

# Automatisierte Kalibrierung von Richtungsmesssystemen in rotativen Direktantrieben

C. Depenthal

**Im Beitrag wird aufgezeigt, wie das Rosettenverfahren als Standardverfahren der Kalibrierung erweitert werden kann, um bei der Bestimmung einer Kalibrierfunktion für rotative Direktantriebe eine hohe Stützpunktzahl zu erhalten**

## 1 Motivation

Konventionelle Schneckengetriebe und Zahnradantriebe werden weitgehend durch rotative Motoren als Direktantriebe abgelöst. Sie werden immer dann empfohlen, wenn höchste Dynamik und Genauigkeit gefordert sind. Die Vorteile liegen nicht nur in der kompakten Bauform, sondern sie zeichnen sich u.a. auch durch hohe Zuverlässigkeit, gleichförmige Bewegung und stabile Regelung aus. Typische Anwendungsgebiete der rotativen Direktantriebe sind z.B. Teilapparate, Montagemaschinen oder Laserschneidmaschinen. Rotative Messsysteme bestehen üblicherweise aus einem Abtastkopf und einer Rasterscheibe als Maßverkörperung, die direkt auf die rotierende Baugruppe montiert ist. Die Abtastung erfolgt optisch und damit berührungslos. Die Messsysteme arbeiten nach dem inkrementalen Messverfahren. Für den Anschluss an ein absolutes Koordinatensystem befindet sich auf der Rasterscheibe – ähnlich wie beim Theodolit – eine Referenzmarke. Die Genauigkeit der Winkelpositionsmessung wird u.a. durch die Teilungsgenauigkeit der Rasterscheibe, die Exzentrizität der Teilung zur Lagerung, die Lageabweichung zwischen Rasterscheibe und Messmodul und durch den Interpolationsfehler beeinflusst.

Im Labor des Geodätischen Instituts der Universität Karlsruhe (GIK) kommen zwei Drehtische zum Einsatz, die als ein solcher Direktantrieb ausgeführt und mit einem Messsystem von Numerik Jena ausgestattet sind. Beide Drehtische werden u.a. so eingesetzt, dass ein Bezug zur absoluten Positionierung benötigt wird. Um den Winkelfehler möglichst klein zu halten, muss eine Kalibrierung der Systeme durchgeführt werden. Für die Verbesserung der Positionierung wird anschließend eine entsprechende Kalibrierfunktion bestimmt.

## 2 Verfahren

Ein seit langem bekanntes Standardverfahren für die Kalibrierung von Winkelmesssystemen ist das so genannte Rosettenverfahren [NOCH, R., STEINER, O., 1966]. Es beruht auf einem Vergleich aller möglichen  $360^\circ/n$  Teilungswinkel von zwei Kreisteilungen in allen möglichen  $n \times n$  Relativlagen zueinander. Der Teilungsfaktor  $n$  ergibt sich aus der Anzahl der betrachteten Kreisteilungsstellen. In jeder Drehlage wird die Summe der beiden Winkelabweichungen beider Kreisteilungen nacheinander an allen  $n$  Positionen gemessen. Aus den  $n^2$  Messergebnissen ergibt sich ein Gleichungssystem mit  $n^2$  Gleichungen und  $2n$  Unbekannten für die  $n$  Teilungsabweichungen beider Teilungen. Daraus werden die Teilungsfehler beider Systeme berechnet und zwar unabhängig vom Teilungsfehler der jeweils anderen Teilung. Bei der Auswertung wird als Restriktion der vermittelnden Ausgleichung eingeführt, dass die Summe aller Einzelteilungsfehler einer Kreisteilung per Definition Null ergeben muss. Das Rosettenverfahren liefert als Ergebnis die Einzelteilungs- bzw. Summenteilungsfehler für das Spiegelpolygon und den Prüfling. Ein Einzelteilungsfehler stellt den Teilungsfehler eines Einzelteilungswinkels dar, der wiederum als Winkel zwischen benachbarten Winkelschenkeln zu verstehen ist. Die Addition der Einzelteilungsfehler bezogen auf eine Anfangsposition wird als Summenteilungsfehler bezeichnet.

Bei der Realisierung des Messaufbaus wird Autokollimation genutzt, um Zentrierabweichungen bei der Generierung der einzelnen Drehlagen unschädlich zu machen. Eine elegante Lösung wird durch die Nutzung eines  $n$ -flächigen Spiegelpolygons erreicht, das zentrisch über dem Prüfling (z.B. rotativer Direktantrieb) positioniert wird (Bild 2.1). Bei diesem Verfahren werden sowohl die Teilungsabweichungen des Prüflings als auch alle  $n$  Prüfwinkel des Spiegelpolygons bestimmt, das Spiegelpolygon wird also simultan vollständig kalibriert. Durch die hohe innere mechanische Stabilität des Spiegelpolygons wird eine hohe Genauigkeit erreicht. Andererseits ist das Verfahren aber immer auf die Anzahl der Spiegelflächen als Stützpunkte beschränkt. Folglich können z.B. bei einem 12er Spiegelpolygon nur Teilungsfehler für die  $30^\circ$ -Winkel bestimmt werden. Damit wird die Maximalfrequenz der Kalibrierfunktion auf  $n/2$  (hier 6) wegen

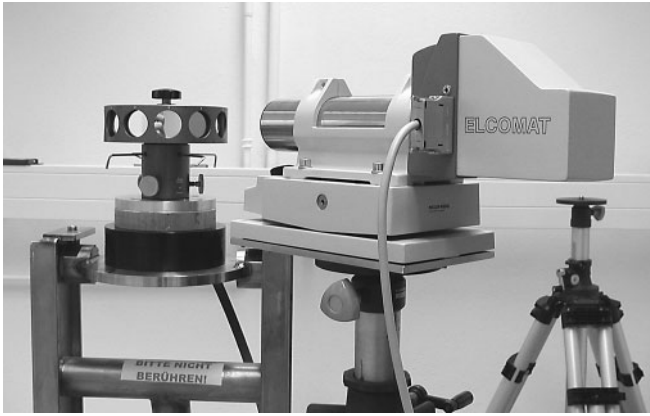


Bild 2.1: Drehtisch mit Spiegelpolygon und Autokollimator

Einhaltung der Nyquist-Frequenz beschränkt. Spiegelpolygone mit mehr als 12 Flächen sind meist sehr teuer und daher eher Einrichtungen wie der PTB vorbehalten.

Eine Kalibrierfunktion  $F_{\text{Kal}}(x)$  für die systematischen periodischen Anteile der Summenteilungsfehler wird in Form einer Fourierreihe beschrieben. Die Frequenzen  $f$  der Schwingungen werden über eine Fourieranalyse ermittelt. Amplituden und Phasen zu den entsprechenden Frequenzen werden anschließend in einer vermittelnden Ausgleichung (GMM) geschätzt. Dabei werden die Amplituden mit Hilfe des Hypothesentests auf Signifikanz geprüft [HENNES, M., 1991]. Die tatsächliche Parametrisierung der Kalibrierfunktion sollte im Zusammenhang mit der jeweiligen Positionswiederholgenauigkeit des Direktantriebs abgeschätzt werden. Interpolationsfehler wirken sich zwar systematisch auf die Positionsabweichung innerhalb einer Signalperiode (Inkrement) aus, treten jedoch bei dieser Untersuchung nicht in Erscheinung, weil immer an derselben Stelle innerhalb des Inkrementintervalls positioniert wurde. Somit verbleiben die zufälligen Anteile, als Fehlerband dem Positionsfehler überlagert. Die zu betrachtende Positionsabweichung lässt sich als Positionsstreuung des Drehtischs bestimmen. Dabei wird eine vorgegebene Richtung, z.B. der Referenzpunkt des Drehtischs wiederholt positioniert und die tatsächliche Position über Autokollimation bestimmt.

Mit einem kalibrierten Spiegelpolygon können direkt Einzelteilungs- oder Summenteilungsfehler eines Drehtischs über Autokollimation und einem Soll-Ist-Vergleich bestimmt werden. Dieser direkte Weg der Teilungsfehlerbestimmung liefert eine Möglichkeit, die Anzahl der diskreten Messpunkte zu erhöhen und führt zu dem Verfahren der „eingehängten Messreihen“, das für zwei Messreihen in [PEGLOW, M., 1964] vorgeschlagen wird. Eine Messreihe besteht immer aus den Messungen an jeweils allen Spiegelflächen während einer vollständigen Umdrehung. Es werden nun mehrere Messreihen jeweils an unterschiedlichen Startpunkten begonnen und zwar so, dass diese innerhalb des ersten Spiegelintervalls  $\Delta x = 2\pi/n$  zwischen Fläche 1 und 2 liegen. Sollen z.B. mit einem 12seitigen Polygon  $5^\circ$ -Intervalle ( $2\pi/t = 5^\circ$ ) bestimmt werden, so wird die erste Messreihe ( $m = 0$ ) an der Nullposition des Drehtischs mit Spiegelfläche 1 begonnen und für jede Messung wird der Drehtisch um  $\Delta x$  (hier  $30^\circ$ ) weitergedreht. Die zweite Messreihe ( $m = 1$ ) beginnt

nun bei der  $5^\circ$ -Position des Drehtischs mit Polygonfläche 1 und es werden wiederum alle  $30^\circ$ -Intervalle gemessen. Somit ergeben sich Positionen von  $0^\circ - 30^\circ - 60^\circ - \dots - 360^\circ$  in der ersten Messreihe und  $5^\circ - 35^\circ - 65^\circ - \dots - 365^\circ$  in der zweiten Messreihe. Dieses Schema wird soweit fortgesetzt bis eine Redundanz durch einen Startpunkt an der  $360^\circ/n$ -ten Position (hier  $30^\circ$ ) erreicht wird. Somit sind die Stützstellen  $> t$  redundant bestimmt und können zur Überprüfung der Messung herangezogen werden. Da bei einer Messreihe immer eine komplette Umdrehung gemessen wird, sollten Start- und Endpunkt unter Berücksichtigung der Positionsstreuung ein gleiches Ergebnis liefern. Das Verfahren kann je nach Aufwand auf kleinere Intervallschritte (z.B.  $1^\circ$ ) erweitert werden. Die Anzahl  $m$  der einzelnen Messreihen richtet sich nach den gewählten Intervallschritten  $2\pi/t$ .

Durch einen Soll-Ist-Vergleich werden für jede einzelne Messreihe die Summenteilungsfehler  $S_{m,m} \frac{2\pi}{n} + k\Delta x$  bestimmt und im Weiteren werden dem Begriff Messreihe nun die einzelnen Summenteilungsfehler subsumiert. Da sich Summenteilungsfehler immer auf eine Anfangsposition beziehen, ergibt sich hier definitionsgemäß, dass an den jeweiligen Startpositionen der Messreihen kein Teilungsfehler bestimmbar ist. Folglich haben alle Messreihen gegenüber der ersten Messreihe (Startposition  $0^\circ$ ) einen Versatz, der durch Zentrierung beseitigt werden kann, was im Folgenden gezeigt wird.

Die erste Messreihe mit  $n$  Stützpunkten und Startpunkt  $0^\circ$  lässt sich als Sinusreihe darstellen

$$\sum_{k=0}^{n-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right). \quad (2.1)$$

Wird die Summationsgrenze halbiert, ergibt sich (2.1) zu

$$\sum_{k=0}^{n-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right) = \sum_{k=0}^{(n-1)/2} \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right) + \sum_{k=(n-1)/2+1}^{n-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right) \quad (2.2)$$

und für die einzelnen Summen folgt

$$\sum_{k=0}^{(n-1)/2} \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right) = \frac{-\sin\left(\frac{\pi(n-1)}{n}\right) - \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) + \sin\left(\frac{(n+1)\pi}{n}\right)}{-2 + 2\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)} \quad (2.3)$$

$$\sum_{k=(n-1)/2+1}^{n-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{n}\right) = \frac{\sin\left(\frac{\pi(n-1)}{n}\right) + \sin\left(\frac{2\pi}{n}\right) - \sin\left(\frac{(n+1)\pi}{n}\right)}{-2 + 2\cos\left(\frac{2\pi}{n}\right)}. \quad (2.4)$$

Wird (2.3) und (2.4) in (2.2) eingesetzt, lässt sich leicht nachvollziehen, dass (2.1) Null ergeben muss und somit auch der Mittelwert von (2.1) zu Null wird.

Besteht eine Sinusreihe über ein Intervall  $[0 \ 2\pi]$  aus  $mn$  Stützpunkten, so lässt sich diese aus  $m$  Messreihen mit entsprechenden Intervallschritten zusammensetzen und mit dem Additionstheorem umformen (2.5). Aus (2.1) folgt, dass die gesamte Sinusreihe (2.5) und jede einzelne Messreihe  $m$  zu Null wird.

$$\sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{n-1} \sin\left(k \frac{2\pi}{n} + j \frac{2\pi}{t}\right) = \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{n-1} \left( \sin k \frac{2\pi}{n} \cos j \frac{2\pi}{t} + \cos k \frac{2\pi}{n} \sin j \frac{2\pi}{t} \right) = \sum_{j=0}^m \left( \cos j \frac{2\pi}{t} \sum_{k=0}^{n-1} \sin k \frac{2\pi}{n} + \sin j \frac{2\pi}{t} \sum_{k=0}^{n-1} \cos k \frac{2\pi}{n} \right) = 0 \quad (2.5)$$

Daher können Messreihen, die zu einer gleichen periodischen Funktion gehören, über eine Zentrierung in Bezug auf die erste Messreihe aneinandergelängt werden, ohne dass periodische Anteile eliminiert werden.

Die Mittelwerte der einzelnen Messreihen beim Verfahren der „eingehängten Messreihe“ weichen voneinander ab, da Polygon und Drehtisch gegeneinander versetzt wurden und somit andere Funktionswerte der gleichen periodischen Funktion vorliegen. Unter der Annahme, dass im Summenteilungsfehler nur periodische und zufällige Fehler vorhanden sind, können die Messreihen über eine Zentrierung

$$S_{m,m}^Z \frac{2\pi}{t} + k\Delta x = S_{m,m} \frac{2\pi}{t} + k\Delta x - (\bar{S}_m - \bar{S}_1) \quad (2.6)$$

aneinander angehängt werden. Dazu wird für jede Messreihe ein Mittelwert der Summenteilungsfehler gebildet

$$\bar{S}_m = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} S_{m,m} \frac{2\pi}{t} + k\Delta x. \quad (2.7)$$

Wurden zuvor mit dem Rosettenverfahren Summenteilungsfehler bestimmt, sollte die erste Messreihe durch die Ergebnisse aus dem Rosettenverfahren ersetzt werden, da diese eine höhere Genauigkeit aufweisen. Voraussetzung ist jedoch, dass sich beide Messungen auf die Nullposition des Drehtisches als ersten Startpunkt beziehen. Bei der Zentrierung (2.6) wird dann der Mittelwert der Summenteilungsfehler aus dem Rosettenverfahren (2.8) verwendet

$$\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} R_{k\Delta x} \quad (2.8)$$

$$S_{m,m}^R \frac{2\pi}{t} + k\Delta x = S_{m,m} \frac{2\pi}{t} + k\Delta x - (\bar{S}_m - \bar{R}). \quad (2.9)$$

Bei der Bestimmung einer Kalibrierfunktion werden auch Oberschwingungen bestimmt, so dass die Sinusreihe (2.5) um die Frequenz  $f$  erweitert werden muss. Folglich muss im Weiteren noch verifiziert werden, ob bei einer Zentrierung alle Frequenzen bestimmt werden können. Dazu werden die zwei Fälle  $f = n$  und  $f \neq n$  bezüglich der Mittelwerte untersucht.

Der Mittelwert einer aus den einzelnen Messreihen zusammengesetzten Sinusreihe mit der Frequenz  $f$  ergibt sich allgemein zu

$$\bar{y} = \frac{1}{nm} \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^{n-1} \sin\left(fk \frac{2\pi}{n} + j \frac{2\pi}{t}\right). \quad (2.10)$$

Der Mittelwert einer jeweiligen Messreihe  $m$  stellt sich dann allgemein folgendermaßen dar

$$\bar{y}_m = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} \sin\left(fk \frac{2\pi}{n} + m \frac{2\pi}{t}\right). \quad (2.11)$$

Unter der Annahme  $f \neq n$  werden beide Mittelwerte zu Null, da die Sinusreihe nur um einen konstanten Anteil erweitert wird und somit (2.5) zutrifft.

Für den Fall  $f = n$  bzw.  $f = kn$  wird (2.11) zu  $\bar{y}_{m=0} = 0$ , da der 1. Term im Argument zu  $2k\pi$  wird. Für alle weiteren Messreihen, also  $m \neq 0$  ergibt sich der Mittelwert zu

$$\bar{y}_m = \sin\left(m \frac{2\pi}{t}\right). \quad (2.12)$$

Da immer gilt  $m \neq t$  folgt aus (2.12), dass  $\bar{y}_m \neq 0$  ist. Durch die Zentrierung werden somit alle Frequenzen  $f = kn$  eliminiert.

In einer Simulation lässt sich dieser Sachverhalt gut darstellen. Dabei wird eine Grundschwingung einmal mit einer Sinusschwingung der Frequenz 11 (Bild 2.2) und einmal mit der Frequenz 12 (Bild 2.3) überlagert. Die Intervallverschiebung beträgt  $5^\circ$  und  $n = 12$ . Im zweiten Subplot sind die Abtastpositionen der einzelnen Messreihen

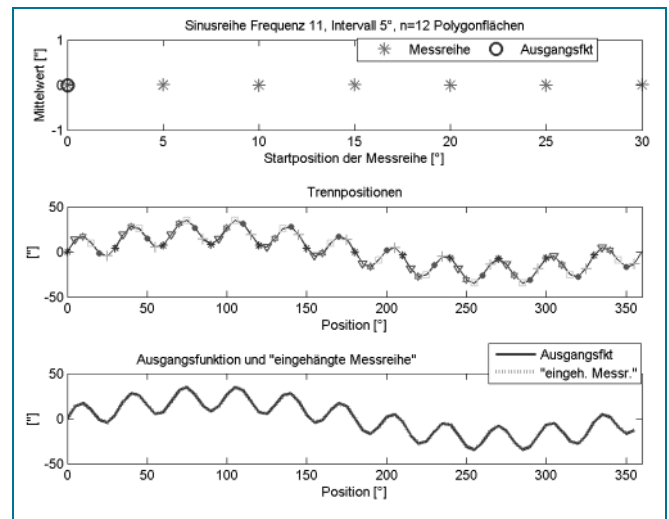


Bild 2.2: Simulation Sinusreihe mit Frequenz 11 für  $n = 12$  und Trennung in Messreihen mit  $5^\circ$  Intervallverschiebung

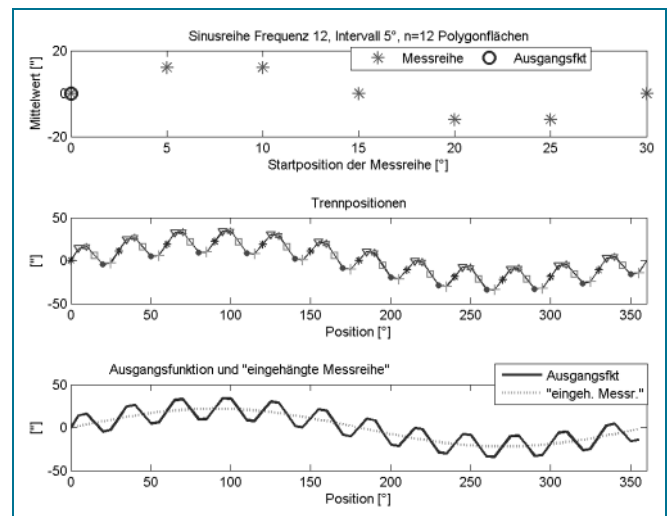


Bild 2.3: Simulation Sinusreihe mit Frequenz 12 für  $n = 12$  und Trennung in Messreihen mit  $5^\circ$  Intervallverschiebung



(eine Signatur pro Messreihe) dargestellt. Der jeweils dritte Subplot zeigt die Ausgangsfunktion und das Ergebnis aus dem Verfahren der „eingehängten Messreihe“. Bei Frequenz 11 sind beide Kurven identisch, während bei Frequenz 12 nur die Grundschwingung erkannt wird. Eine Möglichkeit, dieses Manko auszugleichen ist die gezielte Bestimmung von Amplitude und Phase zu der Frequenz  $f = kn$ . Dazu müssten über einen Polygonbereich  $\Delta x = 2\pi/n$  kontinuierlich Messwerte erfasst werden. Dabei wird der gesamte Messbereich des Autokollimators z.B.  $\pm 1000''$  (siehe 3) ausgenutzt. Konkret bedeutet dies, dass ausgehend von einer Startposition am Drehtisch und der Messposition  $-1000''$  am Autokollimator, nach der ersten Messung der Drehtisch um den Betrag des Messbereichs des Autokollimators weitergedreht wird und eine erneute Messung erfolgt. Danach wird das Spiegelpolygon soweit zurückgedreht, dass wieder die Messposition  $-1000''$  beim Autokollimator erreicht wird und eine erneute Messung erfolgen kann. Dieser Ablauf muss so oft wiederholt werden, bis mindestens der Bereich  $\Delta x$  äquidistant abgedeckt ist. Über den Soll-Ist-Vergleich können dann direkt die Summenteilungsfehler für diesen Bereich ermittelt werden. Bei der anschließenden Ausgleichung zur Bestimmung von Amplitude und Phase für die Sinusfunktion der Frequenzen  $f = kn$ , müssen die Summenteilungsfehler zuerst um die Funktionswerte aus der zuvor bestimmten Kalibrierfunktion  $F_{Kali}(x)$  reduziert werden. Die verbleibende Restfunktion  $F_{Rest}(x)$  enthält dann neben den zufälligen Fehlern nur noch Sinusschwingungen mit den Frequenzen  $f = kn$ . Sind die Amplituden signifikant, wird  $F_{Kali}(x)$  um diese Frequenzen mit Amplitude und Phase erweitert. Die Abschätzung der Messunsicherheit geschieht durch die Messung eines weiteren Bereichs  $\Delta x$  an einer anderen Drehtischposition. Wegen der Orthogonaleigenschaften der trigonometrischen Funktionen und unter der Voraussetzung, dass über einen Kreis äquidistante Messungen erfolgen, reduziert sich die Normalgleichung zu einer Diagonalmatrix [HÖPCKE, W., 1980]. Da die Frequenzen  $f = kn$  in jedem Kreisabschnitt  $\Delta x$  gleichermaßen vorhanden sind, wird bei äquidistanten Stützpunkten innerhalb eines  $\Delta x$  Bereichs die Normalgleichung ebenfalls zur Diagonalmatrix. Folglich können die beiden Funktionen  $F_{Kali}(x)$  und  $F_{Rest}(x)$  zu einer Kalibrierfunktion zusammengefasst werden.

### 3 Anwendung

Das GIK verfügt über einen elektronischen 2-Achs-Autokollimator ELCOMAT 3000 von Möller-Wedel mit einer Genauigkeit von  $\pm 0.1''$  über den gesamten Messbereich von  $\pm 1000''$  und innerhalb eines Bereichs von  $20''$  von  $\pm 0.01''$ . Als Spiegelpolygon wird ein 12-flächiges Leitz Spiegelpolygon eingesetzt, das die Eigenschaft besitzt, dass die Polygonachse des Glaskörpers parallel zur Drehachse des Messobjekts ausgerichtet werden kann. Die Ansteuerung des Drehtischs und Autokollimators erfolgt über LabVIEW (National Instruments), während das Polygon zwischen den einzelnen Messreihen noch von Hand gedreht werden muss. Exemplarisch werden hier die Er-

gebnisse der Kalibrierung für den Drehtisch DT-3P von IDAM (INA – Drives & Mechatronics) vorgestellt. Das im Drehtisch verwendete Messsystem von Numerik Jena verfügt über eine Auflösung von  $0.22''$ . Die Positionsabweichung innerhalb einer Signalperiode beträgt laut Hersteller bei optimalem Anbau der Rasterscheibe  $\pm 1 \dots 2\%$  des Strichabstandes der Rasterteilung. Das entspricht umgerechnet einer Abweichung von  $\pm 0.35'' \dots 0.7''$ .

Für die Bestimmung der Positionswiederholgenauigkeit  $p$  wurde der Referenzpunkt des Drehtischs mehrfach angefahren und die Positionsstreubreite zu  $\pm 2''$  bestimmt. Dieser Wert liefert die Schranken bei der Bestimmung der Messunsicherheit nach Typ B gemäß GUM [DIN, 1995]. Diese ergibt sich zu  $u_c(p) = 1.16''$ .

Vor jeder Messreihe muss die Polygonachse parallel zur Achse des Drehtischs ausgerichtet werden, damit die Spiegelnormale in der Messebene der Drehtischs liegt. Die Kippung bei entsprechenden Umschlagsmessungen sollte dabei  $< 15''$  sein. Das Rosettenverfahren umfasst 12 Messreihen, die jeweils mit einer unterschiedlichen Polygonfläche beginnen. Die vermittelnde Ausgleichung für die Berechnung der Summenteilungsfehler ergab eine Standardabweichung von  $\sigma = 0.15''$ .

Für das Verfahren der „eingehängten Messreihe“ wurden vier Messzyklen durchgeführt, drei mit  $1^\circ$ -Intervallschritten und einer mit  $2^\circ$ -Intervallschritten. Alle vier wurden jeweils auf den Mittelwert aus dem Rosettenverfahren zentriert (2.9). Die Abweichungen der einzelnen Summenteilungsfehler gegenüber den Gemittelten lagen unterhalb von  $\pm 2''$ , also innerhalb der Positionsstreubreite. Aus den 360 Summenteilungsfehlern lässt sich eine Kalibrierfunktion  $F_{Kali}(x)$  schätzen (Bild 3.1). Diese enthält keine Frequenzen mit  $f = 12, 24, 36, \dots$  (siehe 2).

Zur Bestimmung der 12fachen-Frequenz wurde der Bereich von  $0^\circ$ – $60^\circ$  wie unter (2) beschrieben in Einzelschritten gemessen und die Summenteilungsfehler bestimmt (Bild 3.2). Von diesen werden dann die der Position entsprechenden Kalibrierwerte  $F_{Kali}(x)$  abgezogen.

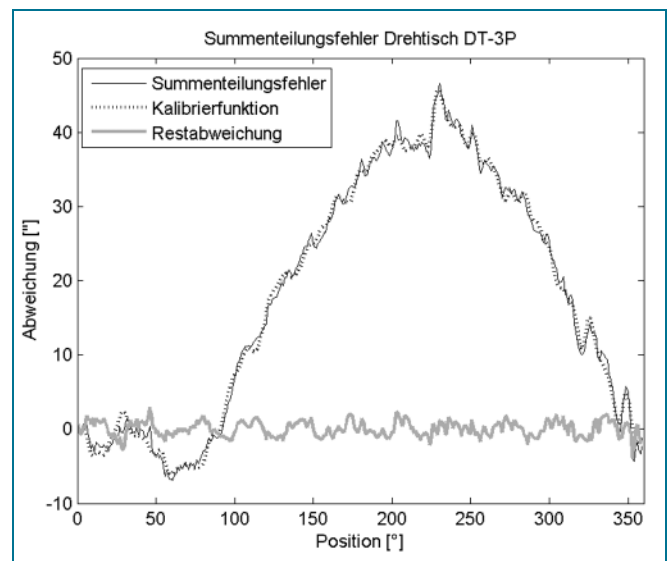
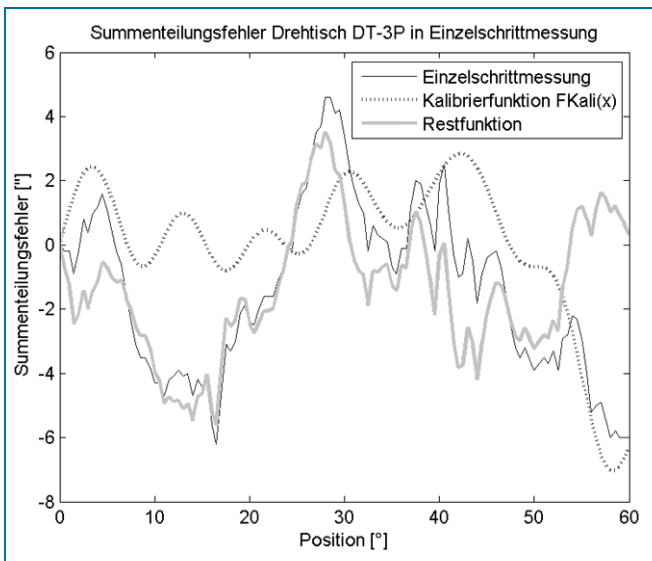


Bild 3.1: Summenteilungsfehler mit  $F_{Kali}(x)$  und Restabweichung für DT-3P



**Bild 3.2:** Summenteilungsfehler in Einzelschrittmessungen mit  $F_{Kali}(x)$  und  $F_{Rest}(x)$

Aus der verbleibenden Restfunktion  $F_{Rest}(x)$  (Bild 3.2) können für die gesuchten Frequenzen Amplitude und Phase geschätzt werden.  $F_{Kali}(x)$  kann anschließend um diese Ergebnisse erweitert werden, so dass eine Kalibrierfunktion  $F_{Kali12}(x)$  entsteht. Da für die Einzelschrittmessung das Spiegelpolygon noch von Hand gedreht wird, empfiehlt es sich, diese Ergebnisse vor einer Übernahme in die Kalibrierfunktion noch zu verifizieren. Hierbei kann ein weiterer  $\Delta x$  Bereich gemessen oder durch Überlappung bei den Messungen die Redundanz erhöht werden. Detailliertere Untersuchungen der Einzelschrittmessung sind noch vorgesehen.

Die Unsicherheit bei der Schätzung der Kalibrierfunktion  $F_{Kali}(x)$  beträgt  $u_c(x) = 0.29''$ . Die einzelnen Messunsicherheiten werden abschließend zur kombinierten Messunsicherheit  $u_c = \sqrt{u_c^2(x) + u_c^2(p)} = 1.2''$  zusammengefasst. Die erweiterte Messunsicherheit ergibt sich mit dem Erweiterungsfaktor 2 zu  $U = \pm 2u_c = 2.40''$ .

Für den zweiten Drehtisch DT-2P wurde ebenfalls eine Kalibrierfunktion geschätzt. Im Drehtisch kommt das gleiche Messsystem jedoch mit einem kleineren Interpolationsfaktor zum Einsatz. Die Positionsstreuung mit  $\pm 4''$  fällt hier etwas größer aus, was vermutlich auf die unterschiedliche Lagerung der beiden Drehtische zurückzuführen ist.

## Literatur

- DIN, 1995: Leitfaden zur Angabe der Unsicherheit beim Messen. 1. Auflage 1995, Beuth Verlag GmbH HENNES, M., 1991: Simultane Selbstkalibrierung periodischer Fehleranteile von Theodoliten. VR 53/5, S. 218–229  
 HÖPCKE, W., 1980: Fehlerlehre und Ausgleichsrechnung, Berlin, New York: de Gruyter  
 NOCH, R.; STEINER, O., 1966: Die Bestimmung von Kreisteilungsfehlern nach dem Rosettenverfahren. Zfi Heft 10, S. 307–2316  
 PEGLOW, M., 1964: Optischer Teilkopf und Spiegelpolygon. Leitz-Mitt. Wiss. U. Tech., Bd. II, Nr. 7 Seite 198–2206

Dipl.-Ing. CLAUDIA DEPENTHAL, Wissenschaftliche Mitarbeiterin, Geodätisches Institut, Universität Karlsruhe, Englerstraße 7, 76128 Karlsruhe, 07 21/6 08 27 27, depenthal@gik.uni-karlsruhe.de

## Zusammenfassung

Werden rotative Direktantriebe zur absoluten Positionierung verwendet, sollte eine Kalibrierung durchgeführt werden, wenn durch die vorgegebenen Spezifikationen ein zu großer Winkelfehler zu erwarten ist. Es zeigte sich, dass hochfrequente Teilungsfehler vorliegen können. Das Rosettenverfahren als Standardverfahren sollte daher durch das Verfahren der „eingehängten Messreihen“ erweitert werden. Dadurch sind die Stützstellen nicht mehr beschränkt auf die Anzahl der Spiegelpolygonflächen, sondern sie können auf beliebige Winkelintervalle erweitert werden, was die Bestimmung hochfrequenter Anteile erlaubt. Die zusätzliche Bestimmung von Frequenzen über Einzelschrittmessung kann eine weitere Verbesserung liefern. Maßgebend für ein gutes Messergebnis ist außerdem die Positionswiederholgenauigkeit der einzelnen Direktantriebe. Diese muss zuvor bestimmt werden und sollte bei der Parametrisierung einer Kalibrierfunktion berücksichtigt werden. Das jetzige Verfahren ist noch sehr zeitintensiv, da das Spiegelpolygon für jede Messreihe von Hand weitergedreht und ausgerichtet werden muss. Daher wäre es von Vorteil, wenn ein Indextisch zwischen dem Prüfling (Drehtisch) und Spiegelpolygon montiert würde, wodurch dann der komplette Ablauf weitestgehend automatisiert werden kann.