch die von SCHRÖER (1993) geforderten Kriterien der diskreten Gleichverteilung sowie der diskreten und der kontinuierlichen Verschiedenheit erfüllt sein. Diese sind erforderlich, um die von BORM UND MENQ (1989) geforderte größtmögliche Streuung der Kalibrier- oder Referenzposen zu erreichen. Im Einzelnen sind folgende Restriktionsarten zu unterscheiden:

- **Mechanische Restriktionen:**

Anhand der mechanischen Restriktionen wird die grundsätzliche Realisierbarkeit einer Pose überprüft. Hierzu gehört die Einhaltung der Grenzen der jeweiligen Achsarbeitsräume sowie des kartesischen Arbeitsraumes.

- **Diskrete Gleichverteilung:**

Zur Überprüfung des Kriteriums der diskreten Gleichverteilung werden die Gelenkarbeitsräume des Roboters in eine vorgegebene Anzahl gleich großer Sektoren unterteilt. Jede neu gefundene Pose wird nun auf ihre Lage innerhalb der Sektoren hin untersucht. Betrachtet wird hierbei die Summe der Einzelposen, mit denen ein Sektor im Vergleich zu den benachbarten Sektoren bereits belegt ist. Übersteigt die Differenz der Posenanzahl zwischen dem betrachteten Sektor und den Nachbarsektoren ein vordefiniertes Maximum, so wird die Pose abgelehnt. Die Anzahl der Sektoren sollte mindestens um 50% kleiner als die Anzahl der zu ermittelnden Posen sein und die maximale Differenz zwischen zwei Nachbarsektoren sollte um so kleiner sein, je weniger Posen der zu suchende Referenzposensatz umfasst. Als Anhaltswert kann hier ein Wert zwischen 2 und 5 angesetzt werden.

- **Diskrete Verschiedenheit:**

Mit diesem Kriterium soll verhindert werden, dass Posen mit zu stark ausgeprägter Ähnlichkeit in den Posensatz aufgenommen werden. Eine Pose wird dann nicht akzeptiert, wenn mehr als zwei Drittel ihrer Gelenkwinkel die gleichen Sektoren belegen wie irgendeine andere, im Referenzposensatz bereits vorhandene Pose.

- **Kontinuierliche Verschiedenheit:**

Zusätzlich zur diskreten Verschiedenheit wird noch die kontinuierliche Verschiedenheit überprüft. Hierzu wird das Minimum des mittleren Abstandes der Gelenkwinkel der zu überprüfenden Pose von jeder bereits vorhandenen Pose

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

relativ zum Betrag des zulässigen Gelenkarbeitsraumes der jeweiligen Achse ermittelt. Ist eine Pose bereits vorhanden, ergibt sich hierfür ein Wert von 0, unterscheidet sich eine Pose in allen Achsen um die volle, zulässige Gelenkarbeitsraumspanne von den vorhandenen Posen, so ergibt sich ein Wert von 1. Als Richtwert kann, je nach Strenge, ein Minimalwert von 0,1 bis 0,3 für die Erfüllung dieses Kriteriums angesetzt werden.

Die Berücksichtigung der oben genannten Kriterien führt zwar mit an Sicherheit grenzender Wahrscheinlichkeit nicht zum optimalen Posensatz, stellt jedoch sicher, dass anhand der mit Hilfe des generierten Posensatzes gewonnenen Eingangsdaten für die Kompensation eine gute Identifizierbarkeit des Robotermodells gewährleistet ist.

Da durch den Referenzkörper in den seltensten Fällen die vollständigen Gelenkarbeitsräume des Roboters ausgeschöpft werden können, empfiehlt es sich, diese für die Bewertung der Kriterien so einzugrenzen, dass nur der tatsächlich nutzbare Bereich berücksichtigt wird. Hierzu kann z. B. mit Hilfe einer systematischen Suche ein beliebig großer Referenzposensatz generiert werden, dessen Posen dann auf die tatsächlichen Maxima und Minima hin untersucht werden können. Für die Suche nach der optimalen Referenzkörperposition darf diese Einschränkung jedoch nicht vorgenommen werden, da der tatsächlich nutzbare Bereich mit der Lage des Referenzkörpers variiert.

#### **3.6.4.4 Softwarewerkzeug zur Überprüfung der Eignung des Referenzposensatzes**

Mit diesem Tool wird ein zuvor generierter Posensatz zunächst in ein zu der verwendeten Kalibriersoftware (hier: RoboCal) kompatibles Format umgewandelt. Anschließend wird er mit Hilfe der Kalibriersoftware unter Berücksichtigung der für die Kompensation zu identifizierenden Parameter anhand der Kondition der Jacobi-Matrix auf seine Eignung hin untersucht. Liegt diese unter 120 (siehe Abschn. 2.6.3.1, Formel 18 sowie Abschn. 3.5.5), so wird der Posensatz akzeptiert. Liegt die Kondition über 120, so muss die Posengenerierung erneut gestartet werden. Kann kein Posensatz gefunden werden, der eine Kondition unter 120 ermöglicht, so müssen die zu identifizierenden Parameter überprüft werden (vgl. hierzu Abschn. 3.5.5).

#### **3.6.4.5 Softwarewerkzeug zur Überprüfung der Kollisionsfreiheit**

Als Tool für die Visualisierung des Referenzposensatzes wird im Rahmen dieser Arbeit AnySim verwendet. Der Referenzposensatz wird hierzu in Form eines Roboterposensatzes an die Simulationssoftware übergeben, die dann mit einem 3D-Simulationsmodell des jeweils verwendeten Roboters sowie des Referenzkörpers im

Rahmen einer Bewegungssimulation (synchronisierte PTP-Bewegung) den Verfahrweg von Pose zu Pose simuliert. Hierdurch lassen sich insbesondere mögliche Kollisionen des Roboters mit dem Referenzkörper oder dem zugehörigen Unterbau erkennen.

#### 3.6.5 Zusammenfassung

Die Entwicklung einer Referenzumgebung beginnt mit der Auswahl der Geometrie des Referenzkörpers. Diese muss insbesondere auf die Kinematik des Roboters abgestimmt sein und möglichst viele, unterschiedliche Posen ermöglichen. Im Rahmen einer Simulation wird dann zunächst die optimale Lage des Referenzkörpers im Arbeitsraum bestimmt, indem mit einer begrenzten Anzahl von Versuchen gültige Referenzposen auf dem Referenzkörper gesucht werden. Die Lage, in der die meisten Posen gefunden werden können, stellt die ideale Referenzkörperposition dar. Anschließend wird ein Referenzposensatz mit einer vorab definierten Anzahl von Einzelposen für diese Lage ermittelt. Dieser wird im nächsten Schritt auf seine grundsätzliche Eignung zur Parameteridentifikation hin überprüft und abschließend in einer graphischen Simulation auf Kollisionsfreiheit getestet.

### 3.7 Aufbau eines Kommunikationskreises

Um eine Kalibriersoftware im Rahmen einer Kompensation einsetzen zu können, muss ein Kommunikationskreis vorhanden sein, über den die zur Kompensation und zum Betrieb notwendigen Abläufe gesteuert und der notwendige Datenaustausch zwischen Roboter, Messsystem und Kompensation sichergestellt werden. Im Laufe der Untersuchungen im Rahmen dieser Arbeit wurde zunächst ein in seinen Grundzügen an GRÄSER (1999) angelehnter Kommunikationskreis umgesetzt, der jedoch im weiteren Verlauf grundlegend überarbeitet wurde.

#### 3.7.1 Prinzipieller Ablauf

Grundsätzlich muss mit dem Kommunikationskreis der nachfolgende Ablauf realisiert werden (Bild 3.11):

Bei der Inbetriebnahme wird das Nullniveau festgelegt. Dies bedeutet, dass die gesamte Anlage beispielsweise anhand eines Masterbauteils justiert wird. Danach wartet die Anlage auf Aufträge. Erhält die Anlage einen solchen, wird zunächst die aktuelle Genauigkeit überprüft. Ist diese ausreichend, kann sofort mit der Bearbeitung begonnen werden. Wird eine zuvor festgelegte Schwelle jedoch überschritten, so muss zunächst eine Referenzfahrt durchgeführt, das RobotermodeLL neu identifiziert und

### 3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse

neue Korrekturwerte für die Punkte des Verfahrprogramms berechnet werden. Erst danach kann mit der Abarbeitung des Auftrags begonnen werden. Nach dessen Abschluss wartet die Anlage auf den nächsten Auftrag.

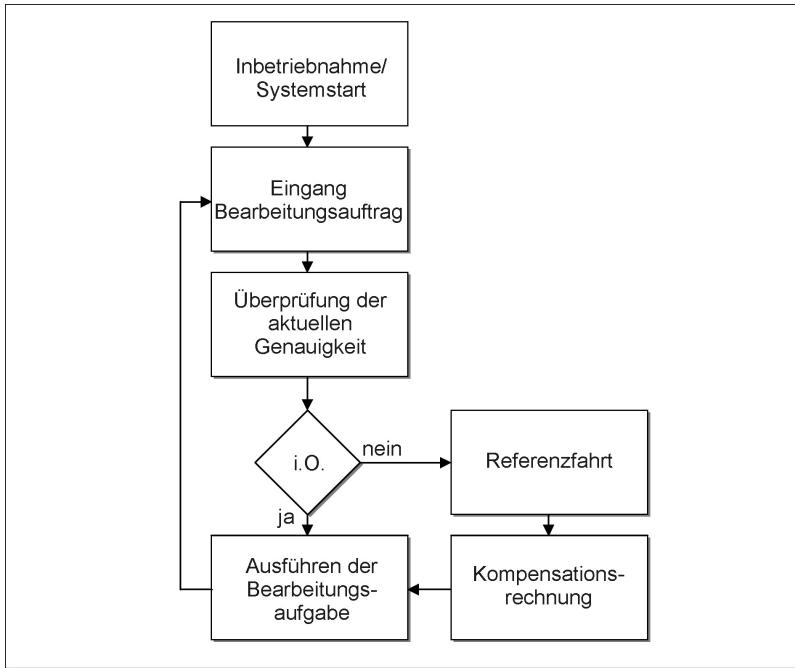
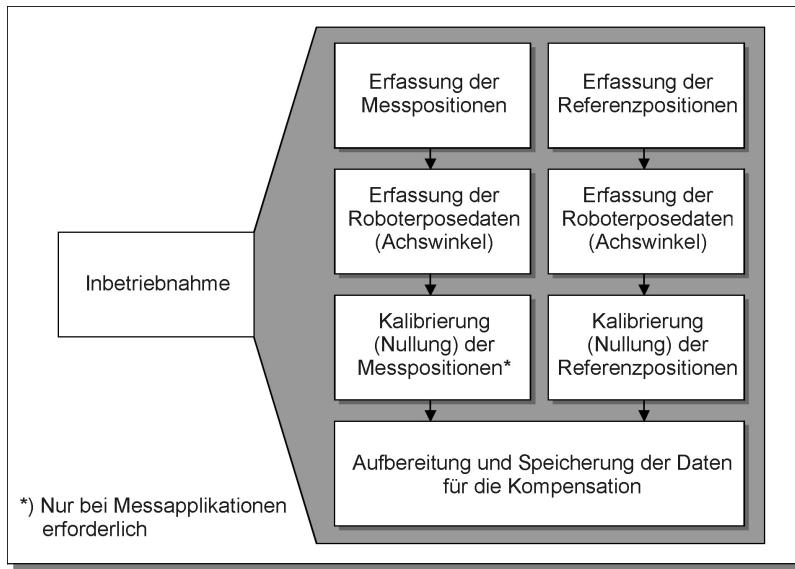


Bild 3.11: Prinzipieller Ablauf der Kompensation (nach GRÄSER 1999)

#### **3.7.2 Inbetriebnahme**

Bei der Inbetriebnahme der Anlage (Bild 3.12) wird in erster Linie das sogenannte Nullniveau festgelegt. Dies gilt sowohl für die Positionierung des Tool Center Points des Roboters an dem zu bearbeitenden oder zu vermessenden Werkstück als auch an der Referenzumgebung, da hier nur betriebsbedingte Abweichungen gemessen werden dürfen. Hierzu muss der Referenzkörper ein- oder mehrmals mit dem verwendeten Messsystem vermessen und das gemittelte Ergebnis der Einzelmessungen am jeweiligen Messmerkmal der Referenz als Null definiert werden. Alle nachfolgenden Messungen am Referenzkörper werden dann relativ zu diesem Kalibrierzustand ausgeführt.



*Bild 3.12: Inbetriebnahme einer Anlage*

Neben der Festlegung des Nullniveaus müssen im Rahmen der Inbetriebnahme vorbereitend auch sämtliche für die Kompensation relevanten Daten erfasst werden. Hierzu gehören die Achswinkelstellungen des Roboters an Arbeits- und Referenzpositionen sowie deren Lage und Orientierung im Raum. Die angenommenen Lagen der Arbeits- und der Referenzpunkte, soweit sie zu Kompensationszwecken verwendet werden, müssen hierbei anhand der Achswinkelstellungen des Roboters mit dem von der Kompensationssoftware verwendeten RobotermodeLL berechnet werden. Nur durch die Berechnung der Lage der Kalibrierpositionen in Verbindung mit der Festlegung des Nullniveaus auf den Ausgangszustand der Anlage kann eine ausreichende Datenkonsistenz der Eingangsdaten für die Kompensation sichergestellt werden. In diesem Fall ist gewährleistet, dass die gemessenen Abweichungen an der Referenzumgebung, abgesehen von Messabweichungen aufgrund der Wiederholgenauigkeit, ausschließlich auf betriebsbedingte Drifteffekte zurückzuführen sind und nicht auf Fehler in der Absolutgenauigkeit des Roboters.

Eine Ermittlung der Lage der Kalibrierpositionen am Referenzkörper durch Vermessung führt zu folgendem Problem:

Die Positionen an der Referenzumgebung werden in diesem Fall im Rahmen der Messgenauigkeit des verwendeten Messsystems in ein kartesisches Koordinatensystem eingemessen. Da selbst ein absolutkalibrierter Roboter gegenüber dem kartesischen

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Koordinatensystem noch Abweichungen von etwa 0,5 mm aufweisen kann, weist somit der an der Referenzumgebung gemessene Wert bereits ohne betriebsbedingte Einflüsse möglicherweise eine Abweichung von bis zu 0,5 mm gegenüber dem vermeintlichen Sollwert auf. Betriebsbedingte Abweichungen haben in diesem Fall, verglichen mit der Messabweichung aufgrund der Fehler in der Absolutgenauigkeit, bei der Kompensation erst dann eine Bedeutung, wenn sie deutlich über den Abweichungen aufgrund der Wiederholgenauigkeit liegen und die Absolutgenauigkeit merklich beeinflussen. Bei der Parameteridentifikation wird somit ein Parametersatz identifiziert, der stärker durch die Abweichungen aufgrund der Absolutgenauigkeit geprägt ist, als durch die eigentlich zu kompensierenden Drifteffekte. Werden mit Hilfe dieses Parametersatzes nun Korrekturwerte für die Roboterposen am eigentlichen Werkstück ermittelt, so führt dies zu einer deutlichen Verschlechterung der Positioniergenauigkeit, da nicht die eigentlich zu kompensierende Drift des Roboters, sondern die mangelnde Absolutgenauigkeit „korrigiert“ wurde. Hinsichtlich der Positioniergenauigkeit am Werkstück äußert sich dies mitunter in zeitweiligen Sprüngen zwischen unterschiedlichen Niveaus der Abweichungen.

Dieses Verhalten ist wie folgt erklärbar:

Die Parameteridentifikation erfolgt mit Hilfe eines Näherungsverfahrens (Gauss-Newton-Algorithmus). Dieses findet für eine bestimmte Konstellation von Parameterabweichungen im Robotermodell ein Minimum für die Summe der Quadrate der Restabweichungen (Residuen) an den Referenzpunkten. Da gemessene Positionierabweichungen nicht immer eindeutig den Abweichungen bestimmter Parameter zugeordnet werden können, existieren oftmals weitere Minima für andere Konstellationen von Parameterabweichungen. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn nach der Modellreduzierung noch mehrere Parameter übrig sind, deren Abweichungen zu einem ähnlichen Verhalten des Modells im Arbeitsraum, insbesondere am Referenzkörper, führen können. Überlagern sich mit den Messabweichungen aufgrund der fehlenden Absolutgenauigkeit Abweichungen aufgrund von betriebsbedingten Drifteffekten, so kann es passieren, dass bei Überschreiten einer nach außen im Voraus nicht erkennbaren Schwelle eine andere Konstellation von Parameterabweichungen eine insgesamt bessere Übereinstimmung zwischen Modell und Realität liefert. Da sich hierdurch das Verhalten des Modells im gesamten Arbeitsraum verändert, werden für die Posen am Werkstück nun geringfügig andere Korrekturwerte berechnet. Dies äußert sich im Positionierverhalten des Roboters am Werkstück über der Zeit als Sprung im Bereich weniger zehntel Millimeter.

Ein ähnlicher Effekt kann auch dann auftreten, wenn die Solldaten nicht mit dem zur Kompensation verwendeten Modell berechnet, sondern unmittelbar aus der Robotersteuerung übernommen werden. Je nach verwendetem Steuerungsmodell können auch hier Unterschiede im Bereich einiger zehntel Millimeter auftreten. Ob entsprechende

Abweichungen vorhanden sind, kann mit Hilfe eines einmaligen Vergleichs der mit der Robotersteuerung und der mit RoboCal generierten Positionsdaten überprüft werden. Durchschnittliche Abweichungen unter 0,01 Millimeter können hierbei ohne merklichen Genauigkeitsverlust vernachlässigt werden. Bei größeren Abweichungen muss die Berechnung der Lage der Mess- und Arbeitspositionen mit der verwendeten Kalibriersoftware erfolgen.

#### 3.7.3 Überprüfung der aktuellen Anlagengenauigkeit

Erhält die Anlage einen Arbeitsauftrag, so kann die Genauigkeit der Anlage zunächst an einem oder mehreren Prüfpunkten an der Referenz getestet werden. Diese werden hierzu mit den bei der letzten Kompensationsrechnung ermittelten Korrekturdaten gemessen. Sind die gewonnenen Messabweichungen unterhalb einer zuvor definierten Schranke, so kann unmittelbar mit dem eigentlichen Arbeitsauftrag begonnen werden. Wird an einem der Prüfpunkte jedoch eine zu große Abweichung gemessen, so muss der Roboter zunächst nachkalibriert werden.

Dieses Prüfpunktverfahren kann jedoch entscheidende Nachteile in sich bergen:

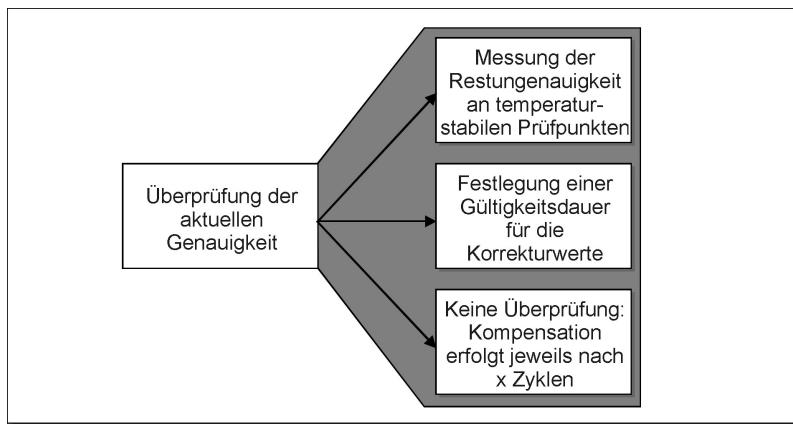
- In Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebszustand kann es passieren, dass an den Prüfpunkten lokal zu kleine Abweichungen gemessen werden und die zunehmende Ungenauigkeit des Systems zu spät erkannt wird. In Versuchen hat sich gezeigt, dass Zustände, in denen an einzelnen Arbeitspunkten bereits unzulässige Abweichungen von 0,25 mm auftreten, während an den Prüfpunkten noch Abweichungen unter 0,12 mm gemessen werden, nicht auszuschließen sind. Eine Senkung des zulässigen Grenzwertes bringt in diesem Fall auch keine Verbesserung mit sich, da man hierdurch in den Bereich der Wiederholgenauigkeit des Roboters gelangt und eine Überschreitung des Grenzwertes an den Prüfpunkten somit häufiger durch stochastische als durch systematische Abweichungen ausgelöst wird. Tatsächlich sinnvoll ist der Einsatz des Prüfpunktverfahrens somit auch nur dann, wenn zwischen der geforderten Genauigkeit und der Wiederholgenauigkeit noch ausreichend Spielraum für die zuverlässige Erkennung systematischer Fehler vorhanden ist.
- Wird das Prüfpunktverfahren in Verbindung mit einer Aufteilung der Messungen an den Referenzpunkten über mehrere Takte betrieben, so dauert es nach einer erkannten Abweichung dementsprechend auch mehrere Takte, bis die Genauigkeit der Anlage wiederhergestellt ist.
- Wird eine ausreichend große Anzahl an Prüfpunkten gewählt, so stellt sich die Frage, warum die gleiche Zeit nicht zum unmittelbaren Messen von Eingangsdaten für die Kompensation verwendet wird. Eine gleichzeitige Nutzung für beide

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

Zwecke scheidet dann aus, wenn das Messsystem nur komensierte oder unkomensierte Daten ausgeben kann.

Bedingt sinnvoll ist das Verfahren somit nur, wenn keine unmittelbare Taktzeitbindung vorhanden ist, da dann nur bei Bedarf nachkalibriert werden muss. In allen anderen Fällen haben sich andere Vorgehensweisen (Bild 3.13) sowohl in Versuchen als auch in der Praxis besser bewährt:

- Vor oder nach jedem Bearbeitungsauftrag werden einige Punkte an der Referenzumgebung vermessen. Sobald alle Punkte einmal gemessen wurden, wird eine Parameteridentifikation ausgelöst. Voraussetzung ist hierbei jedoch, dass zwischenzeitlich kein (längerer) Stillstand aufgetreten ist. In diesem Fall müssen bereits durchgeführte Messungen wiederholt werden.
- Wird die Referenzumgebung innerhalb eines einzigen Taktes vollständig vermessen, so wird eine zeitliche Schranke für die Gültigkeit der Kompensation festgelegt. Bei einer Überschreitung wird unmittelbar mit der Nachkalibrierung begonnen.



*Bild 3.13: Mögliche Methoden zur Auslösung der Kompensation*

Anstelle einer Überprüfung der Anlagengenauigkeit wird die Nachkalibrierung des Roboters somit nun zyklisch in Abhängigkeit von der Anzahl der verstrichenen Takte beziehungsweise zeitgesteuert durchgeführt.

### 3.7.4 Durchführung der Kompensation

Zur Durchführung der Kompensation (Bild 3.14) werden zunächst die Punkte der Referenzumgebung ohne Berücksichtigung eventuell vorhandener Korrekturdaten vermessen. Dies kann, wie in Abschnitt 3.7.3 bereits angedeutet, verteilt über mehrere Takte oder in einem einzigen Durchlauf erfolgen. Die hierbei gemessene Abweichung stellt die aktuelle Drift des Roboters aufgrund des aktuellen Betriebszustandes dar. Die gewonnenen Messwerte werden nun mit Hilfe der während der Inbetriebnahme der Anlage ermittelten Absolutpositionen der Referenzpunkte zu Absolutmesswerten verarbeitet und an die Kompensationsrechnung übergeben.

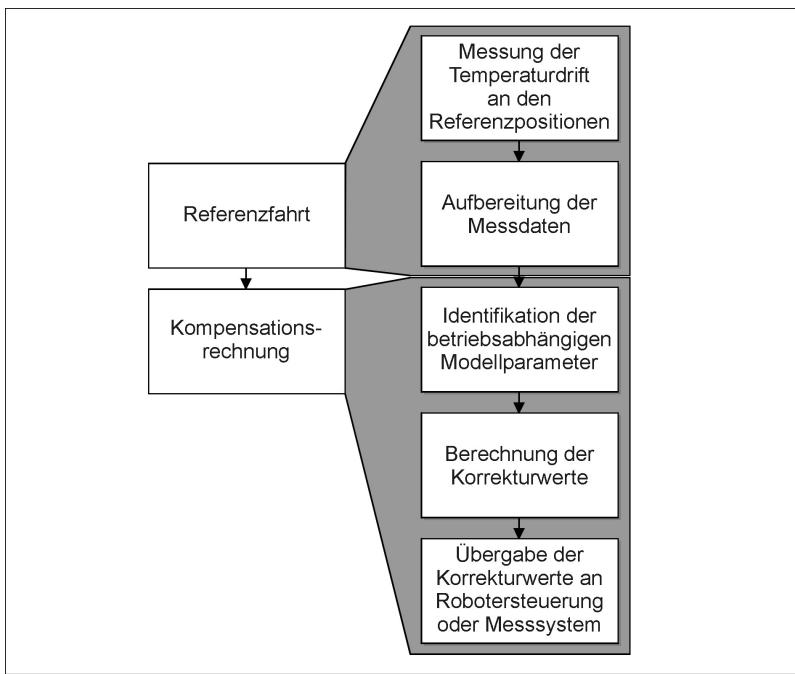


Bild 3.14: Durchführung der Kompensation

Hierzu werden mit der Kalibriersoftware anhand der Messwerte die für die Kompensation freigeschalteten Parameter identifiziert (Abschn. 2.6.3.1, Formeln 15ff). Als Eingangsmodell für die Nachkalibrierung kann sowohl das nominale, als auch ein im Rahmen einer Grundkalibrierung identifiziertes Robotermodell verwendet werden. Nach der Parameteridentifikation liegt ein aktualisierter Parametersatz vor, mit dessen

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Hilfe mit der Kalibriersoftware Korrekturwerte für die einzelnen Arbeitspunkte ermittelt werden können. Je nachdem, in welcher Form die Eingangsdaten vorliegen und die Ausgangsdaten benötigt werden, sind unterschiedliche Wege erforderlich.

Die Positionsdaten können entweder in Form von Achswinkelpositionen des Roboters oder als kartesische Werte vorliegen, die mit Hilfe eines grundkalibrierten oder mit Hilfe des nominalen Robotermodells von der Kalibriersoftware oder der Robotersteuerung berechnet wurden.

Die möglichen Korrekturdaten unterscheiden sich zunächst hinsichtlich ihrer Verwendung: Es besteht, z. B. bei Einsatz der Kompensation in Messanlagen, sowohl die Möglichkeit, lediglich die Messwerte zu korrigieren (Datenkompensation), als auch eine Anpassung der Roboterpose am Messpunkt vorzunehmen (Posenkompensation).

Bei Korrektur des Messwertes wird immer ein Korrekturvektor in Form von  $\Delta x$ ,  $\Delta y$ ,  $\Delta z$  benötigt. Soll jedoch die Roboterposition direkt korrigiert werden, so können entweder korrigierte Achswinkelwerte oder eine rechnerische Position im Raum notwendig sein, die der Roboter anstelle der Ausgangsposition anfahren muss, um den ursprünglichen Punkt (Sollposition) wiederzufinden.

Geht man von der Annahme aus, dass die Robotersteuerung mit dem nominalen Modell arbeitet, so tritt meistens eine der folgenden Konstellationen auf:

- Die Roboterpose liegt in Form von Achswinkeln vor. Die Korrektur soll zunächst unmittelbar über die Roboterpose erfolgen. In diesem Fall muss die Position und Orientierung des anzufahrenden Punktes zunächst mit Hilfe des nominalen Robotermodells vorwärts und anschließend anhand des nachkalibrierten Modells rückwärts transformiert werden. Als Ergebnis erhält man unmittelbar die zum Erreichen des Punktes notwendigen, korrigierten Achswinkel. Diese müssen zur Robotersteuerung übertragen werden (Bild 3.15: A').
- Die Ausgangssituation ist die gleiche wie bei 1. Die Korrektur soll hier jedoch im Falle einer Messanlage lediglich in Form einer Datenkompensation erfolgen. Um die notwendigen Korrekturdaten zu erhalten, muss die gegebene Achswinkelposition mit Hilfe des nachkalibrierten Modells vorwärts transformiert werden. Von der berechneten Position muss dann die bei der Einrichtung berechnete Position abgezogen werden. Addiert man den somit ermittelten Korrekturvektor zum Messwert hinzu, so erhält man das komensierte Messergebnis (Bild 3.15: A').
- Die Roboterpose liegt in Form von Position ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) und Orientierung ( $R_x$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ ) vor. Die Kompensation soll über eine Korrektur der Roboterpose erfolgen. Hierzu muss zunächst eine Rückwärtstransformation mit Hilfe des nachkalibrierten Modells erfolgen. Als Ergebnis liegt die Roboterpose dann in Form von Achswinkeln vor, die der Roboter anfahren müsste, um die Sollposition zu erreichen. Die berechneten Achswinkel werden nun mit Hilfe des nominalen bzw.

des verwendeten Steuerungsmodells vorwärts transformiert. Als Ergebnis erhält man unmittelbar die korrigierte Position. Diese muss zur Robotersteuerung übertragen werden (Bild 3.15: B).

- Wie bei 3. liegt die Roboterpose in Form von Position (x,y,z) und Orientierung (Rx,Ry,Rz) vor. Diesmal soll jedoch anstelle einer Arbeitspose lediglich ein Messwert korrigiert werden. Hierzu werden die Eingangsdaten zunächst mit Hilfe des nominalen Modells rückwärts und dann mit dem nachkalibrierten Modell vorwärts transformiert. Um den Korrekturvektor zu erhalten, werden vom Ergebnis die Eingangsdaten abgezogen (Bild 3.15: B').

Während bei Handhabungsaufgaben nur die Posenkompensation zum Einsatz kommen kann, haben beim Einsatz in Messanlagen sowohl die Posen- als auch die Datenkompensation ihre Berechtigung.

Die Datenkompensation ermöglicht bei korrekter Einrichtung einer Messapplikation geringfügig höhere Genauigkeiten. Durch den Umstand, dass hierbei die Roboterposition in der Steuerung nicht verändert wird, ist sichergestellt, dass Bahnabweichungen lediglich im Bereich der betriebsbedingten Abweichungen auftreten und somit bei den meisten Robotern und Umgebungsbedingungen im Bereich von 1 mm und darunter liegen. Da während des Betriebes keine korrigierten Posedaten zum Roboter übertragen werden müssen, verkürzen sich aufgrund der wegfallenden Kommunikationszeiten darüber hinaus die Zykluszeiten. Nachteilig ist neben der Tatsache, dass das Verfahren nur bei Messanwendungen eingesetzt werden kann, auch, dass sich Einrichtfehler einzelner Messmerkmale (z. B. Orientierungsabweichungen) stärker auf die Messgenauigkeit auswirken können als bei einer Posenkompensation, da die Stellung des Roboters relativ zum Messpunkt nach wie vor der Drift aufgrund betriebsabhängiger Einflüsse unterliegt.

Die Posenkompensation hingegen ist riskanter als die Datenkompensation, da Fehler bei der Berechnung und Übertragung von Korrekturposen zu Kollisionen in der Anlage führen können. Daneben können bereits kleine Korrekturen von Posen im Bereich singulärer Stellungen zu großen Unterschieden in der Achswinkelposition des Roboters führen, was neben möglichen Genauigkeitsverlusten ebenfalls das Risiko von Kollisionen birgt.

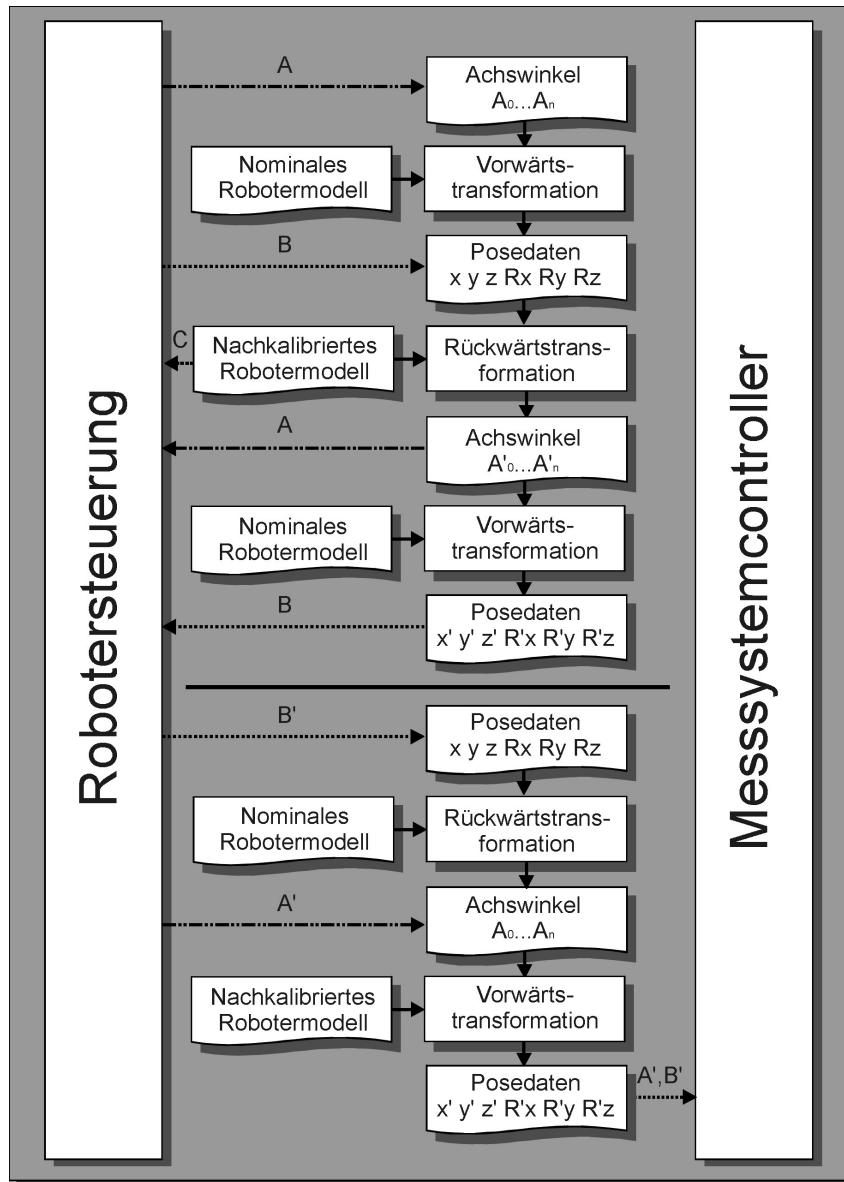


Bild 3.15: Umsetzungsvarianten zur Verwendung der Ergebnisse der Kompensationsrechnung

Neben den oben beschriebenen Varianten der Daten- und Posenkompensation besteht theoretisch die Möglichkeit, anhand der identifizierten Modellparameter unmittelbar das in der Robotersteuerung abgelegte Steuerungsmodell zu aktualisieren. Hierzu werden die im nachkalibrierten RobotermodeLL enthaltenen identifizierten Parameter direkt an die Steuerung übertragen, wo sie die entsprechenden Modellparameter des Steuerungsmodells ersetzen (Bild 3.15: C). Diese Vorgehensweise ist jedoch an folgende Randbedingungen geknüpft:

- Das Steuerungsmodell und das von der Kompensation identifizierte Modell müssen hinsichtlich Struktur, Aufbau und Werten der Eingangsparameter identisch sein.
- Es müssen grundsätzlich alle nachkalibrierten Parameter übertragen und bei der Positionsberechnung berücksichtigt werden. Das Übertragen lediglich einzelner Parameter oder Parametergruppen würde zwangsläufig zu Positionierfehlern führen.
- Die Aktualisierung des Steuerungsmodells muss ohne Neustart der Steuerung möglich sein. Bei den meisten Robotersteuerungen ist dies bislang nicht ohne weitreichende Eingriffe durch den Hersteller realisierbar.

Die Aktualisierung des Steuerungsmodells würde neben der erhöhten Positioniergenauigkeit zwangsläufig auch eine Verbesserung der Bahngenaugkeit mit sich bringen, da dann das nachkalibrierte Modell auch zur Bahnplanung eingesetzt werden kann. Hierdurch erweitern sich die Einsatzmöglichkeiten der Methode deutlich.

#### 3.7.5 Durchführung der Bearbeitungsaufgabe

Zur Durchführung der eigentlichen Bearbeitungsaufgabe muss in der Robotersteuerung lediglich das jeweilige Bewegungsprogramm gestartet werden. Voraussetzung hierfür ist, dass zuvor alle notwendigen Korrekturdaten an die Robotersteuerung übertragen wurden.

#### 3.7.6 Zusammenfassung

Der prinzipielle Ablauf der Kompensation im Betrieb orientiert sich an der von GRÄSER (1999) beschriebenen Vorgehensweise, jedoch wird auf die Überprüfung der aktuellen Genauigkeit des Roboters anhand von Prüfpunkten verzichtet. Stattdessen wird alternativ nach dem Anlagenstart die Gültigkeit der letzten Kalibrierung beispielsweise anhand eines Zeitstempels überprüft. Ist die Kalibrierung noch gültig, so wird unmittelbar mit der Mess- oder Bearbeitungsaufgabe begonnen. Andernfalls wird vor der Messung bzw. Bearbeitung zunächst eine Referenzfahrt eingeleitet, der

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

aktueller Parametersatz identifiziert und eine Korrektur der Roboterposen vorgenommen.

Um eine einfache Übertragbarkeit der Methode auf unterschiedliche Robotertypen sicherzustellen, muss bei der Konzeption der notwendigen Schnittstellen darauf geachtet werden, dass nur Schnittstellen verwendet werden, die für alle in Frage kommenden Roboter- und Steuerungstypen standardmäßig verfügbar sind, da nur dann auch die zugehörige Software problemlos portierbar ist.

#### **3.8 Absolutgenaue Roboterapplikationen**

Die primäre Intention einer Temperaturdriftkompensation ist zunächst die Sicherstellung einer bestimmten Wiederholgenauigkeit auch unter Betriebseinflüssen. Im Gegensatz hierzu zielt die Absolutkalibrierung eines Roboters darauf ab, systematische Abweichungen im Arbeitsraum aufgrund stationärer Einflüsse auszugleichen. Die Abgrenzung zwischen beiden Verfahren lag bislang zum einen in den verwendeten Modellen, zum anderen in der einmaligen oder zyklisch durchzuführenden Parameteridentifikation sowie den hierzu verwendeten Eingangsdaten. Durch die Verwendung einer Standardkalibriersoftware zur Kompensation wird diese Trennung weniger deutlich, da die verwendeten Modelle zumindest hinsichtlich ihres Aufbaus identisch sind. Der Unterschied besteht nun hauptsächlich in den für die Parameteridentifikation verwendeten Eingangsdaten.

Für eine Kalibrierung im Rahmen einer Kompensation muss sichergestellt sein, dass im Ausgangszustand, der in diesem Fall mit dem Sollzustand identisch ist, eine möglichst große Übereinstimmung zwischen Modell und Eingangsdaten vorhanden ist. Dies kann dadurch geschehen, dass die Lagen der Messpunkte zur Gewinnung der Eingangsdaten für die Kompensation mit Hilfe des zur Beschreibung des Ausgangs- oder Sollzustandes verwendeten Modells berechnet werden. Dieses Modell kann im einfachsten Fall das nominale Modell sein.

Im Gegensatz hierzu stimmen bei einer Absolutkalibrierung Ausgangs- und Sollzustand nicht überein. Ziel der Absolutkalibrierung ist es, diesen Unterschied auszugleichen. Die zu lösende Aufgabe gliedert sich somit in zwei Unterpunkte:

- Herstellung der Absolutgenauigkeit im Rahmen einer Grundkalibrierung.
- Aufrechterhaltung der Genauigkeit im Betrieb durch Nachkalibrieren bzw. Kompensation.

### 3.8.1 Voraussetzungen für den Aufbau einer absolutgenauen Roboterapplikation

Mit dem Aufbau einer absolutgenauen Roboterapplikation ist entweder das Ziel verbunden, offline generierte Verfahrprogramme ohne Nachteachen auf den Roboter übertragen zu können oder, im Falle einer Messapplikation, absolute Messdaten zu erhalten, die in Bezug auf ihre Genauigkeit mit denen einer Koordinatenmessmaschine zumindest annähernd vergleichbar sind. Dies setzt, wie auch im Falle einer reinen Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse, eine ausreichende Übereinstimmung von Modell und realer Anwendung voraus. Jedoch sind in diesem Fall Näherungen, die bislang gemacht wurden, um den Einfluss unbekannter Parameter aus dem Roboterumfeld zu minimieren, nicht mehr zulässig.

Grundsätzlich gilt: Alle Größen, die Bestandteil der Transformation vom Roboterfuß zum Mess- oder Kalibrierpunkt sind und die nicht im Rahmen der Kalibrierung ermittelt werden, müssen vorab so genau wie möglich, beispielsweise durch Vermessung, bestimmt werden, da sie sonst zu systematischen Fehlern bei der Parameteridentifikation des Roboters führen. Dies betrifft grundsätzlich die Lagen von Kalibrier- oder Referenzpunkten im Raumkoordinatensystem. Diese wurden bislang mit Hilfe des jeweils verwendeten Robotermodells berechnet. Dies entspricht der Annahme, dass das vom Roboter aufgespannte Koordinatensystem exakt mit dem realen Raumkoordinatensystem übereinstimmt. Für eine absolutgenaue Applikation ist dies nicht ausreichend. Hier müssen die Lagen aller Punkte im Raumkoordinatensystem sowie alle Koordinatentransformationen, die mit diesem in unmittelbarem Zusammenhang stehen, exakt erfasst werden. Dies hat jedoch auch zur Folge, dass die Genauigkeit des hierzu verwendeten (externen) Messsystems als zusätzliche Einflussgröße zu berücksichtigen ist.

Bei Verwendung der Kalibriersoftware RoboCal ist ebenso die exakte Werkzeugtransformation vorher zu ermitteln, da diese von der Parameteridentifikation ausgeschlossen ist. Als unbekannte Größe dürfen somit lediglich die exakten Parameterwerte des Robotermodells vom Roboterfuß bis zum Flansch übrig bleiben.

### 3.8.2 Grundkalibrierung

Zur Herstellung der Absolutgenauigkeit kommen theoretisch drei Möglichkeiten in Betracht:

- a. Bei der Erstinbetriebnahme wird der TCP des Roboters mit Hilfe eines zusätzlichen, externen Messsystems, wie z. B. eines Lasertrackers oder Theodoliten, an einer ausreichenden Anzahl unterschiedlicher Posen vermessen. Der anhand dieser

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

Daten identifizierte Parametersatz wird dann als Ausgangsmodell für die spätere Kompensation verwendet.

- b. Die Kalibrierung erfolgt wie bei a einmalig bei der Erstinbetriebnahme, jedoch wird das Steuerungsmodell des Roboters unmittelbar angepasst. Dies entspricht dem Einsatz eines vorkalibrierten Roboters. Die Kompensation bleibt hiervon unberührt.
- c. Zur Grundkalibrierung wird das gleiche Messsystem wie für die Kompensation verwendet. Dies ist in der Regel ein am Roboter angeflanschter Sensor in Verbindung mit einer raumfesten Referenz. Diese wurde zuvor mit Hilfe eines externen Messsystems hinsichtlich ihrer Lage im Raum beziehungsweise relativ zum Roboter sowie der Lage der einzelnen Referenzpunkte vermessen. Mit Hilfe des am Roboter angeflanschten Sensors werden nun die Positionierabweichungen des Roboters relativ zum Arbeitspunkt des Sensors vermessen. Der Arbeitspunkt des Sensors muss hierbei mit dem Tool Center Point des Roboters identisch sein. Die Sensororientierung kann mit ausreichender Genauigkeit anhand der Achswinkelstellungen des Roboters berechnet werden.

Die Grundkalibrierung unterscheidet sich somit vom herkömmlichen Vorgehen lediglich im Fall der Verwendung eines roboteradaptierten Messsystems. Dies betrifft neben der Art und Weise der Messdatengewinnung insbesondere die Auswahl der zu kalibrierenden Parameter. Für diese gelten dieselben Einschränkungen, wie sie in Abschnitt 3.5.5.1 für die Kompensation beschrieben wurden. Der Vorteil der unter c beschriebenen Methode liegt in der Möglichkeit, Nachkalibrierungen ohne Hinzuziehen eines zusätzlichen, externen Messsystems durchzuführen. Dies eröffnet auch die Option, die Kalibrierung in bestimmten Störungsfällen zur Fehlersuche und -behebung heranzuziehen. Hinsichtlich der erreichbaren Genauigkeit sind die Varianten a und b zu bevorzugen, da hier der gesamte Arbeitsraum des Roboters bei der Parameteridentifikation berücksichtigt wird. Mit diesen lässt sich, wie in Versuchen an einem Roboter vom Typ ABB IRB 4400/45 und Trumpf BendMaster (Bild 3.16) nachgewiesen werden konnte, eine Absolutgenauigkeit in der Größenordnung der dreifachen Wiederholgenauigkeit des Systems, bestehend aus Messsystem und Roboter, erreichen. Eine Kalibrierung am Referenzkörper liefert nur dann hiermit vergleichbare Ergebnisse, wenn der tatsächlich genutzte Achsarbeitsraum des Roboters weitgehend deckungsgleich mit dem an der Referenzumgebung dargestellten Arbeitsraum ist. Dies wiederum ist nur dann möglich, wenn der Referenzkörper z.B. über geeignete Aufnahmen ausschließlich zu Kalibrierzwecken in den Arbeitsraum des Roboters eingebracht und unmittelbar danach wieder aus diesem entfernt wird. Eine entsprechende Vorrichtung wurde beispielsweise im Fall des Trumpf BendMasters (Bild 3.16) realisiert.

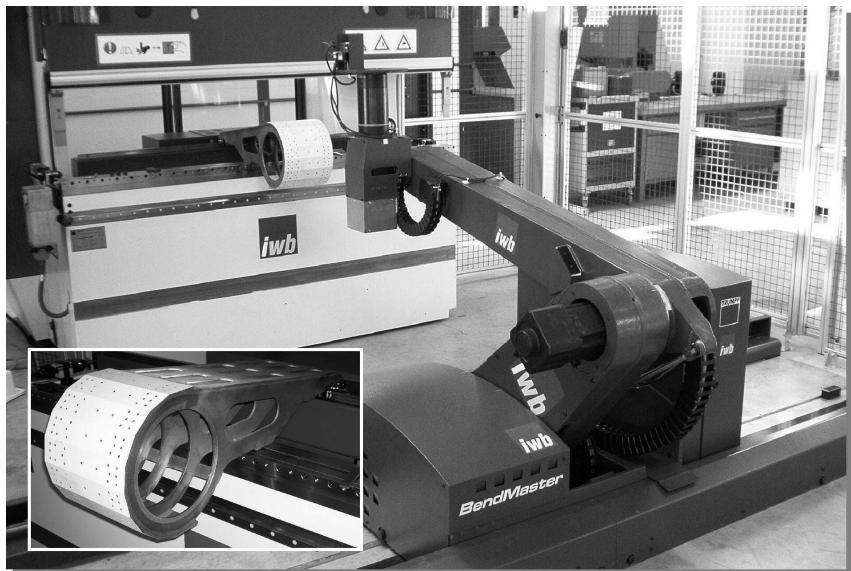


Bild 3.16: *Trumpf BendMaster und zugehöriger Referenzkörper*

#### 3.8.3 Kompensation

Für das Aufrechterhalten der Genauigkeit im Betrieb durch Kompensation bieten sich hinsichtlich der Messdatengewinnung zunächst scheinbar zwei Möglichkeiten an:

- a. Die Kompensation erfolgt anhand von Messdaten, die an Referenzpunkten gemessen werden, deren Lagen mit Hilfe des kalibrierten oder, falls ein bereits vorkalibrierter Roboter verwendet wird, auch nominalen Robotermodeells berechnet werden.
- b. Zur Kompensation werden anstatt berechneter Positionsdaten für die Referenzpunkte die Ergebnisse einer Vermessung derselben als Ausgangs- bzw. Sollzustand herangezogen.

Unter Genauigkeitsaspekten ist a die zu bevorzugende Variante. Nur bei dieser ist sichergestellt, dass ausschließlich betriebsbedingte Drifteffekte in Verbindung mit der systemimmanenten Wiederholgenauigkeit das Messergebnis an den Referenzpunkten und somit das Kompensationsergebnis beeinflussen. Werden stattdessen vermessene Referenzposen verwendet, so überlagern sich den eigentlich zu erfassenden Drifteffekten noch die Restfehler der Absolutkalibrierung sowie die Messabweichungen

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

---

des zur Vermessung der Positionen verwendeten externen Messsystems. Dies kann wiederum zu einer Verschlechterung des Kompensationsergebnisses bis hin zur Unbrauchbarkeit führen (vergleiche hierzu Abschn. 3.7.2).

Der Ablauf der Kompensation an sich bleibt auch in absolutgenau eingerichteten Zellen unverändert.

#### **3.8.4 Zusammenfassung**

Der Aufbau einer absolutgenau arbeitenden Roboterzelle gliedert sich in zwei Teilaufgaben:

Zunächst muss durch eine Grundkalibrierung des Roboters die Absolutgenauigkeit sichergestellt werden. Hierzu ist der Einsatz externer Messsysteme, wie beispielsweise eines Lasertrackers, dem Einsatz roboteradaptierter Messsysteme vorzuziehen, da diese aufgrund der notwendigen Referenzumgebung nur einen geringen Teil des Arbeitsraumes abdecken können. Hierdurch sind viele Parameter, die an den kartesischen Arbeitsraum gebunden sind, nur schwer oder gar nicht identifizierbar.

Im zweiten Schritt muss die Genauigkeit durch eine Kompensation aufrechterhalten werden. Hierzu wird durch Berechnung der Lage der Messpositionen an der Referenzumgebung unter Berücksichtigung des identifizierten RobotermodeLLs erreicht, dass ausschließlich betriebsbedingte Abweichungen am Referenzkörper gemessen werden. Die eigentliche Kompensationsrechnung basiert dann ebenfalls auf dem eingangs identifizierten Modell.

### **3.9 Einflüsse auf die Genauigkeit**

Betrachtet man die Prozesskette von der Vermessung des Roboters bis zu seinem Einsatz, so hat jeder Teilschritt und alle daran beteiligten Komponenten einen Einfluss auf die Genauigkeit des Gesamtsystems. Letztendlich entscheidend ist in erster Linie die Durchgängigkeit der verwendeten Modelle und der zur Kompensation verwendeten Eingangsdaten. Insbesondere die Einflüsse, die nicht im Modell berücksichtigt werden, können die Funktion des Gesamtsystems nachhaltig stören. Generell zu unterscheiden sind drei derartige Haupteinflussgrößen:

- a. Systematische Abweichungen, die durch das Kompensations- oder Kalibrierverfahren erkannt und minimiert werden sollen.
- b. Systematische Abweichungen, deren Ursachen nicht im Modell berücksichtigt werden und die die zu kompensierenden oder zu kalibrierenden Abweichungen überlagern.

- c. Zufällige Einflüsse, die die systematischen Einflüsse überlagern und aufgrund ihres zufälligen Charakters generell nicht vorhersagbar und somit nicht kompensierbar sind.

Für die Genauigkeit der Kompensation oder Kalibrierung gilt nun grundsätzlich, dass das Ergebnis um so besser wird, je größer der Anteil der systematischen Abweichungen (a), die mit Hilfe des verwendeten Modells berücksichtigt werden können, im Verhältnis zu den nicht vom Modell erfassten systematischen (b) sowie den zufälligen (c) Störgrößen ist.

In der Praxis zeigt sich dies darin, dass insbesondere bei nicht vorhandenen oder kleinen Abweichungen aufgrund betriebsabhängiger Einflüsse zunächst eine scheinbare Verschlechterung der Wiederholgenauigkeit eines kompensierten Systems zu beobachten ist. Die Parameteridentifikation wird dann überwiegend von den nicht im Modell berücksichtigten systematischen und zufälligen Einflüssen bestimmt, was zwangsweise zu Abweichungen bei der Parameteridentifikation und somit zu geringfügig fehlerbehafteten Posekorrekturen führt. Die mit der Kalibriersoftware identifizierten Parameter beschreiben in diesem Fall ein Verhalten, das in der Realität entweder nicht existiert oder eigentlich nicht auf den Roboter zurückzuführen ist. Zufällige Streuungen werden hier als systematische Abweichung interpretiert oder aus dem Umfeld des Roboters stammende Abweichungen werden fälschlicherweise dem Roboter zugerechnet. Insbesondere zufällige Einflüsse werden umso relevanter, je weniger Eingangsdaten in Form von Messungen zur Verfügung stehen, um ihren Einfluss statistisch herauszumitteln.

Idealerweise sollten die Eingangsdaten bei der Kompensation und bei der Kalibrierung somit nur Abweichungen aufweisen, die einerseits ausschließlich dem Roboter zuzurechnen sind, andererseits auch durch das jeweils verwendete Modell berücksichtigt werden. Um dies zu erreichen, muss zunächst bekannt sein, welche Einflüsse überhaupt auf das Gesamtsystem einwirken (Bild 3.17). Dies sind Einflüsse aus:

- dem Messsystem,
- der Modellierung,
- der Berechnung (Parameteridentifikation und Posenkompensation) und
- der Positioniergenauigkeit des Roboters.

#### **Einflüsse aus dem Messsystem:**

Unter Einflüssen aus dem Messsystem sind alle Einflüsse zu verstehen, die direkt oder indirekt Einfluss auf die Messgenauigkeit haben. Hier ist zunächst zwischen roboteradaptierten Messsystemen (z. B. Perceptron IPNet mit FlexiCam) und externen Messsystemen (z. B. Lasertracker) zu unterscheiden. Im Einzelnen Bestandteil der Messgenauigkeit sind folgende Einflussfaktoren:

- die Wiederholgenauigkeit des Messsystems,

### 3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse

- die Absolutgenauigkeit des Messsystems,
- die Wiederholgenauigkeit des Roboters sowie
- die Temperaturdrift des Messsystems.

Die Wiederholgenauigkeit des Roboters spielt insofern eine Rolle, als sie unmittelbar in Form zusätzlicher Streuungen in das Messergebnis mit einfließt. Die Temperaturdrift des Messsystems kann beispielsweise auch durch einen nicht temperaturstabilen Referenzkörper verursacht werden.

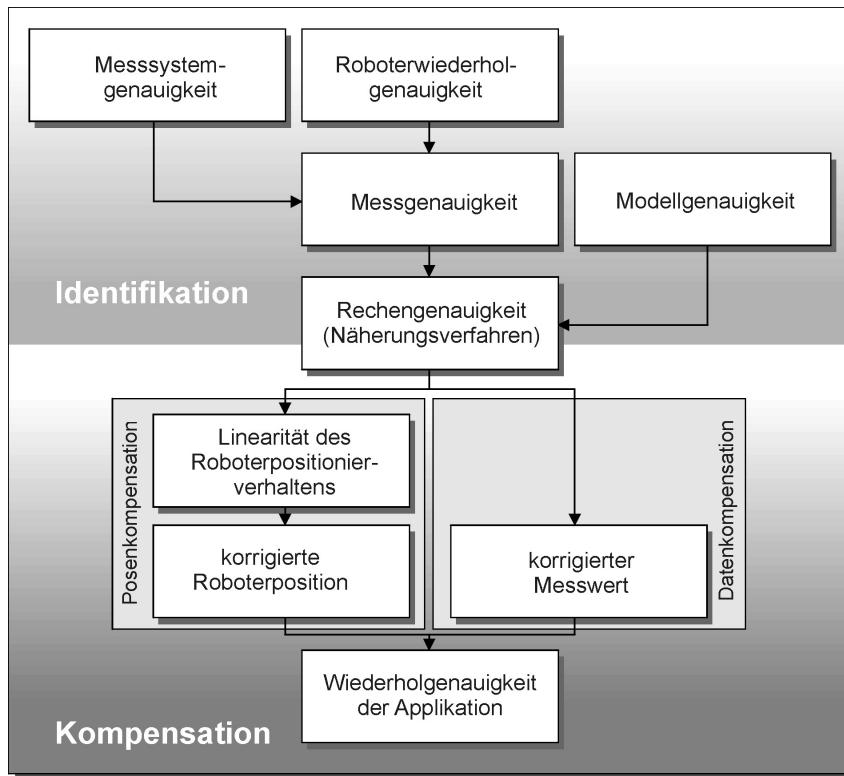


Bild 3.17: Einflüsse auf die Genauigkeit der Kompensation

#### Einflüsse aus der Modellierung:

Die Modellierung beeinflusst die Genauigkeit dadurch, dass sie letztendlich vorgibt, welche Effekte durch das Modell abgebildet werden können. Jede Vereinfachung

dessen kann somit zu Genauigkeitsverlusten führen. Ob dies in der Praxis eintritt, hängt jedoch vor allem von der Identifizierbarkeit der Parameter ab. Modellparameter, die zwar im Modell vorhanden sind, jedoch nicht identifizierbar oder anderweitig mit sinnvollen Werten belegbar sind, bewirken keine Genauigkeitssteigerung. Eine Reduzierung des Modells um diese Parameter hat somit auch keinen Einfluss auf die erzielbare Genauigkeit. Die Parameterreduzierung im Rahmen der Kompensation ist somit als Kompromiss zwischen der Menge der innerhalb einer bestimmten Zeitschranke erfassbaren Eingangsdaten und der letztendlich benötigten Genauigkeit zu sehen.

#### **Einflüsse aus der Berechnung:**

Die Genauigkeit der Berechnung ist insbesondere von der Qualität und der Menge der Eingangsdaten (Messwerte) abhängig. Darüber hinaus spielen Rundungsfehler, die Konvergenz des von der Kalibrierung eingesetzten Software verwendeten Näherungsverfahrens sowie die grundsätzliche Identifizierbarkeit des verwendeten Parametersatzes eine Rolle.

#### **Einflüsse aus der Positioniergenauigkeit des Roboters:**

Der Einfluss des Roboters ist an zwei Stellen hinsichtlich der erzielbaren Genauigkeit relevant:

- Bei der Erfassung der Kalibrier- oder Referenzmessdaten hängt die Genauigkeit der Messdaten unmittelbar von der Wiederholgenauigkeit des Roboters ab.
- Bei der Umsetzung der Korrektur in Form einer Posenkompensation spielt neben der Wiederholgenauigkeit auch die Absolutgenauigkeit des Roboters eine Rolle. Insbesondere ist hier die Übereinstimmung zwischen Korrekturwert und tatsächlich umgesetzter Korrektur entscheidend.

#### **3.9.1 Zusammenfassung und erzielbare Genauigkeit**

Insgesamt können über die mit der Methode zur Kompensation erzielbare Genauigkeit folgende Aussagen getroffen werden:

Ihr Einsatz bewirkt zunächst grundsätzlich eine scheinbare Verschlechterung der Wiederholgenauigkeit des Systems. Die Ursache hierfür liegt in der Summe der Einflüsse von der Erfassung der Kompensationsmessdaten über die Modellierung, Parameteridentifikation und Korrekturwertberechnung bis zur Umsetzung des Korrekturwertes durch den Roboter. Insbesondere bei nur kleinen, betriebsbedingten Abweichungen lässt sich dieser Effekt gut beobachten.

Systematische Abweichungen können jedoch fast vollständig eliminiert werden, sofern sich alle relevanten Effekte mit Hilfe des jeweils verwendeten Modells abbilden

### **3 Entwicklung einer Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

lassen. Einflüsse hingegen, deren Ursache nicht in der Roboterkinematik liegt, können sich störend auswirken. Dies kann beispielsweise auch ein nicht temperaturstabiler Referenzkörper sein.

Mit der Methode lassen sich Drifteffekte aufgrund betriebsabhängiger Einflüsse im gesamten Arbeitsraum eines Roboters bis in den Bereich der dreifachen Messgenauigkeit des Systems bestehend aus Messsystem, Referenzkörper und Roboter reduzieren. Dieser Richtwert beinhaltet bereits Streuungen aufgrund der Wiederholgenauigkeit.

### **4 Anwendungsbeispiel**

Die in Kap. 3 beschriebene Methode wurde in einem Anwendungsbeispiel umgesetzt. Dessen Beschreibung im Rahmen dieses Kapitels beginnt mit der Auswahl der Testapplikation (Abschn. 4.1) und der verwendeten Kalibriersoftware (Abschn. 4.2). Anschließend wird die Entwicklung eines Referenzkörpers erläutert (Abschn. 4.3). Danach folgt die Umsetzung des Kompensationskreises (Abschn. 4.4). Mit dem Verfahren erzielte Kompensationsergebnisse werden in Abschn. 4.5 dargestellt. Abschn. 4.6 enthält eine kurze, wirtschaftliche Bewertung des Verfahrens anhand des Anwendungsbeispiels. Auf die nochmalige Beschreibung des Verfahrens zur Parameterreduktion an sich wird im Rahmen des Anwendungsbeispiels verzichtet, da die hierbei gesammelten Erfahrungen bereits in Abschn. 3.6 ausführlich behandelt wurden.

#### **4.1 Auswahl der Testapplikation**

Die Auswahl einer Testapplikation für die Kompensationsmethode erfolgte anhand folgender vier Überlegungen:

- An die Anwendung müssen besondere Genauigkeitsanforderungen hinsichtlich der Wiederholgenauigkeit gestellt werden, die von Standardrobotern bislang nicht ohne weiteres erfüllt werden konnten. Ansonsten wäre eine weitere Kompensation nicht notwendig und der zusätzliche Aufwand nicht zu rechtfertigen.
- Es müssen Möglichkeiten vorhanden sein, das erreichte Ergebnis unmittelbar quantifizieren zu können.
- Die Implementierung einer Temperaturkompensation soll mit möglichst geringem Aufwand an Zusatzhardware (z. B. Messsensorik) möglich sein.
- Die übrigen industriellen Anforderungen an die Anwendung müssen bekannt sein.

Es gibt derzeit nur eine Roboteranwendung, die diese vier Grundanforderungen gleichzeitig erfüllt und sich daher im Zusammenhang mit der Erprobung von Verfahren zur Genauigkeitssteigerung bei Industrierobotern bereits zur Standardanwendung entwickelt hat (WIEST 2001, GRÄSER 1999, LETTENBAUER 2002), die robotergestützte Inline-Messzelle.

Robotergestützte Inline-Messzellen dienen zur Vermessung von Bauteilen (meist Karosserien im Rohbau in der Automobilindustrie) in der Linie mit Hilfe eines an den Roboter angeflanschten Sensors. Sie unterliegen Genauigkeitsanforderungen, die derzeit von Industrierobotern zwar angesichts ausreichend hoher Wiederholgenauigkeiten theoretisch erreicht werden können, in der Praxis jedoch unter Betriebsbedingungen bislang nicht erfüllbar waren. Außerdem verfügen sie bereits

## 4 Anwendungsbeispiel

---

über die notwendige Messsensorik und somit Zusatzhardware, die zur Kompensation notwendig ist. Bei einem geeigneten Versuchsaufbau ist ferner eine unmittelbare Quantifizierung des Kompensationseffektes möglich, da dieser direkt am Messobjekt überprüft werden kann.

Der Gedanke, Messaufgaben im Rohbau in der Automobilindustrie mit Robotern zu lösen, hat vor allem wirtschaftliche Hintergründe. Noch bis vor wenigen Jahren beschränkte sich die Prozesskontrolle auf wenige, stichprobenartige Messungen täglich, die auf Koordinatenmessmaschinen an ausgeschleusten Karosserien durchgeführt wurden. Da bei diesem Verfahren mitunter mehrere Stunden vergehen, bis das Messergebnis vorliegt, konnte es passieren, dass Abweichungen im Prozess über mehrere Stunden hinweg unerkannt blieben und spätestens in der Endmontage zu Problemen führten, weil Anbauteile schwer oder nicht montierbar waren oder Spaltmaße nicht eingehalten werden konnten. Um diesem Problem zu begegnen, suchte man nach Möglichkeiten, eine 100%-Kontrolle im Rohbau unmittelbar in der Linie durchzuführen. Dies wurde realisiert, indem man für jeden einzelnen Messpunkt einen optischen Sensor installierte, der mit Hilfe einer integrierten Kamera anhand des Kontrastes ein Merkmal vermaß. Das Merkmal kann beispielsweise eine Bohrung, Blechkante oder ähnliches sein. Die Auswertung erfolgt über Triangulation oder durch Vermessung des Verlaufs einer auf das Blech projizierten Laserlinie im Kamerabild (Bild 4.1).

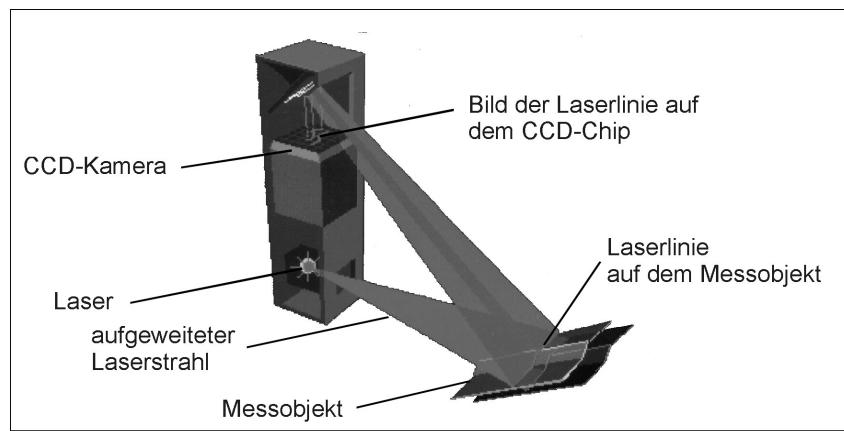


Bild 4.1: Funktionsprinzip eines Laser-Triangulationssensors [Bildnachweis: Perceptron]

Mit dem Verfahren sind ein-, zwei- oder dreidimensionale Messungen möglich: eindimensional durch Berechnung des Abstandes beispielweise einer Blechoberfläche von der Kamera durch Auswertung einer Laserlinie mittels Triangulation, zweidimensional durch Auswertung des Mittelpunktes einer Bohrung im Kamerabild sowie dreidimensional durch Kombination beider Verfahren.

Der größte Nachteil derartiger Anlagen liegt in den relativ hohen Kosten. Pro Sensor betragen diese derzeit etwa € 7.500,- zuzüglich der Kosten für den notwendigen Messsystem-Controller (etwa € 50.000,-) sowie weiterer Kosten für Rahmenkonstruktionen, Service, etc. Da zur aussagekräftigen Vermessung einer ganzen Karosserie üblicherweise etwa 50 bis 100 Messpunkte notwendig sind, liegt es nahe, nach kostengünstigeren Möglichkeiten Ausschau zu halten.

Um einerseits Sensorikkosten zu senken, andererseits das Messverfahren zu flexibilisieren, entstand die Idee, die Messaufgabe mit Hilfe von Robotern mit einem angeflanschten Sensor zu lösen, zumal da diese zwischenzeitlich Wiederholgenauigkeiten von zum Teil unter  $\pm 0,1$  mm erreichten. Als Problem erwies sich hierbei, dass diese Genauigkeit betriebsabhängig variiert. Trotz dieses spätestens seit GRÄSER (1999) bekannten Umstandes orientiert sich die Automobilindustrie bei den Anforderungen für robotergestützte Messanlagen weitgehend an den Anforderungen stationärerer Messanlagen.

Aufgrund der beschriebenen Wichtigkeit wurde daher die robotergestützte Inline-Messzelle als Testapplikation für diese Arbeit ausgewählt.

## 4.2 Verwendete Kalibriersoftware

Für die Untersuchungen und die Umsetzung des Verfahrens fiel die Wahl auf die von SCHRÖER (1993) entwickelte Kalibriersoftware RoboCal, da diese die in Abschnitt 3.3.1 genannten Anforderungen am besten erfüllt. Die Hauptdefizite der ausgewählten Software lagen zu Beginn der Untersuchungen in der nur eingeschränkten Unabhängigkeit vom Robotertyp, der Rechengeschwindigkeit bei der Berechnung korrigierter Posen, der zwangsweisen Ermittlung einer Transformation vom Messsystem in das Roboterkoordinatensystem sowie den Lizenzgebühren. Alternativ wäre eine Umsetzung mit Hilfe des von der ESA entwickelten, in praktisch allen wesentlichen Punkten mit RoboCal vergleichbaren Systems RoCal denkbar gewesen.

### **Unabhängigkeit vom Robotertyp:**

Mit RoboCal können annähernd beliebige Knickarmroboter mit offenem, kinematischem Aufbau modelliert werden. Modellierungsmöglichkeiten für die wichtigsten Formen geschlossener Teilketten, wie z. B. Viergelenke, Schubkurbeln, etc. sind ebenfalls vorhanden. Ebenso besteht die Möglichkeit, Linearachsen, wie sie beispiels-

weise bei SCARA-Robotern zur Realisierung von Bewegungen in Richtung der z-Achse verwendet werden, zu modellieren. Unberücksichtigt bleiben hierbei jedoch Einflüsse, die z. B. die Geradheit der Bewegung der Achse beeinflussen.

Daneben besteht keine Möglichkeit, Parallelkinematiken wie beispielsweise TriCepte oder Hexapoden zu modellieren. Kalibriersoftwarepakete für diese Kinematiken sind derzeit noch Gegenstand der Forschung und somit generell noch nicht verfügbar.

### **Rechengeschwindigkeit:**

Zu Beginn der Untersuchungen benötigte RoboCal für eine Modellidentifikation etwa zwei bis drei Sekunden und für die anschließende Berechnung korrigierter Posen bis zu 2 Sekunden je Pose. Während der Zeitbedarf für die Parameteridentifikation somit noch akzeptabel ist, sprengt die Zeit zur Berechnung der korrigierten Posen jede Taktzeitanforderung. Ursache hierfür war die äußerst hohe Genauigkeit der im Hintergrund laufenden Berechnungen. Kartesische Positionen wurden mitunter bis über die vierte Nachkommastelle hinaus berechnet. Da viele Standardindustrieroboter hier mehr als zwei bis maximal drei Nachkommastellen nicht mehr verarbeiten, bestand die Möglichkeit, deren Anzahl zu reduzieren, ohne Genauigkeitsverluste in Kauf nehmen zu müssen. Durch Parametrierung der Genauigkeit konnte die Rechenzeit zwischenzeitlich deutlich reduziert werden. Sie liegt nun unter 0,5 s je Pose.

### **Ermittlung der Transformation vom Messsystem-Koordinatensystem in das Roboterkoordinatensystem:**

Bei Verwendung eines zu kalibrierenden oder zu kompensierenden Roboters in einer Inline-Messzelle und Vermessung des Roboters mit der angeflanschten Sensorik stellt der Roboter selbst das Messsystem dar. Die Ermittlung der Transformation vom Messsystem-Koordinatensystem in das Roboterkoordinatensystem erübrigts sich somit. Wird die Transformation dennoch berechnet, so gehen bestimmte Anteile von Abweichungen, die eigentlich auf den Roboter und nicht auf das vermeintliche, externe Messsystem zurückzuführen sind, für die Parameteridentifikation verloren. Ein Genauigkeitsverlust ist die Folge. Der Effekt ist vergleichbar mit dem in Abschn. 3.5.5.1 beschriebenen Problem der Identifikation von Elastizitätsparametern anhand von an einem Referenzkörper gemessenen Positionierabweichungen. Die Ermittlung der Transformation ist mittlerweile bei ausreichender Übereinstimmung der Koordinaten-Systeme nicht mehr zwingend erforderlich, so dass diese Anforderung ebenfalls erfüllt ist.

### **Lizenzgebühren:**

Die Kosten für eine RoboCal-Lizenz (Modellierungsmodul, Identifikations- und Kompensationsmodul) liegen derzeit im Bereich mehrerer € 10.000,-. Wird eine derartige Lizenz in jeder zu kompensierenden Applikation eingesetzt, ist die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens allein schon aufgrund dieser Tatsache in Frage

gestellt. Im Fall des Einsatzes der Software in robotergestützten Inline-Messzellen konnte für die benötigten Komponenten, da diese jeweils nur in einer Anlage eingesetzt werden, ein Kompromiss gefunden werden, bei dem die Wirtschaftlichkeit noch gewährleistet ist.

### 4.2.1 Roboterkalibrierung mit RoboCal

Die Kalibrierung eines Roboters mit RoboCal orientiert sich an dem in Bild 2.11 dargestellten Ablauf und beginnt mit der Modellierung.

#### Modellierung des Roboters:

Hierzu werden mindestens Informationen über die Vektorkette, den kinematischen Aufbau, Drehrichtungen der Einzelachsen, Kopplungen zwischen den Achsen sowie die jeweiligen Maximalstellungen (Softwareanschläge) benötigt. Daneben können auch Getriebeübersetzungen, die Auflösung der Drehgeber, Massenverteilungen entlang der kinematischen Kette sowie Biegesteifigkeiten der Strukturelemente und Torsionssteifigkeiten der Getriebe bei der Modellierung berücksichtigt werden. Die Eingabe der Daten erfolgt entweder in Form von Abfragen in einem DOS-Programm oder durch direktes Editieren vorhandener Modelle. Gerade bei kinematisch ähnlichen Robotern bietet sich diese Vorgehensweise an. RoboCal überprüft jeweils nach Fertigstellung eines Teilmodells die Konsistenz der eingegebenen Daten und weist auf eventuelle Modellierungsfehler hin. Die eingegebenen Daten werden anschließend, wie alle sonstigen von RoboCal generierten oder benötigten Daten auch, in einer Text-Datei abgelegt und sind somit jederzeit editierbar.

Prinzipiell werden bei der Modellierung drei Modelle (Bild 4.2) erzeugt, die in einer Datei zusammengefasst werden:

- Die kinematische Kette des Roboters, die in erster Linie die Anzahl der Achsen, Achsabstände, Achslängen, sowie die Drehrichtungen der Gelenke enthält.
- Das Antriebsmodell, das die Art und Übersetzungen der einzelnen Antriebe, Kopplungen zwischen diesen sowie kinematische Besonderheiten wie beispielsweise die Daten von Viergelenkketten enthält.
- Das Elastizitätsmodell, das Informationen über das grundsätzliche Biegeverhalten, Schwerpunktlagen, Elastizitäten, Zusatzmassen, sowie Symmetrien umfasst.

Darüber hinaus können noch Informationen über Drehgeberauflösungen sowie Achs- und Motorarbeitsräume mit berücksichtigt werden. Zur Berücksichtigung der applikationsspezifischen Gegebenheiten dienen ein separat zu erstellendes Werkzeug- und ein Arbeitsraummodell.

## 4 Anwendungsbeispiel

---

Anhand der drei Modelle wird ein Parametersatz erstellt, der zunächst die angegebenen Parameter selbst enthält. Darüber hinaus wird das Modell noch durch die Software um weitere Parameter ergänzt, die üblicherweise die Genauigkeit des Roboters ebenfalls beeinflussen. Hierzu gehören beispielsweise das Übertragungsverhalten der Getriebe sowie das Getriebespiel und Elastizitäten.

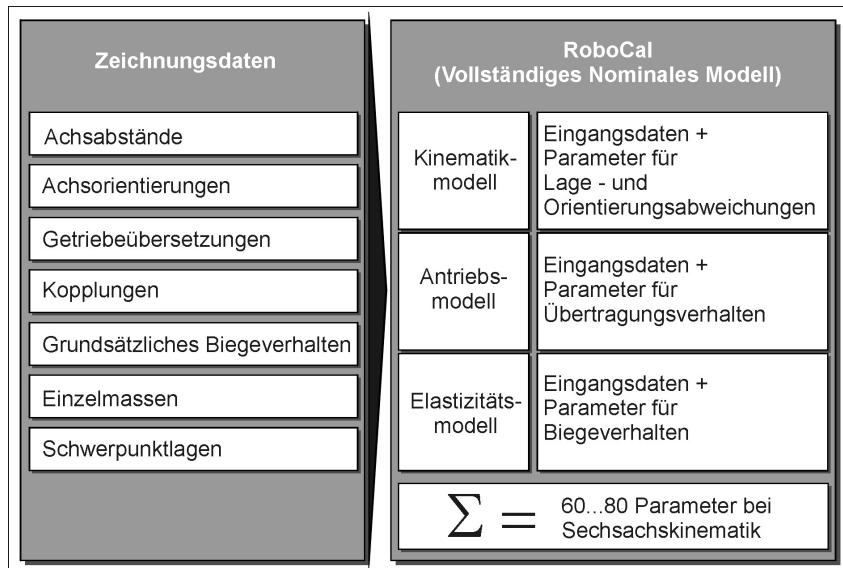


Bild 4.2: Robotermodellierung mit RoboCal

Beim Einsatz der Software zur Kalibrierung des Roboters gilt zunächst der Grundsatz, dass der Roboter so exakt wie möglich modelliert werden muss und alle verfügbaren Informationen auch genutzt werden. Im Fall des Einsatzes zur Kompensation gilt dies prinzipiell auch, es sind jedoch Einschränkungen vorhanden: Je nachdem, in welcher Form Informationen über den Roboter, insbesondere bei der Antriebsmodellierung, in das Modell eingeflossen sind, variieren später sowohl die erforderlichen Eingabeformate benötigter Daten als auch die Ausgabeformate mit Hilfe des Modells generierter Daten. Da dies jedoch die Schnittstellen zur späteren Anwendung sind, müssen bereits bei der Modellierung Konventionen festgelegt werden, um bei Übertragung des Kompensationsverfahrens auf andere Robotermodelle anpassungsfrei auf die Schnittstellen zugreifen zu können.

Eine einfache Übertragbarkeit kann erreicht werden, indem beispielsweise Getriebes-

übersetzungen immer mit einem festen Wert (z. B. 1, 10, 100, 1000,...) angenommen werden beziehungsweise auf die hiermit verbundene Angabe der Drehgeberauflösung verzichtet oder nur zu Zwecken der Skalierung zurückgegriffen wird.

Gegebenenfalls weitere notwendige Konventionen können aufgrund von Anforderungen der jeweiligen Applikation relevant werden. So kann es sinnvoll sein, Elemente des am Roboterflansch befestigten Werkzeugs oder des Unterbaus, wie beispielsweise einen Sockel, mit in die Beschreibung der kinematischen Kette aufzunehmen, falls es sich hierbei um Komponenten handelt, die zum einen standardmäßig mit zu den Bestandteilen der Anlage gehören, zum anderen bei der Kompensation berücksichtigt werden sollen.

Nach Abschluss der Modellierung wird nochmals die Konsistenz des Gesamtmodells überprüft sowie das eigentliche Modell generiert, welches automatisch um zusätzliche Parameter für mögliche Abweichungen ergänzt wird. Auf dessen Basis wird parallel eine Datei angelegt, in der jeder einzelne Parameter für eine spätere Identifizierung freigeschaltet oder gesperrt werden kann.

Zur Vervollständigung müssen nun noch Modelle für die verwendeten Roboterwerkzeuge sowie die Umgebung, in der sich der Roboter befindet, erstellt werden. Letztere beinhalten die Arbeitsraumgrenzen sowie die ungefähre Position des zur Kalibrierung verwendeten Messsystems.

Am Roboterflansch angebrachte Werkzeuge müssen und können mit RoboCal zwar modelliert werden, die Parameter des Werkzeugs sind jedoch nicht Bestandteil des eigentlichen Robotermodeells und somit auch nicht identifizierbar. RoboCal setzt immer exakt bekannte Werkzeugdaten voraus. Sollen Werkzeugparameter dennoch identifiziert werden, so müssen diese als Element der kinematischen Kette (z. B. als Verlängerung der letzten Handachse) des Roboters modelliert und behandelt werden. Die identifizierten Abweichungen des so modellierten Werkzeugs können dann jedoch auch nicht mehr getrennt von anderen Parametern des identifizierten Robotermodeells verwendet werden, da sie von diesen nicht mehr unabhängig sind.

### **Modelloptimierung**

Im nächsten Schritt folgt die sogenannte Modelloptimierung. Hierzu wird zunächst ein Kalibrierposensatz generiert, der etwa 500 Einzelposen umfasst. Diese werden nach Gleichverteilungs- und Verschiedenheitskriterien (Abschn. 3.6.4.3, Restriktionskriterien) ausgewählt. Ziel ist es hierbei, so viele Einzelposen zur Verfügung zu stellen, dass sich mit ihnen alle prinzipiell identifizierbaren Parameter theoretisch ermitteln lassen.

Mit Hilfe dieses Parametersatzes wird nun eine Modelloptimierung in der Form durchgeführt, dass nicht oder nur schlecht identifizierbare Parameter für die

Identifikation gesperrt werden, bis eine ausreichende Gesamtidentifizierbarkeit der übrig gebliebenen Parameter erreicht ist. Welche Parameter hierbei gewählt werden, kann vom Benutzer frei bestimmt werden. Die Entscheidung wird jedoch durch ein Diagnosewerkzeug der Kalibriersoftware RoboCal, das Aufschluss über die grundsätzliche Identifizierbarkeit der Einzelparameter gibt, unterstützt.

Als Kriterium für die Identifizierbarkeit des gesamten Modells dient die Kondition der Jacobi-Matrix. Übersteigt diese einen Wert von 120 (vgl. hierzu Abschn. 3.5.5), werden weitere Parameter im Modell gesperrt, bis die gewünschte Kondition erreicht ist.

### Generierung eines Posensatzes zur Grundkalibrierung

Der nächste Schritt besteht in der Generierung eines Posensatzes zur Grundkalibrierung. Dieser umfasst eine zur vollständigen Kalibrierung des Roboters ausreichende Anzahl von möglichst verschiedenen, statistisch im Arbeitsraum verteilten Einzelposen (etwa 100 bis 120 Posen), bei deren Ermittlung Arbeitsraumgrenzen, die Position des Messsystems sowie eine Pfadoptimierung berücksichtigt werden, um die notwendige Sichtbarkeit des Tool Center Points vom Messsystem aus zu gewährleisten. Die ermittelten Posen müssen dann zu einem Roboterverfahrprogramm verarbeitet werden.

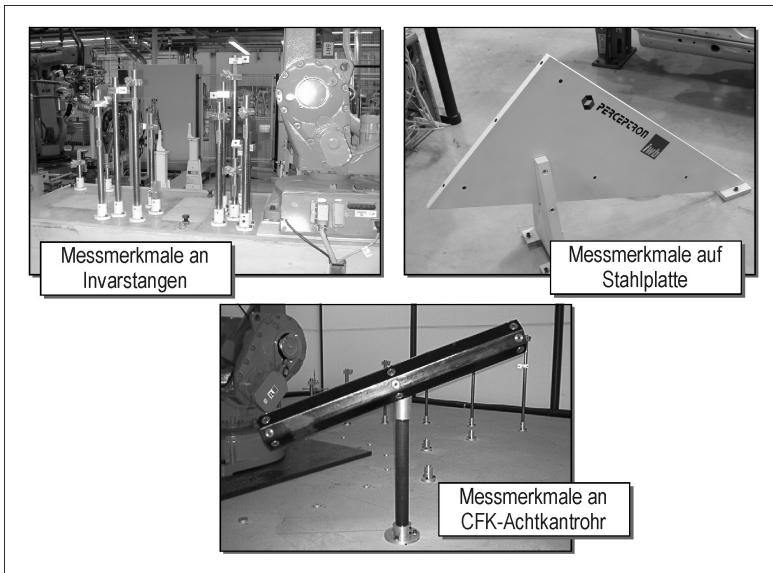
Mit Hilfe des Verfahrprogramms wird die TCP-Position des Roboters im nächsten Schritt beispielsweise mit einem Lasertracker oder einem Theodolitensystem vermessen und die Messdaten in einer Datei zusammengefasst. Da die Daten lediglich in Form von x-, y- und z-Werten der am Roboter angebrachten Messmerkmale vorliegen müssen und die zur Parameteridentifikation verwendete Messdatendatei editierbar ist, ist es prinzipiell unerheblich, welche Art von Messsystem verwendet wird. Mit Hilfe der Messdaten findet anschließend die Parameteridentifikation zur Grundkalibrierung statt, bei der im ersten Schritt die Transformation vom Messsystem-Koordinatensystem in das Roboterkoordinatensystem und danach die eigentlichen Parameter identifiziert werden. Diese werden hierbei so angepasst, dass sich mit dem identifizierten Parametersatz die gemessenen Roboterpositionen so gut wie möglich nachvollziehen lassen, das heißt bis die Summe der Fehlerquadrate an den Referenzpositionen ein Minimum erreicht.

Mit dem identifizierten Parametersatz können dann zur Steigerung der Absolutgenauigkeit entweder die in den Verfahrprogrammen enthaltenen Roboterposen korrigiert werden, oder, ausreichende Übereinstimmung des Steuerungsmodells des Roboters und des mit RoboCal erstellten Modells vorausgesetzt, die identifizierten Parameter direkt in die Robotersteuerung übertragen werden.

Zur Erkennung betriebsabhängiger Parameter im Robotermodell wird der Ablauf zur Vermessung und Parameteridentifikation mit dem generierten Posensatz entsprechend Abschnitt 3.5 mehrfach bei unterschiedlichen Betriebszuständen durchgeführt.

### 4.3 Entwicklung eines Referenzkörpers

Anhand der in Abschnitt 3.6 beschriebenen Anforderungen wurde nach Vorversuchen mit Referenzumgebungen aus Invarstangen mit würzelförmigen, mit einer Bohrung versehenen Messmerkmalen, ein Referenzkörper in Form eines Achtkantröhres aus CFK entwickelt (Bild 4.3). Dieser ermöglicht eine gute Abdeckung des Achsarbeitsraums des Roboters bei niedrigem Flächenbedarf.



*Bild 4.3: Im Verlauf der Untersuchungen verwendete Referenzkörper*

Zur Herstellung der Messmerkmale (dunkle Bohrung bzw. Kreis auf hellem Grund) auf dem Achtkantröhre gibt es grundsätzlich zwei Möglichkeiten. Entweder werden an dem Achtkantröhre Metallbuchsen (Aluminium oder Stahl) mit einer scharfkantigen Bohrung angebracht oder einfach weiße Aufkleber mit einem schwarzen Kreis auf die Seiten des Rohres aufgeklebt.

Die Aluminiumbuchsen weisen eine größere Beständigkeit gegen Umwelteinflüsse auf, sind jedoch aufwendiger hinsichtlich der Herstellung und der Montage. Eine Vermessung ihrer Lage auf dem Referenzkörper kann auf einer Koordinatenmessmaschine erfolgen.

Im Gegensatz zu Aluminiumbuchsen sind die Aufkleber äußerst preisgünstig in der

Herstellung (mit einem normalen Laserdrucker möglich) und deutlich flexibler in der Anwendung. Allerdings sind sie empfindlicher gegenüber Umwelteinflüssen und können, je nach Umfeld, mit der Zeit an Kontrast verlieren. Eine Vermessung ist anhand einer geeigneten Zielmarkierung beispielsweise mit Hilfe von Theodoliten möglich. Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich entsprechende Aufkleber ideal für kurzfristig zu erstellende Versuchsaufbauten.

Als kostengünstige Alternative wurde noch ein weiterer Referenzkörper entwickelt. Dieser besteht aus einer 20 mm starken, senkrecht stehenden, dreieckigen Stahlplatte aus St 37 (Bild 4.3). Ziel der Verwendung dieses zusätzlichen Körpers ist zum einen die Überprüfung der Anforderungen an den Referenzkörper hinsichtlich Temperaturstabilität, zum anderen der Versuch, die Kosten für die benötigte Zusatzhardware so niedrig wie nur möglich zu halten.

Die Generierung eines Verfahrprogramms am Referenzkörper erfolgt mit der in Abschn. 3.6.4 beschriebenen Simulation.

### 4.4 Umsetzung des Kommunikationskreises

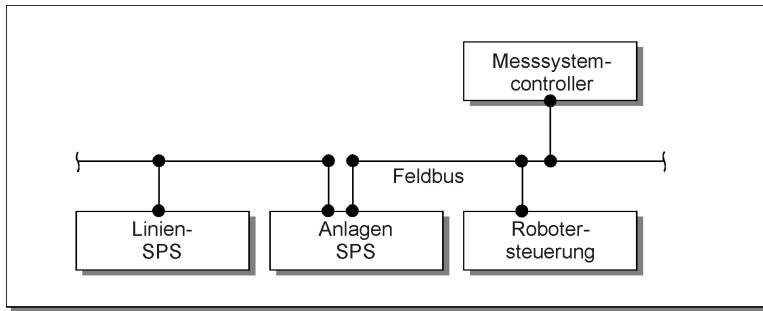
An den Kommunikationskreis wurden für das Anwendungsbeispiel folgende Anforderungen gestellt:

- Die gesamte Kommunikation muss über eine einzige Schnittstelle erfolgen, die für jedes der auch zukünftig verwendeten Systeme grundsätzlich verfügbar sein muss.
- Die Mehrfacheingabe gleicher Daten an mehreren Stellen ist unbedingt zu vermeiden. Dementsprechend sind geeignete Schnittstellen zu schaffen.
- Die Kompensation selbst ist für den Benutzer nur in zwei Fällen von Interesse, nämlich bei der Einrichtung und im Falle eventueller Fehler. In allen anderen Fällen muss sie vollkommen im Hintergrund ablaufen. Eine spezielle, kompensationsspezifische Benutzerschnittstelle ist somit lediglich zur Unterstützung des Benutzers bei der Einrichtung des Systems erforderlich.

Die oben genannten Anforderungen wurden bei der Implementierung der Kompensation auf dem von der Fa. Perceptron neu entwickelten IPNet-Messsystem umgesetzt. Als einzige Schnittstelle zur Robotersteuerung dient hier eine Feldbusanbindung (Bild 4.4), die für alle industriell eingesetzten Robotertypen verfügbar ist. Auf der Robotersteuerung läuft ein als gewöhnliches Anwenderprogramm konzipiertes Kommunikationsprogramm, das den Datenaustausch über die Feldbusanbindung sicherstellt. Die Koordination der Abläufe in der Zelle sowie die Anbindung an die Linien-SPS übernimmt eine in den IPNet-Controller integrierte Anlagen-SPS. Notwendige Einrichteinformationen für die Kompensation können vom Benutzer über in das System integrierte Eingabemasken eingegeben werden. Der Austausch

## **4.5 Kompensationsergebnisse und Übertragung des Verfahrens auf unterschiedliche Robotertypen**

erforderlicher Daten zwischen den Systemen erfolgt automatisch entweder über die Feldbusanbindung oder durch Übertragen von Dateien (z. B. Verfahrprogramme mit Informationen über vorhandene Messpunkte) mittels Diskette. Die Kompensation ist vollständig in den Messsystem-Controller eingebunden.



*Bild 4.4: Kommunikationskreis zur Kompensation*

Um einen neuen Robotertyp in das System zu integrieren, muss, neben Modellierung und Parameterreduktion für die Kompensation, lediglich die Feldbusanbindung hergestellt sowie die Kommunikationssoftware auf die jeweilige Roboterprogrammiersprache adaptiert werden. Die soft- und hardwareseitige Einbindung eines neuen Robotertyps in den Kommunikationskreis kann mittlerweile problemlos innerhalb von einer Woche realisiert werden.

## **4.5 Kompensationsergebnisse und Übertragung des Verfahrens auf unterschiedliche Robotertypen**

Das Verfahren wurde, wie oben beschrieben, zunächst anhand eines Roboters vom Typ ABB 2400L entwickelt und anschließend auf folgende Robotertypen übertragen:

*Symmetrisch aufgebaute Sechsachsroboter:*

- ABB 4400 L30
- ABB 4400 / 45
- Comau Smart H1

*Asymmetrisch aufgebaute Sechsachsroboter:*

- Kuka KR 15
- Kuka KR 150

## 4 Anwendungsbeispiel

SCARA-Roboter:

- Adept SCARA

Vierachs-Sonderkinematik auf Bodenfahrbahn:

- Trumpf BendMaster (Einsatz des Verfahrens zur Lastkompensation)

Die Identifikation stark betriebsabhängiger Parameter erfolgte jeweils nach der in Abschn. 4.5 beschriebenen Methode zur Parameterreduktion. Es zeigte sich bei allen Robotern, dass die Summe aus Abweichungen aufgrund der Wiederholgenauigkeit sowie betriebsabhängiger Einflüsse (Änderung der Umgebungstemperatur sowie Aufwärm- oder Abkühlphase) mit der Kompensation bis auf etwa das zwei bis dreifache der systemimmanenten Wiederholgenauigkeit des Roboters reduziert werden kann.

Bei einem Roboter vom Typ Comau Smart H1 konnte die Auswirkung der Temperat drift beispielsweise von etwa 0,5 mm (Bild 4.5) auf deutlich unter 0,2 mm (Bild 4.6) gesenkt werden. Getestet wurde hierbei ein Temperaturbereich von 15°C bis 42°C. Der Roboter wies in Voruntersuchungen eine Wiederholgenauigkeit von unter 0,1 mm auf.

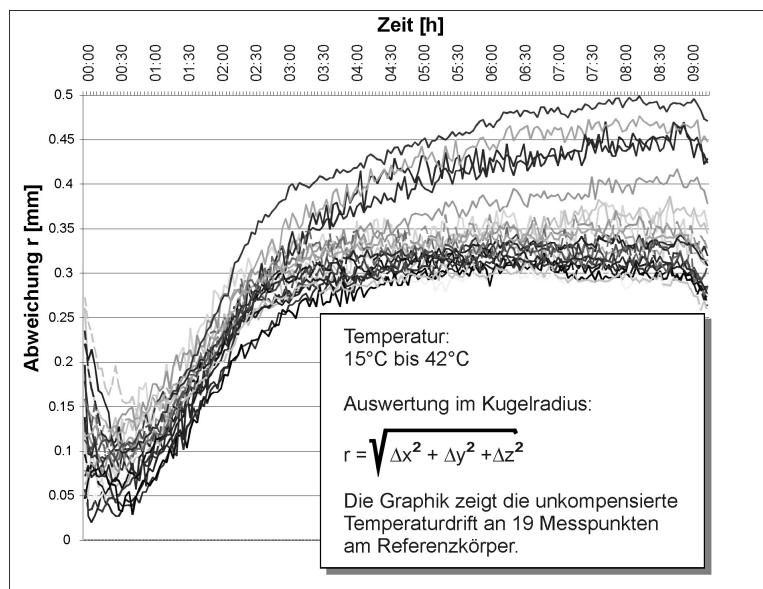


Bild 4.5: Unkomensierte Temperaturdrift des Comau Smart H1 an den Messpunkten am Referenzkörper

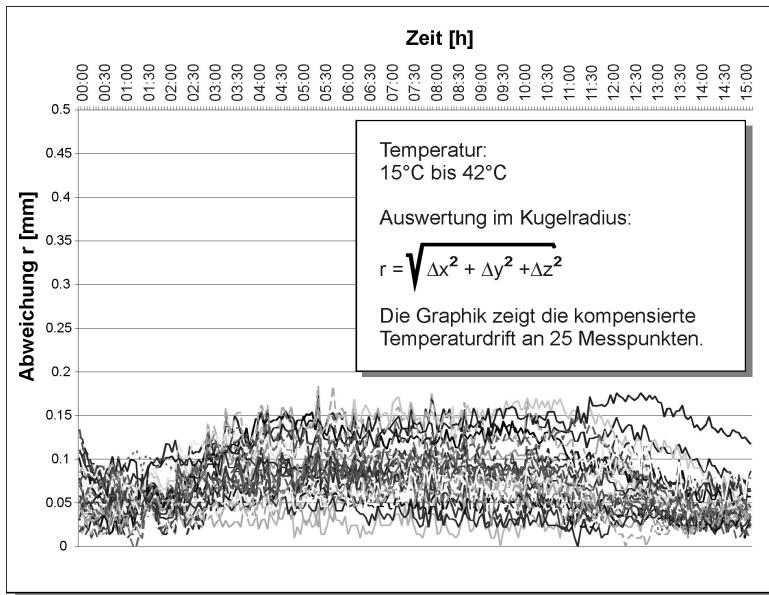


Bild 4.6: Kompensierte Temperaturdrift des Comau Smart H1 an der Messumgebung

Messungen an in der Industrie bereits im Einsatz befindlichen Anlagen bestätigen hierbei die Ergebnisse aus dem Labor. Im Fall des Trumpf BendMaster wurde der Nachweis erbracht, dass sich das Verfahren prinzipiell auch zur Kompensation unterschiedlicher Lasteinflüsse eignet.

## 4.6 Wirtschaftliche Bewertung

Die wirtschaftliche Bewertung einer Kompensationsmethode für Industrieroboter kann theoretisch auf zwei Arten erfolgen:

1. Durch Vergleich der Kosten für die Umsetzung der Methode mit den Kosten anderer Verfahren zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse.
2. Durch anwendungsspezifische Vergleiche zwischen einer kompensierten Roboteranwendung und der bislang eingesetzten Automatisierungslösung.

In der Praxis ist die erste Methode nur bedingt aussagekräftig, da diese die technischen Restriktionen, denen die zu bewertende Kompensationsmethode sowie mögliche alternative Verfahren unterliegen, nicht berücksichtigt. Aussagekräftiger ist der zweite

Ansatz. Hier kann der wirtschaftliche Nutzen jedoch nur in Abhängigkeit von der jeweiligen Anwendung und hierfür existierenden Konkurrenzlösungen betrachtet werden.

### **4.6.1 Vergleich mit anderen Verfahren zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse**

Durch den Einsatz einer Standardkalibriersoftware in Verbindung mit einem Verfahren zur Parameterreduktion und zur Entwicklung einer Referenzumgebung konnte der Aufwand zur Übertragung einer modellbasierten Kompensation auf neue Roboter- und Steuerungstypen deutlich reduziert werden. Während bislang etwa sechs Monate Entwicklungsaufwand erforderlich waren, um die Kompensation auf einen neuen Roboter beziehungsweise eine andere Steuerung zu übertragen, ermöglicht die im Rahmen dieser Arbeit entwickelte Methode eine Implementierungsdauer von insgesamt nur vier Wochen.

Die einzige, unmittelbar mit der entwickelten, modellbasierten Kompensation im Bereich der Standardroboter zu vergleichende Methode ist die sogenannte Roboterführung, die darauf beruht, dass die Positionierabweichung des Roboters am Werkstück während der Bearbeitung über Sensoren erfasst und über einen Regelkreis korrigiert wird.

Die Kosten der beiden unterschiedlichen Kompensationsverfahren unterscheiden sich hauptsächlich hinsichtlich der jeweils eingesetzten Sensorik, der Rechnerhardware für die Kompensationsrechnung sowie der gegebenenfalls notwendigen Referenzpunkt-darstellungen. Je nach Ausführung können hier für beide Verfahren zwischen € 10.000,- und € 50.000,- Euro angesetzt werden. Bei der modellbasierten Kompensation ist ebenfalls zu berücksichtigen, dass durch die notwendige Vermessung von Referenzpunkten und die damit verbundenen Nebenzeiten eine um etwa 10 bis 20% niedrigere Ausbringung der kompensierten Anlage zu erwarten ist.

Die entwickelte Kompensationsmethode bringt somit überall da wirtschaftliche Vorteile, wo der Aufbau einer Roboterführung in Form einer Ausrichtung des Roboters unmittelbar am Werkstück technisch nicht möglich oder mit einem deutlich größeren Sensorikaufwand (z. B. Einsatz von zwei Reseau-Scanning-Kameras: ca. € 75.000,- pro Stück) verbunden ist.

Andere Methoden scheiden mangels Übertragbarkeit auf Standardroboter aus dem Vergleich aus:

- Eine Absicherung gegen Genauigkeitsverluste durch Betriebseinflüsse über konstruktive Maßnahmen führt zu deutlich höheren Kosten beim Roboter selbst. In Verbindung mit den zu erwartenden niedrigen Stückzahlen sind derartige Roboter

sehr teuer und damit im Bereich der Sondermaschinen einzuordnen. Ähnliches gilt für eine Messung der Verformung des Roboters im Betrieb unmittelbar an der Roboterstruktur.

- Der Einsatz von Temperaturverformungsmodellen ist bislang nur im Labor erfolgreich und stellt ebenfalls besondere Anforderungen an die Konstruktion (RICHTER 1997).

### **4.6.2 Anwendungsspezifischer Kostenvergleich**

Die wirtschaftliche Bewertung in Form eines Kostenvergleichs erfolgt exemplarisch für das Anwendungsbeispiel, eine robotergestützte Inline-Messzelle zur Vermessung von Fahrzeugkarosserien. Da diese erst durch den Einsatz von Kompensationsverfahren realisierbar wird, ist das konkurrierende Verfahren in diesem Fall der Einsatz festinstallierter Sensoren. Ein möglicher Kostenvorteil ergibt sich aus der Einsparung von Messsensoren. Zusätzliche Sensorikkosten für die Kompensation, wie sie bei anderen Handhabungssapplikationen zwingend notwendig sind, entfallen. Ein Kostenvorteil gegenüber anderen Kompensationsverfahren ist damit praktisch immer sichergestellt. Begrenzende Faktoren sind insbesondere die zur Verfügung stehende Taktzeit sowie der benötigte Arbeitsraum. Werden die Taktzeiten zu kurz oder der Arbeitsraum zu groß, so muss bei der kompensierten Roboteranwendung die Anzahl der Roboter erhöht werden, während die Applikation mit fest installierten Sensoren hiervon als quasi unabhängig angesehen werden kann.

Zur Abschätzung des Kostenvorteils müssen nur Kosten betrachtet werden, die nicht in beiden Fällen identisch sind. So wird beispielsweise in beiden Fällen ein Controller für das Messsystem benötigt.

Im betrachteten Fall kann von folgenden Eckdaten ausgegangen werden:

#### **Robotergestützte Applikation:**

##### **Zeitbedarf der robotergestützten Applikation:**

Messdauer pro Messpunkt:	2,5 s
Zeitanteil Referenzfahrt (20%):	0,5 s
Gesamtzeit pro Messpunkt:	3 s

##### **Komponenten und Aufwendungen der robotergestützten Applikation:**

###### *Investitionskosten je Anlage:*

Controller	€ 50.000,-
Planungskosten (10%):	€ 5.000,-
<i>Gesamt je Anlage:</i>	€ 55.000,-

## 4 Anwendungsbeispiel

---

*Investitionskosten je Roboter:*

Roboter:	€ 45.000,-
Robotersockel:	€ 3.000,-
SPS:	€ 5.000,-
Sensor:	€ 7.500,-
Sensorverkabelung:	€ 2.500,-
Sensorflansch:	€ 500,-
Referenzkörper:	€ 5.000,-
Kompensationskosten (z. B. Software):	€ 5.000,-
Programmierkosten:	€ 3.000,-
Planungskosten (10%):	€ 7.650,-
<b>Gesamt je Roboter:</b>	<b>€ 84.150,-</b>
Jährliche Wartungskosten je Roboter:	€ 5.000,-

**Festinstallierte Messsensoren:**

*Zeitbedarf bei festinstallierten Sensoren:*

Messdauer pro Messpunkt: vernachlässigbar gering

**Komponenten und Aufwendungen bei festinstallierten Sensoren:**

*Investitionskosten je Anlage:*

Controller	€ 50.000,-
Planungskosten (10%):	€ 5.000,-
<b>Gesamt je Anlage:</b>	<b>€ 55.000,-</b>

*Kosten je Sensor:*

Sensor:	€ 7.500,-
Sensorverkabelung:	€ 500,-
Stahlbau:	€ 500,-
Programmierkosten:	€ 10,-
Planungskosten (10%):	€ 851,-
<b>Gesamt je Sensor:</b>	<b>€ 9.361,-</b>

Jährliche Wartungskosten (je Sensor): € 50,-

**Kostenvergleich:**

Geht man von einer Anlagengesamtbetriebszeit von 6 Jahren aus, so ergibt sich bereits für Anlagen mit ca. 20 Messpunkten und Taktzeiten über 60 Sekunden ein Kostenvorteil auf Seiten der robotergestützten Applikation. Dies setzt voraus, dass alle Messpunkte vom Arbeitsraum eines Roboters überdeckt werden können. Bild 4.7 zeigt für Anlagen mit festinstallierten Sensoren und robotergestützte Anlagen exemplarisch

die Anlagenkosten pro Messpunkt in Abhängigkeit von der Anzahl der Messpunkte. Hierbei wurden die Messpunkte taktzeitabhängig auf einen bis maximal 4 Roboter verteilt, was sich im Diagramm (Bild 4.7) in Sprüngen im Kurvenverlauf äußert.

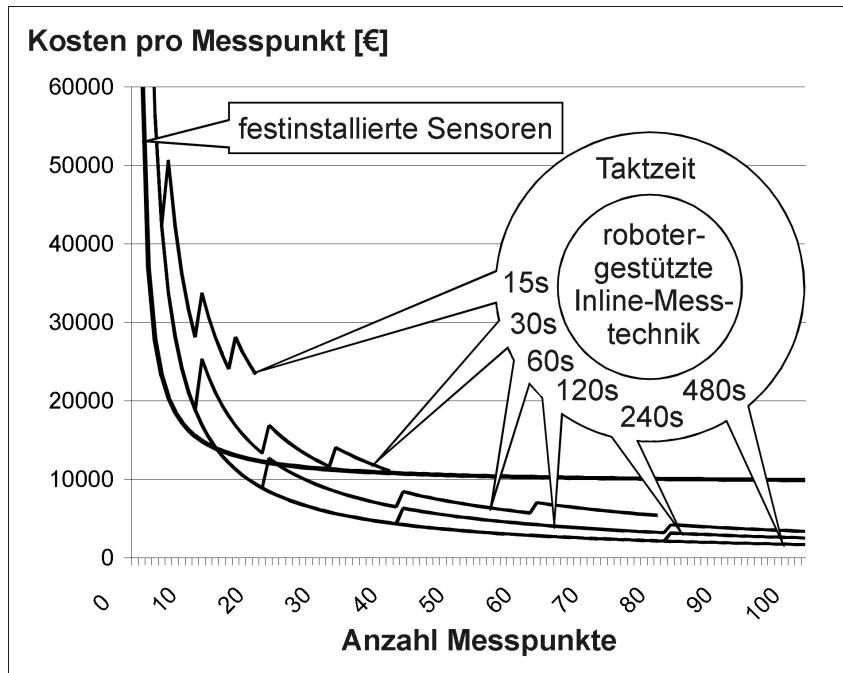


Bild 4.7: Kosten pro Messpunkt

In der Praxis ist zusätzlich noch die Erreichbarkeit der Punkte durch den oder die Roboter zu berücksichtigen. Ob ein tatsächlicher Kostenvorteil vorhanden ist, muss somit auch hier immer im Einzelfall überprüft werden. Industriell eingesetzte, mit Hilfe der entwickelten Methode kompensierte Anlagen, arbeiten mit 30 bis 50 zum Teil variantenspezifischen Messpunkten je Roboter bei Taktzeiten zwischen einer und sechs Minuten. Sie ermöglichen einen Kostenvorteil zwischen 25 und 50% gegenüber fest installierten Messsensoren. Ohne Kompensation der Auswirkungen betriebsabhängiger Einflüsse wäre ihr Betrieb nicht mit ausreichender Genauigkeit möglich. Andere Kompensationsmethoden sind aufgrund zusätzlich erforderlicher Sensoren erheblich teurer.

## **4 Anwendungsbeispiel**

---

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

Die Bereiche der modellbasierten Kompensation und der modellbasierten Absolutkalibrierung von Industrierobotern wurden bislang streng voneinander getrennt. Der Hintergrund dieser Trennung ist in erster Linie im unterschiedlichen Detaillierungsgrad der jeweils verwendeten Modelle begründet, da hiervon die Menge der zur Parameteridentifikation notwendigen Eingangsdaten maßgeblich abhängt. Während zur Absolutkalibrierung beispielsweise eines Sechsachsroboters etwa einhundert 3D-Messungen erforderlich sind, um 60 bis 80 Parameter des vollständigen RobotermodeLLS zu identifizieren, müssen aus Taktzeitgründen für die Kompensation 15 bis maximal 20 Messpunkte ausreichen. Dementsprechend wurde hier bislang überwiegend mit stark vereinfachten, eng an das nominale RobotermodeLL angelehnten Modellen gearbeitet. Diese sind jedoch nicht in der Lage, alle auftretenden Effekte mit ausreichender Genauigkeit abzubilden. Darüber hinaus fehlten standardisierte Modellierungs- und Berechnungswerkzeuge, wie sie im Bereich der Absolutkalibrierung bereits seit einigen Jahren eingesetzt werden. Ziel der Arbeit war es daher, beide Bereiche zusammenzuführen und eine Kompensation anhand des vollständigen RobotermodeLLS unter Verwendung einer Standardkalibriersoftware zu realisieren. Hierdurch sollte ein verbesserter Kompensationseffekt sowie eine einfache Übertragbarkeit der Methode auf unterschiedliche Robotertypen erreicht werden.

Um dieses Ziel zu erreichen, war eine Methode zu entwickeln, mit der es möglich ist, im Parametersatz des vollständigen Modells gezielt stark betriebsabhängige Parameter im Sinne einer Modellreduktion zu identifizieren sowie eine Vorgehensweise zur simulationsgestützten Generierung von Referenzposen an einem zu entwickelnden Referenzkörper aufzuzeigen.

Zur Umsetzung der Methode wird zunächst eine Versuchsumgebung in Form einer Temperaturkammer mit einer temperaturstabilen Messumgebung zur Darstellung des Werkstücks benötigt, um mögliche Werkstückeinflüsse auf die Mess- bzw. Positioniergenauigkeit auszuschließen. Durch die Messumgebung konnte eine gute Abdeckung des kartesischen- und des Achsarbeitsraumes von Industrierobotern mit einer Traglast von 15 bis etwa 150 kg erreicht werden. Der Raum für die Referenzumgebung wurde räumlich getrennt von der Messumgebung neben dem Roboter vorgesehen.

Im Rahmen der Methode wird der Roboter zunächst mit der Software modelliert und grundkalibriert. Diese Grundkalibrierung wird anschließend bei unterschiedlichen Betriebszuständen wiederholt. Durch Vergleich der Parametersätze miteinander können diejenigen Parameter identifiziert werden, die in Abhängigkeit vom Betriebszustand variieren und einen starken TCP-Einfluss haben. Zur Sicherstellung einer ausreichenden Durchgängigkeit des Modells vom Roboterfuß bis zum Flansch wird der Satz der als betriebsabhängig erkannten Parameter anschließend noch um hierfür

## **5 Zusammenfassung und Ausblick**

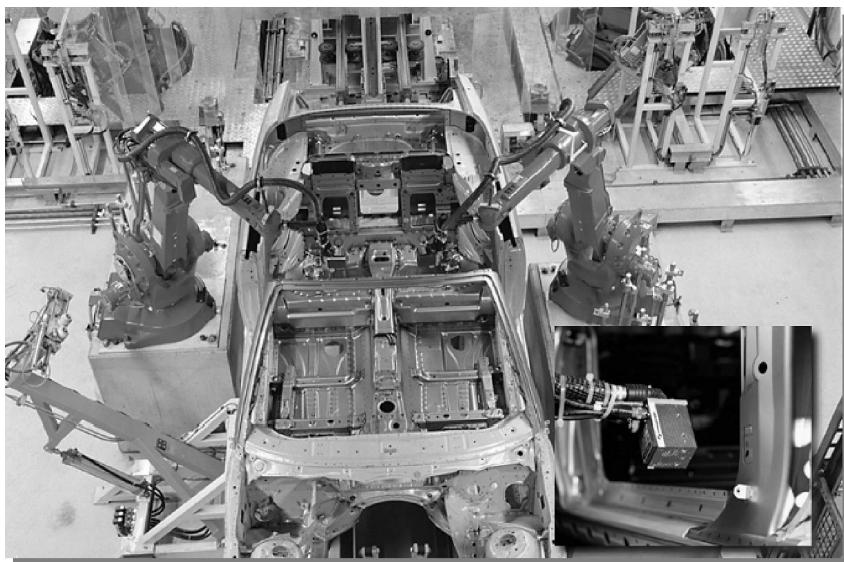
---

eventuell fehlende Parameter ergänzt. Die weitere Modelloptimierung erfolgt dann experimentell bereits im Rahmen von Kompensationsversuchen.

Als Referenzumgebung eignen sich Körper, mit denen es möglich ist, den Achsarbeitsraum des jeweiligen Roboters in einem kleinen Bereich des kartesischen Arbeitsraumes gut abzudecken. Mit Hilfe einer Simulation wird nach der Geometriedefinition zunächst die optimale Lage des Referenzkörpers bestimmt und anschließend ein Posensatz für die Kompensation auf dem Referenzkörper generiert.

Zur Durchführung der Kompensation wird ein Kommunikationskreis zur Online-Kompensation benötigt, über den alle notwendigen Daten zwischen Roboter, Messsystem und Kompensationsrechner ausgetauscht werden.

Da für die Methode in Frage kommende Kalibriersoftwarepakete ursprünglich zur Steigerung der Absolutgenauigkeit konzipiert waren, besteht die Möglichkeit, diese Funktionalität ebenfalls weiter zu nutzen. Die Kompensation kann wahlweise auf der Basis eines mit nominalen Werten belegten oder eines identifizierten und somit absolutgenauen Modells erfolgen.



*Bild 5.1: Roberterstützte Inline-Messanlage in der Automobilindustrie*

Mit der Methode ist es möglich, die Abweichung aufgrund der Temperaturdrift auf etwa den dreifachen Wert der Messgenauigkeit an der Referenzumgebung zu

reduzieren. Die Wiederholgenauigkeit ist hierin bereits enthalten. Die Vorgehensweise wurde auf mehrere, unterschiedliche Robotertypen erfolgreich übertragen. Diese befinden sich zwischenzeitlich bei mehreren namhaften Automobilherstellern in kompensierten, robotergestützten Inline-Messzellen im Einsatz (Bild 5.1) und erreichen hier eine Messgenauigkeit von etwa 0,2 mm. Die Implementierung bei einem neuen Robotertyp ist mit der Methode innerhalb von vier Wochen möglich. Bislang waren hierfür erfahrungsgemäß etwa 6 Monate erforderlich.

Das Hauptdefizit des Verfahrens ist bislang die fehlende Übertragbarkeit auf geschlossene kinematische Ketten. Zur Kalibrierung derartiger Kinematiken ist derzeit noch keine Standardsoftware verfügbar. Entsprechende Softwarepakete befinden sich noch in der Entwicklung. Welche Besonderheiten hier zu berücksichtigen sind, bleibt somit vorerst offen.

Ebenso existieren Entwicklungspotenziale im Bereich preisgünstiger Messtechnik zur Erfassung der aktuellen, betriebsbedingten Abweichungen. Die Kosten für die bei vielen potenziellen Anwendungen zusätzlich benötigte Sensorik ist derzeit einer der Hauptgründe für die Beschränkung des Verfahrens auf den Bereich der robotergestützten Inline-Messtechnik.

Im Bereich der robotergestützten Messtechnik ist ein Ausbau des Verfahrens zur robotergestützten Koordinatenmessmaschine denkbar.

### **6 Literaturverzeichnis**

ABB 2000

Produkthandbücher M2000: Elektronische Dokumentation OS4.0 M2000.  
ABB Flexible Automation GmbH. Friedberg 2000.

ALBAN UND JANOWA 2000

Alban, T.; Janocha, H.: Dynamisches Vermessen von Robotern mit  
Inertialmesssystemen. In: Technisches Messen 67 (2000), Nr. 11. S. 457-  
464.

BERNHARDT 1995:

Bernhardt, R.: Deviation of Simulation and Reality in Robotics: Causes and  
Countermeasures. Proceedings of the 28<sup>th</sup> International Symposium on  
Automotive Technology and Automation. Stuttgart 1995, S. 139-144.

BORM UND MENQ 1989

Borm, J.-H.; Menq, C.-H.: Experimental Study of Observability of  
Parameter Errors in Robot Calibration. In: Robotics and Automation, IEEE  
1989, S. 587-592.

COMAU 2001

Smart H: Produktdatenblatt. Comau S.p.A. Turin 2001.

DAUSTER 2001

Dauster, K.: Prozessangepasste, lernende Roboterregelung für  
Montageprozesse. München: Technische Universität München 2001  
(Dissertation).

DENAVIT UND HARTENBERG 1955

Denavit J.; Hartenberg, R.S.: A Kinematic Notation for Lower-Pair  
Mechanisms Based on Matrices. ASME Journal of Applied Mechanics Vol.  
22, 1955, S. 215-221.

DIEWALD 1995:

Diewald, B.W.: Über-alles-Kalibrierung von Industrierobotern zur lokalen  
Minimierung der Posefehler. Saarbrücken: Universität des Saarlandes 1995  
(Dissertation).

DIN EN ISO 9283

Industrieroboter - Leistungskenngrößen und zugehörige Prüfmethoden.  
Berlin: Beuth 1999.

### DLR 2003

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR): Internetseite des Institute of Robotics and Mechatronics: URL: [www.robotic.dlr.de](http://www.robotic.dlr.de). Oberpfaffenhofen: 10.04.2003.

### DRIELS UND PATHRE 1994

Driels, M.R.; Pathre, U.S.: Robot Calibration Using an Automatic Theodolite. International Journal of Advanced Manufacturing Technology 9 (1994), S. 114-125.

### DUELEN ET AL 1992

Duelen, G.; Ueckerdt, R.; Grethlein, M.: Genauigkeitskenngrößen von Industrierobotern gemäß ISO 9283 automatisch bestimmen. In: ZwF 87 (1992) 9, S. 506-508.

### EHRENSTRASSER UND BONGARDT 2002

Ehrenstrasser, M.; Bongardt, T.: Genauigkeitssteigerung durch Kompensationsmethoden bei Werkzeugmaschinen und Industrierobotern. In: Mechatronische Produktionssysteme – Genauigkeit gezielt entwickeln. *iwb* – Seminarberichte 60. München: Utz 2002.

### FANUC 2003

Fanuc Robotics Deutschland: Internetseite der Fanuc Robotics Deutschland GmbH: URL: <http://www.fanucrobotics.de>. Neuhausen: 2003.

### GÖLLNITZ 2002

Göllnitz, H.: Hochgenaue Industrieroboter – Möglichkeiten und Trends zur Verbesserung der Genauigkeit. In: Mechatronische Produktionssysteme – Genauigkeit gezielt entwickeln. *iwb* – Seminarberichte 60. München: Utz 2002.

### GÖTTE 2002

Götte, H.: Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik. *iwb* Forschungsberichte Nr. 165. München: Utz 2002 (Dissertation an der TU-München).

### GOSSEL 1996

Gossel, O.: Steigerung der Genauigkeit von Industrierobotern basierend auf einer durchgängigen Genauigkeitsanalyse. Universität der Bundeswehr. Hamburg: 1996 (Dissertation).

### GRÄSER 1999

Gräser, R.-G.: Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter

## **6 Literaturverzeichnis**

---

Verformungen an Industrierobotern. *iwb* Forschungsberichte Nr. 125.  
München: Utz 1999 (Dissertation an der TU-München).

### **HAYATI UND MIRMIRANI 1985**

Hayati, S.; Mirmirani, M.: Improving the Absolut Positioning Accuracy of Robot Manipulators. *Journal of Robotic Systems* 2 (4) (1985), S. 394-413.

### **HEINEMEIER 1993**

Heinemeier, H.-J.: Programmiergerechte Betriebsmittelgestaltung von Roboterintegrierten Montagezellen. *Produktionstechnik – Berlin* 109.  
TU Berlin. München: Hanser 1993 (Dissertation).

### **HEISEL ET AL. 1997**

Heisel, U.; et al.: Thermal Behaviour of Industrial Robots and Possibilities for Error Compensation. In: *CIRP Annals* Vol. 46/1/1997, S. 283-286.

### **HESSE 1993**

Hesse, S.: Handhabungsmaschinen. Würzburg: Vogel Buchverlag 1993,  
S. 65.

### **HESSELBACH 1996**

Hesselbach, J.; Thoben, R.; Pittschellis, R.: Parallelroboter für hohe Genauigkeiten. *wt-Produktion und Management* 86. Heidelberg: Springer 1996.

### **HESSELBACH ET. AL. 2000**

Hesselbach, J.; Helm, M.; Kerle, H.; Krefft, M.; Reinhart, G; Jacob, D;  
Höppner, J.; Schmid, H.A.: Ein neuer Parallelroboter mit  
Spreizbandantrieben. In: Neugebauer, R.: Arbeitsgenauigkeit von  
Parallelkinematiken. Chemnitz, Zwickau: wissenschaftliche Scripten 2000,  
S. 397 – 404.

### **IRIS 1998**

Handbook on Robot Performance Testing and Calibration. Hrsg. K.  
Schröer. Stuttgart: Fraunhofer IRB 1998.

### **KAHLEN 2001**

Kahlen, K.: Der Kugelmotor-Ein Direktantrieb für mehrdimensionale  
Bewegungen. *MessTec Automation*, Heft 7-8 (2001).

### **KRYPTON 2000**

Krypton Electronic Engineering n.v.: Measurement Systems for Robot  
Metrology and Calibration. Firmenschrift. Leuven: 1998.

### KUGELMANN 1993

Kugelmann, F.: Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionssystemen. iwb Forschungsberichte 67. München: Springer 1993 (Dissertation an der TU-München).

### KUGELMANN 1999

Kugelmann, D.: Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern. iwb Forschungsberichte 127; München: Utz 1999 (Dissertation an der TU-München).

### KUKA 2003

KUKA Roboter GmbH: Internetseite der KUKA Roboter GmbH. URL: <http://www.kuka-roboter.de>. Augsburg: 2003.

### LEICA 1997

Leica GmbH: Produkthandbuch 3D-Laser Tracking System – Hardware. Heerbrugg (CH): 1997.

### LETTENBAUER 2002

Lettenbauer, H.: System zum Einsatz von Industrierobotern in der fertigungsnahen Qualitätsprüfung. Universität der Bundeswehr Hamburg. Aachen: Shaker 2002 (Dissertation).

### LOMBARD UND PERROT 1983

Lombard, J.; Perrot, J.C.: Automatic Measurement of the Positioning Accuracy of Industrial Robots. In: Annals of the CIRP, Vol. 32/1/1983, S. 32-38.

### LÜCKEL ET AL. 2001

Lückel, J.; Moritz, W.; Kuhlbusch, W.; Toepper, S.; Scharfeld, F.; Maißer, P.; Freudenberg, H.; Kallenbach, E.; Zentner, J.; Saffert, E.: Iterative model-based Design of the Parallel Robot, TRIPLANAR. 2001 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM 2001). Villa Olmo, Como, Italy.

### MEYER 1992

Meyer, R.: Einsatz geodätischer Messtechnik bei der Roboter- und Fertigungszellenvermessung. VDI Berichte 921 (1992), S. 129-136.

### MEYER 1994

Meyer, R.: Der Einsatz automatisierter Theodolite zur Parameteridentifikation bei Industrierobotern. Hannover: 1994 (Dissertation).

## **6 Literaturverzeichnis**

---

MILBERG ET AL. 1997

Milberg, J.; Reinhart, G.; Trunzer, W.: Strategies for On-line Path Planning for Robots with 3D Contour-Following Sensors. *Production Engineering* 4 (1997) 1, S. 45-50.

MOTOMAN 2003

Motoman Robotec GmbH: Internetseite der Motoman Robotec GmbH.  
URL: <http://www.motoman.de>. Allershausen: 2003.

PERCEPTRON 2003

Perceptron GmbH: Internetseite der Perceptron GmbH. URL:  
<http://www.perceptron.de>. München: 2003.

PFEIFFER UND REITHMEIER 1987

Pfeiffer, F.; Reithmeier, E.: *Roboterdynamik*. Stuttgart: BG Teubner 1987.

PRITSCHOW 1997

Pritschow, G.; Wurst, K.-H.: Zur Gestaltungs- und Konstruktionssystematik von Maschinen mit Stabkinematik. *wt-Produktion und Management* 87. Heidelberg: Springer 1997

REINHART UND GRÄSER 1998

Reinhart, G.; Gräser, R.-G.: On-Line-Kompensation der Temperaturdrift. *Werkstattstechnik Wt*, 1/2 (1998), S. 29-32.

REINHART ET AL. 1998 A

Reinhart, G.; Gräser, R.-G.; Klingel, R.: Qualification of Standard Industrial Robots to Cope with Sophisticated Assembly Tasks. In: *CIRP Annals* Vol.: 47/1/1998, S. 1-4.

REINHART ET AL. 1998 B

Reinhart, G.; Gräser, R.-G.; Klingel, R.: Einsatz von Standardindustrierobotern in der Fertigungsmesstechnik. *Maschinenmarkt MM* 14 (1998), S. 48-52.

RICHTER 1997

Richter, F.: Erfassung und Ausgleich thermisch bedingter Verformungen an Industrierobotern. Universität Stuttgart 1997 (Dissertation).

ROOS 1998

Roos, E.: Anwendungsorientierte Mess- und Berechnungsverfahren zur Kalibrierung off-line programmierter Roboterapplikationen. Universität der Bundeswehr Hamburg. Düsseldorf: VDI 1998 (Dissertation).

### SCHRÖER 1993

Schröer, K.: Identifikation von Kalibrationsparametern kinematischer Ketten. München: Carl Hanser 1993 (Dissertation).

### SCOUT 2003

Dr. Barthel Sensorsysteme GmbH: SCOUT: Die bessere Lösung für viele Produktionsaufgaben. Internetseite.  
URL: [www.scout-sensor.com/Sensor.html](http://www.scout-sensor.com/Sensor.html). München: 2003.

### SHAMMA UND WHITNEY 1987

Shamma, J.S., Whitney, D.E.: A Method for Inverse Robot Calibration. ASME Journal of Dynamic Systems; Measurement and Control, 109 (1987), S. 46-43.

### SLV 1996

Schweißtechnische Lehr- und Versuchsanstalt Halle: Optische 3D-Vermessung an Bauteilen und Industrierobotern. Firmenschrift. Halle: 1996.

### STÄUBLI 2003

Stäubli AG: Internetseite der Stäubli AG:  
URL: [http://www.staubli.com/web/web\\_de/robot/division.nsf](http://www.staubli.com/web/web_de/robot/division.nsf). Zürich: 2003.

### THATER 1993

Thater, G.: Verfahren zur Bestimmung der Posegenauigkeit und zur Fehlerkompensation Off-Line programmierter Industrieroboter. Universität der Bundeswehr. Hamburg: 1993 (Dissertation).

### THATER ET AL. 1994

Thater, G.; Behrens, A.; Roos, E.: Reproducible Tests for Industrial Robots. In: Proc. 25<sup>th</sup> International Symposium on Industrial Robots. Hannover: 1994, S. 491-497.

### UNIBW 2002

Universität der Bundeswehr Hamburg, Pressestelle: Mitteilungen an die Presse 4/2002. Hannovermesse 2002: Kalibriersystem zur Genauigkeitssteigerung von Industrierobotern. Internetseite. URL: <http://www.unibw-hamburg.de/PRWEB/presse/pr-04-2002.pdf>. Hamburg 2002.

### VDI 2860 1987

Handhabungsfunktionen, Handhabungseinrichtungen, Begriffe,

## **6 Literaturverzeichnis**

---

Definitionen, Symbole. Blatt 1. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI.

**VDI 2860 1988**

Kenngrößen für Industrieroboter: Einsatzspezifische Kenngrößen. Blatt 2 und 3. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI 1988.

**VDI 2861 1989**

Kenngrößen für Industrieroboter. Blatt 1 bis 3. Hrsg. Verein Deutscher Ingenieure. Düsseldorf: VDI 1988.

**VEITSCHEGGER UND CHI-HAUR 1986:**

Veitschegger, W.K.; Chi-Haur, W.: Robot Accuracy Analysis based on Kinematics. IEEE Journal of Robotics and Automation Vol. RA-2, No. 3 (1986) September, S. 171-179.

**VERL UND PIETERS 1999**

Verl. A., Pieters, S.: AMATEC setzt neue Maßstäbe. In: *roboter news*. 01/99. Firmenschrift der Fa. KUKA. Augsburg 1999, S.13.

**WECK 1999**

Weck, M.: Werkzeugmaschinen, Fertigungssysteme. Band 3.2. Automatisierung und Steuerungstechnik. Düsseldorf: VDI 1999.

**WERNER 2002**

Werner, J.: Das Laser- $\mu$ -GPS – Ein neuer Ansatz eines 3D-Lasermesssystems. In: Mechatronische Produktionssysteme – Genauigkeit gezielt entwickeln. *iwb* – Seminarberichte 60. München: Utz 2002.

**WIEST 2001**

Wiest, U.: Kinematische Kalibrierung von Industrierobotern. Universität Karlsruhe. Aachen: Shaker 2001 (Dissertation).

**ZELLER 1995**

Zeller, F.-J.: Sensorplanung und schnelle Sensorregelung für Industrieroboter. München; Wien: Hanser 1995.

## 7 Anhang

### 7.1 Abbildungsverzeichnis

Bild 1.1:	Zusammenföhrung der Bereiche der modellbasierten Kalibrierung und Kompensation .....	3
Bild 1.2:	Gliederung der Arbeit.....	5
Bild 2.1:	Offene, geschlossene und hybride kinematische Ketten (Roboterdarstellung nach VDI 2861 1989) .....	7
Bild 2.2:	Arten von Bewegungssachsen [Bildnachweis: Roboter: Mitsubishi]....	8
Bild 2.3:	Roboter mit offenem kinematischem Aufbau (links: Sechsachs-Roboter, rechts: SCARA)[Bildnachweis: Roboter: Stäubli (links); Bosch (rechts)]......	9
Bild 2.4:	Symmetrisch und asymmetrisch aufgebauter Roboter [Bildnachweis: Roboter: Stäubli (links); ABB (rechts)] .....	9
Bild 2.5:	Roboter mit geschlossenem kinematischem Aufbau [Bildnachweis: Roboter: Comau (links); Fanuc (Mitte); ABB (rechts)] .....	11
Bild 2.7:	Roboter mit Prüfebene.....	16
Bild 2.8:	Genauigkeit als Maß für die Übereinstimmung von realem Roboter und Steuerungsmodell [Bildnachweis: Roboter: Stäubli] ....	21
Bild 2.9:	Messsysteme zur Bestimmung der TCP-Position von Industrierobotern [Bildnachweis: Triangulations-Sensor: Perceptron; Theodolit: Leica; Rodym 6D: Krypton; Lasertracker: Leica; Reseau Scanning Kamera: Rollei] .....	23
Bild 2.10:	Mögliche Stellschrauben zur Genauigkeitssteigerung .....	29
Bild 2.11:	Ablauf der modellbasierten Kalibrierung .....	41
Bild 2.12:	Maßnahmen zur Reduzierung der Temperaturdrift.....	52
Bild 3.1:	Anforderungen an das Kompensationsverfahren bei Robotereinsatz in Inline-Messzellen .....	62
Bild 3.2:	Vorgehensweise zur Umsetzung der Kompensationsmethode.....	68
Bild 3.3:	Temperaturkammer als Versuchsumgebung .....	72
Bild 3.4:	Layout des Versuchsaufbaus in der Temperaturkammer .....	73
Bild 3.5:	Vorgehensweise zur Parameterreduktion .....	78

Bild 3.6:	Messung der Positionierabweichungen eines Roboters mit einem Lasertracker .....	80
Bild 3.7:	Beispiel einer graphischen Darstellung des Parameterverlaufs in Abhängigkeit vom Erwärmungszustand.....	83
Bild 3.9:	Kompensationstest in der für die vorliegende Arbeit zur Verfügung stehenden Temperaturkammer .....	87
Bild 3.10:	Vorgehensweise zur Generierung eines Referenzposensatzes .....	96
Bild 3.11:	Prinzipieller Ablauf der Kompensation (nach GRÄSER 1999) .....	104
Bild 3.12:	Inbetriebnahme einer Anlage.....	105
Bild 3.13:	Mögliche Methoden zur Auslösung der Kompensation.....	108
Bild 3.14:	Durchführung der Kompensation .....	109
Bild 3.15:	Umsetzungsvarianten zur Verwendung der Ergebnisse der Kompensationsrechnung .....	112
Bild 3.16:	Trumpf BendMaster und zugehöriger Referenzkörper .....	117
Bild 3.17:	Einflüsse auf die Genauigkeit der Kompensation .....	120
Bild 4.1:	Funktionsprinzip eines Laser-Triangulationssensors [Bildnachweis: Perceptron].....	124
Bild 4.2:	Robotermodellierung mit RoboCal .....	128
Bild 4.3:	Im Verlauf der Untersuchungen verwendete Referenzkörper.....	131
Bild 4.4:	Kommunikationskreis zur Kompensation .....	133
Bild 4.5:	Unkompensierte Temperaturdrift des Comau Smart H1 an den Messpunkten am Referenzkörper .....	134
Bild 4.6:	Kompensierte Temperaturdrift des Comau Smart H1 an der Messumgebung .....	135
Bild 4.7:	Kosten pro Messpunkt.....	139
Bild 5.1:	Robotergestützte Inline-Messanlage in der Automobilindustrie.....	142

## **7.2 Tabellenverzeichnis**

Tabelle 2.1:	Typische Genauigkeitskennwerte aktueller Industrieroboter .....	18
Tabelle 2.2:	Einflussgrößen bezüglich der Genauigkeit von Industrierobotern....	20
Tabelle 2.3:	Bekannte Einsatzbereiche der vorgestellten Sensoren und Messsysteme .....	28

## **7.3 Formelverzeichnis**

Formel 1:	Übertragungsverhalten eines Antriebs.....	42
Formel 2:	Modellierung des Getriebespiels .....	42
Formel 3:	Modellierung der Gelenkelastizität .....	43
Formel 4:	Fourier-Approximation.....	43
Formel 5:	Gesamtübertragungsverhalten eines Gelenks.....	43
Formel 6:	Menge der Elementartransformationen .....	43
Formel 7:	Denavit-Hartenberg-Konvention .....	44
Formel 8:	Hayati-Konvention .....	44
Formel 9:	Tensor der Reaktionskräfte und Momente in den Robotergelenken..	45
Formel 10:	Transformation eines Teilkörpers (I).....	45
Formel 11:	Rotation.....	45
Formel 12:	Elastizitätstransformationen .....	45
Formel 13:	Transformation eines Teilkörpers (II) .....	46
Formel 14:	Modelfunktion .....	46
Formel 15:	Gleichungssystem zur Parameteridentifikation .....	46
Formel 16:	Ziel der Parameteridentifikation .....	47
Formel 17:	Zielfunktional .....	47
Formel 18:	Linearisierung für das Gauß-Newton-Verfahren.....	47
Formel 19:	Partielle Differenzierung der Modelfunktion .....	47
Formel 20:	Skalierungsfaktor .....	48
Formel 21:	Extremaler Skalierungsfaktor .....	48

Formel 22:	Gemittelter Skalierungsfaktor.....	48
Formel 23:	Mittlerer Einfluss einer Parameterdifferenz auf die TCP-Position ....	48
Formel 24:	Lösung des linearen Ausgleichsproblems .....	49
Formel 25:	Sicherstellung der Konvergenz des Näherungsverfahrens .....	49
Formel 26:	Abbruchkriterium .....	49

### **7.4 Verwendete Software**

#### **AnySim**

Tecnomatix Technologies GmbH & Co. KG  
Richard-Reitzner-Allee 8  
D-85540 Haar b. München  
Deutschland  
URL: <http://www.tecnomatix.com>

#### **Matlab**

The Math Works Inc.  
24 Prime Park Way  
Natick, MA 01760-1500  
USA  
URL: <http://www.mathworks.com>

#### **RoboCal**

Krypton Industrial Metrology  
Research Park Z1  
Interleuvenlaan 86  
B-3001 Leuven  
Belgien  
URL: <http://www.krypton.be>

#### **Excel (Microsoft Office)**

Microsoft Deutschland GmbH  
Konrad-Zuse-Str. 1  
D-85716 Unterschleißheim  
Deutschland  
URL: <http://www.microsoft.de>

# iwb Forschungsberichte Band 1–121

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. J. Milberg und Prof. Dr.-Ing. G. Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Band 1–121 erschienen im Springer Verlag, Berlin, Heidelberg und sind im Erscheinungsjahr und den folgenden drei Kalenderjahren erhältlich im Buchhandel oder durch Lange & Springer, Otto-Suhr-Allee 26–28, 10585 Berlin

- |    |   |    |   |
|----|---|----|---|
| 1  | <i>Streifinger, E.</i><br>Beitrag zur Sicherung der Zuverlässigkeit und Verfügbarkeit moderner Fertigungsmittel<br>1986 · 72 Abb. · 167 Seiten · ISBN 3-540-16391-3       | 14 | <i>Groha, A.</i><br>Universelles Zellenrechnerkonzept für flexible Fertigungssysteme<br>1988 · 74 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-19182-8                      |
| 2  | <i>Fuchsberger, A.</i><br>Untersuchung der spanenden Bearbeitung von Knochen<br>1986 · 90 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-16392-1  | 15 | <i>Riese, K.</i><br>Klippsmontage mit Industrierobotern<br>1988 · 92 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-19183-6   |
| 3  | <i>Meißer, C.</i><br>Montageautomatisierung am Beispiel des Schraubens mit Industrierobotern<br>1986 · 77 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-16393-X                          | 16 | <i>Lutz, P.</i><br>Leitsysteme für rechnerintegrierte Auftragsabwicklung<br>1988 · 44 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-19260-3                                  |
| 4  | <i>Summer, H.</i><br>Modell zur Berechnung verzweigter Antriebsstrukturen<br>1986 · 74 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-16394-8   | 17 | <i>Klippl, C.</i><br>Mobiler Roboter im Materialfluß eines flexiblen Fertigungssystems<br>1988 · 86 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-50468-0                    |
| 5  | <i>Simon, W.</i><br>Elektrische Vorschubantriebe an NC-Systemen<br>1986 · 141 Abb. · 198 Seiten · ISBN 3-540-16693-9  | 18 | <i>Rascher, R.</i><br>Experimentelle Untersuchungen zur Technologie der Kugelherstellung<br>1989 · 110 Abb. · 200 Seiten · ISBN 3-540-51301-9                 |
| 6  | <i>Büchs, S.</i><br>Analytische Untersuchungen zur Technologie der Kugelbearbeitung<br>1986 · 74 Abb. · 173 Seiten · ISBN 3-540-16694-7                                   | 19 | <i>Heusler, H.-J.</i><br>Rechnerunterstützte Planung flexibler Montagesysteme<br>1989 · 43 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-51723-5                             |
| 7  | <i>Hünzinger, I.</i><br>Schneiderodierte Oberflächen<br>1986 · 79 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-16695-5  | 20 | <i>Kirchknopf, P.</i><br>Ermittlung modularer Parameter aus Übertragungsfrequenzgängen<br>1989 · 57 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51724-3                    |
| 8  | <i>Pilland, U.</i><br>Echtzeit-Kollisionsschutz an NC-Drehmaschinen<br>1986 · 54 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-17274-2   | 21 | <i>Sauerer, Ch.</i><br>Beitrag für ein Zerspanprozeßmodell Metallbandsägen<br>1990 · 89 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-51868-1                                |
| 9  | <i>Barthelmeß, P.</i><br>Montagegerechtes Konstruieren durch die Integration von Produkt- und Montageprozeßgestaltung<br>1987 · 70 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18120-2 | 22 | <i>Karstedt, K.</i><br>Positionsbestimmung von Objekten in der Montage- und Fertigung automatisierung<br>1990 · 92 Abb. · 157 Seiten · ISBN 3-540-51879-7     |
| 10 | <i>Reithofer, N.</i><br>Nutzungsicherung von flexibel automatisierten Produktionsanlagen<br>1987 · 84 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-18440-6                              | 23 | <i>Peiker, St.</i><br>Entwicklung eines integrierten NC-Planungssystems<br>1990 · 66 Abb. · 180 Seiten · ISBN 3-540-51880-0                                   |
| 11 | <i>Diese, H.</i><br>Rechnerunterstützte Entwicklung flexibel automatisierter Montageprozesse<br>1988 · 56 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-18799-5                          | 24 | <i>Schugmann, R.</i><br>Nachgiebige Werkzeugaufhängungen für die automatische Montage<br>1990 · 71 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-52138-0                     |
| 12 | <i>Reinhart, G.</i><br>Flexible Automatisierung der Konstruktion und Fertigung elektrischer Leitungssätze<br>1988 · 112 Abb. · 197 Seiten · ISBN 3-540-19003-1            | 25 | <i>Wrba, P.</i><br>Simulation als Werkzeug in der Handhabungstechnik<br>1990 · 125 Abb. · 178 Seiten · ISBN 3-540-52231-X                                     |
| 13 | <i>Bürstner, H.</i><br>Investitionsentscheidung in der rechnerintegrierten Produktion<br>1988 · 74 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-19099-6                                 | 26 | <i>Eibelhäuser, P.</i><br>Rechnerunterstützte experimentelle Modalanalyse mittels gestufter Sinusanregung<br>1990 · 79 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-52451-7 |
|    |   | 27 | <i>Prasch, J.</i><br>Computerunterstützte Planung von chirurgischen Eingriffen in der Orthopädie<br>1990 · 113 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-52543-2         |

- 28 Teich, K.  
Prozeßkommunikation und Rechnerverbund in der Produktion  
1990 · 52 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-52764-8
- 29 Pfraun, W.  
Rechnergestützte und graphische Planung manueller und teilautomatisierter Arbeitsplätze  
1990 · 59 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-52829-6
- 30 Tauber, A.  
Modellbildung kinematischer Strukturen als Komponente der Montageplanung  
1990 · 93 Abb. · 190 Seiten · ISBN 3-540-52911-X
- 31 Jäger, A.  
Systematische Planung komplexer Produktionssysteme  
1991 · 75 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-53021-5
- 32 Hartberger, H.  
Wissensbasierte Simulation komplexer Produktionssysteme  
1991 · 58 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-53326-5
- 33 Tuczek, H.  
Inspektion von Karosseriepreßteilen auf Risse und Einschnürungen mittels Methoden der Bildverarbeitung  
1992 · 125 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-53965-4
- 34 Fischbacher, J.  
Planungsstrategien zur störungstechnischen Optimierung von Reinraum-Fertigungsgeräten  
1991 · 60 Abb. · 166 Seiten · ISBN 3-540-54027-X
- 35 Moser, O.  
3D-Echtzeitkollisionsschutz für Drehmaschinen  
1991 · 66 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-54076-8
- 36 Naber, H.  
Aufbau und Einsatz eines mobilen Roboters mit unabhängiger Lokomotions- und Manipulationskomponente  
1991 · 85 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-54216-7
- 37 Kupec, Th.  
Wissensbasiertes Leitsystem zur Steuerung flexibler Fertigungsanlagen  
1991 · 68 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-54260-4
- 38 Maulhardt, U.  
Dynamisches Verhalten von Kreissägen  
1991 · 109 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-54365-1
- 39 Götz, R.  
Strukturierte Planung flexibel automatisierter Montagesysteme für flächige Bauteile  
1991 · 86 Abb. · 201 Seiten · ISBN 3-540-54401-1
- 40 Koepfer, Th.  
3D-grafisch-interaktive Arbeitsplanung - ein Ansatz zur Aufhebung der Arbeitsteilung  
1991 · 74 Abb. · 126 Seiten · ISBN 3-540-54436-4
- 41 Schmidt, M.  
Konzeption und Einsatzplanung flexibel automatisierter Montagesysteme  
1992 · 108 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-55025-9
- 42 Burger, C.  
Produktionsregelung mit entscheidungsunterstützenden Informationssystemen  
1992 · 94 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-55187-5
- 43 Hößmann, J.  
Methodik zur Planung der automatischen Montage von nicht formstablen Bauteilen  
1992 · 73 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-5520-0
- 44 Petry, M.  
Systematik zur Entwicklung eines modularen Programmbaukastens für robotergeführte Klebefolzprozesse  
1992 · 106 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-55374-6
- 45 Schönecker, W.  
Integrierte Diagnose in Produktionszellen  
1992 · 87 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-55375-4
- 46 Bick, W.  
Systematische Planung hybrider Montagesysteme unter Berücksichtigung der Ermittlung des optimalen Automatisierungsgrades  
1992 · 70 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-55377-0
- 47 Gebauer, L.  
Prozeßuntersuchungen zur automatisierten Montage von optischen Linsen  
1992 · 84 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55378-9
- 48 Schräuber, N.  
Erstellung eines 3D-Simulationssystems zur Reduzierung von Rüstzeiten bei der NC-Bearbeitung  
1992 · 103 Abb. · 161 Seiten · ISBN 3-540-55431-9
- 49 Wisbacher, J.  
Methoden zur rationellen Automatisierung der Montage von Schnellbefestigungselementen  
1992 · 77 Abb. · 176 Seiten · ISBN 3-540-55512-9
- 50 Garnick, F.  
Laserbearbeitung mit Robotern  
1992 · 110 Abb. · 184 Seiten · ISBN 3-540-55513-7
- 51 Eubert, P.  
Digitale Zustandesregelung elektrischer Vorschubantriebe  
1992 · 89 Abb. · 159 Seiten · ISBN 3-540-44441-2
- 52 Gläss, W.  
Rechnerintegrierte Kabelsatzfertigung  
1992 · 67 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-55749-0
- 53 Helm, H.J.  
Ein Verfahren zur On-Line Fehlererkennung und Diagnose  
1992 · 60 Abb. · 153 Seiten · ISBN 3-540-55750-4
- 54 Lang, Ch.  
Wissensbasierte Unterstützung der Verfügbarkeitsplanung  
1992 · 75 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-55751-2
- 55 Schuster, G.  
Rechnergestütztes Planungssystem für die flexibel automatisierte Montage  
1992 · 67 Abb. · 135 Seiten · ISBN 3-540-55830-6
- 56 Bomm, H.  
Ein Ziel- und Kennzahlensystem zum Investitionscontrolling komplexer Produktionssysteme  
1992 · 87 Abb. · 195 Seiten · ISBN 3-540-55964-7
- 57 Wendt, A.  
Qualitätssicherung in flexibel automatisierten Montagesystemen  
1992 · 74 Abb. · 179 Seiten · ISBN 3-540-56044-0
- 58 Hansmaier, H.  
Rechnergestütztes Verfahren zur Geräuschminderung  
1993 · 67 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-56053-2
- 59 Dilling, U.  
Planung von Fertigungssystemen unterstützt durch Wirtschaftssimulationen  
1993 · 72 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56307-5

- 60 *Strohmayer, R.*  
Rechnergestützte Auswahl und Konfiguration von Zubringereinrichtungen  
1993 · 80 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-56652-X
- 61 *Glas, J.*  
Standardisierter Aufbau anwendungsspezifischer Zellenrechnersoftware  
1993 · 80 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-56890-5
- 62 *Stettner, R.*  
Rechnergestützte Simulationswerkzeuge zur Effizienzsteigerung des Industrieroboter Einsatzes  
1994 · 91 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-56889-1
- 63 *Dirndorfer, A.*  
Roboter systeme zur förderbandsynchronen Montage  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57031-4
- 64 *Wiedemann, M.*  
Simulation des Schwingungsverhaltens spanender Werkzeugmaschinen  
1993 · 81 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-57177-9
- 65 *Woenckhaus, Ch.*  
Rechnergestütztes System zur automatisierten 3D-Layoutoptimierung  
1994 · 81 Abb. · 140 Seiten · ISBN 3-540-57284-8
- 66 *Kummelsteiner, G.*  
3D-Bewegungssimulation als integratives Hilfsmittel zur Planung manueller Montagesysteme  
1994 · 62 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-57535-9
- 67 *Kugelmann, F.*  
Einsatz nachgiebiger Elemente zur wirtschaftlichen Automatisierung von Produktionsystemen  
1993 · 76 Abb. · 144 Seiten · ISBN 3-540-57549-9
- 68 *Schwarz, H.*  
Simulationsgestützte CAD/CAM-Kopplung für die 3D-Laserbearbeitung mit integrierter Sensorik  
1994 · 96 Abb. · 148 Seiten · ISBN 3-540-57577-4
- 69 *Viethen, U.*  
Systematik zum Prüfen in flexiblen Fertigungssystemen  
1994 · 70 Abb. · 142 Seiten · ISBN 3-540-57794-7
- 70 *Seehuber, M.*  
Automatische Inbetriebnahme geschwindigkeitsadaptiver Zustandsregler  
1994 · 72 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-57896-X
- 71 *Amann, W.*  
Eine Simulationsumgebung für Planung und Betrieb von Produktionsystemen  
1994 · 71 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-57924-9
- 72 *Schöpf, M.*  
Rechnergestütztes Projektinformations- und Koordinationssystem für das Fertigungsvorfeld  
1997 · 63 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58052-2
- 73 *Welling, A.*  
Effizienter Einsatz bildgebender Sensoren zur Flexibilisierung automatisierter Handhabungsvorgänge  
1994 · 66 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-580-0
- 74 *Zetlmayer, H.*  
Verfahren zur simulationsgestützten Produktionsregelung in der Einzel- und Kleinserienproduktion  
1994 · 62 Abb. · 143 Seiten · ISBN 3-540-58134-0
- 75 *Lindl, M.*  
Auftragsleittechnik für Konstruktion und Arbeitsplanung  
1994 · 66 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58221-5
- 76 *Zipper, B.*  
Das integrierte Betriebsmittelwesen - Baustein einer flexiblen Fertigung  
1994 · 64 Abb. · 147 Seiten · ISBN 3-540-58222-3
- 77 *Raith, P.*  
Programmierung und Simulation von Zellenabläufen in der Arbeitsvorbereitung  
1995 · 51 Abb. · 130 Seiten · ISBN 3-540-58223-1
- 78 *Engel, A.*  
Strömungstechnische Optimierung von Produktionssystemen durch Simulation  
1994 · 69 Abb. · 160 Seiten · ISBN 3-540-58258-4
- 79 *Zäh, M. F.*  
Dynamisches Prozeßmodell Kreissägen  
1995 · 95 Abb. · 186 Seiten · ISBN 3-540-58624-5
- 80 *Zwanzer, N.*  
Technologisches Prozeßmodell für die Kugelschleifbearbeitung  
1995 · 65 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-58634-2
- 81 *Romanow, P.*  
Konstruktionsbegleitende Kalkulation von Werkzeugmaschinen  
1995 · 66 Abb. · 151 Seiten · ISBN 3-540-58771-3
- 82 *Kahlenberg, R.*  
Integrierte Qualitätssicherung in flexiblen Fertigungszellen  
1995 · 71 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-58772-1
- 83 *Huber, A.*  
Arbeitsfolgenplanung mehrstufiger Prozesse in der Hartbearbeitung  
1995 · 87 Abb. · 152 Seiten · ISBN 3-540-58773-X
- 84 *Birkel, G.*  
Aufwandsminimierter Wissenserwerb für die Diagnose in flexiblen Produktionszellen  
1995 · 64 Abb. · 137 Seiten · ISBN 3-540-58869-8
- 85 *Simon, D.*  
Fertigungsregelung durch zielgrößenorientierte Planung und logistisches Störungsmanagement  
1995 · 77 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-58942-2
- 86 *Nedeljkovic-Groha, V.*  
Systematische Planung anwendungsspezifischer Materialflußsteuerungen  
1995 · 94 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-58953-8
- 87 *Rockland, M.*  
Flexibilisierung der automatischen Teilbereitstellung in Montageanlagen  
1995 · 83 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-58999-6
- 88 *Linner, St.*  
Konzept einer integrierten Produktentwicklung  
1995 · 67 Abb. · 168 Seiten · ISBN 3-540-59016-1
- 89 *Eder, Th.*  
Integrierte Planung von Informationssystemen für rechnergestützte Produktionssysteme  
1995 · 62 Abb. · 150 Seiten · ISBN 3-540-59084-6
- 90 *Deutschle, U.*  
Prozeßorientierte Organisation der Auftragsentwicklung in mittelständischen Unternehmen  
1995 · 80 Abb. · 188 Seiten · ISBN 3-540-59337-3
- 91 *Dieteler, A.*  
Recyclingintegrierte Produktentwicklung  
1995 · 68 Abb. · 146 Seiten · ISBN 3-540-60120-1

- 92 *Hechl, Chr.*  
Personalorientierte Montageplanung für komplexe und varianteureiche Produkte  
1995 · 73 Abb. · 158 Seiten · ISBN 3-540-60325-5
- 93 *Albertz, F.*  
Dynamikgerechter Entwurf von Werkzeugmaschinen - Gestellstrukturen  
1995 · 83 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-60608-8
- 94 *Trunzer, W.*  
Strategien zur On-Line Bahnplanung bei Robotern mit 3D-Konturfolgesensoren  
1996 · 101 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-60961-X
- 95 *Fichtmüller, N.*  
Rationalisierung durch flexible, hybride Montagesysteme  
1996 · 83 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-60960-1
- 96 *Trucks, V.*  
Rechnergestützte Beurteilung von Getriebestructuren in Werkzeugmaschinen  
1996 · 64 Abb. · 141 Seiten · ISBN 3-540-60599-8
- 97 *Schäffer, G.*  
Systematische Integration adaptiver Produktionssysteme  
1996 · 71 Abb. · 170 Seiten · ISBN 3-540-60958-X
- 98 *Koch, M. R.*  
Autonome Fertigungsstellen - Gestaltung, Steuerung und integrierter Störungsbehandlung  
1996 · 67 Abb. · 138 Seiten · ISBN 3-540-61104-5
- 99 *Moceduma de la Barrera, J.L.*  
Ein durchgängiges System zur computer- und rechnergestützten Chirurgie  
1996 · 99 Abb. · 175 Seiten · ISBN 3-540-61145-2
- 100 *Geuer, A.*  
Einsatzpotential des Rapid Prototyping in der Produktentwicklung  
1996 · 84 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-61495-8
- 101 *Ebner, C.*  
Ganzheitliches Verfügbarkeits- und Qualitätsmanagement unter Verwendung von Felddaten  
1996 · 67 Abb. · 132 Seiten · ISBN 3-540-61678-0
- 102 *Pischetsrieder, K.*  
Steuerung autonomer mobiler Roboter in der Produktion  
1996 · 74 Abb. · 171 Seiten · ISBN 3-540-61714-0
- 103 *Köhler, R.*  
Disposition und Materialbereitstellung bei komplexen varianteureichen Kleinprodukten  
1997 · 62 Abb. · 177 Seiten · ISBN 3-540-62024-9
- 104 *Feldmann, Ch.*  
Eine Methode für die integrierte rechnergestützte Montageplanung  
1997 · 71 Abb. · 163 Seiten · ISBN 3-540-62059-1
- 105 *Lehmann, H.*  
Integrierte Materialfluß- und Layoutplanung durch Kopplung von CAD- und Ablaufsimulationssystem  
1997 · 96 Abb. · 191 Seiten · ISBN 3-540-62202-0
- 106 *Wegner, M.*  
Steuerungsintegrierte Fehlerbehandlung für maschinennahe Abläufe  
1997 · 94 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-62656-5
- 107 *Lorenzen, J.*  
Simulationsgestützte Kostenanalyse in produktorientierten Fertigungsstrukturen  
1997 · 63 Abb. · 129 Seiten · ISBN 3-540-62794-4
- 108 *Krämer, U.*  
Systematik für die rechnergestützte Ähnlichkeitssuche und Standardisierung  
1997 · 53 Abb. · 127 Seiten · ISBN 3-540-63338-3
- 109 *Pfersdorf, I.*  
Entwicklung eines systematischen Vorgehens zur Organisation des industriellen Service  
1997 · 74 Abb. · 172 Seiten · ISBN 3-540-63615-3
- 110 *Kube, R.*  
Informations- und kommunikationstechnische Integration von Menschen in der Produktion  
1997 · 77 Abb. · 155 Seiten · ISBN 3-540-63642-0
- 111 *Kaiser, J.*  
Vernetztes Gestalten von Produkt und Produktionsprozeß mit Produktmodellen  
1997 · 67 Abb. · 139 Seiten · ISBN 3-540-63999-3
- 112 *Geyer, M.*  
Flexibles Planungssystem zur Berücksichtigung ergonomischer Aspekte bei der Produkt- und Arbeitssystemgestaltung  
1997 · 85 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-64195-5
- 113 *Martin, C.*  
Produktionsregelung - ein modularer, modellbasierter Ansatz  
1998 · 73 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-64401-6
- 114 *Löffler, Th.*  
Akustische Überwachung automatisierter Fügeprozesse  
1998 · 85 Abb. · 136 Seiten · ISBN 3-540-64511-X
- 115 *Lindermair, R.*  
Qualitätsorientierte Entwicklung von Montagesystemen  
1998 · 84 Abb. · 164 Seiten · ISBN 3-540-64686-8
- 116 *Koehler, J.*  
Prozeßorientierte Teamstrukturen in Betrieben mit Großserienfertigung  
1998 · 75 Abb. · 185 Seiten · ISBN 3-540-65037-7
- 117 *Schuller, R. W.*  
Leitfäden zum automatisierten Auftrag von hochviskosen Dichtmassen  
1999 · 76 Abb. · 162 Seiten · ISBN 3-540-65320-1
- 118 *Debuschewitz, M.*  
Integrierte Methodik und Werkzeuge zur herstellungsorientierten Produktentwicklung  
1999 · 104 Abb. · 169 Seiten · ISBN 3-540-65350-3
- 119 *Bauer, L.*  
Strategien zur rechnergestützten Offline-Programmierung von 3D-Laseranlagen  
1999 · 98 Abb. · 145 Seiten · ISBN 3-540-65382-1
- 120 *Pfob, E.*  
Modellgestützte Arbeitsplanung bei Fertigungsmaschinen  
1999 · 89 Abb. · 154 Seiten · ISBN 3-540-65525-5
- 121 *Spitznagel, J.*  
Erfahrungsgeleitete Planung von Laseranlagen  
1999 · 63 Abb. · 156 Seiten · ISBN 3-540-65896-3

# Seminarberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Seminarberichte iwb sind erhältlich im Buchhandel oder beim

Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [utz@utzverlag.com](mailto:utz@utzverlag.com)

- 1 Innovative Montagesysteme - Anlagengestaltung, -bewertung und -überwachung  
115 Seiten · ISBN 3-931327-01-9
- 2 Integriertes Produktmodell - Von der Idee zum fertigen Produkt  
82 Seiten · ISBN 3-931327-02-7
- 3 Konstruktion von Werkzeugmaschinen - Berechnung, Simulation und Optimierung  
110 Seiten · ISBN 3-931327-03-5
- 4 Simulation - Einsatzmöglichkeiten und Erfahrungsberichte  
134 Seiten · ISBN 3-931327-04-3
- 5 Optimierung der Kooperation in der Produktentwicklung  
95 Seiten · ISBN 3-931327-05-1
- 6 Materialbearbeitung mit Laser - von der Planung zur Anwendung  
86 Seiten · ISBN 3-931327-76-0
- 7 Dynamisches Verhalten von Werkzeugmaschinen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-77-9
- 8 Qualitätsmanagement - der Weg ist das Ziel  
130 Seiten · ISBN 3-931327-78-7
- 9 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Analysen und Konzepte  
120 Seiten · ISBN 3-931327-79-5
- 10 3D-Simulation - Schneller, sicherer und kostengünstiger zum Ziel  
90 Seiten · ISBN 3-931327-10-8
- 11 Unternehmensorganisation - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
110 Seiten · ISBN 3-931327-11-6
- 12 Autonome Produktionssysteme  
100 Seiten · ISBN 3-931327-12-4
- 13 Planung von Montageanlagen  
130 Seiten · ISBN 3-931327-13-2
- 14 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 15 Flexible fluide Kleb/Dichtstoffe - Dosierung und Prozeßgestaltung  
80 Seiten · ISBN 3-931327-15-9
- 16 Time to Market - Von der Idee zum Produktionsstart  
80 Seiten · ISBN 3-931327-16-7
- 17 Industriekeramik in Forschung und Praxis - Probleme, Analysen und Lösungen  
80 Seiten · ISBN 3-931327-17-5
- 18 Das Unternehmen im Internet - Chancen für produzierende Unternehmen  
165 Seiten · ISBN 3-931327-18-3
- 19 Leittechnik und Informationslogistik - mehr Transparenz in der Fertigung  
85 Seiten · ISBN 3-931327-19-1
- 20 Dezentrale Steuerungen in Produktionsanlagen - Plug & Play - Vereinfachung von Entwicklung und Inbetriebnahme  
105 Seiten · ISBN 3-931327-20-5
- 21 Rapid Prototyping - Rapid Tooling - Schnell zu funktionalen Prototypen  
95 Seiten · ISBN 3-931327-21-3
- 22 Mikrotechnik für die Produktion - Greifbare Produkte und Anwendungspotentiale  
95 Seiten · ISBN 3-931327-22-1
- 24 EDM Engineering Data Management  
195 Seiten · ISBN 3-931327-24-8
- 25 Rationale Nutzung der Simulationstechnik - Entwicklungstrends und Praxisbeispiele  
152 Seiten · ISBN 3-931327-25-6
- 26 Alternative Dichtungssysteme - Konzepte zur Dichtungsmontage und zum Dichtmittelauflauftrag  
110 Seiten · ISBN 3-931327-26-4
- 27 Rapid Prototyping - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
111 Seiten · ISBN 3-931327-27-2
- 28 Rapid Tooling - Mit neuen Technologien schnell vom Entwurf zum Serienprodukt  
154 Seiten · ISBN 3-931327-28-0
- 29 Installationstechnik an Werkzeugmaschinen - Abschlußseminar  
156 Seiten · ISBN 3-931327-29-9
- 30 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 31 Engineering Data Management (EDM) - Erfahrungsberichte und Trends  
183 Seiten · ISBN 3-931327-31-0
- 32 Nicht erschienen - wird nicht erscheinen
- 33 3D-CAD - Mehr als nur eine dritte Dimension  
181 Seiten · ISBN 3-931327-33-7
- 34 Laser in der Produktion - Technologische Randbedingungen für den wirtschaftlichen Einsatz  
102 Seiten · ISBN 3-931327-34-5
- 35 Ablaufsimulation - Anlagen effizient und sicher planen und betreiben  
129 Seiten · ISBN 3-931327-35-3
- 36 Moderne Methoden zur Montageplanung - Schlüssel für eine effiziente Produktion  
124 Seiten · ISBN 3-931327-36-1
- 37 Wettbewerbsfaktor Verfügbarkeit - Produktivitätsteigerung durch technische und organisatorische Ansätze  
95 Seiten · ISBN 3-931327-37-X
- 38 Rapid Prototyping - Effizienter Einsatz von Modellen in der Produktentwicklung  
128 Seiten · ISBN 3-931327-38-8
- 39 Rapid Tooling - Neue Strategien für den Werkzeug- und Formenbau  
130 Seiten · ISBN 3-931327-39-6
- 40 Erfolgreich kooperieren in der produzierenden Industrie - Flexibler und schneller mit modernen Kooperationen  
160 Seiten · ISBN 3-931327-40-X
- 41 Innovative Entwicklung von Produktionsmaschinen  
146 Seiten · ISBN 3-89675-041-0
- 42 Stückzahlflexible Montagesysteme  
139 Seiten · ISBN 3-89675-042-9
- 43 Produktivität und Verfügbarkeit - ...durch Kooperation steigern  
120 Seiten · ISBN 3-89675-043-7
- 44 Automatisierte Mikromontage - Handhaben und Positionieren von Mikrobauteilen  
125 Seiten · ISBN 3-89675-044-5
- 45 Produzieren in Netzwerken - Lösungsansätze, Methoden, Praxisbeispiele  
173 Seiten · ISBN 3-89675-045-3
- 46 Virtuelle Produktion - Ablaufsimulation  
108 Seiten · ISBN 3-89675-046-1
- 47 Virtuelle Produktion - Prozeß- und Produktsimulation  
131 Seiten · ISBN 3-89675-047-X
- 48 Sicherheitstechnik an Werkzeugmaschinen  
106 Seiten · ISBN 3-89675-048-8

- 49** Rapid Prototyping · Methoden für die reaktionsfähige Produktentwicklung  
150 Seiten · ISBN 3-89675-049-6
- 50** Rapid Manufacturing · Methoden für die reaktionsfähige Produktion  
121 Seiten · ISBN 3-89675-050-X
- 51** Flexibles Kleben und Dichten · Produkt- & Prozeßgestaltung, Mischverbindungen, Qualitätskontrolle  
137 Seiten · ISBN 3-89675-051-8
- 52** Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung von Klein- und Prototypenserien  
124 Seiten · ISBN 3-89675-052-6
- 53** Mischverbindungen · Werkstoffauswahl, Verfahrensauswahl, Umsetzung  
107 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 54** Virtuelle Produktion · Integrierte Prozess- und Produktsimulation  
133 Seiten · ISBN 3-89675-054-2
- 55** e-Business in der Produktion · Organisationskonzepte, IT-Lösungen, Praxisbeispiele  
150 Seiten · ISBN 3-89675-055-0
- 56** Virtuelle Produktion – Ablaufsimulation als planungsbegleitendes Werkzeug  
150 Seiten · ISBN 3-89675-056-9
- 57** Virtuelle Produktion – Datenintegration und Benutzerschnittstellen  
150 Seiten · ISBN 3-89675-057-7
- 58** Rapid Manufacturing · Schnelle Herstellung qualitativ hochwertiger Bauteile oder Kleinserien  
169 Seiten · ISBN 3-89675-058-7
- 59** Automatisierte Mikromontage · Werkzeuge und Fügetechnologien für die Mikrosystemtechnik  
114 Seiten · ISBN 3-89675-059-3
- 60** Mechatronische Produktionssysteme · Genauigkeit gezielt entwickeln  
131 Seiten · ISBN 3-89675-060-7
- 61** Nicht erschienen – wird nicht erscheinen
- 62** Rapid Technologien · Anspruch – Realität – Technologien  
100 Seiten · ISBN 3-89675-062-3
- 63** Fabrikplanung 2002 · Visionen – Umsetzung – Werkzeuge  
124 Seiten · ISBN 3-89675-063-1
- 64** Mischverbindungen · Einsatz und Innovationspotenzial  
143 Seiten · ISBN 3-89675-064-X
- 65** Fabrikplanung 2003 – Basis für Wachstum · Erfahrungen Werkzeuge Visionen  
136 Seiten · ISBN 3-89675-065-8
- 66** Mit Rapid Technologien zum Aufschwung · Neue Rapid Technologien und Verfahren, Neue Qualitäten, Neue Möglichkeiten, Neue Anwendungsfelder  
185 Seiten · ISBN 3-89675-066-6
- 67** Mechatronische Produktionssysteme · Die Virtuelle Werkzeugmaschine: Mechatronisches Entwicklungsvergehen, Integrierte Modellbildung, Applikationsfelder  
ISBN 3-89675-067-4 · lieferbar ab 03/04
- 68** Virtuelle Produktion · Nutzenpotenziale im Lebenszyklus der Fabrik  
139 Seiten · ISBN 3-89675-068-2
- 69** Kooperationsmanagement in der Produktion · Visionen und Methoden zur Kooperation – Geschäftsmodelle und Rechtsformen für die Kooperation – Kooperation entlang der Wertschöpfungskette  
134 Seiten · ISBN 3-98675-069-0

# Forschungsberichte iwb

herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Institut für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der Technischen Universität München

Forschungsberichte iwb ab Band 122 sind erhältlich im Buchhandel oder beim  
Herbert Utz Verlag, München, Fax 089-277791-01, [utz@utzverlag.de](mailto:utz@utzverlag.de)

- 122 Schneider, Burghard  
**Prozesskettenorientierte Bereitstellung nicht formstabiler Bauteile**  
1999 · 183 Seiten · 98 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-559-5
- 123 Goldstein, Bernd  
**Modellgestützte Geschäftsprozeßgestaltung in der Produktentwicklung**  
1999 · 170 Seiten · 65 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-546-3
- 124 Mößmer, Helmut E.  
**Methode zur simulationsbasierten Regelung zeitvarianter Produktionssysteme**  
1999 · 164 Seiten · 67 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-585-4
- 125 Gräser, Ralf-Gunter  
**Ein Verfahren zur Kompensation temperaturinduzierter Verformungen an Industrierobotern**  
1999 · 167 Seiten · 63 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-603-6
- 126 Trossin, Hans-Jürgen  
**Nutzung der Ähnlichkeitstheorie zur Modellbildung in der Produktionstechnik**  
1999 · 162 Seiten · 75 Abb. · 11 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-614-1
- 127 Kugelmann, Doris  
**Aufgabenorientierte Offline-Programmierung von Industrierobotern**  
1999 · 168 Seiten · 68 Abb. · 2 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-615-X
- 128 Diesch, Rolf  
**Steigerung der organisatorischen Verfügbarkeit von Fertigungszellen**  
1999 · 160 Seiten · 69 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-618-4
- 129 Lulay, Werner E.  
**Hybrid-hierarchische Simulationsmodelle zur Koordination teilautonomer Produktionsstrukturen**  
1999 · 182 Seiten · 51 Abb. · 14 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-620-6
- 130 Murr, Otto  
**Adaptive Planung und Steuerung von integrierten Entwicklungs- und Planungsprozessen**  
1999 · 178 Seiten · 85 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-636-2
- 131 Macht, Michael  
**Ein Vorgehensmodell für den Einsatz von Rapid Prototyping**  
1999 · 170 Seiten · 87 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-638-9
- 132 Mehler, Bruno H.  
**Aufbau virtueller Fabriken aus dezentralen Partnerverbünden**  
1999 · 152 Seiten · 44 Abb. · 27 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-645-1
- 133 Heitmann, Knut  
**Sichere Prognosen für die Produktionsoptimierung mittels stochastischer Modelle**  
1999 · 146 Seiten · 60 Abb. · 13 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-675-3
- 134 Blessing, Stefan  
**Gestaltung der Materialflußsteuerung in dynamischen Produktionsstrukturen**  
1999 · 160 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-690-7
- 135 Abay, Can  
**Numerische Optimierung multivariater mehrstufiger Prozesse am Beispiel der Hartbearbeitung von Industriekeramik**  
2000 · 159 Seiten · 46 Abb. · 5 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-697-4

- 136 Brandner, Stefan  
**Integriertes Produktdaten- und Prozeßmanagement in virtuellen Fabriken**  
2000 · 172 Seiten · 61 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-715-6
- 137 Hirschberg, Arnd G.  
**Verbindung der Produkt- und Funktionsorientierung in der Fertigung**  
2000 · 165 Seiten · 49 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-729-6
- 138 Reek, Alexandra  
**Strategien zur Fokuspositionierung beim Laserstrahlschweißen**  
2000 · 193 Seiten · 103 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-730-X
- 139 Sabbah, Khalid-Alexander  
**Methodische Entwicklung störungstoleranter Steuerungen**  
2000 · 148 Seiten · 75 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-739-3
- 140 Schliffenbacher, Klaus U.  
**Konfiguration virtueller Wertschöpfungsketten in dynamischen, heterarchischen Kompetenznetzwerken**  
2000 · 187 Seiten · 70 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-754-7
- 141 Sprenzel, Andreas  
**Integrierte Kostenkalkulationsverfahren für die Werkzeugmaschinenentwicklung**  
2000 · 144 Seiten · 55 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-757-1
- 142 Gallasch, Andreas  
**Informationstechnische Architektur zur Unterstützung des Wandels in der Produktion**  
2000 · 150 Seiten · 69 Abb. · 6 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-781-4
- 143 Cuiper, Ralf  
**Durchgängige rechnergestützte Planung und Steuerung von automatisierten Montagevorgängen**  
2000 · 168 Seiten · 75 Abb. · 3 Tab. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-783-0 · lieferbar ab ca. 02/01
- 144 Schneider, Christian  
**Strukturmechanische Berechnungen in der Werkzeugmaschinenkonstruktion**  
2000 · 180 Seiten · 66 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-789-X
- 145 Jonas, Christian  
**Konzept einer durchgängigen, rechnergestützten Planung von Montageanlagen**  
2000 · 183 Seiten · 82 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-870-5
- 146 Willnecker, Ulrich  
**Gestaltung und Planung leistungsorientierter manueller Fließmontagen**  
2001 · 175 Seiten · 67 Abb. · broschiert · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-89675-891-8
- 147 Lehner, Christof  
**Beschreibung des Nd:Yag-Laserstrahlschweißprozesses von Magnesiumdruckguss**  
2001 · 205 Seiten · 94 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0004-X
- 148 Rick, Frank  
**Simulationsgestützte Gestaltung von Produkt und Prozess am Beispiel Laserstrahlschweißen**  
2001 · 145 Seiten · 57 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0008-2
- 149 Höhn, Michael  
**Sensorgeführte Montage hybrider Mikrosysteme**  
2001 · 171 Seiten · 74 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0012-0
- 150 Böhl, Jörn  
**Wissensmanagement im Klein- und mittelständischen Unternehmen der Einzel- und Kleinserienfertigung**  
2001 · 179 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0020-1
- 151 Bürgel, Robert  
**Prozessanalyse an spanenden Werkzeugmaschinen mit digital geregelten Antrieben**  
2001 · 185 Seiten · 60 Abb. · 10 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0021-X  
lieferbar ab ca. 09/01
- 152 Stephan Dürrschmidt  
**Planung und Betrieb wandlungsfähiger Logistiksysteme in der variantenreichen Serienproduktion**  
2001 · 914 Seiten · 61 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0023-6

- 153 Bernhard Eich  
**Methode zur prozesskettenorientierten Planung der Teilebereitstellung**  
2001 · 132 Seiten · 48 Abb. · 6 Tabellen · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0028-7
- 154 Wolfgang Rudorfer  
**Eine Methode zur Qualifizierung von produzierenden Unternehmen für Kompetenznetzwerke**  
2001 · 207 Seiten · 89 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0037-6
- 155 Hans Meier  
**Verteilte kooperative Steuerung maschinennaher Abläufe**  
2001 · 162 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0044-9
- 156 Gerhard Nowak  
**Informationstechnische Integration des industriellen Service in das Unternehmen**  
2001 · 203 Seiten · 95 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0055-4
- 157 Martin Werner  
**Simulationsgestützte Reorganisation von Produktions- und Logistikprozessen**  
2001 · 191 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0058-9
- 158 Bernhard Lenz  
**Finite Elemente-Modellierung des Laserstrahlschweißens für den Einsatz in der Fertigungsplanung**  
2001 · 150 Seiten · 47 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0094-5
- 159 Stefan Grunwald  
**Methode zur Anwendung der flexiblen integrierten Produktentwicklung und Montageplanung**  
2002 · 206 Seiten · 80 Abb. · 25 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0095-3
- 160 Josef Gartner  
**Qualitätssicherung bei der automatisierten Applikation hochviskoser Dichtungen**  
2002 · 165 Seiten · 74 Abb. · 21 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0096-1
- 161 Wolfgang Zeller  
**Gesamtheitliches Sicherheitskonzept für die Antriebs- und Steuerungstechnik bei Werkzeugmaschinen**  
2002 · 192 Seiten · 54 Abb. · 15 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0100-3
- 162 Michael Loferer  
**Rechnergestützte Gestaltung von Montagesystemen**  
2002 · 178 Seiten · 80 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0118-6
- 163 Jörg Fährer  
**Ganzheitliche Optimierung des indirekten Metall-Lasersinterprozesses**  
2002 · 176 Seiten · 69 Abb. · 13 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0124-0
- 164 Jürgen Höppner  
**Verfahren zur berührungslosen Handhabung mittels leistungsstarker Schallwandler**  
2002 · 132 Seiten · 24 Abb. · 3 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0125-9
- 165 Hubert Götte  
**Entwicklung eines Assistenzrobotersystems für die Knieendoprothetik**  
2002 · 258 Seiten · 123 Abb. · 5 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0126-7
- 166 Martin Weissenberger  
**Optimierung der Bewegungsdynamik von Werkzeugmaschinen im rechnergestützten Entwicklungsprozess**  
2002 · 210 Seiten · 86 Abb. · 2 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0138-0
- 167 Dirk Jacob  
**Verfahren zur Positionierung unterseitenstrukturierter Bauelemente in der Mikrosystemtechnik**  
2002 · 200 Seiten · 82 Abb. · 24 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0142-9
- 168 Ulrich Roßgoderer  
**System zur effizienten Layout- und Prozessplanung von hybriden Montageanlagen**  
2002 · 175 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0154-2
- 169 Robert Klingel  
**Anziehverfahren für hochfeste Schraubenverbindungen auf Basis akustischer Emissionen**  
2002 · 164 Seiten · 89 Abb. · 27 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0174-7

- 170 Paul Jens Peter Ross  
**Bestimmung des wirtschaftlichen Automatisierungsgrades von Montageprozessen in der frühen Phase der Montageplanung**  
2002 · 144 Seiten · 38 Abb. · 38 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0191-7
- 171 Stefan von Praun  
**Toleranzanalyse nachgiebiger Baugruppen im Produktentstehungsprozess**  
2002 · 250 Seiten · 62 Abb. · 7 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0202-6
- 172 Florian von der Hagen  
**Gestaltung kurzfristiger und unternehmensübergreifender Engineering-Kooperationen**  
2002 · 220 Seiten · 104 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0208-5
- 173 Oliver Kramer  
**Methode zur Optimierung der Wertschöpfungskette mittelständischer Betriebe**  
2002 · 212 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0211-5
- 174 Winfried Dohmen  
**Interdisziplinäre Methoden für die integrierte Entwicklung komplexer mechatronischer Systeme**  
2002 · 200 Seiten · 67 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0214-X
- 175 Oliver Anton  
**Ein Beitrag zur Entwicklung telepräsenter Montagesysteme**  
2002 · 158 Seiten · 85 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0215-8
- 176 Welf Broser  
**Methode zur Definition und Bewertung von Anwendungsfeldern für Kompetenznetzwerke**  
2002 · 224 Seiten · 122 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0217-4
- 177 Frank Breitinger  
**Ein ganzheitliches Konzept zum Einsatz des indirekten Metall-Lasersinterns für das Druckgießen**  
2003 · 156 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0227-1
- 178 Johann von Pieverling  
**Ein Vorgehensmodell zur Auswahl von Konturfertigungsverfahren für das Rapid Tooling**  
2003 · 163 Seiten · 88 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0230-1
- 179 Thomas Baudisch  
**Simulationsumgebung zur Auslegung der Bewegungsdynamik des mechatronischen Systems Werkzeugmaschine**  
2003 · 190 Seiten · 67 Abb. · 8 Tab. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0249-2
- 180 Heinrich Schieferstein  
**Experimentelle Analyse des menschlichen Kausystems**  
2003 · 132 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0251-4
- 181 Joachim Berlak  
**Methodik zur strukturierten Auswahl von Auftragsabwicklungssystemen**  
2003 · 244 Seiten · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0258-1
- 182 Christian Meierlohr  
**Konzept zur rechnergestützten Integration von Produktions- und Gebäudeplanung in der Fabrikgestaltung**  
2003 · 181 Seiten · 84 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0292-1
- 183 Volker Weber  
**Dynamisches Kostenmanagement in kompetenzzentrierten Unternehmensnetzwerken**  
2004 · 210 Seiten · 64 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0330-8
- 184 Thomas Bongardt  
**Methode zur Kompensation betriebsabhängiger Einflüsse auf die Absolutgenauigkeit von Industrierobotern**  
2004 · 170 Seiten · 40 Abb. · 20,5 x 14,5 cm · ISBN 3-8316-0332-4