6 Wiederholgenauigkeitskenngrößen des untersuchten Industrieroboters

Bevor die Pose-Genauigkeit des untersuchten Industrieroboters durch Kalibrierung gesteigert werden soll, ist er bezüglich seiner Wiederholgenauigkeitskenngrößen zu analysieren. Diese bilden eine untere Schranke der erreichbaren Pose-Genauigkeit, da sie aufgrund ihres stochastischen Charakters prinzipiell nicht durch ein Modell zur Kalibrierung von Industrierobotern erfaßbar sind.

Zur Analyse der Wiederholgenauigkeit von Industrierobotern wird ein Verfahren entwickelt, mit dem diese erheblich aussagekräftiger beschrieben werden kann, als mit den in Kapitel 3 vorgestellten Kenngrößen. Dieses allgemeingültige Verfahren wird anschließend an die für den zu untersuchenden SCARA relevanten Belange angepaßt, um nach Überprüfung der dem Verfahren zugrundeliegenden Annahmen eine Vermessung des SCARA durchführen zu können. Es werden dabei die Pose-Wiederholgenauigkeit und die Umkehrspanne in Abhängigkeit unterschiedlicher Einflußgrößen analysiert.

Im letzten Abschnitt dieses Kapitels wird ein Modell zur Beschreibung der Pose-Wiederholgenauigkeit entworfen. Dieses Modell wird anhand der durchgeführten Messungen verifiziert.

6.1 Messung der Pose-Wiederholgenauigkeit

Mit Meßkopf und Meßwürfel ist es möglich, die Pose-Wiederholgenauigkeit eines Industrieroboters zu vermessen. Das eingesetzte Meßverfahren zeichnet sich gegenüber vielen aus der Literatur bekannten und zur Wiederholgenauigkeitsmessung eingesetzten Verfahren dadurch aus, daß es sowohl eine sehr hohe Genauigkeit erreicht, als auch in der Lage ist, einzelne Posen automatisiert und in kurzer zeitlicher Folge zu vermessen. Gerade der letzte Punkt ist hier besonders wichtig, da aussagekräftige Ergebnisse nur unter Verwendung hinreichend vieler Einzelmessungen gewonnen werden können. Um den in nicht klimatisierten Räumen unvermeidbaren Einfluß von Temperaturschwankungen zu vermeiden, ist darüber hinaus dafür zu sorgen, daß alle Messungen innerhalb einer kurzen Zeitspanne erfolgen.

6.1.1 Auswertung

Da die Pose-Wiederholgenauigkeit von Industrierobotern von vielen unabhängigen Einflußgrößen abhängt, kann aufgrund des zentralen Grenzwertsatzes der Statistik davon ausgegangen werden, daß sie normalverteilt ist. Der Vektor der Pose-Wiederholgenauigkeit $\vec{w}$ kann damit durch den Vektor der Mittelwerte $\vec{\mu}_w$ und die Kovarianzmatrix Σ_w vollständig charakterisiert werden:

$$\vec{w} \sim N(\vec{\mu}_w, \Sigma_w);\ \vec{\mu}_w \in \Re^n;\ \Sigma_w \in \Re^{n\times n}. \tag{6.1}$$

Dabei beschreibt n die Dimension der betrachteten Pose. Die zugehörige Dichtefunktion lautet [Hafner 89]:

$$f(\vec{w} \mid N(\vec{\mu}_w, \Sigma_w)) = \left(\frac{1}{2\pi}\right)^{\frac{n}{2}} |\Sigma_w|^{-\frac{1}{2}}\, e^{-\frac{1}{2}(\vec{w}-\vec{\mu}_w)^T \Sigma_w^{-1}(\vec{w}-\vec{\mu}_w)}\ . \tag{6.2}$$

Es ist zunächst zu klären, wie eine solche mehrdimensionale Dichtefunktion anhand aussagekräftiger Kennwerte beschrieben werden kann. Das Koordinatensystem, in dem die Pose-Wiederholgenauigkeit gemessen wird, ist willkürlich gewählt bzw. durch die Lage des Meßsystems vorgegeben. Durch Berechnung des Hauptachsensystems der Wiederholgenauigkeit und Transformation der obigen Dichtefunktion in dieses System können die benötigten Kennwerte ermittelt werden.

Durch eine Hauptachsentransformation ergibt sich als transformierte Kovarianzmatrix eine Diagonalmatrix $\Sigma_{w,HA}$:

$$\Sigma_{w,HA} = B^T \Sigma_w B;\ B = (\vec{b}_1 \cdots \vec{b}_n) \in \Re^{n\times n};\ \Sigma_{w,HA} = \mathrm{Diag}(\lambda_1^2, \cdots, \lambda_n^2) \in \Re^{n\times n}. \tag{6.3}$$

Dabei sind $\vec{b}_i$ die Eigenvektoren und λ_i^2 die Eigenwerte der ursprünglichen Kovarianzmatrix Σ_w.

Diese Verteilung kann als n-dimensionales Ellipsoid, das sich mit der Hauptachsentransformation

$$\vec{w}_{HA} = B^T(\vec{w} - \vec{\mu}_w);\ \vec{w}_{HA} \in \Re^n \tag{6.4}$$

zu

$$\sum_{i=1}^{n} \frac{w_{HA,i}^2}{\lambda_i^2} = \delta^2 \tag{6.5}$$

ergibt, angeschrieben werden. Der Skalar δ^2 ist ein Wert, der die Größe des Ellipsoides beschreibt. Seine Dichtefunktion ist die Chi-Quadrat (χ^2) Verteilung mit dem Freiheitsgrad n.

Da die Wiederholgenauigkeit n-dimensional normalverteilt ist, sind auch alle Randverteilungen der Wiederholgenauigkeit normalverteilt. Insbesondere sind alle

eindimensionalen Schnitte durch die mehrdimensionale Normalverteilung eindimensional normalverteilt.

Eine Möglichkeit, die Wiederholgenauigkeit anhand weniger Werte zu charakterisieren, ist damit die Angabe der Eigenwerte der Kovarianzmatrix Σ_w. Diese beschreiben bei jeweils eindimensionaler Betrachtung die Varianzen der gemessenen Posen in Richtung der einzelnen Hauptachsen. Außerdem ist es sinnvoll, zusätzlich die Richtungen der Hauptachsen anzugeben.

Eine weitere Möglichkeit ist die Berechnung des Ellipsoides, innerhalb dessen ein bestimmter Prozentsatz (z.B. 95% oder 99,7%) aller Meßpunkte liegt. Diese Wahrscheinlichkeit $P(\chi^2 \leq \delta^2)$ kann mit Hilfe geeigneter Tabellen (z.B. [Sachs 92]) oder Formeln bestimmt werden.

Ein Problem der mit Hilfe der Kovarianzmatrix der Pose berechneten Kenngrößen besteht darin, daß die Pose einen Positions- und einen Orientierungsanteil besitzt. Ein Schnitt durch die mehrdimensionale Normalverteilung, der durch beide Bereiche verläuft, ist im Sinne der obigen Herleitung möglich und eventuell auch notwendig. Da eine solche Betrachtung jedoch keine praktisch verwertbaren Resultate liefert, ist zur Auswertung zwischen Position und Orientierung zu unterscheiden. Die gesamte Kovarianzmatrix ist für Position und Orientierung in eine jeweils eigene Kovarianzmatrix zu teilen, die dann wie beschrieben auszuwerten ist.

6.1.2 Pose-Wiederholgenauigkeit für einen SCARA

Die Kinematik eines SCARA weist einige Besonderheiten auf. Diese können als a priori Wissen bei der Analyse der Pose-Wiederholgenauigkeit beachtet werden. Die sich ergebenden Besonderheiten bei der Auswertung der Pose-Wiederholgenauigkeit werden in diesem Abschnitt dargestellt.

Die Wiederholgenauigkeit der Position ist in allen drei Raumrichtungen zu beschreiben. Bei einem SCARA erfolgen durch die Hubachse (z-Richtung) Bewegungen, die - näherungsweise - senkrecht zu den übrigen Bewegungen (x-y-Ebene) stehen. Damit ist die Wiederholgenauigkeit der Position in z-Richtung von derjenigen in der x-y-Ebene im Sinne einer nach dem linearen Glied abgebrochenen Taylorreihe stochastisch unabhängig.

Für einen SCARA sind die Hauptachsen daher nur in der x-y-Ebene zu bestimmen. Die Wiederholgenauigkeit in dieser Ebene wird beschrieben durch die Standardabweichungen in den Richtungen der beiden Hauptachsen und durch die Orientierung des Hauptachsensystems. Letztere kann durch den Winkel zwischen dem Basiskoordinatensystem und der Hauptachse mit der größeren Standard-

abweichung angegeben werden. In z-Richtung genügt zur Charakterisierung die Angabe der Standardabweichung.

Auch für die Wiederholgenauigkeit der Orientierung ergeben sich relativ zur allgemeinen Theorie deutliche Vereinfachungen. Bei einem SCARA kann nur ein Orientierungswinkel (Drehung um die z-Achse) angesteuert werden. Zur Auswertung ist damit also wiederum die Angabe einer Standardabweichung ausreichend.

6.1.3 Dichtefunktionen gemessener Pose-Wiederholgenauigkeiten

Bevor die Auswirkungen unterschiedlicher Einflußgrößen auf die Pose-Wiederholgenauigkeit untersucht werden, wird das Vorgehen zur Auswertung an einem Meßpunkt exemplarisch dargelegt. Damit können im weiteren die jeweiligen Ergebnisse knapp präsentiert werden.

Insbesondere soll die Annahme überprüft werden, ob die Pose-Wiederholgenauigkeit durch eine mehrdimensionale Normalverteilung beschrieben werden kann. Aufgrund der geschilderten Besonderheiten der SCARA-Kinematik liegt eine mehrdimensionale Normalverteilung nur für die Position in der x-y-Ebene vor. Die Auswertung der Pose-Wiederholgenauigkeit in dieser Ebene steht damit im Vordergrund der folgenden Untersuchungen.

Die beispielhaften Untersuchungen werden an dem Punkt im Arbeitsraum, der mit den Stellwerten von 40°, 45°, 142 mm und 0° erreicht wird, durchgeführt (Bild 6.1). Angefahren wurde dieser Punkt mit maximaler Verfahrgeschwindigkeit und jeweils gleichen Achsbewegungen von 30°, 30° und 90 mm. Durch die Kopplung der letzten Drehachse mit den anderen beiden Drehachsen ergibt sich für diese eine Anfahrbewegung von 60°. Um die Ergebnisse statistisch abzusichern ist an jedem zu untersuchenden Punkt eine große Anzahl an Messungen aufzunehmen. Für die folgenden Untersuchungen wurden daher pro Punkt 300 Posen gemessen.

Vor der Durchführung weitergehender Analysen sind die Meßdaten in ihr Hauptachsensystem zu transformieren. Für den betrachteten Fall kann aus der im MKKS vermessenen Pose-Wiederholgenauigkeit folgende Kovarianzmatrix für die x-y-Ebene berechnet werden:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 54{,}46\,\mu m^2 & -28{,}95\,\mu m^2 \\ -28{,}95\,\mu m^2 & 18{,}41\,\mu m^2 \end{bmatrix}.$$

Diese weist mit den Eigenwerten λ_1^2=70,537 µm² und λ_2^2=2,333 µm² die Eigenvektoren

$$v_1 = \begin{bmatrix} -0{,}874 \\ 0{,}485 \end{bmatrix} ; \; v_2 = \begin{bmatrix} -0{,}485 \\ -0{,}874 \end{bmatrix}$$

auf. Damit kann der Winkel vom Basis- zum Hauptachsensystem mit

$$\tan\alpha = \frac{v_{1y}}{v_{1x}} = \frac{0{,}485}{-0{,}874} \Rightarrow \alpha = -29{,}03° \tag{6.6}$$

bestimmt werden. Die Standardabweichungen der Randverteilungen ergeben sich zu $\sigma_x = \sqrt{\lambda_1^2} = 8{,}4\,\mu m$ und $\sigma_y = \sqrt{\lambda_2^2} = 1{,}6\,\mu m$.

Nach dieser Transformation in das Hauptachsensystem kann eine Analyse der Verteilungen bezüglich der oben geschilderten Annahmen durchgeführt werden.

Zur Beurteilung der Annahme normalverteilter Meßwerte können zwei unterschiedliche Hilfsmittel eingesetzt werden: Die grafische Aufbereitung der Meßdaten und die Anwendung nichtparametrischer Tests.

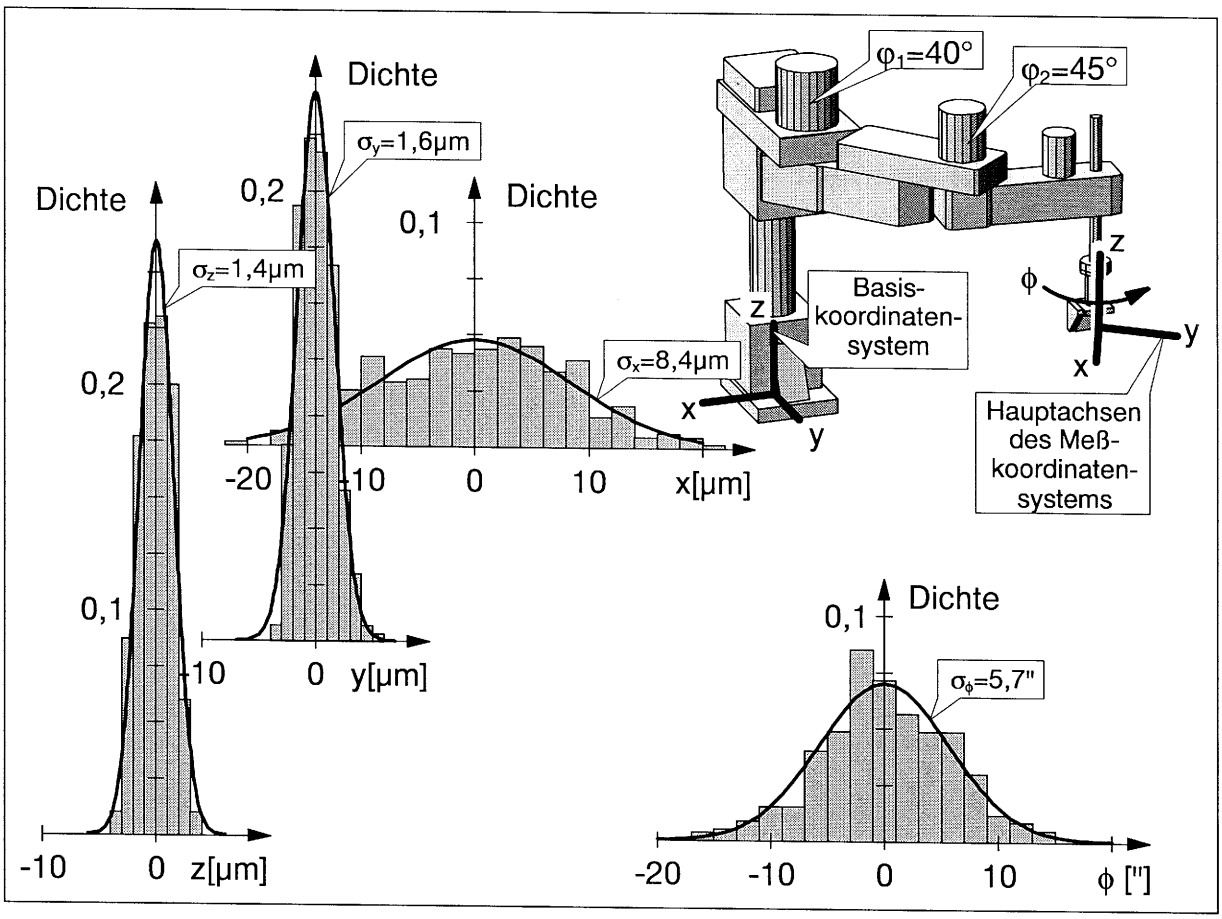

Bild 6.1: Gemessene Pose-Wiederholgenauigkeit

Bei der grafischen Aufbereitung werden die Meßwerte einer idealen Normalverteilung gegenübergestellt. Es bietet sich zunächst an, ein Histogramm mit der Dichtefunktion der Normalverteilung zu überlagern, um aus den so sichtbaren Abweichungen Schlüsse ziehen zu können (Bild 6.1). Erheblich aussagekräftiger ist jedoch das Auftragen der Meßwerte in einem Wahrscheinlichkeitsnetz [Stange 70].

Im Wahrscheinlichkeitsnetz wird über dem mit dem Erwartungswert verschobenen und mit der Standardabweichung normierten gemessenen Merkmal $x_s=(x-\mu)/\sigma$ das standardisierte Merkmal $u=x_s$ und die zugehörige relative Summenhäufigkeit

$$\phi(u) = \int_{-\infty}^{u} \frac{1}{\sqrt{2\pi}\,\sigma} e^{-\frac{(v-\mu)^2}{2\sigma^2}} dv \tag{6.7}$$

aufgetragen. Wird für x_s und u eine lineare Skalierung gewählt, so kann eine ideale Normalverteilung als Gerade aufgetragen werden. Für $\phi(u)$ ergibt sich dann eine nichtlineare Skalierung. Als Hilfslinien können in das Wahrscheinlichkeitsnetz Zufallsstreifen, innerhalb derer einzelne Proben unter Annahme normalverteilter Daten mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit liegen, eingezeichnet werden [Stange 70].

Für jeden Meßwert wird das zugehörige standardisierte Merkmal x_s berechnet und über diesem die Wahrscheinlichkeit $P(x \leq x_s)$ aufgetragen. Streuen Meßwerte nur wenig um die eine ideale Normalverteilung charakterisierende Gerade, so kann angenommen werden, daß die den Meßwerten zugrundeliegende Grundgesamtheit normalverteilt ist [Sachs 92].

Neben der grafischen Aufbereitung können auch nichtparametrische Tests zur Prüfung auf Normalverteilung herangezogen werden. Dazu eignet sich der auf dem Test von Kolgomorov und Smirnov basierende K-S Lilliefors Test [Janssen 94]. Dieser Test liefert Signifikanzen, mit denen die Hypothese für das Vorliegen einer Normalverteilung angenommen oder verworfen werden kann.

Für die mit dem Meßkopf vermessenen Pose-Wiederholgenauigkeiten ergibt sich sowohl aus den Wahrscheinlichkeitsnetzen als auch mit den K-S Lilliefors Tests, daß die Annahme normalverteilter Pose-Wiederholgenauigkeiten gerechtfertigt ist. Diese Aussage kann als gesichert gelten, da sie mit beiden Methoden an unterschiedlichen Meßpunkten erzielt wurde.

Beispielhaft ist für den oben genannten Fall in Bild 6.2 das Wahrscheinlichkeitsnetz für die Randverteilungen in Richtung der ersten und zweiten Hauptachse aufgetragen. Entsprechend der Hauptachsenanalyse in der x-y-Ebene wurden die Meßdaten vorab in das um -29,03° verdrehte Hauptachsensystem transformiert. Da die einzelnen Meßwerte nur wenig streuen kann angenommen werden, daß die Pose-Wiederholgenauigkeit normalverteilt ist.

Der K-S Lilliefors Test, der mit der Software SPSS durchgeführt wurde, ergab die maximal mögliche Signifikanz für alle Komponenten der gemessenen Pose. Somit kann auch aufgrund dieser Analyse die Annahme normalverteilter Daten bestätigt werden.

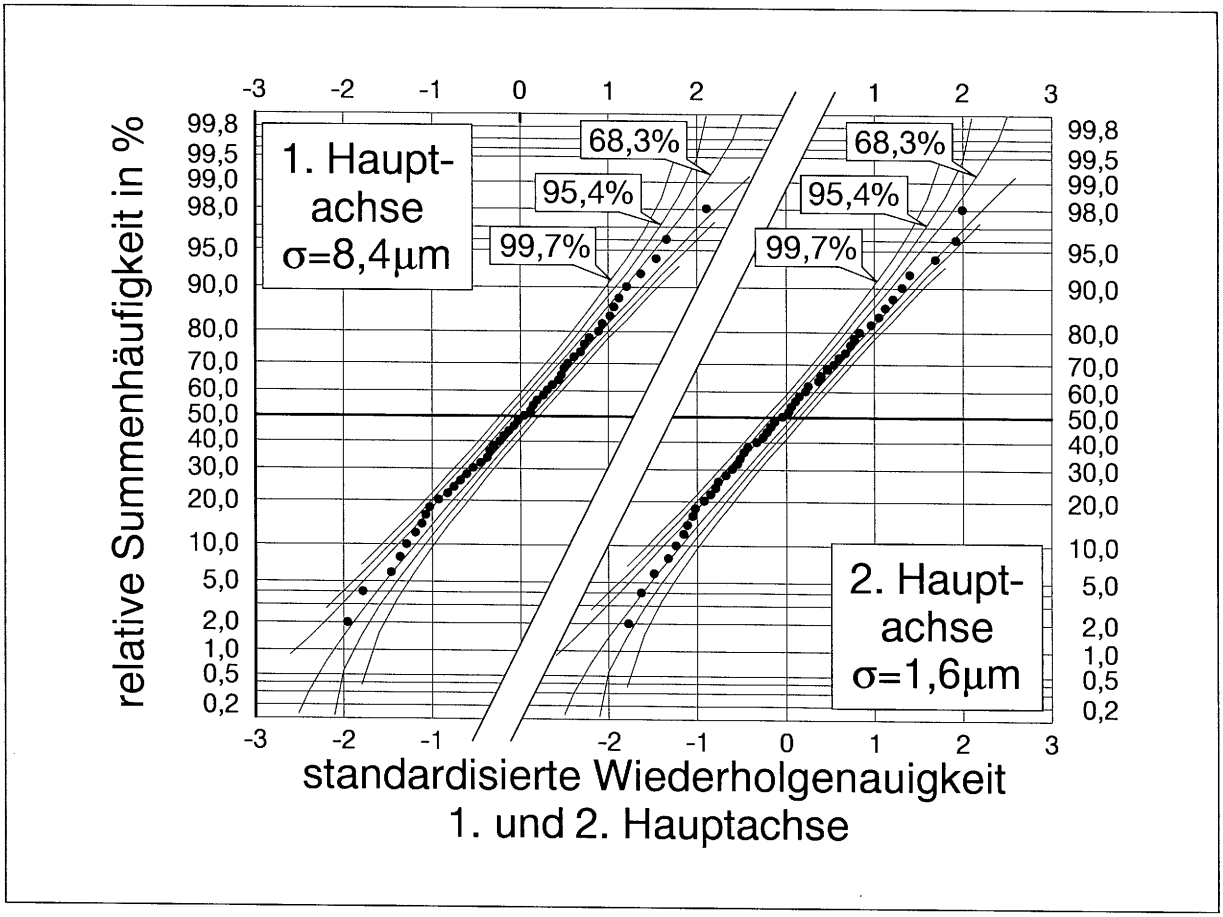

Bild 6.2: Wahrscheinlichkeitsnetz der Pose-Wiederholgenauigkeit im Hauptachsensystem

Nachdem somit festgestellt werden konnte, daß die gemessene Pose normalverteilt ist, muß die Verteilung von δ^2 untersucht werden. Da die Pose-Wiederholgenauigkeit, wie gezeigt werden konnte, normalverteilt ist, ist zu erwarten, daß die Dichtefunktion von δ^2 einer χ^2 Verteilung mit dem Freiheitsgrad zwei entspricht.

Dies ist auch tatsächlich der Fall, wie die Analyse vieler Meßreihen ergab. In Bild 6.3 ist dieser Sachverhalt an dem in diesem Abschnitt exemplarisch untersuchten Fall dargestellt. Die Verteilung der einzelnen Meßpunkte in der x-y-Ebene ist in dem oberen Diagramm zu erkennen. Aus diesen Werten können die Randverteilungen entlang der Hauptachsen entsprechend Bild 6.1 mitsamt ihren Kennwerten gewonnen werden. Durch Standardisierung der Randverteilungen und anschließende Quadrierung und Addition ergibt sich der eindimensionale Kennwert δ^2. Im unteren Diagramm in Bild 6.3 ist gut zu erkennen, daß δ^2 entsprechend den theoretischen Überlegungen χ^2 verteilt ist. Aus dieser Verteilung können unter Zuhilfenahme der Standardabweichungen der Randverteilungen in Hauptachsenrichtung die Ellipsen bestimmt werden, innerhalb derer mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit Meßwerte auftreten. Auch hier kann eine gute Übereinstimmung zwischen Vorhersage und Realität festgestellt werden.

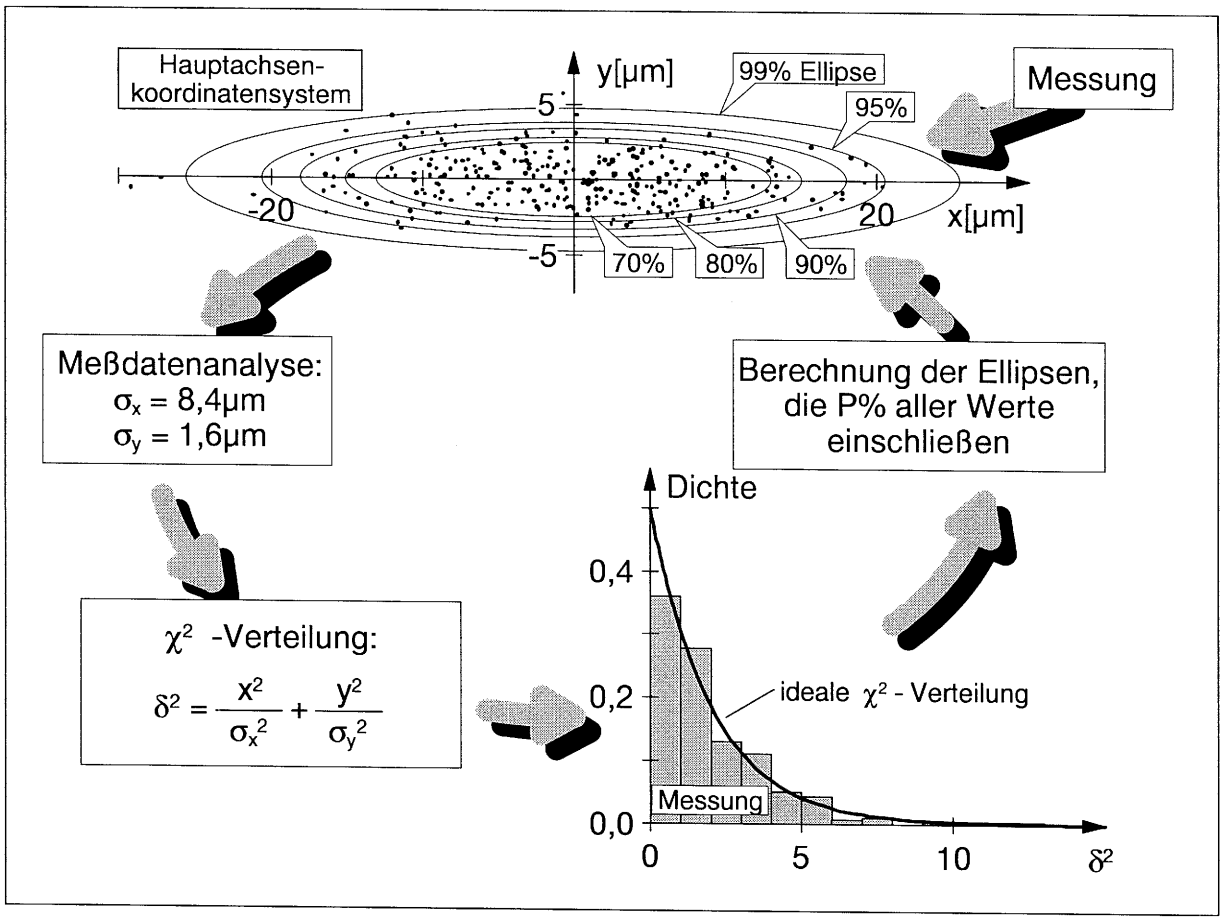

Bild 6.3: Eindimensionale Repräsentation einer gemessen Wiederholgenauigkeit

Damit konnte gezeigt werden, daß das vorgestellte Verfahren zur Analyse von Pose-Wiederholgenauigkeiten einsetzbar ist, da die Annahme mehrdimensionaler Normalverteilungen bestätigt werden konnte.

6.2 Bewertung aus der Literatur bekannter Wiederholgenauigkeitskenngrößen

Gegenüber der vorgestellten Auswertung haben diejenigen nach DIN EN 29283 oder ähnliche aus der Literatur bekannte Verfahren [Kuang 93] [Keferstein 90] [Bhatti 88] [Benhabib 87] den Nachteil, daß sie ein nicht anschaulich interpretierbares Ergebnis liefern. Es wird aus den mehrdimensional verteilten Daten durch eine Abstandsbewertung eine eindimensionale Kenngröße errechnet. Aus dieser wird entsprechend den Methoden zur Auswertung eindimensionaler Normalverteilungen ein Genauigkeitskennwert berechnet. Da die betrachtete Verteilung allerdings im allgemeinen nicht normalverteilt ist, kann auch das Ergebnis nicht, wie dort gewohnt, interpretiert werden [Grethlein 94] [Sturm 88]. Dieses kann anhand von Bild 6.4 verdeutlicht werden: Die eindimensionale Kenngröße der Pose-Wiederholgenauigkeit ist nicht normalverteilt. Der aus Mittelwert und Standardabweichung

berechnete Wert der Pose-Wiederholgenauigkeit ist damit letztlich willkürlich gewählt.

Die in dieser Arbeit vorgestellte Auswertung hat demgegenüber den entscheidenden Vorteil, daß die Genauigkeitskennwerte direkt interpretiert und gedeutet werden können. Es ist möglich, Richtungen, in denen eine große oder kleine Streuung zu erwarten ist, zu ermitteln, um darauf beispielsweise eine Montage optimal abzustimmen.

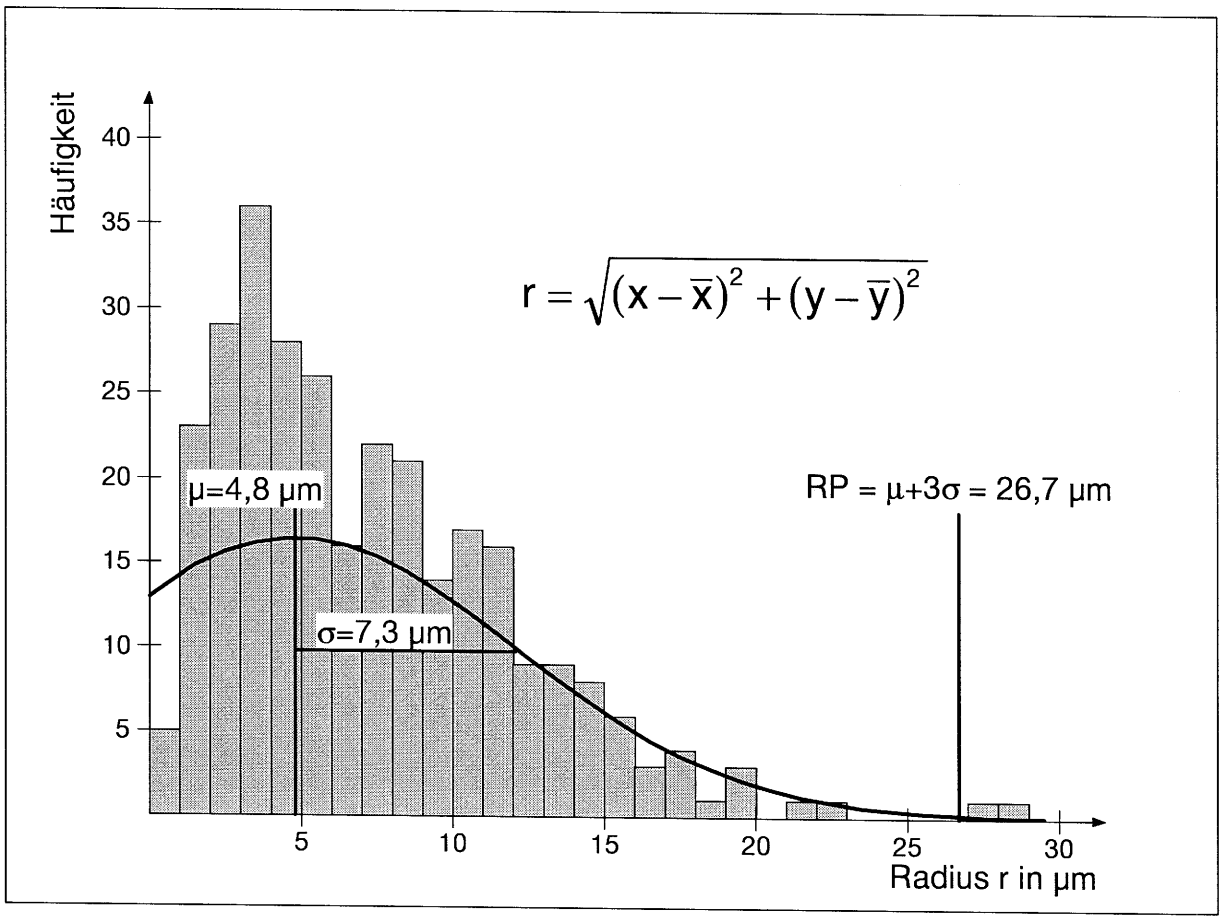

Bild 6.4: Pose-Wiederholgenauigkeit nach DIN EN 29283
(für die in Abschnitt 6.1.3 diskutierte Pose)

Auch die in der VDI-Richtlinie 2861 vorgeschlagene Auswertung oder ähnliche aus der Literatur bekannte Verfahren [Visser 94] [Kühn 91] [Peters 85] sind zu kritisieren. Die Pose-Wiederholgenauigkeit wird als Positionsstreubreite jeweils eindimensional entlang der Koordinatenachsen eines zugrunde gelegten Basiskoordinatensystems ausgewertet. Somit ist zwar die Auswertung interpretierbar, da die so gemessenen Verteilungen entsprechend den dargestellten Untersuchungen normalverteilt sind, aber es ergibt sich ein anderes gravierendes Problem: Die ermittelten Positionsstreubreiten sind von der Wahl des Bezugskoordinatensystems abhängig! Da zur Wahl des Bezugskoordinatensystems keine eindeutige Vorschrift vorliegt, kann die gemessene Positionsstreubreite durch die Wahl der Auswerterichtungen

stark beeinflußt werden (Bild 6.5). Im dargestellten Fall unterscheiden sich die gemessenen Positionsstreubreiten um einen Faktor von bis zu 5,4. Wird jeweils in zwei orthogonalen Richtungen gemessen, so liegt der Unterschied zwischen den größten gemessenen Positionsstreubreiten immer noch bei einen Faktor von 1,4.

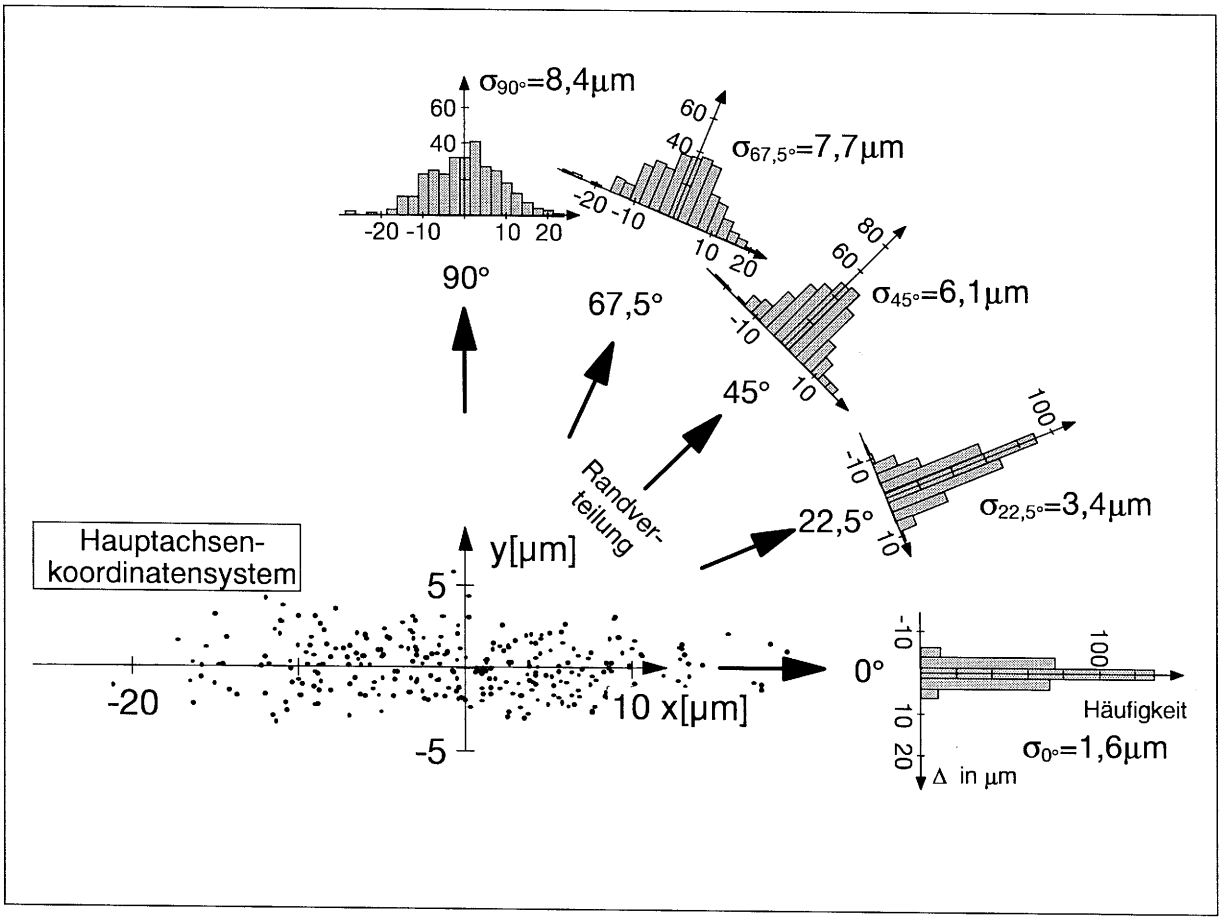

Bild 6.5: Positionsstreubreite nach VDI-Richtlinie 2861
(für die in Abschnitt 6.1.3 diskutierte Pose)

Wie die dargestellten Untersuchungen gezeigt haben, ist eine Auswertung nur in Richtung der Hauptachsen sinnvoll, nur so können reproduzierbare und eindeutige Kenngrößen ermittelt werden.

Unter diesem Gesichtspunkt ist die Anwendung der VDI-Richtlinie nicht zu empfehlen. Hier ist die DIN EN zu bevorzugen, da so die Ergebnisse bezüglich der Koordinatensystemwahl invariant sind. Letztlich sollte allerdings die in dieser Arbeit vorgestellte Methode zur Berechnung der Pose-Wiederholgenauigkeit aufgrund ihrer Eindeutigkeit und Interpretierbarkeit für eine fundierte Bewertung von Industrierobotern herangezogen werden.

6.3 Einflußgrößen auf die Pose-Wiederholgenauigkeit

An unterschiedlichen Posen wurde die Pose-Wiederholgenauigkeit in Abhängigkeit der Haupteinflußgrößen, namentlich der Stellwerte (und damit der Position), der Anfahrrichtung und der Verfahrgeschwindigkeit untersucht. Als weitere Kenngröße der Wiederholgenauigkeit wurde die Umkehrspanne an verschiedenen Punkten vermessen.

6.3.1 Stellwerte

Die Pose-Wiederholgenauigkeit wurde in Abhängigkeit der Stellwerte gemessen. Da das Verhalten bei links- und rechtsarmiger Stellung aufgrund der vorliegenden Symmetrie als gleich angenommen werden kann, wurde nur die rechtsarmige Stellung untersucht. Mit einer Anfahrgeschwindigkeit von 10% der Maximalgeschwindigkeit wurden pro untersuchter Pose 400 Einzelmessungen aufgenommen.

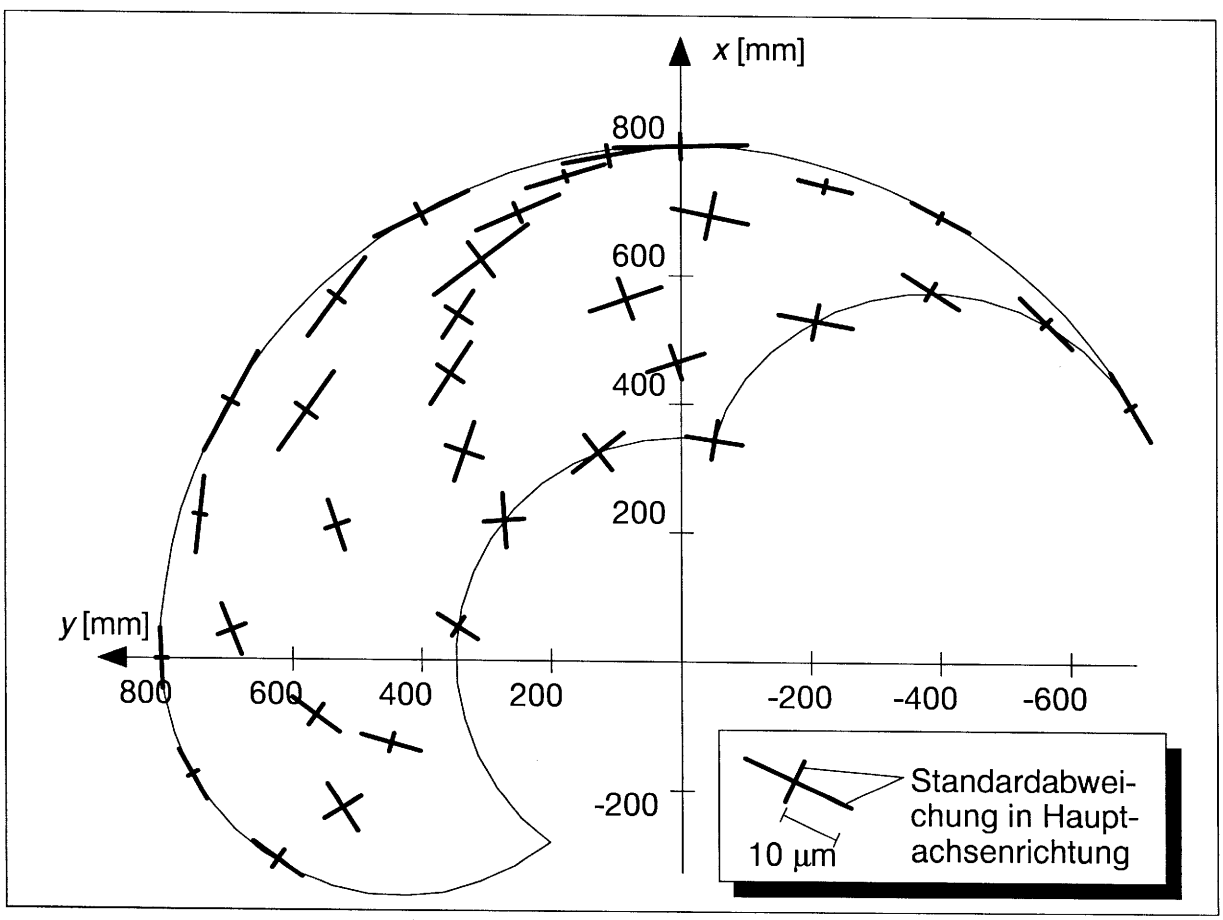

Bild 6.6: Wiederholgenauigkeit in x-y-Ebene

In Bild 6.6 ist die Pose-Wiederholgenauigkeit in der x-y-Ebene, charakterisiert durch die Standardabweichungen in den Hauptachsenrichtungen und die Orientierungen

der Hauptachsen, dargestellt. Die Wiederholgenauigkeiten der Orientierung und Position in z-Richtung sind in Bild 6.7 dargestellt. Die Annahme der stochastischen Unabhängigkeit der Wiederholgenauigkeit in der x-y-Ebene von den letztgenannten Wiederholgenauigkeiten konnte durch eine Analyse der entsprechenden Kovarianzen bestätigt werden.

Es zeigt sich, daß die Pose-Wiederholgenauigkeit deutlich von den Stellwerten bzw. vom Meßort abhängt (Bild 6.6). Am äußeren Rand des Arbeitsbereichs ergibt sich eine sehr schlanke Ellipse, die zum inneren Rand hin kreisförmiger wird. Die Form einer Ellipse, also das Verhältnis der Hauptachsen zueinander, wird durch den Stellwert der zweiten Achse bestimmt. Die Orientierung der Hauptachsen wird demgegenüber durch die Stellwerte der ersten beiden Achsen beeinflußt.

In Richtung der großen Hauptachse betragen die gemessenen Standardabweichungen 4,5 bis 12,7 µm, in Richtung der kleinen Hauptachse 1,0 bis 4,5 µm.

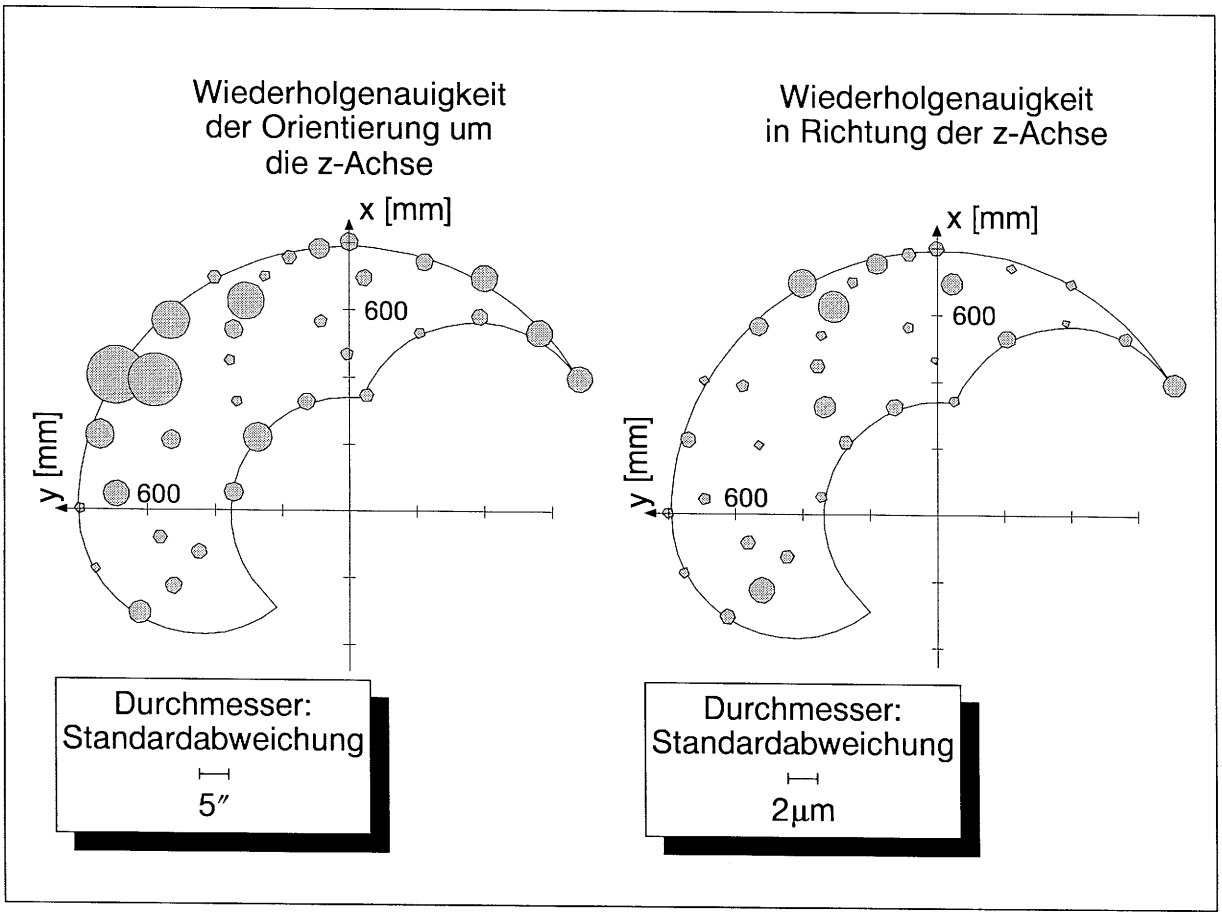

Bild 6.7: Wiederholgenauigkeit der Orientierung und der Position in z-Richtung

Bei der Orientierungs-Wiederholgenauigkeit kann keine Abhängigkeit von den Stellwerten festgestellt werden; sie kann durch eine mittlere Standardabweichung von 3,2" charakterisiert werden. Die Unterschiede in den einzelnen gemessenen Standardabweichungen können eher auf lokale Effekte zurückgeführt werden.

Dieses gilt auch bezüglich der Wiederholgenauigkeit in z-Richtung. Es liegt eine mittlere Standardabweichung von 1,5 µm vor.

6.3.2 Anfahrgeschwindigkeit und Anfahrweg

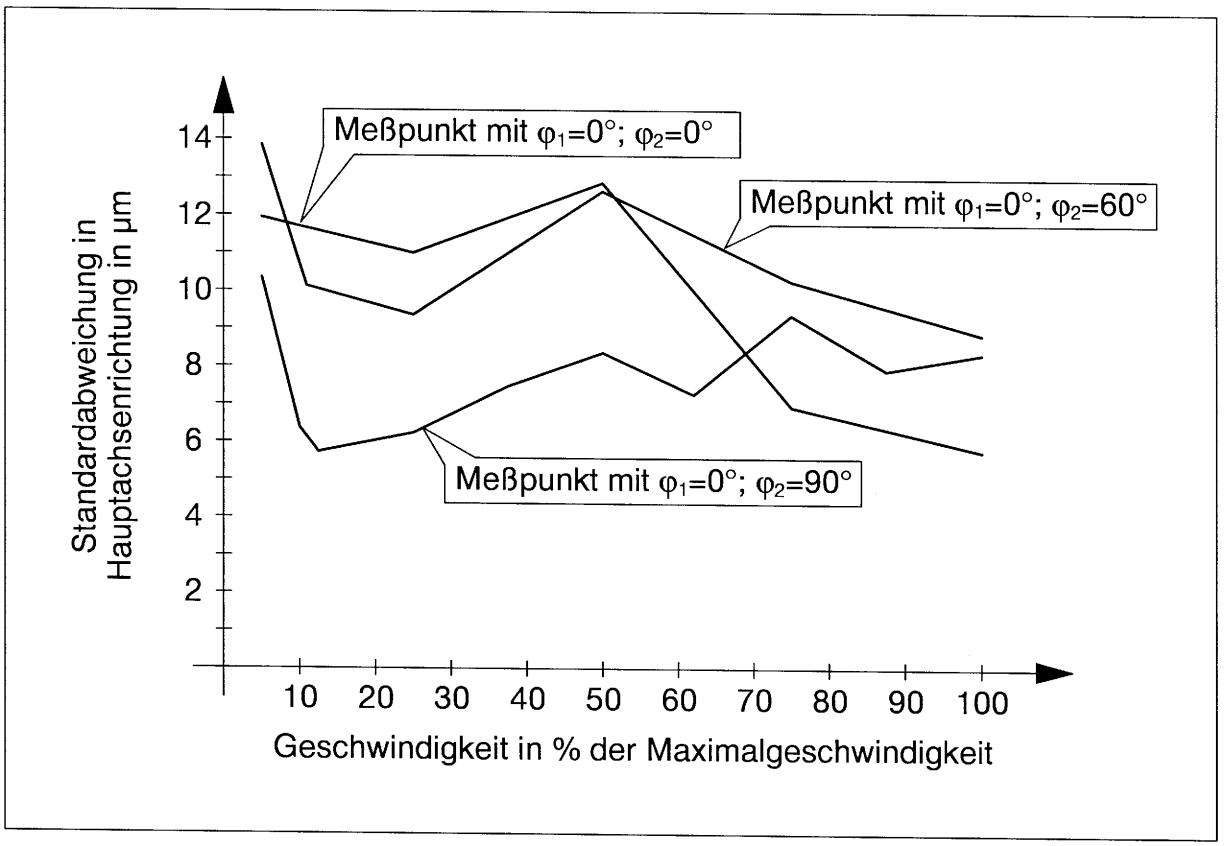

Bild 6.8: Wiederholgenauigkeit in Abhängigkeit der Geschwindigkeit

Zur Bestimmung des Einflusses der Anfahrgeschwindigkeit wurde diese ebenfalls an unterschiedlichen Posen variiert. Aus den in Bild 6.8 dargestellten Ergebnissen ist ersichtlich, daß kein deutlicher Trend vorliegt. Es kann lediglich festgestellt werden, daß bei sehr kleinen Geschwindigkeiten (5% der Maximalgeschwindigkeit) eine Verschlechterung der Pose-Wiederholgenauigkeit auftritt. Vermutlich kann dieses Verhalten durch nichtlineare Effekte, die bei kleinen Geschwindigkeiten in Erscheinung treten, erklärt werden. In weiterführenden Untersuchungen wäre zu ermitteln, welche der in Frage kommenden Ursachen wie Quantisierung der Meßsysteme, Reibung und Spiel in den Antriebselementen oder Struktur und Auslegung der Steuerung und Regelung für das beobachtete Verhalten verantwortlich sind. Bei größeren Geschwindigkeiten ergibt sich eine nur wenig veränderte Pose-Wiederholgenauigkeit. Damit kann das Ergebnis einer anderen Untersuchung [Kuang 92] bestätigt werden, denn auch dort wurde festgestellt, daß der Einfluß der Anfahrgeschwindigkeit auf die Pose-Wiederholgenauigkeit klein ist.

Eine Betrachtung unterschiedlicher Anfahrwege hat ergeben, daß diese keinen Einfluß auf die Wiederholgenauigkeit ausüben.

6.3.3 Umkehrspanne

Neben der Pose-Wiederholgenauigkeit ist die Umkehrspanne eine wichtige Kenngröße zur Beschreibung des statischen Verhaltens von Industrierobotern. Die Umkehrspanne ergibt sich dadurch, daß aufgrund von Spiel, toten Zonen und ähnlichem bei unterschiedlicher Anfahrrichtung ein jeweils anderer Punkt erreicht wird.

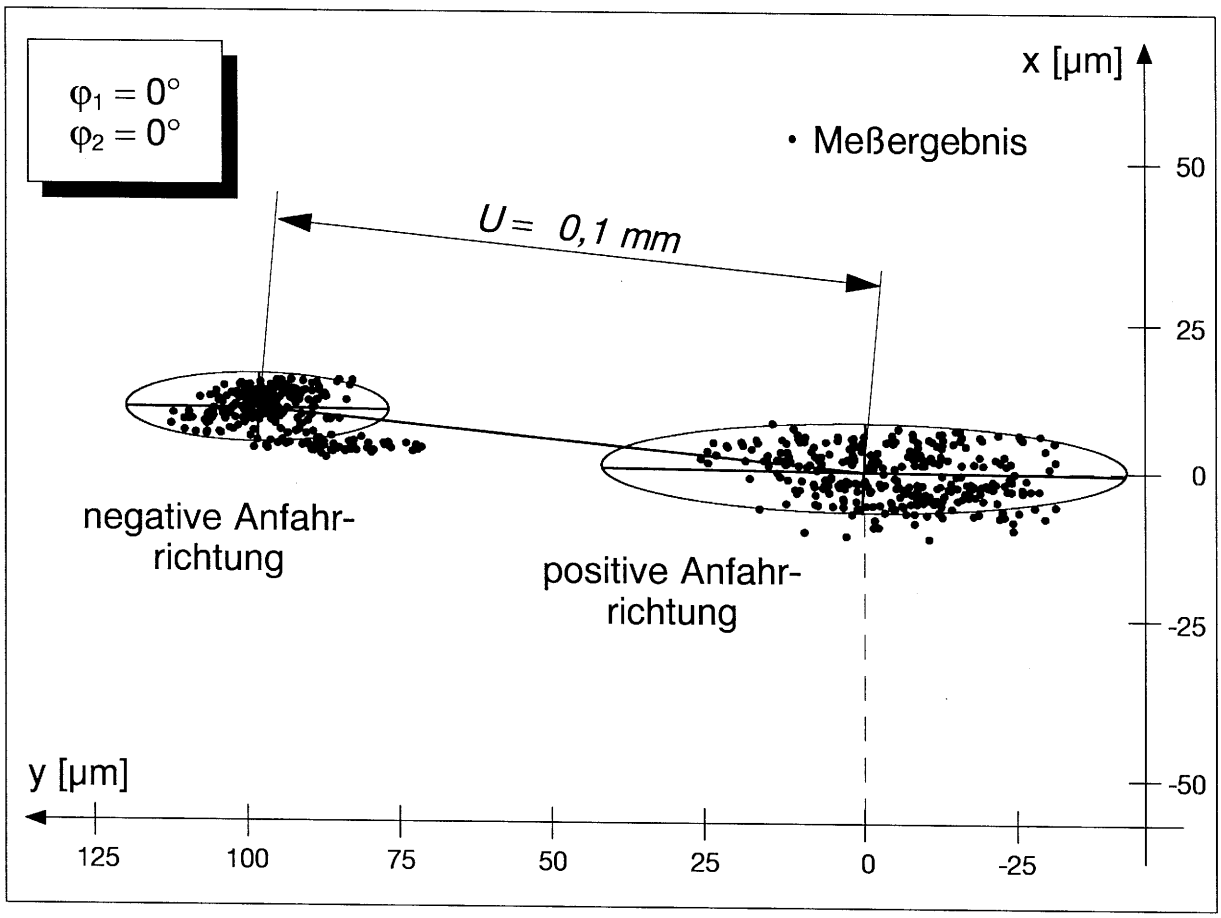

Bild 6.9: Umkehrspanne

Die Umkehrspanne des untersuchten SCARA wurde an verschiedenen Posen im Arbeitsraum vermessen. Die letztlich aussagekräftige dreidimensionale Umkehrspanne ist von den Stellwerten unabhängig und beträgt 0,1 bis 0,12 mm (Bild 6.9).

6.4 Modell zur Beschreibung der Pose-Wiederholgenauigkeit

Nachdem die Pose-Wiederholgenauigkeit meßtechnisch erfaßt wurde und eine deutliche Abhängigkeit von den Stellwerten festgestellt werden konnte, ist nun ein Modell zu bilden, welches die gemessene Pose-Wiederholgenauigkeit mit einer ausreichenden Qualität beschreibt. Damit kann ein Verständnis für die im Industrieroboter gelegenen Fehlerquellen gewonnen werden, um so später das Potential einer Genauigkeitssteigerung durch Kalibrierung abschätzen zu können. Da kein signifikanter Einfluß der weiteren untersuchten Einflußgrößen festgestellt werden konnte, sind diese auch nicht durch das zu entwickelnde Modell zu erfassen. Ebenfalls ist eine Beschreibung der Umkehrspanne durch ein Modell nicht sinnvoll, da hier ebenfalls keine Abhängigkeit von den untersuchten Einflußgrößen festgestellt werden konnte.

6.4.1 Modellbildung

Auf die Pose-Wiederholgenauigkeit von Industrierobotern haben als stochastische Größen die Antriebselemente mit ihren Weg- oder Winkelmeßeinrichtungen einen dominanten Einfluß [Tönshoff 90] [Mooring 86]. Das Modell muß also diese Haupteinflußgrößen enthalten. Da die gemessene Pose-Wiederholgenauigkeit nur von den Stellwerten abhängt, ist von dem Modell zur Beschreibung des untersuchten SCARA auch nur diese Abhängigkeit zu berücksichtigen. Anfahrgeschwindigkeit oder -offset sind nicht weiter zu beachten.

Von Whitney [Whitney 86] wurde die Annahme meßtechnisch verifiziert, daß die Getriebe durch eine tote Zone zu beschreiben sind und sich folglich immer in einem der Randbereiche befinden. Dieser Befund wurde von Renders [Renders 91] in Frage gestellt; es wurde vielmehr angenommen, daß die Getriebe aufgrund von Reibung Winkel innerhalb der toten Zone realisieren. Ackerson [Ackerson 85] kommt demgegenüber zu dem Schluß, daß beide Interpretationen möglich sind: Der realisierte Winkel hängt, wie durch experimentelle Untersuchungen nachgewiesen wurde, von vielfältigen Einflußgrößen, wie Reibung, veränderlicher statischer Last und dynamischen Wechselwirkungen der Gelenke, ab.

In weiteren Untersuchungen [Mooring 86] [Bhatti 88] wurde festgestellt, daß sowohl die einzelnen Komponenten der Pose-Wiederholgenauigkeit als auch deren Ursachen im Industrieroboter als normalverteilt angenommen werden können. Daher ist es, zumal da die gemessenen Pose-Wiederholgenauigkeiten normalverteilt sind, gerechtfertigt, im folgenden bei den einzelnen Ursachen von normalverteilten Unsicherheiten auszugehen.

Insgesamt ergibt sich damit, daß sowohl Ein- als auch Ausgangsgrößen des Modells normalverteilt sind. Es bietet sich damit an, ein lineares Modell zu benutzen.

Da allerdings die Abbildung der genannten Eingangsgrößen auf die Pose entsprechend der Darstellung in Abschnitt 3.3 nichtlinear ist, ist eine Linearisierung im Sinne einer nach dem linearen Glied abgebrochenen Taylorreihe durchzuführen [Rall 95]. Mit der Jacobimatrix $C_{\bar{s}_0}$, die aus den partiellen Differentialen der Pose nach den oben genannten Einflußgrößen besteht, ergibt sich als Modell an dem durch den zugehörigen Stellwertvektor $\bar{s}_0$ beschriebenen Linearisierungspunkt:

$$\bar{w} = C_{\bar{s}_0}\,\bar{x};\ \bar{w} \in \Re^n;\ C_{\bar{s}_0} \in \Re^{n\times m};\ \bar{x} \in \Re^m. \tag{6.8}$$

Die Jacobimatrix $C_{\bar{s}_0}$ bildet damit die Unsicherheiten der Einflußgrößen $\bar{x}$ auf die Pose-Wiederholgenauigkeit ab. Aufgrund der stochastischen Unabhängigkeit der einzelnen Einflußgrößen kann deren Unsicherheit mit einer nur auf der Hauptdiagonalen besetzten Kovarianzmatrix beschrieben werden:

$$\bar{x} \sim N(\bar{0}, \Sigma_x);\ \Sigma_x = \mathrm{Diag}(\sigma_1^2, \sigma_2^2, \cdots, \sigma_m^2) \in \Re^{m\times m} \tag{6.9}$$

Die Kovarianzmatrix der Wiederholgenauigkeit kann damit zu

$$\Sigma_w = C_{\bar{s}_0}\Sigma_x C_{\bar{s}_0}^T;\ \Sigma_w \in \Re^{n\times n} \tag{6.10}$$

berechnet werden.

Eine Anwendung der bei der Meßauswertung beschriebenen Methoden (siehe Abschnitt 6.1.1) ermöglicht es, abschließend die auch dort genutzten Kennwerte der Pose-Wiederholgenauigkeit zu berechnen.

6.4.2 Quantitative Erfassung der Modelleingangsgrößen

Nachdem die Struktur des Modells im vorhergehenden festgelegt wurde, sind die Eingangsgrößen des Modells quantitativ zu bestimmen. Es wird dabei angenommen, daß alle Eingangsgrößen normalverteilt sind. Jede Eingangsgröße ist damit allein durch ihre Standardabweichung vollständig beschrieben. Anhand von entsprechenden Datenblättern werden im folgenden die einzelnen Standardabweichungen abgeschätzt.

6.4.2.1 Winkelgeber

An allen Achsen des untersuchten Industrieroboters sind jeweils am freien Wellenende der Motoren inkrementale Winkelgeber eingesetzt. Diese Winkelgeber arbeiten nach dem fotoelektrischen Abtastprinzip. Die Genauigkeit der eingesetzten Winkelgeber wird charakterisiert durch den maximalen Teilungsfehler, der mit

$T_{max}=\pm 50°$ (el.) angegeben ist [Balluff]. Mit 1080 Strichen ergeben sich bei Vierfachauswertung pro Umdrehung I=4320 Impulse. Damit kann die maximale Abweichung der Winkelmessung berechnet werden:

$$\varphi_{WG,max} = \frac{T_{max}}{360°(el)} \cdot \frac{360°}{I} = 0{,}0116° = 41{,}67''. \qquad (6.11\text{-}1)$$

Werden die Unsicherheiten der Winkelgeber als normalverteilt und mittelwertfrei angenommen, können die charakteristischen Größen dieser Verteilung bestimmt werden: Aus der Mittelwertfreiheit folgt $\mu_{WG}= 0$. Aus der maximalen Winkelabweichung kann die Standardabweichung unter der Annahme, daß 99,7% aller Abweichungen kleiner als dieser Maximalfehler sind, zu

$$\sigma_{WG} = 1/3\ \varphi_{WG,max}=13{,}9'' \qquad (6.11\text{-}2)$$

bestimmt werden.

6.4.2.2 Getriebe

An den ersten beiden Achsen besitzt der untersuchte Industrieroboter jeweils ein Harmonic Drive Getriebe. An der Hubachse wird die Drehbewegung des Motors durch ein Kegelradgetriebe und ein Zahnstangengetriebe in eine Linearbewegung umgesetzt. An der letzten Drehachse wird die Drehbewegung durch ein Planetengetriebe und zwei Zahnriemen übertragen. In diesem Abschnitt werden diese einzelnen Übertragungsglieder kurz vorgestellt und die jeweiligen Genauigkeitskenngrößen hergeleitet.

6.4.2.2.1 Achse 1 und 2

Die Harmonic Drive Getriebe an den ersten beiden Achsen unterscheiden sich nur bezüglich ihrer Übersetzung. Es handelt sich um Getriebe, die gepaart sind und so ein sehr kleines Spiel aufweisen. In den Datenblättern von Harmonic Drive [Harmonic Drive] wird die Wiederholgenauigkeit mit $\varphi_{HD,max}=\pm 1'$ angegeben. Da es sich bei den Getrieben um in großer Stückzahl produzierte Standardmaschinenelemente handelt, kann angenommen werden, daß die angegebene Wiederholgenauigkeit die 3σ Umgebung beinhaltet. Wird analog zum Vorgehen bei den Winkelgebern von normalverteilten und mittelwertfreien Unsicherheiten ausgegangen, so folgt: $\mu_{HD}=0$ und $\sigma_{HD}=1'/3=20''$.

In [Gerstmann 91] wurden unterschiedliche Getriebe auf ihr Genauigkeitsverhalten hin untersucht. Für ein Harmonic Drive Getriebe wurde eine Standardabweichung der Winkelabweichung von ungefähr 17" ermittelt. Damit kann der obige Wert als vertrauenswürdig angenommen werden.

6.4.2.2.2 Achse 3

Für das Getriebe der Hubachse liegen keine Angaben aus Datenblättern vor. Daher wird dessen Wiederholgenauigkeit mit den Ergebnissen von [Gerstmann 91] abgeschätzt. Es wurde eine Standardabweichung von $\sigma_{HU,rot}$=15" für ein zweistufiges Stirnradgetriebe gemessen. Da von allen untersuchten Getriebearten dieses dem vorliegenden Getriebe am nächsten kommt, wird zunächst von dem für dieses Getriebe ermittelten Kennwert ausgegangen. Da Kegelradgetriebe jedoch gegenüber Stirnradgetrieben eine geringere Genauigkeit aufweisen, wird als überschlägiger Ausgleich angenommen $\sigma_{HU,rot}$=20". Bei dem vorliegenden Getriebe wird eine Dreh- in eine Hubbewegung gewandelt, so daß die Standardabweichung ebenfalls zu transformieren ist. Mit dem Radius des letzten Ritzels (20 mm) folgt

$$\sigma_{HU} = 20\ \text{mm} \cdot \sigma_{GH,rot} = 1{,}9\mu\text{m}. \tag{6.12}$$

6.4.2.2.3 Achse 4

Auch für das Getriebe der letzten Drehachse liegen keine Angaben vor. Daher wird auch hier von den in [Gerstmann 91] bestimmten Kennwerten ausgegangen. Die Standardabweichung der Orientierung von Planetengetrieben wurde mit σ_{PG}=15" und die von Zahnriemen mit σ_{ZR}=1,1' gemessen. Da es sich um in Reihe geschaltete Getriebe handelt, kann die Standardabweichung des Gesamtgetriebes durch eine Faltung gewonnen werden. Diese lautet unter der Annahme normalverteilter Werte:

$$\sigma_{GZ} = \sqrt{\sigma_{PG}^2 + \sigma_{ZR}^2} = 1{,}1'. \tag{6.13}$$

6.4.2.3 Gesamte Antriebseinheiten

Nachdem im vorhergehenden die Winkelgeber und Getriebe der einzelnen Achsen bezüglich ihrer Wiederholgenauigkeit analysiert wurden, ist daraus die Wiederholgenauigkeit der Winkel- bzw. Wegmessung bezogen auf die Bewegung des Industrieroboters abzuleiten.

In Bild 6.10 ist dargestellt, wie sich bei gegebenem, vom Winkelgeber ausgelesenem Winkel der Weg bzw. Winkel eines Gliedes x_A des Industrieroboters - unter Berücksichtigung der Unsicherheiten von Getriebe und Winkelgeber - verändert. Mit dem Zusammenhang

$$x_A = u_G + i\,(u_{WG} + x_{WG}) \tag{6.14}$$

kann die Verteilung von x_A berechnet werden. Da u_G und u_{WG} normalverteilt und mittelwertfrei sind, und x_{WG} einen konstanten Wert aufweist, ergibt sich

$$x_A \sim N(\mu_A, \sigma_A) = N\left(i\,x_{WG}, \sqrt{\sigma_G^2 + (i \cdot \sigma_{WG})^2}\right). \tag{6.15}$$

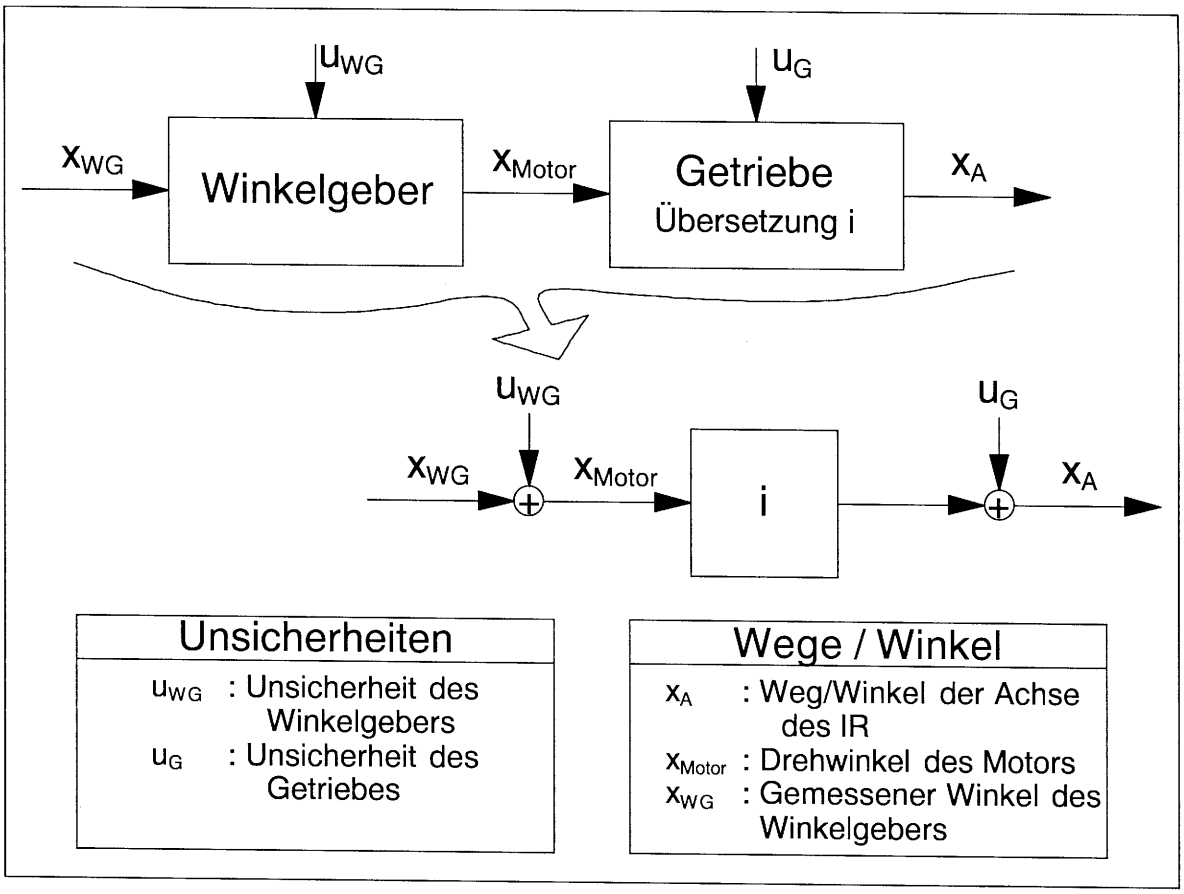

Bild 6.10: Fehlerfortpflanzung bei den Antriebseinheiten eines Industrieroboters

Für alle Achsen ist in Tabelle 6.1 die Berechnung der entsprechenden Standardabweichungen des Weges bzw. Winkels zusammengestellt.

Achse	Standardabw. Getriebe σ_G	Standardabw. Winkelgeber σ_{WG}	Übersetzung i	Standardabw. Weg / Winkel σ_A
1	σ_{HD} = 20"	σ_{WG} = 13,9"	1/128	σ_{A1} = 20"
2	σ_{HD} = 20"	σ_{WG} = 13,9"	1/100	σ_{A2} = 20"
3	σ_{HU} = 1,9µm	σ_{WG} = 13,9"	9,56mm/360°	σ_{A3} = 1,9µm
4	σ_{GZ} = 1,1'	σ_{WG} = 13,9"	1/33	σ_{A4} = 1,1'

Tabelle 6.1: Unsicherheit der einzelnen Achsen des untersuchten SCARA

Es ist zu erkennen, daß die Unsicherheiten nahezu ausschließlich durch die Getriebe verursacht werden. Der Einfluß der Winkelgeber kann demgegenüber vernachlässigt werden.

6.4.3 Simulation der Pose-Wiederholgenauigkeit

Mit den ermittelten Unsicherheiten der einzelnen Achsen des Industrieroboters ist es möglich, dessen Pose-Wiederholgenauigkeit zu simulieren. Die simulierte Pose-Wiederholgenauigkeit in der x-y-Ebene wird durch den Drehwinkel des Hauptachsensystems bezüglich des Basiskoordinatensystems und durch die Standardabweichungen in Richtung der beiden Hauptachsen angegeben. Zur Beschreibung der Drehung um die z-Achse und der Verschiebung in z-Richtung ist die Angabe der jeweiligen Standardabweichung ausreichend.

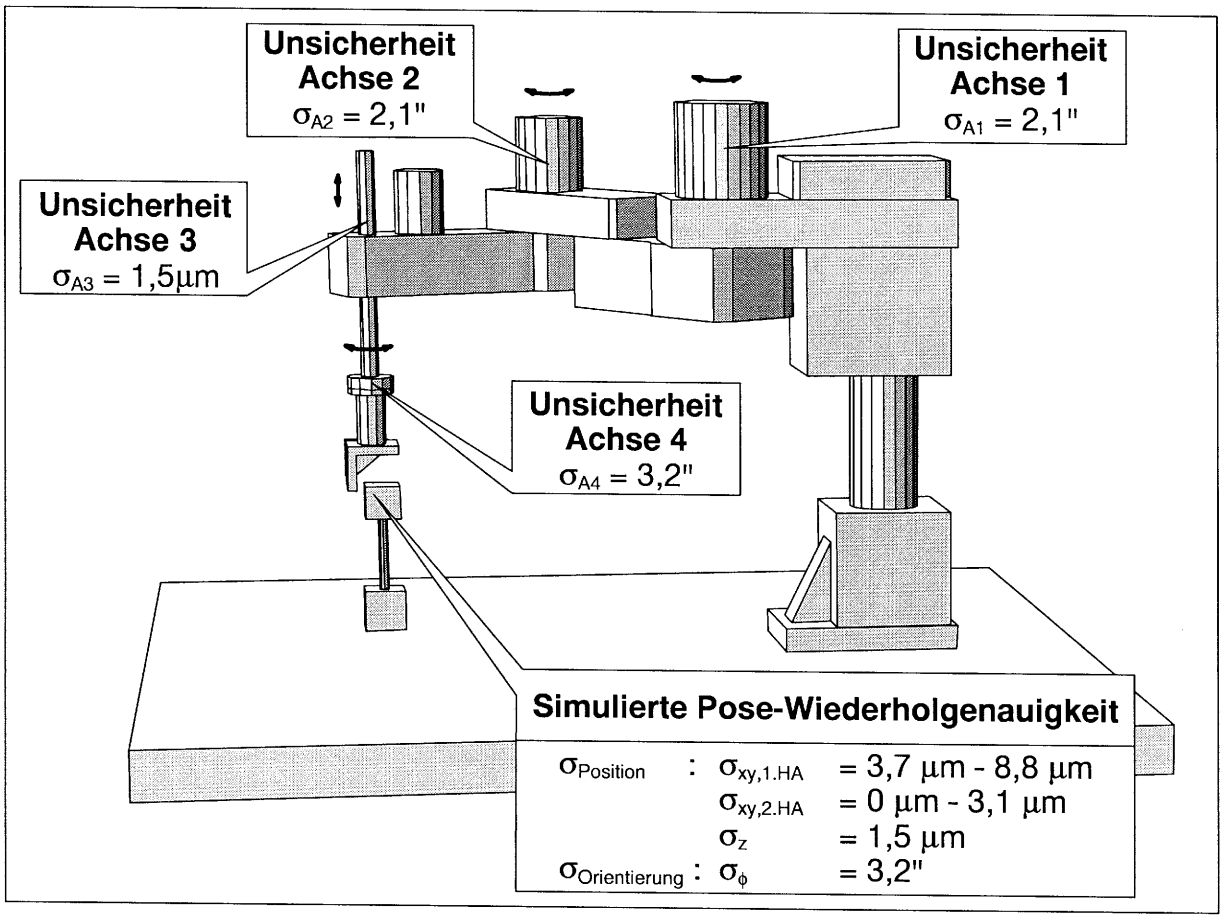

Bild 6.11: Parameter zur Beschreibung der Wiederholgenauigkeit

Für korrekt bestimmte Unsicherheiten müßte die simulierte mit der gemessenen Pose-Wiederholgenauigkeit (Bild 6.6) übereinstimmen. Die Simulation erfolgt zunächst mit den in Tabelle 6.1 aufgeführten Unsicherheiten. Ein Vergleich ergibt:

- Die Orientierungen der Hauptachsensysteme sind zwar vom Verlauf her richtig berechnet, die entsprechenden Winkel nehmen allerdings auf zu kleine Werte ab.
- Die Standardabweichungen in den Hauptachsenrichtungen sind erheblich zu groß berechnet.
- Die Orientierungs-Wiederholgenauigkeiten um die z-Achse sind ebenfalls zu groß berechnet.

- Die Positions-Wiederholgenauigkeiten in z-Richtung sind mit dem Modell etwas zu groß berechnet.

Um eine verbesserte Übereinstimmung zwischen Messung und Simulation zu erhalten, wurden die der Simulation zugrundeliegenden Parameter angepaßt. Mit den geänderten Parametern, die in Bild 6.11 zusammengestellt sind, ergibt sich die in Bild 6.12 dargestellte simulierte Wiederholgenauigkeit in der x-y-Ebene. Im Gegensatz dazu sind die beiden anderen Komponenten der Pose-Wiederholgenauigkeit (Drehung um die z-Achse und Verschiebung entlang derselben) mit Standardabweichungen von 3,2" bzw. 1,5 µm über dem Arbeitsraum konstant.

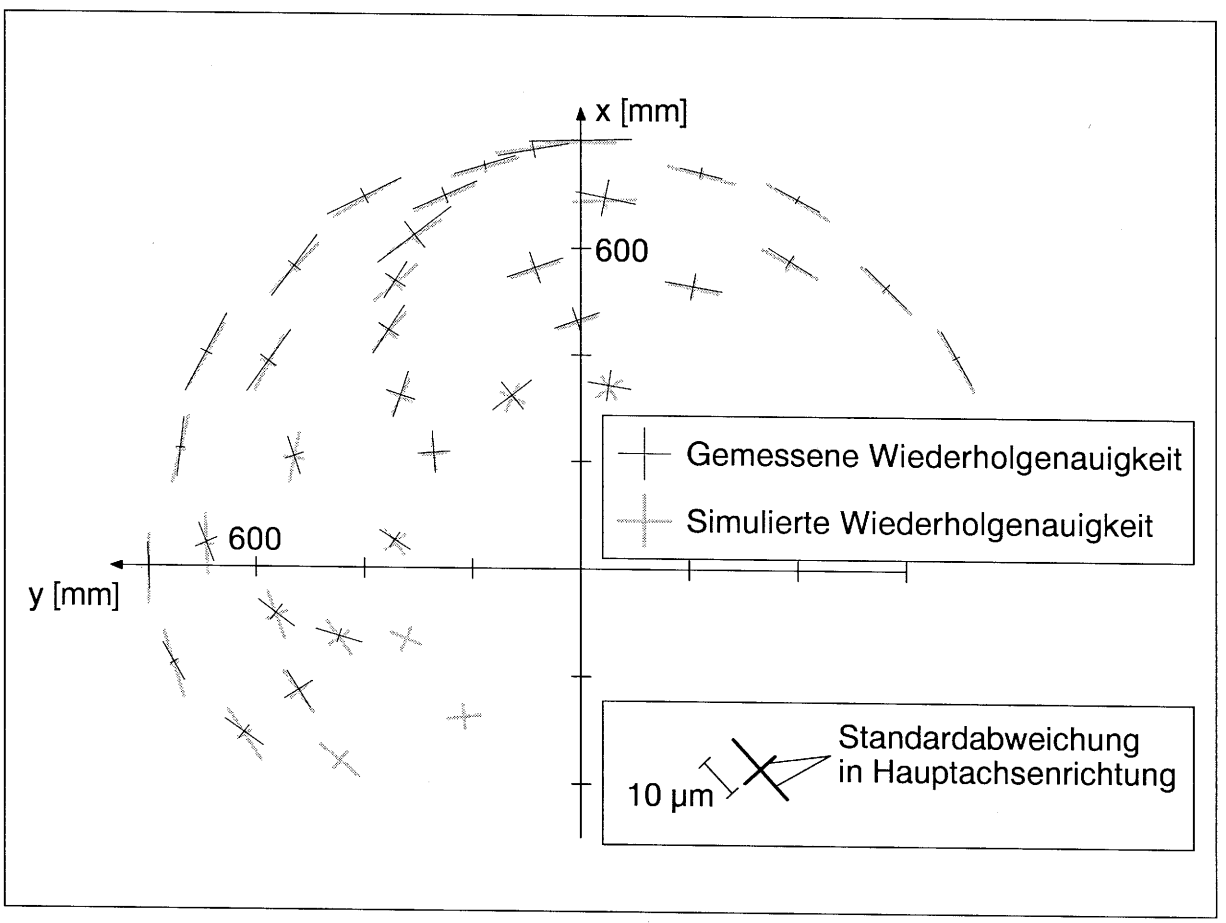

Bild 6.12: Simulierte Wiederholgenauigkeit

Eine gute Übereinstimmung zwischen simulierten und gemessenen Wiederholgenauigkeiten ist damit gefunden. Alle Teilaspekte der Pose-Wiederholgenauigkeit stimmen zwischen Modell und Messung gut überein.

Es hat sich aber auch gezeigt, daß eine alleinige Analyse der entsprechenden Kenngrößen aus Datenblättern nicht ausreichend ist. Zum Erreichen einer guten Übereinstimmung zwischen Modell und Realität sind die abgeschätzten Kennwerte anhand der Realität abzugleichen.

Die aus Datenblättern abgeleiteten Kenngrößen sind, mit Ausnahme der Hubachse, um den Faktor 7 bis 20 zu groß angenommen. Dieses mag daran liegen, daß die in Datenblättern gegebenen Kenngrößen noch erheblich größere Sicherheiten aufweisen, als hier angenommen wurde. Gestützt wird diese Aussage dadurch, daß die gemessene maximale Pose-Wiederholgenauigkeit den Angaben des Industrieroboterherstellers recht gut entspricht. Damit kann der Fall ausgeschlossen werden, daß der untersuchte Industrieroboter zufällig besonders genaue Getriebe besitzt.

Insbesondere die Getriebe der ersten beiden Achsen sind bezüglich ihrer Wiederholgenauigkeit erheblich besser als die entsprechenden Angaben in den Datenblättern vermuten lassen. Begründet werden könnte dies z.B. dadurch, daß die verwendeten Getriebe ausgesucht sind und somit deutlich genauer als die in den Datenblättern angegebenen sind. Für den Zahnriemen, der die Drehbewegung der Achse 4 überträgt, konnte eine Abschätzung nur anhand einer Untersuchung anderer Zahnriemen erfolgen. Auch hier weist der vorliegende Zahnriemen eine deutlich bessere Genauigkeit auf.

Abschließend kann festgestellt werden, daß das Ziel dieses Abschnitts erreicht wurde: Ein Modell konnte entwickelt werden, welches in der Lage ist, die Pose-Wiederholgenauigkeit zu beschreiben. Damit können einerseits weitergehende Verfahren auf einer konkreten Basis aufsetzen, und andererseits ist es möglich, für eine Fertigungs- oder Montageaufgabe Bereiche im Arbeitsbereich auszuwählen, bei denen eine optimale Genauigkeit erreicht werden kann.

Außerdem konnte die gewinnbringende Anwendung der entwickelten Methode zur Beschreibung der Pose-Wiederholgenauigkeit gezeigt werden. Es ist festzustellen, daß mit Hilfe dieser Methode deutlich mehr Informationen über die Pose-Wiederholgenauigkeit gewonnen werden können, als dies mit einem Vorgehen nach DIN EN 29283 oder nach VDI-Richtlinie 2861 möglich gewesen wäre.