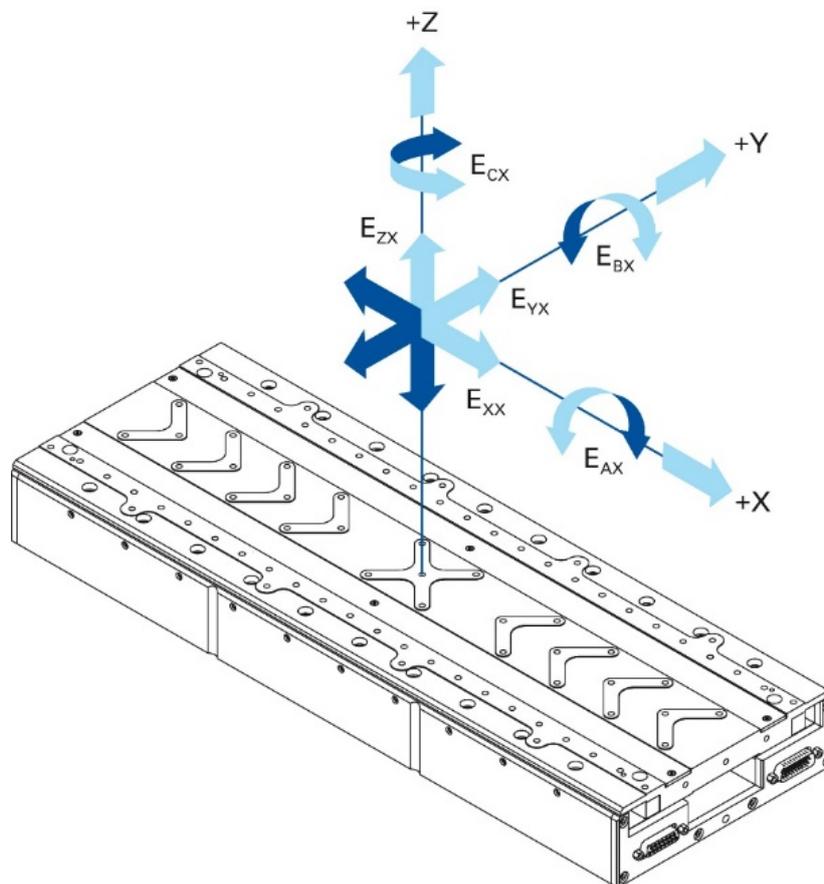


So misst PI - Teil II

Positioniergenauigkeit, Wiederholgenauigkeit und verwandte Messungen: Messprozedur und Datenaufbereitung bei PI



1 Qualifizieren von Positionierachsen

Zur Qualifizierung der von Physik Instrumente (PI) hergestellten Positionierachsen werden Messungen an Prototypen, Einzelprodukten und Serienprodukten durchgeführt. Für Serienprodukte werden basierend auf den Messwerten gültige Spezifikationen abgeleitet und in den Datenblättern veröffentlicht. Diese Spezifikationen beschreiben die grundlegenden Eigenschaften der Positionierung eines Produkttyps, wie z.B. Positioniergenauigkeit, Winkelfehler in mehreren Achsen, sowie die uni- und bidirektionale Wiederholgenauigkeit.

Insbesondere bei der Konzeption von kundenspezifischen Lösungen ist es wichtig ein gemeinsames Verständnis für Spezifikationen zu haben, da nur so die Auslegung klar definiert werden kann.

Das hier vorliegende Dokument beschreibt

- welche Messungen durchgeführt und welche Messverfahren angewendet werden,
- welche Normen dabei Berücksichtigung finden,
- wie die aus in den Messungen gewonnen Daten aufbereitet werden,
- wie aus den Daten die Messergebnisse abgeleitet werden und welche Terminologie bei der Beschreibung verwendet wird.

Weiterhin wird ein kurzer Überblick über das Aussehen und den Aufbau der Messprotokolle und der auf den Messprotokollen angegebenen Messergebnisse gegeben.

2 Geltende Normen und Besonderheiten in der Präzisionspositionierung

Die hier beschriebenen Messvorschriften basieren maßgeblich auf der Serie der internationalen ISO 230 Normen, wobei primär die ISO 230-1 (2012-03) und ISO 230-2 (2014-05) Normen relevant sind, sowie auf der amerikanischen ASME B5.54 (2005) Norm. Diese ist in Bezug auf die hier beschriebenen Messungen in großen Teilen identisch zu der ISO 230 Serie.

Ein großer Nachteil der genannten Normen für die Qualifikation in der Mikro- und Nanopositionierung besteht in der Tatsache, dass sie eigentlich für größere Drehmaschinen, Fräsen und ähnliche Produkte konzipiert wurden. Die darin beschriebenen Methoden passen daher nicht in allen Ausführungen und Einzelheiten zur Qualifikation von Produkten, die für die hochpräzise Mikro- und Nanopositionierung hergestellt werden. Wenn die Übertragung der Ideen aus diesen Normen auf die Qualifizierung von PI Produkten nicht unmittelbar möglich war, wurden daher Modifikationen an den in den Normen beschriebenen Messvorschriften vorgenommen.

Die bei PI geltenden Messvorschriften sind also keine direkte Kopie der genannten Normen, sondern beinhalten auch spezifische Anpassung und insbesondere Erweiterungen, mit dem Ziel die Vermessung von Mikro- und Nanopositionierachsen bestmöglich durchzuführen.

PI beteiligt sich aktiv an der aktuellen ASME B5.64 Normungsgruppe, die die Entwicklung eines Messstandards speziell für Mikro- und Nanopositioniersysteme zum Ziel hat.

3 Grundlegende Durchführung der Messungen und verwendete Messmittel

3.1 Allgemeine Messprozedur

Die von PI hergestellten Positionierachsen werden mit einem definierten Stellweg konzipiert und spezifiziert.

Definitionen: Der Stellweg ist derjenige Weg innerhalb dessen Positionen über den Controller gesteuert angefahren werden können. Der Messweg liegt innerhalb dieses Stellwegs, oder entspricht maximal dem Stellweg. Die jeweiligen Endpunkte des Messwegs werden immer unidirektional angefahren. Alle anderen Messpunkte werden bidirektional angefahren. Dabei bezeichnet „unidirektional“ jeweils eine Messreihe, bei der das Anfahren der Zielposition immer in der gleichen Richtung ausgeführt wurde, „bidirektional“ bezeichnet das Anfahren der Zielposition aus beiden Richtungen (Hin- und Rückrichtung).

Für die Bestimmung einer Messgröße müssen Positionen innerhalb des Stellweges meist bidirektional angefahren und dort Messwerte erfasst werden. Dies ist an den Endpunkten des Stellweges nicht möglich, da diese das Ende des numerisch steuerbaren Bereiches darstellen und dort die Positionierung nur aus einer Richtung kommend möglich ist. Der sogenannte bidirektionale Messweg schließt die Endpunkte aus und ist somit immer etwas kürzer als der gesamte Messweg.

Die Daten, die an den Endpunkten des Messwegs unidirektional gemessen werden, werden nur für Bestimmung ausgewählter Messgrößen verwendet. Beispielsweise wird daraus der Hub bestimmt, der sicherstellt, dass die Positionierachse auch über den spezifizierten Weg verfahren werden kann.

Die Positionen, an denen innerhalb des Messwegs Messdaten aufgenommen werden, werden Zielposition P_i genannt. Standardmäßig werden immer die Zielpositionen an den Messpunkten an den Enden des Messwegs vermessen (zwei Punkte) und zusätzlich 18 äquidistant verteilte Punkte innerhalb des Messwegs, was zu insgesamt 20 Zielpositionen führt.

Diese Zielpositionen werden für die Aufnahme der Messdaten mäanderförmig abgefahren (siehe Abbildung 1) und die Positionsdaten mit einem geeigneten Messmittel erfasst. Der gesamte bidirektionale Zyklus wird standardmäßig fünfmal abgefahren, so dass entsprechend fünf Sätze von unidirektionalen Messpunkten in beiden Richtungen aufgenommen werden.

Die gesamte Messung wird dabei als statische Messung ausgeführt. Das bedeutet, dass eine Zielposition angefahren wird, die bewegte Plattform dort zum Stillstand kommt und erst dann die Messdaten mit dem entsprechenden Messmittel aufgenommen werden.

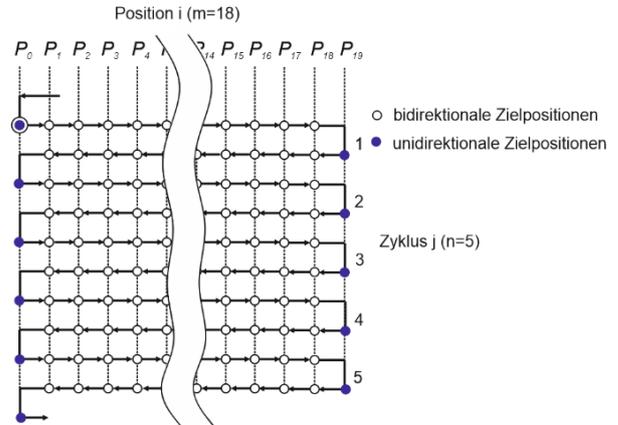


Abb. 1 Exemplarische Darstellung des Zyklus innerhalb dessen die Messdaten erfasst werden.

Aus diesen Messungen wird für jede einzelne angefahrne Zielposition die Positionsabweichung berechnet. Diese Positionsabweichungen $x_{ij} \uparrow$ oder $x_{ij} \downarrow$ entsprechen dann der Differenz der aktuellen, erreichten Istposition P_{ij} und der kommandierten Zielposition P_i . Die entsprechende Positionsabweichung wird für jeden Zyklus j an der Zielposition i berechnet:

$$x_{ij} = P_{ij} - P_i$$

Die Symbole \uparrow und \downarrow kennzeichnen dabei die Richtung, aus der die Zielposition angefahren wurde.

3.2 Messmittel

Die Erfassung der Messdaten erfolgt zumeist mit Interferometern zur Bestimmung der linearen Auslenkungen und Autokollimatoren zur Bestimmung der Winkelabweichung.

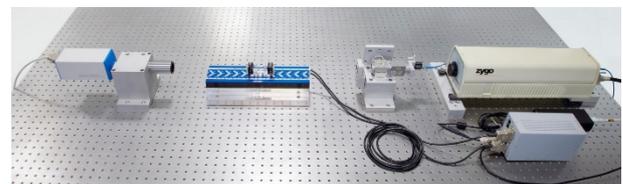


Abb. 2 Typischer Messaufbau, von links: Autokollimator zur Messung von Winkelabweichungen, Positionierachse mit Aufnahme zweier Reflektorspiegel, Interferometeraufbau zur Messung der Auslenkung.

In Abbildung 2 ist ein solcher Messaufbau gezeigt. Aus einer Richtung wird mit einem Interferometer gegen die zu untersuchende Achse gemessen, um die lineare Auslenkung zu bestimmen, aus der gegenüberliegenden Richtung gleichzeitig mit einem Autokollimator, um zeitgleich die Winkelabweichungen zu bestimmen. Die Positionierachse ist entsprechend mit zwei Reflektorspiegeln ausgestattet, gegen die mit dem Interferometer, bzw. Autokollimator gemessen wird. Die bei PI verwendeten Messmittel werden im Whitepaper PI-WP4011D-Messtechnik-Messumgebung.pdf (So misst PI - Teil I) genauer beschrieben.

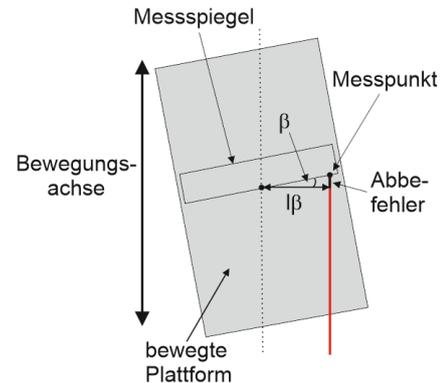


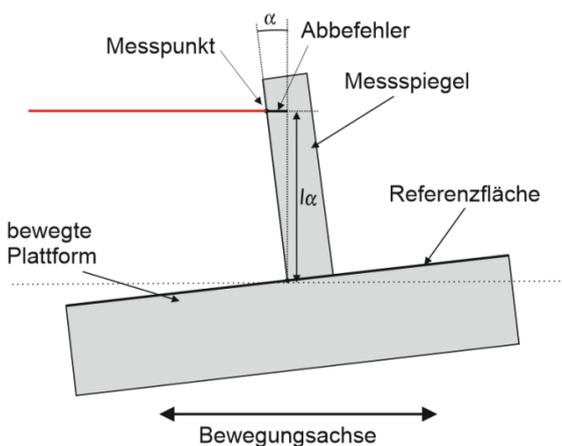
Abb. 3 Abbefehler für die beiden Winkel α , β : rot = Messstrahl, l_α und l_β beschreiben die Abstände zu den Achsen bzgl. des Messpunkts des Interferometers. Der Punkt, auf den korrigiert wird, liegt auf der Oberfläche der Bewegungsplattform.

3.3 Korrektur der Rohdaten

3.3.1 Korrektur des Abbefehlers

Ein Abbefehler bedeutet, dass sich aus einem Winkelfehler ein Fehler in der Linearmessung (z.B. der Positioniergenauigkeit) ergibt.

Dies ist in Abbildung 3 bildlich dargestellt: Durch eine Verkipfung der bewegten Plattform ergibt sich ein Winkelfehler des Messspiegels bezüglich des Interferometerstrahls. Die Auswirkung auf den linearen Messwert ist abhängig vom Abstand des Spiegels zur Plattform. Es resultiert also ein Fehler im Messwert, der durch eine entsprechende Korrektur berücksichtigt und in den Daten bereinigt werden kann.



Je nach Aufbau des Messmittels relativ zur bewegten Plattform kann ein Abbefehler in einer oder in zwei Richtungen existieren.

Für eine Korrektur werden die Messwerte der Linearmessung mithilfe der mittels des Autokollimators gemessenen Winkelangaben verrechnet. Der Abstand des bewegten Spiegels in Relation zur Oberfläche der Bewegungsplattform bestimmt und für die Berechnung verwendet. Dieser Abstand wird auch im Messprotokoll angegeben. Aus dem Messprotokoll geht auch hervor, ob eine Abbekorrektur der Messdaten durchgeführt wurde oder nicht.

Bei PI werden Winkel und Linearmessung getrennt voneinander gemessen. Dadurch können die Fehler voneinander separiert und lineare und Winkelfehler getrennt voneinander angegeben werden.

Wenn bei der Vermessung die Abbefehlerkorrektur durchgeführt wurde, wird jeweils die Oberfläche der bewegten Plattform als Referenzfläche herangezogen, bzw. auf diese Oberfläche zurückgerechnet. Mit Hilfe dieser Information kann auch für Punkte in beliebigen Abständen in Bezug auf die Plattform ein resultierender Positionierungsfehler berechnet werden.

3.3.2 Korrektur thermischer Drift

Der Einfluss thermischer Schwankungen kann nicht immer vollständig durch eine Kontrolle der Umgebungsbedingungen kompensiert werden. Das ist insbesondere bei Positionierachsen mit Auflösungen und Genauigkeiten bis in den Sub-

Nanometerbereich der Fall. Schon kleinste Temperaturänderungen während der Messung können hier durch thermische Ausdehnungen des Messaufbaus oder des Messmittels zu Positionsänderungen führen. Auch Verspannungen im Messaufbau und damit einhergehende Relaxationsprozesse führen zu solchen Positionsänderungen. Wenn höchste Genauigkeiten gefordert sind können solche Effekte die Messergebnisse massiv beeinflussen. Daher kann es notwendig sein, diese thermischen Effekte zu korrigieren.

Die Korrektur der Messdaten erfolgt unter Voraussetzung der folgenden Annahmen:

- Die zu untersuchende Positionierachse selbst ändert sich im Verlaufe der Zeit nicht, abgesehen von den mechanischen Veränderungen die durch die Temperaturänderungen hervorgerufen werden.
- Bei stabiler Temperatur würde der erste angefahrne Messpunkt immer an der identischen Position gemessen.
- Die Temperaturdrift ist nicht positions-, sondern zeitabhängig.

Zur Korrektur werden die jeweils ersten Messpunkte von aufeinander folgenden Wiederholungen durch eine Gerade (zeitlich) verbunden und diese Gerade von den Messdaten einer Wiederholung abgezogen. Damit kann eine thermische Drift kompensiert werden.

Aus dem Messprotokoll geht jeweils hervor, ob eine Korrektur der thermischen Drift durchgeführt wurde.

3.3.3 Lineare Korrektur der Rohdaten

Wenn für eine Auswertung nur die Abweichungen von einem idealen linearen Verlauf von Interesse sind, so werden die Rohdaten zunächst linear korrigiert. Das bedeutet es wird von den gemessenen Positionsabweichungen x_{ij} in Relation zu den kommandierten Zielpositionen P_i eine Regressionsgerade abgezogen. Diese wird nach der Methode der kleinsten Quadrate berechnet.

Aus dem Messprotokoll geht jeweils hervor, ob eine lineare Korrektur durchgeführt wurde.

4 Datenanalyse

Hier werden die Berechnungsvorschriften mit den entsprechenden Berechnungsformeln zur Auswertung der gewonnenen Messdaten vorgestellt.

4.1 Basisdaten für die Positionsabweichung

Zunächst werden die unidirektionalen Positionsabweichungen an jeder gemessenen Zielposition für beide Richtungen $x_i \uparrow$ und $x_i \downarrow$ bestimmt. Daraus berechnet sich jeweils der Mittelwert der Positionsabweichungen $\bar{x}_i \uparrow$ und $\bar{x}_i \downarrow$ für beide Richtungen an jeder Einzelposition:

$$\bar{x}_i \uparrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \uparrow$$

und

$$\bar{x}_i \downarrow = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{ij} \downarrow$$

Aus diesen mittleren Positionsabweichungen an den Punkten $\bar{x}_i \uparrow$ und $\bar{x}_i \downarrow$, die nur die beiden Einzelrichtungen (Hin- und Rückrichtung) bewerten, wird dann der Mittelwert bestimmt. Das ist die gemittelte bidirektionale Positionsabweichung an jeder Einzelposition $\bar{\bar{x}}_i$:

$$\bar{\bar{x}}_i = \frac{\bar{x}_i \uparrow + \bar{x}_i \downarrow}{2}$$

Mit diesen berechneten Werten kann man eine Mittelwertkurve zeichnen, die die mittlere Abweichung der Achse über den gesamten Stellweg zeigt (siehe Abbildung 4).

Die Mittelwerte zeigen die systematische Abweichung. Weitere Kenngrößen einer Positionierachse sind auf statistische Abweichungen zurückzuführen. Dazu wird die Standardabweichung an den entsprechenden Zielpositionen P_i jeweils getrennt für Hin- und Rückweg ermittelt. Dies erfolgt gemäß den Formeln

$$s_i \uparrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_i \uparrow)^2}$$

und

$$s_i \downarrow = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_i \downarrow)^2}$$

Diese fünf Datensätze zusammen geben einen guten Überblick, wie sich die Positionierachse über den Messweg verhält und wie die statistischen Abweichungen aussehen. Abbildung 4 zeigt exemplarisch alle Daten im Überblick. Auf dieser Basis können weitere Größen berechnet werden.

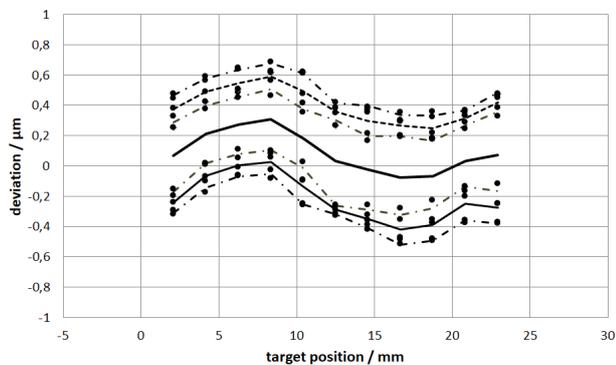


Abb. 4 Veranschaulichung der Positionsabweichungen einer Achse in Hin- und Rückrichtung

4.2 Die gemittelte bidirektionale Positionsabweichung M

Die gemittelte bidirektionale Positionsabweichung M ist die Differenz zwischen dem Maximal- und dem Minimalwert der gemittelten bidirektionalen Positionsabweichungen an den Punkten \bar{x}_i

$$M = \max(\bar{x}_i) - \min(\bar{x}_i)$$

Die gemittelte bidirektionale Positionsabweichung M ist die maximale Abweichung (Spitze-Spitze) der Mittelwertkurve wie sie oben beschrieben wurde, also die mittlere Positionsabweichung der Achse.

Diese ist in Abbildung 5 in Rot veranschaulicht.

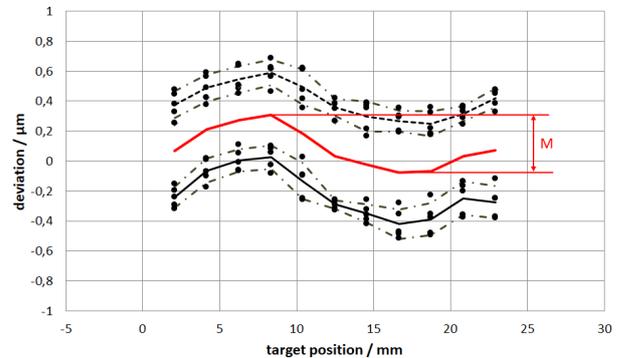


Abb. 5 Veranschaulichung der gemittelten bidirektionalen Positionsabweichung M

Wird bei der Berechnung von M von den Rohdaten noch eine Korrekturgerade (siehe 3.3.3) abgezogen, so bezeichnet man diesen Wert als M_L .

4.3 Das Umkehrspiel B

Um ein Maß dafür zu bekommen wie groß der Fehler zwischen der Positionierung in Hin- und Rückrichtung ist, wird das maximale Umkehrspiel der Positionierung B berechnet. Es ist betragsmäßig die maximale Abweichung zwischen Hin- und Rückweg

$$B = \max [|\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow|]$$

Dies ist in Abbildung 6 in Rot veranschaulicht.

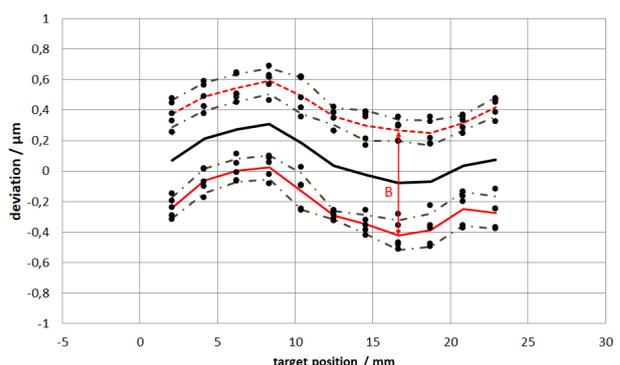


Abb. 6 Veranschaulichung des maximalen Umkehrspiels der Positionierung B

Daraus kann auch ein mittleres Umkehrspiel bestimmt werden. Es macht eine Aussage darüber wie groß die mittlere Abweichung zwischen Hin- und Rückweg ist. Zur Bestimmung des mittleren Umkehrspiels der Positionierung \bar{B} wird der Betrag des Mittelwerts des Umkehrspiels an allen Einzelpositionen bestimmt:

$$\bar{B} = \left| \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m (\bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow) \right|$$

Das Umkehrspiel B sagt aus, wie sich die Positionierachse bei Richtungsumkehr verhält.

4.4 Unidirektionale und bidirektionale Wiederholgenauigkeit R

Ein weiteres wichtiges Merkmal einer Positioniereinrichtung ist die Wiederholgenauigkeit.

Zur Berechnung der Wiederholgenauigkeiten wird zuerst die bidirektionale Wiederholgenauigkeit R_i der Positionierung an einer Position berechnet. Diese wird berechnet gemäß

$$R_i = \max[s_i \uparrow + s_i \downarrow + |B_i|; 2s_i \uparrow; 2s_i \downarrow]$$

mit

$$B_i = \bar{x}_i \uparrow - \bar{x}_i \downarrow$$

Die bidirektionale Wiederholgenauigkeit sagt aus, wie „gut“ jede einzelne Zielposition beim Anfahren aus unterschiedlichen Richtungen immer wieder „getroffen“ wird.

Die maximale bidirektionale Wiederholgenauigkeit ergibt sich entsprechend als der Maximalwert der Wiederholgenauigkeiten an den Zielpositionen:

$$R = \max [R_i]$$

Dies ist in Abbildung 7 in Rot veranschaulicht.

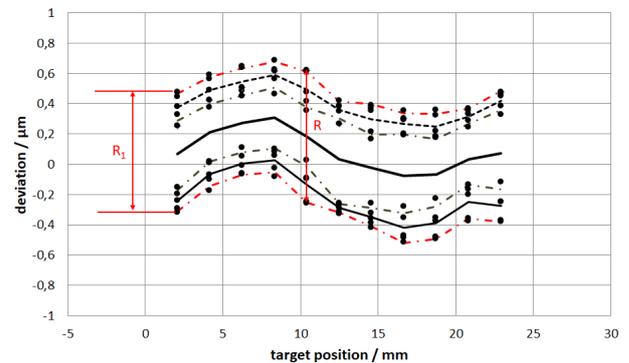


Abb. 7 Veranschaulichung der maximalen bidirektionalen Wiederholgenauigkeit R, sowie beispielhaft R_1 an der ersten Zielposition

Die maximale unidirektionale Wiederholgenauigkeit der Positionierung $R \downarrow \uparrow$, ist der Maximalwert der Standardabweichungen der unidirektionalen Wiederholgenauigkeit einer Positionierachse:

$$R \downarrow \uparrow = \pm \max [s_i \uparrow; s_i \downarrow]$$

Die maximale unidirektionale Wiederholgenauigkeit sagt aus, wie groß die maximale Abweichung an einer beliebigen Zielposition sein kann, beim Anfahren aus der jeweils gleichen Richtung.

Der Wert der unidirektionalen Wiederholgenauigkeit der Positionierung wird als \pm Wert angegeben.

Die gemittelte unidirektionale Wiederholgenauigkeit der Positionierung $\bar{R} \downarrow \uparrow$, wird berechnet gemäß

$$\bar{R} \downarrow \uparrow = \pm \frac{\frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i \uparrow + \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m s_i \downarrow}{2}$$

Sie entspricht dem Mittelwert der unidirektionalen Wiederholgenauigkeiten in beiden Richtungen.

4.5 Die bidirektionale Positioniergenauigkeit A

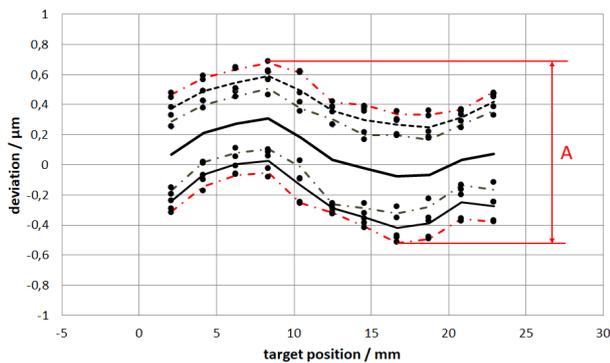
Die bidirektionale Positioniergenauigkeit A ist die Messgröße, die alle auftretenden Fehler vereint und damit den maximalen Fehler beinhaltet, der bei der Positionierung entstehen kann.

Die bidirektionale Positioniergenauigkeit ist die Spanne, die aus der Kombination der bidirektionalen systematischen Abweichungen zusammen mit den statistischen Abweichungen berechnet werden:

$$A = \max [\bar{x}_i \uparrow + s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow + s_i \downarrow] - \min [\bar{x}_i \uparrow - s_i \uparrow; \bar{x}_i \downarrow - s_i \downarrow]$$

Dies ist in Abbildung 8 in Rot veranschaulicht.

Abb. 8 Veranschaulichung der bidirektionalen Positioniergenauigkeit A



Um die Konsistenz zur bidirektionalen Wiederholgenauigkeit zu wahren, wird die Berechnung der bidirektionalen Positioniergenauigkeit nur mit der einfachen und nicht mit der doppelten Standardabweichung durchgeführt.

4.6 Der Hub S

Die Vermessung einer Positionierachse soll nachweisen, dass der gesamte Stellweg abgefahren werden kann, das heißt, dass die zu vermessende Achse jede numerisch gesteuerte Zielposition erreichen kann, wenn der Messweg gleich dem Stellweg gewählt wurde. Dazu werden die Mittelwerte der Positionen an den Endpunkten des Messweges ermittelt. Die Differenz dieser Mittelwerte ist der Hub S der Positionierachse.

4.7 Die Linearität L

Die Linearität beschreibt die maximale Abweichung der Messwerte von einer idealen Gerade.

Zur Berechnung der Linearität werden die gemessenen Werte an den Zielpositionen P_0 bis P_{m+1} verwendet. Von den berechneten Abweichungen wird eine Gerade, die durch die Endpunkte des Messweges geht, abgezogen. Diese berechneten Fehler werden dann mit xl_{ij} bezeichnet.

Die Linearität der Positionierung L ist dann entsprechend

$$L = \max \left[\left| \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n xl_{ij} \uparrow \right| \right]$$

Dies ist in Abbildung 9 in Rot veranschaulicht.

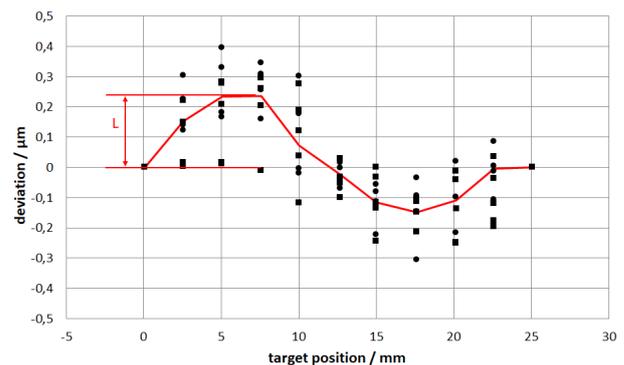


Abb. 9 Veranschaulichung der Bestimmung der Linearität der Positionierung L

Abgeleitet davon kann die prozentuale Linearität L_p (in Prozent) berechnet werden, wobei L_m den Messweg bezeichnet.

$$L_p = 100 \cdot \frac{L}{L_m}$$

4.8 Die Hysterese H

Die Hysterese H einer Achse ist die maximale Differenz zwischen Hin- und Rückrichtung an allen Zielpositionen:

$$H = \max \left[\left| \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{l_{ij}} \uparrow - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n x_{l_{ij}} \downarrow \right| \right]$$

Die Berechnung von H erfolgt analog zur Berechnung des Umkehrspiels B .

Die prozentuale Hysterese H_p (in Prozent) kann entsprechend berechnet werden

$$H_p = 100 \cdot \frac{H}{L_m}$$

5 Anhang 1: Verwendete Koordinatensysteme und Bezeichnung der Bewegungsachsen

PI verwendet zur Bezeichnung der Bewegungsachsen standardmäßig ein rechtshändiges Koordinatensystem. Die linearen Achsen sind dabei mit X, Y, Z und die Rotationsachsen mit A, B, C gekennzeichnet. Die Rotationsachsen sind entsprechend den linearen Achsen zugeordnet, beispielsweise ist A die Rotationsachse um die lineare Achse X.

Dort wo es zur Verdeutlichung nötig ist, sind die Rotationsachsen zusätzlich noch mit einem expliziten Verweis auf die Linearachsen gekennzeichnet, zum Beispiel A (rot X). Das Koordinatensystem ist in Abbildung 10 zur Veranschaulichung noch einmal gezeichnet.

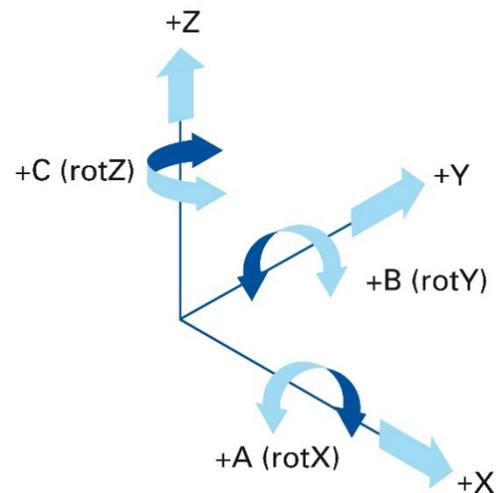


Abb. 10 Rechtshändiges Koordinatensystem

6 Anhang 2: Mechanisches Übersprechen („Crosstalk“) einer Bewegung und Bezeichnung der Fehler

Bei mechanischen Positionierachsen ist zumeist nicht nur der Positionsfehler in der Bewegungsrichtung relevant, sondern auch ein mechanisches Übersprechen einer linearen Bewegung in die weiteren linearen und rotatorischen Richtungen. Um dieses mechanische Übersprechen zu ermitteln, werden lineare Messungen orthogonal zur Bewegungsrichtung und entsprechende Winkelmessungen ausgeführt. Hierbei wird eine Messung gemäß dem Bewegungsprofil der in Kapitel 3.1 beschriebenen Messprozedur durchgeführt. Zur Analyse der Daten werden dieselben Methoden wie für die Positionsdaten herangezogen, es wird jedoch kein Abzug der Istposition von der Zielposition ausgeführt, sondern es werden die Rohdaten verwendet.

Die Geradheit („Straightness“) und die Ebenheit („Flatness“) werden berechnet aus der gemittelten bidirektionalen Positionsabweichung mit einer zuvor ausgeführten linearen Korrektur M_L .

Hierbei muss noch beachtet werden, dass sich am funktionalen Punkt unter Umständen die rotatorischen Fehler in translatorische Fehler übersetzen, abhängig davon wo der Nullpunkt der parasitären Verkipfung liegt.

Die Fehler selbst folgen einer eindeutigen Nomenklatur. Die verschiedenen messbaren Fehler für lineare Bewegungen werden in Abbildung 11 veranschaulicht.

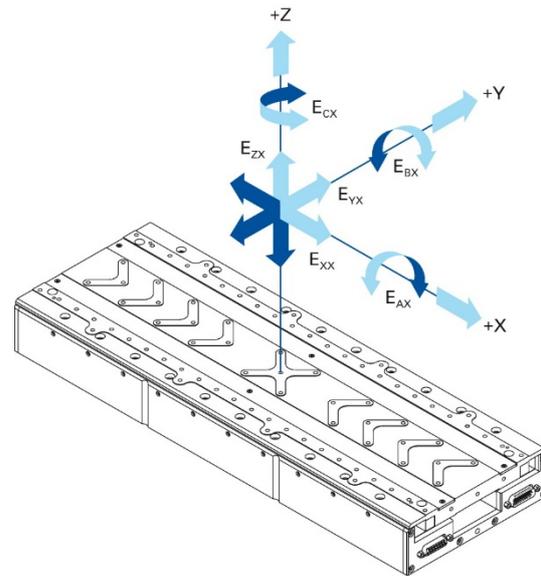


Abb. 11 Nomenklatur der Fehler in den verschiedenen Achsen bei einer linearen Bewegung. (Abbildung angelehnt an ISO 230-1:2012)

Die Nomenklatur dieser unterschiedlichen Fehler folgt bei PI damit dem folgenden Muster:

$E_{<Bezeichnung\ der\ Achse,\ in\ der\ der\ Fehler\ gemessen\ wird><kommandierte\ Achse>}$

X Achse der kommandierten linearen Bewegung

E_{AX} Winkelabweichung um die X-Achse (Rollen, „Roll“)

E_{BX} Winkelabweichung um die Y-Achse (Nicken, „Pitch“)

E_{CX} Winkelabweichung um die Z-Achse (Gieren, „Yaw“)

E_{XX} Positionsabweichung der X-Achse

E_{XXL} Positionsabweichung der X-Achse, minus Regressionsgerade

E_{YX} Geradheitsabweichung in Richtung der Y-Achse (Geradheit)

E_{ZX} Geradheitsabweichung in Richtung der Z-Achse (Ebenheit)

Werden zwei Achsen bewegt (z.B. X und Y), kann es weiterhin eine kombinierte parasitäre lineare Bewegung in der Z-Achse geben. Dieser Fehler wird als Ebenenfehler („out-of-plane error“) bezeichnet.

Analoge Fehler sind auch bei rotatorischen Positionierachsen zu finden. Entsprechend zeigt Abbildung 12 die verschiedenen messbaren Fehler für rotatorische Bewegungen.

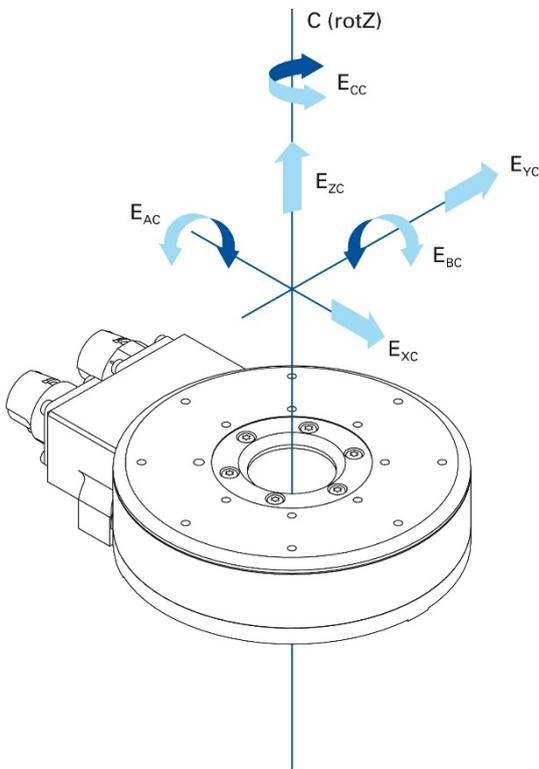


Abb. 12 Nomenklatur der Fehler in den verschiedenen Achsen bei einer rotatorischen Bewegung (Abbildung angelehnt an ISO 230-1:2012)

E_{XC} Radiale Abweichung in Richtung der X-Achse
 E_{YC} Radiale Abweichung in Richtung der Y-Achse
 E_{ZC} Axiale Abweichung von C

E_{AC} Neigungsabweichung um die X-Achse
 E_{BC} Neigungsabweichung um die Y-Achse
 E_{CC} Winkel Positionsabweichung von C

Ein kombinierter rotatorischer Fehler, also ein radiales Auswandern in der Bewegung wird folgendermaßen bezeichnet:

E_{XYC} Radiale Abweichung von C

Entsprechend wird eine kombinierte Neigungsabweichung bezeichnet:

E_{ABC} Neigungsabweichung von C

7 Anhang 3: Beispiel eines Messprotokolls

Die aus den Messungen und Berechnungen gewonnenen Daten können auf einem Messprotokoll ausgegeben und zur Verfügung gestellt werden. Ein solches Protokoll ist beispielhaft in Abbildung 13 gezeigt. Das Protokoll unterteilt sich dabei in verschiedene Bereiche:

1. Allgemeine Beschreibung, z.B. der Systemkomponenten und Parameter
2. Beschreibung zur Messung, z.B. Achsen, Messweg, Messparameter, Korrekturen
3. Messergebnisse z.B. der linearen Abweichungen
4. Messergebnisse z.B. der Winkelabweichungen
5. Grafische Darstellung der Messergebnisse

Die Berechnungsvorschriften zu den in 3. und 4. angegebenen Messwerten sind in Abschnitt 4 beschrieben und können entsprechend aus den gegebenen Formeln abgeleitet werden. Dies gilt sowohl für die linearen Abweichungen als auch für die Winkelabweichungen.

Test Protocol for Linear Stage H-811K097_AXIS_Z

File: H-811K097_AXIS_Z_118069051_EZZ_FullRange_Vergleich_ztz.pdf
 Protocol no.: FM 7.5-79_A1
 2020-05-14 10:07:20, Script version: 1.20.20.0, Signed on 2020-05-13 15:31:23 for Framework 1.20.20.0

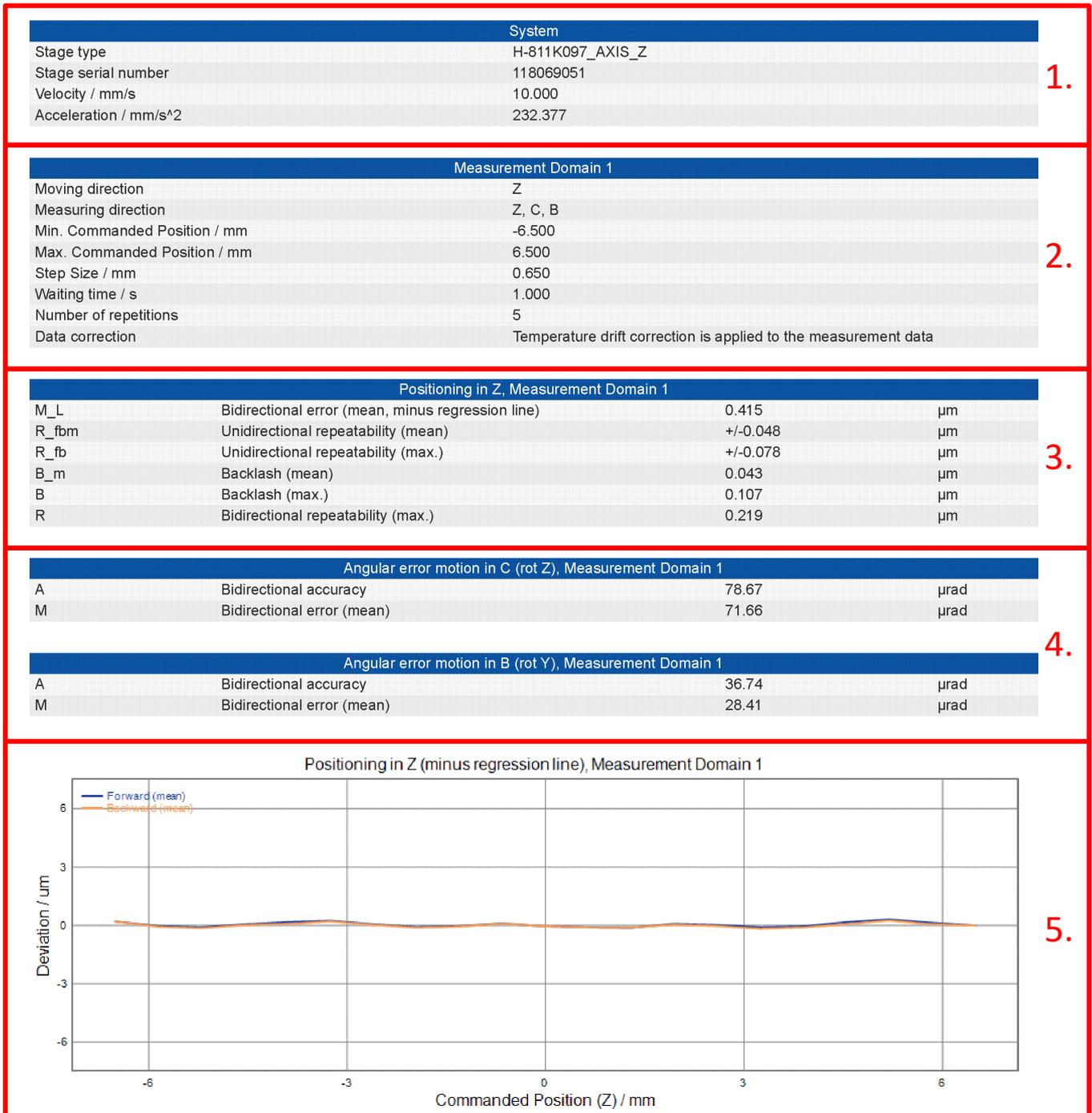


Abb. 13 Beispiel eines Testprotokolls

8 Weitere Dokumente und Links

Whitepaper So misst PI – Teil II

https://www.physikinstrumente.de/fileadmin/user_upload/physik_instrumente/files/WP/PI-WP4011D-Messtechnik-Messumgebung.pdf

ISO 230-1

<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nwm/normen/wdc-beuth:din21:151552174>

ISO 230-2

<https://www.din.de/de/mitwirken/normenausschuesse/nwm/normen/wdc-beuth:din21:206720855>

ASME B.5.54 – 2005

<https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/b5-54-methods-performance-evaluation-computer-numerically-controlled-machining-centers>

Autoren



Dr. Axel Grabowski, Leiter Entwicklung Sensorik



Peter Diez, Senior Industrial Engineer in der Gruppe Mess- und Fertigungstechnologie



Birgit Schulze, Produkt Marketing Managerin für Parallelkinematiken

Über PI

Physik Instrumente (PI), gegründet 1970, ist seit vielen Jahren Markt- und Technologieführer für hochpräzise Positioniertechnik und Piezo-Anwendungen in den Marktsegmenten Halbleiterindustrie, Life Sciences, Photonik und Industrieautomatisierung. In enger Zusammenarbeit mit Kunden aus aller Welt verschieben die rund 1.300 Spezialisten von PI seit 50 Jahren immer wieder die Grenzen des technisch Möglichen und erarbeiten von Grund auf maßgeschneiderte Lösungen. PI Technologien erreichen reproduzierbare Genauigkeiten im Millionstel-Millimeter-Bereich. Mehr als 350 erteilte und angemeldete Patente unterstreichen den Innovationsanspruch des Unternehmens.

PI entwickelt, fertigt und qualifiziert alle Kerntechnologien im eigenen Haus und setzt damit immer neue Maßstäbe für präzises Positionieren: piezokeramische Flächenwandler und Aktoren, elektromagnetische Antriebe sowie Sensoren mit Nanometer Auflösung. Als Mehrheitseigentümer der ACS Motion Control ist PI darüber hinaus ein weltweit führender Hersteller modularer Motion-Control-Systeme für mehrachsige Antriebssysteme und entwickelt maßgeschneiderte Komplettsysteme für höchste Präzision und Dynamik bei industriellen Anwendungen.

Mit sechs Fertigungsstandorten sowie 15 Vertriebs- und Servicenerlassungen in Europa, Nordamerika und Asien ist PI überall dort vertreten, wo High-Tech-Lösungen entwickelt und hergestellt werden.