

## I           **Meßsoftware für statistische Analysen „ZLM-Stat“**

Mit dem Programmteil „ZLM Stat“ können Meßwerte für Position und Winkel eines Meßobjekts aufgenommen und analysiert werden. Es können Weg- und Winkeloptik mit Standardauflösung und erweiterter Auflösung sowie die 2-Meter- und 10-Meter Geradheitsoptik verwendet werden. Das Meßprogramm wird vorrangig dann eingesetzt, wenn mit dem Meßobjekt Positionen mehrmals angefahren werden sollen, um statistische Aussagen über den Positioniervorgang zu erhalten. Gegenüber den Programmteilen „ZLM Position“, „ZLM Winkel statisch“ und „ZLM Geradheit“ besteht der Vorteil dieses Programms in der synchronen Aufnahme von Meßwerten mehrerer Meßachsen eines mehrachsigen Laserwegmeßsystems. Die zu messende Größe und die verwendete Optik läßt sich für jede Achse einzeln wählen.

## I 1 Meßverfahren und Auswerterichtlinien

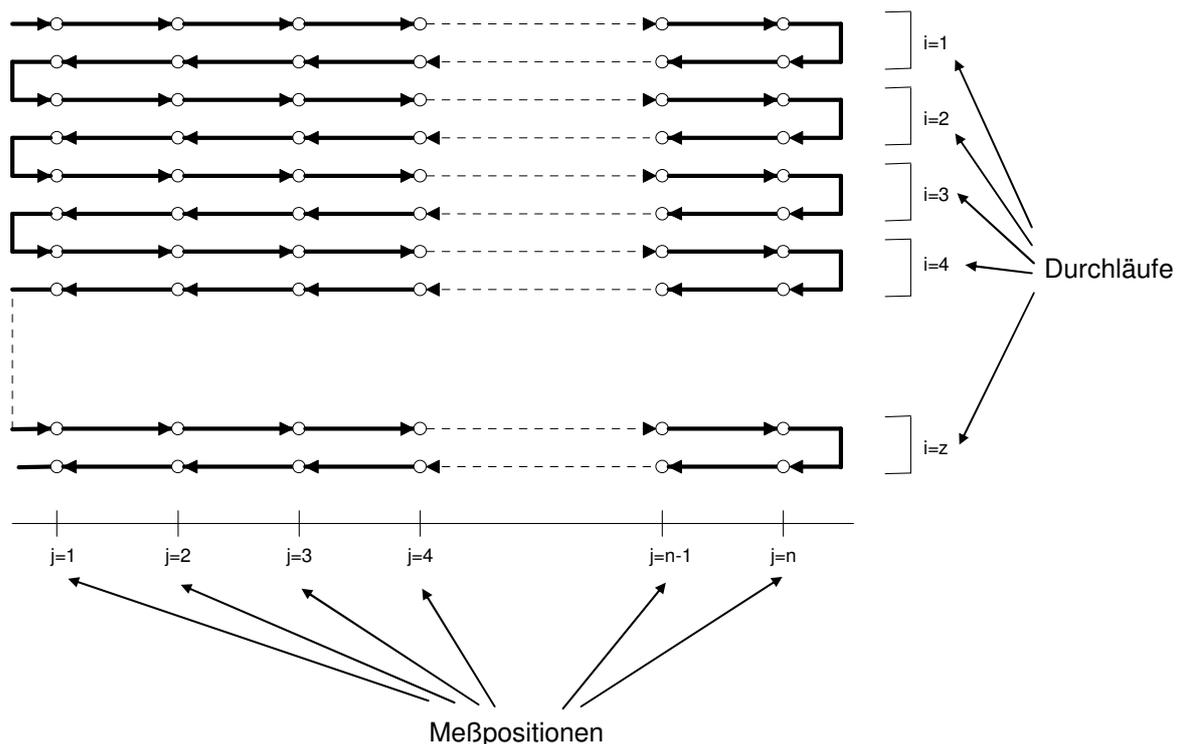
Die Informationen über Positionierverfahren und Auswerterichtlinien, die in diesem Abschnitt gegeben werden, gleichen den Informationen des Abschnitts „G Kalibriersoftware „ZLM Position““. Diese Positionier- und Auswerteverfahren können auch bei der Verwendung mehrerer Meßachsen verwendet werden. Bei den Richtlinien werden statistische Auswerteverfahren nur für Wegmessungen angegeben. Diese Auswerteverfahren lassen sich aber auf rotatorische Meßgrößen und Transversalabweichungen verallgemeinern.

### I 1.1 Positionierverfahren

Um statistische Aussagen über das Positionierverhalten eines Meßobjekts machen zu können, müssen mit dem Meßobjekt mehrere Positionen mehrmals angefahren werden. Von den, in der Praxis verwendeten Positionierverfahren unterstützt das Programm das Linearverfahren, das Pendelschrittverfahren, das Quasipilgerschrittverfahren und das unidirektionale Linearverfahren. Zum besseren Verständnis werden die Positionierfolgen für lineare Messungen beschrieben. Sie lassen sich jedoch auf rotatorische Achsen übertragen und werden vom Programm auch für rotatorische Achsen unterstützt.

#### I 1.1.1 Linearverfahren

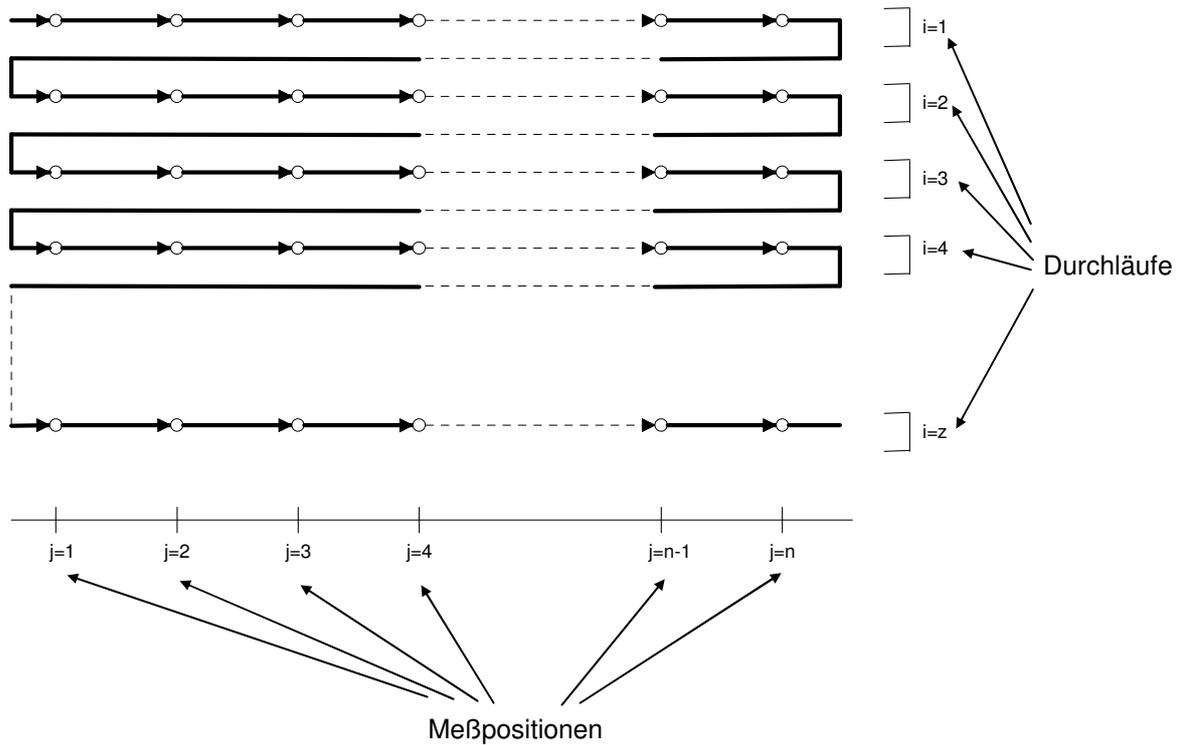
Beim Linearverfahren werden zunächst alle Positionen der Reihe nach in positiver Richtung und anschließend der Reihe nach in negativer Richtung angefahren.



Um zu gewährleisten, daß auch die erste und die letzte Meßposition in jedem Durchlauf aus der richtigen Richtung angefahren werden, muß am Anfang der Messung ein Einfahrweg und am Ende jedes Halbdurchlaufs eine Umkehrschleife gefahren werden.

Dieses Positionierverfahren ist einfach zu programmieren. Bei großen Abständen der Meßpositionen untereinander ist jedoch die Gesamtdauer der Messung groß. Treten während der Messung starke Temperaturänderungen auf, so wirken sich diese sowohl auf die Umkehrspanne als auch auf die Positionsstreuung aus (vgl. Abschnitt I.1.2).

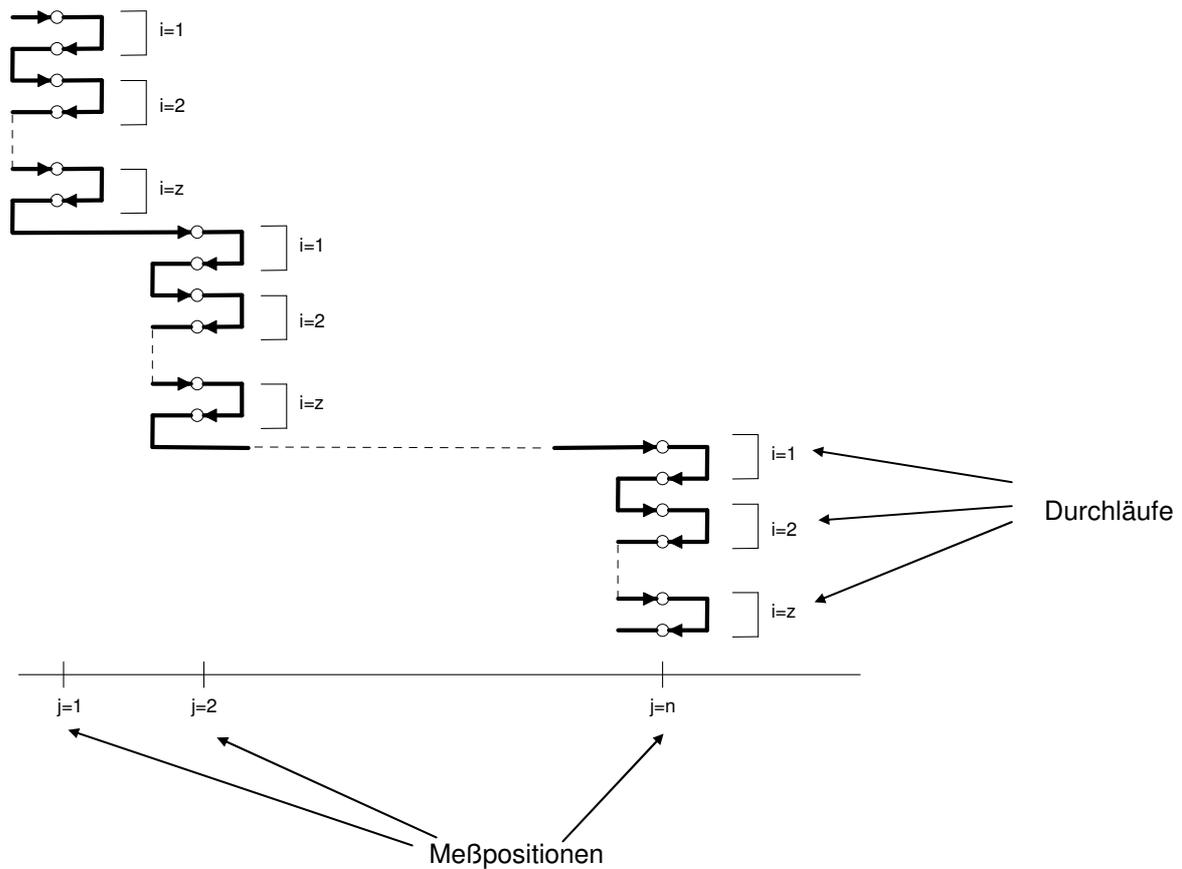
### I 1.1.2 Unidirektionales Linearverfahren



Ist anzunehmen, daß die Unterschiede beim Anfahren in positive, gegenüber dem Anfahren in negative Richtung vernachlässigbar sind (kleine Umkehrspanne), so kann mit dem Programm auch das unidirektionale Linearverfahren verwendet werden.

Im Extremfall kann auch ein Schnelltest mit einem Durchlauf vorgenommen werden. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß die im Abschnitt I.1.2 beschriebenen Auswerterichtlinien der Normungsgremien dieses Positionierverfahren nicht berücksichtigen.

### I 1.1.3 Pendelschrittverfahren

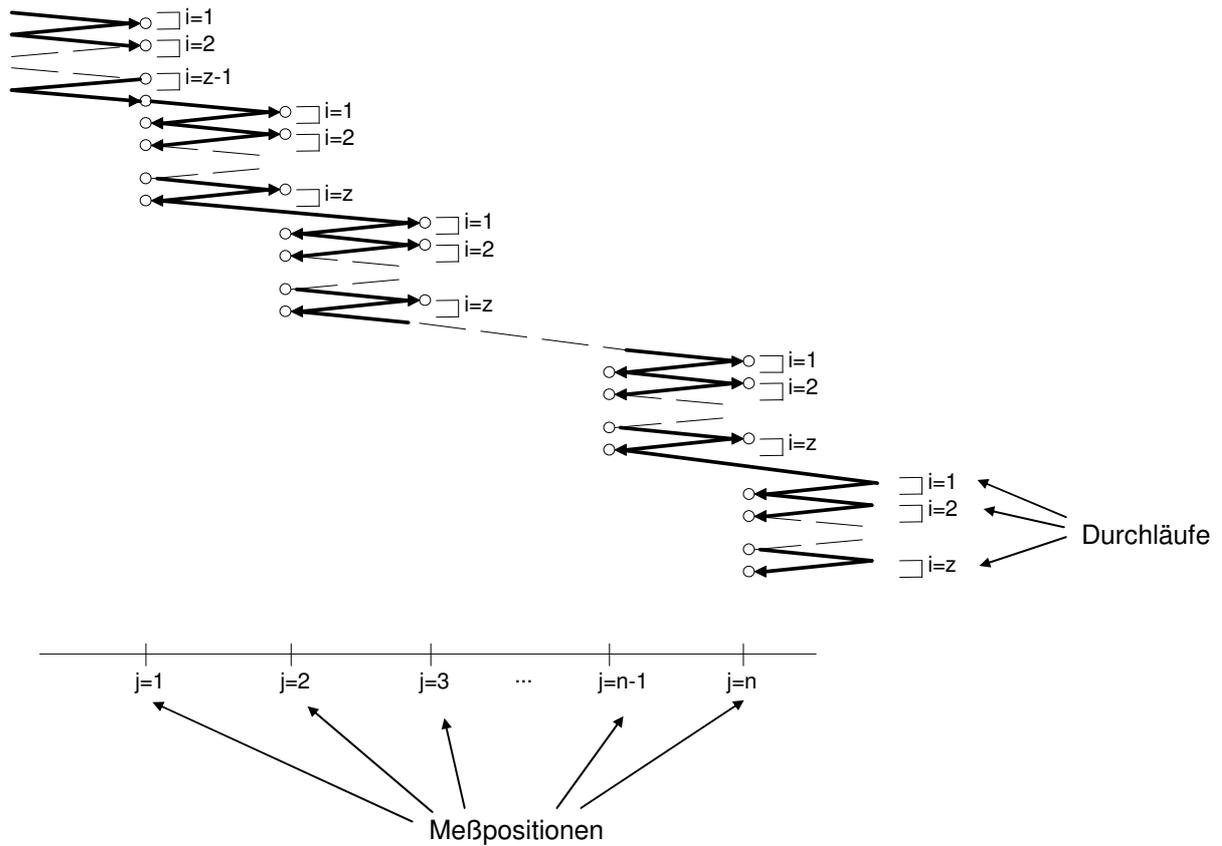


Beim Pendelschrittverfahren wird eine Meßposition abwechselnd in positive und negative Richtung angefahren, bevor zur folgenden Meßposition übergegangen wird.

Bei größeren Abständen zwischen den Meßpositionen ist mit dem Pendelschrittverfahren der kürzeste Gesamtverfahrweg realisierbar.

Starke Temperaturänderungen während der Messung wirken sich weder auf die Umkehrspanne noch auf die Positionsstreuung aus (vgl. Abschnitt I.1.2). Durch die große Zeitdifferenz der Aufnahme der Meßwerte der ersten Meßposition und der Aufnahme der Meßwerte der letzten Meßposition treten thermische und andere Einflüsse während der Messung als systematische Fehler auf.

**I 1.1.4 Quasi-Pilgerschritt-Verfahren**



Beim Quasi-Pilgerschritt-Verfahren wird zunächst die erste Meßposition mehrmals in positiver Richtung angefahren. Anschließend wird abwechselnd die zweite Position in positive und die erste Position in negative Richtung angefahren. Die abwechselnde Positionierung von  $j$ -ter und  $j+1$ -ter Position wird fortgeführt bis die letzte Position in positiver Richtung durchgemessen wurde. Abschließend muß nur noch die letzte Position mehrmals in negative Richtung angefahren werden.

Wie beim Pendelschrittverfahren wirken sich starke Temperaturänderungen während der Messung nicht auf die Umkehrspanne und die Positionsstreuung aus und treten als systematischer Fehler in Erscheinung.

## I.1.2 Auswerterichtlinien

Für die Abnahme von Koordinatenmeßmaschinen und Werkzeugmaschinen haben verschiedene Normungsinstitutionen Richtlinien bzw. Normen herausgegeben.

Das Programm nimmt diese Richtlinien zur Grundlage der statistischen Auswertung.

Die Richtlinien:

- ISO 230,
- VDI/DGQ 3441 und
- NMTBA

wurden für die Abnahme von Werkzeugmaschinen und die Richtlinie VDI/VDE 2617 wurde für die Abnahme von Koordinatenmeßmaschinen herausgegeben.

Die Richtlinien unterscheiden sich vor allem in der Berechnung der Kenngrößen und der graphischen Darstellung der Ergebnisse.

Alle Richtlinien behandeln Positionsmessungen. Die VDI/VDE 2617 umfaßt auch Geradheits- und Winkelmessungen. Für Geradheits- und Winkelmessungen werden jedoch keine statistischen Auswerteverfahren angegeben. Das Programm liefert für Geradheits- und Winkelmessungen Diagramme und Kenngrößen, die stark an den Auswerteverfahren für Positionsmessungen angelehnt sind. In den Übersichten in diesem Abschnitt werden jedoch nur die Auswertformeln angegeben, die in den Richtlinien behandelt werden.

### Ziel der Messung bei Werkzeugmaschinen

Bei Werkzeugmaschinen sollte eine Abschätzung möglich sein, mit welcher Genauigkeit Teile auf dieser Maschine gefertigt werden können.

### Ziel der Messung bei Koordinatenmeßmaschinen

Bei Koordinatenmeßmaschinen soll eine Aussage über die Meßgenauigkeit der Maschine gewonnen werden.

### Ergebnis einer Messung

In den Richtlinien werden Kenngrößen definiert und graphische Darstellungen empfohlen mit denen eine Abschätzung systematischer und zufälliger Abweichungen vom Idealzustand der Maschine möglich ist. Die Software liefert diese Kenngrößen und Diagramme als Meßergebnis.

Bei der Aufnahme der Meßwerte sollte beachtet werden:

- Für jede Maschinenachse von Interesse sollte mindestens eine Linie parallel zur Achse festgelegt werden, auf der Meßpositionen angefahren werden.
- Die Meßpositionen sollten über den gesamten Verfabereich verteilt werden.

Weitere Empfehlungen für die Wahl der Meßpositionen werden von den Richtlinien gegeben.

| Richtlinie   | Mindestanzahl absolut                               | Mindestanzahl je Maßstabelement | Bestimmungsgleichung für Sollpositionen  |
|--------------|---|---------------------------------|--|
| ISO 230      | 5 (bis 1m Meßlänge)<br>5 je Meter (bis 2m Meßlänge) | 1                               | $P_j = N \cdot p \cdot r$<br><br>$P_j$ - Sollposition<br>$N$ - ganze Zahl<br>$r$ - zufälliger Dezimalbruch<br>$p$ - größte periodische Teilung |
| VDI/DGQ 3441 | 10 je Meter + 1<br>(bis 2m Meßlänge)                | 1                               |  |
| VDI/VDE 2617 | 11  | 2                               |  |

Für die Berechnung der Kenngrößen und die graphische Darstellung der Ergebnisse gibt es bei den Richtlinien größere Unterschiede.

Eine Gemeinsamkeit ist jedoch, daß alle Richtlinien einen Satz von Kenngrößen definieren, die getrennt

- systematische Positionsabweichungen,
  - zufällige Positionsabweichungen und
  - summarisch systematische und zufällige Positionsabweichungen
- charakterisieren. Auch den entsprechenden graphischen Darstellungen können diese drei Aspekte der Positionsabweichungen getrennt entnommen werden.

Am Beispiel einer Werkzeugmaschine wird im folgenden versucht, die Bedeutung der Kenngrößen zu verdeutlichen:

#### **Systematische Positionsabweichungen:**

Mit Ausnahme der ISO230 wird eine Kenngröße „**Positionsabweichung**“ definiert.

Wenn auf der Werkzeugmaschine eine gewisse Anzahl von Teilen gefertigt wird, so gibt die „Positionsabweichung“ an, mit welcher Fertigungsabweichung bei den Teilen im Durchschnitt zu rechnen ist.

Mit Ausnahme der NMTBA wird eine Kenngröße „**Umkehrspanne**“ definiert.

Die „Umkehrspanne“ gibt an, mit welchen Auswirkungen im Durchschnitt zu rechnen ist, wenn beim Fertigungsprozeß eine Position statt aus der einen Richtung, nun aus der anderen Richtung angefahren wird.

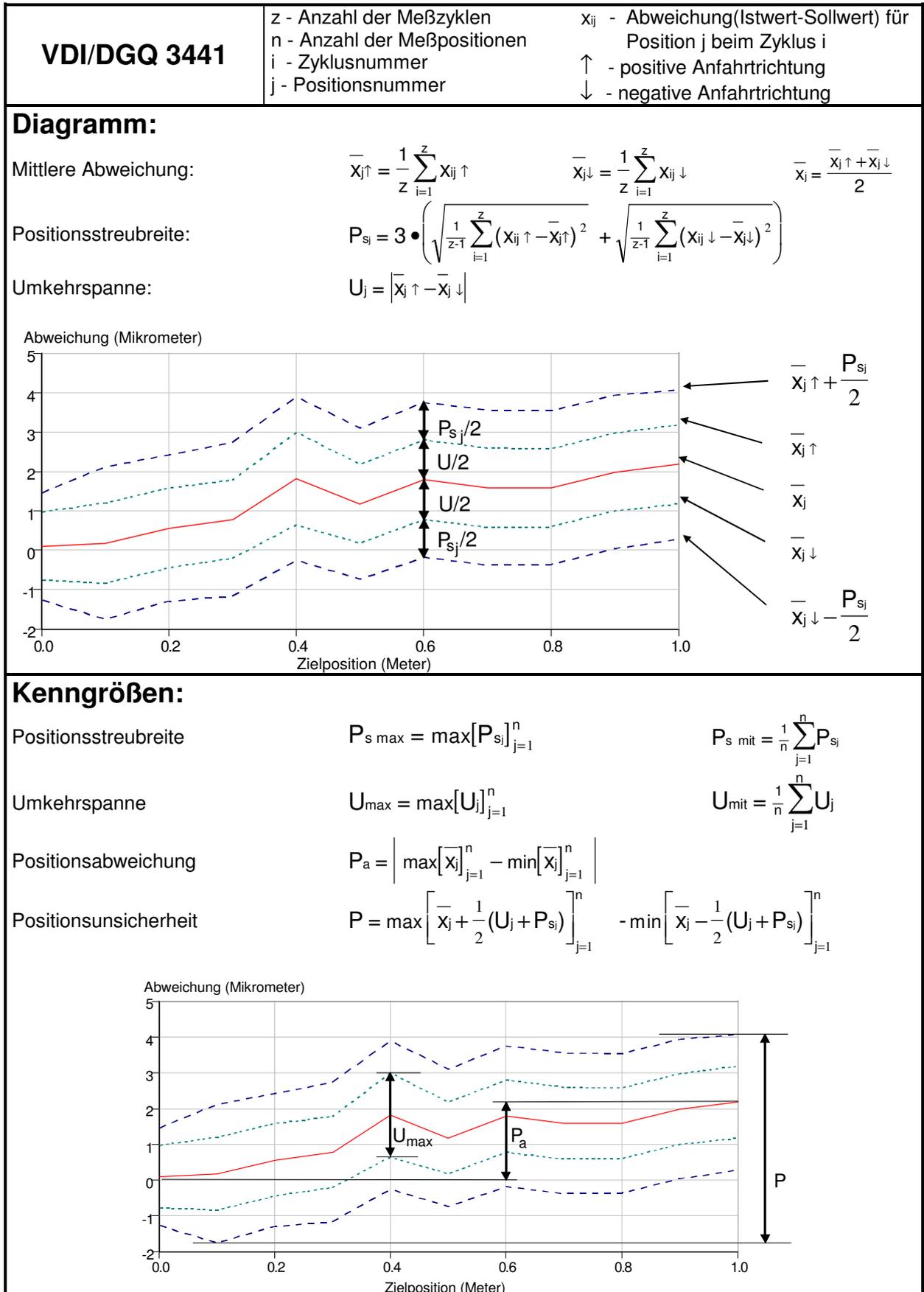
#### **Zufällige Positionsabweichungen:**

Die „**Positionsstreuung**“ gibt an, welche maximalen Unterschiede bei mindestens 99,5% der gefertigten Teile zu erwarten sind. (Eine Ausnahme bildet die VDI/VDE 2617 für Koordinatenmeßmaschinen, bei der die Positionsstreuung für 95% der zu erwartenden Meßwertabweichungen berechnet wird).

#### **Summarische Positionsabweichungen:**

Die „**Positionsunsicherheit**“ gibt an, mit welcher Fertigungsabweichung bei einer 99,5% -igen Ausbeute zu rechnen ist, unabhängig davon, aus welcher Richtung die Positionen angefahren werden.

Den folgenden Übersichten kann entnommen werden, wie die Kenngrößen und die Graphen in den Diagrammen bei den einzelnen Richtlinien berechnet werden.



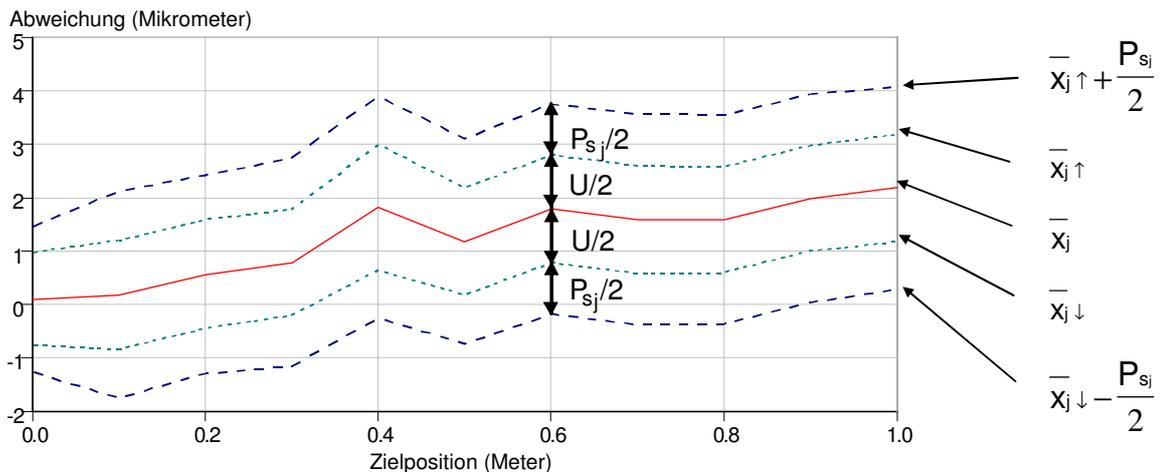
|                     |                              |   |
|---------------------|------------------------------|---|
| <b>VDI/VDE 2617</b> | z - Anzahl der Meßzyklen     | $x_{ij}$ - Abweichung(Istwert-Sollwert) für |
|                     | n - Anzahl der Meßpositionen | Position j beim Zyklus i                    |
|                     | i - Zyklusnummer             | ↑ - positive Anfahrtrichtung                |
|                     | j - Positionsnummer          | ↓ - negative Anfahrtrichtung                |

**Diagramm:**

Mittlere Abweichung:  $\bar{x}_{j\uparrow} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z x_{ij\uparrow}$        $\bar{x}_{j\downarrow} = \frac{1}{z} \sum_{i=1}^z x_{ij\downarrow}$        $\bar{x}_j = \frac{\bar{x}_{j\uparrow} + \bar{x}_{j\downarrow}}{2}$

Positionsstreuung:  $P_{sj} = 2 \cdot \left( \sqrt{\frac{1}{z-1} \sum_{i=1}^z (x_{ij\uparrow} - \bar{x}_{j\uparrow})^2} + \sqrt{\frac{1}{z-1} \sum_{i=1}^z (x_{ij\downarrow} - \bar{x}_{j\downarrow})^2} \right)$

Umkehrspanne:  $U_j = |\bar{x}_{j\uparrow} - \bar{x}_{j\downarrow}|$



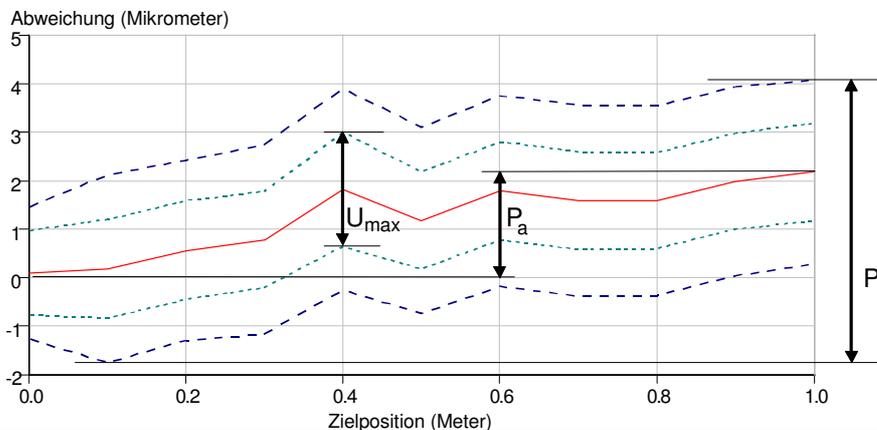
**Kenngößen:**

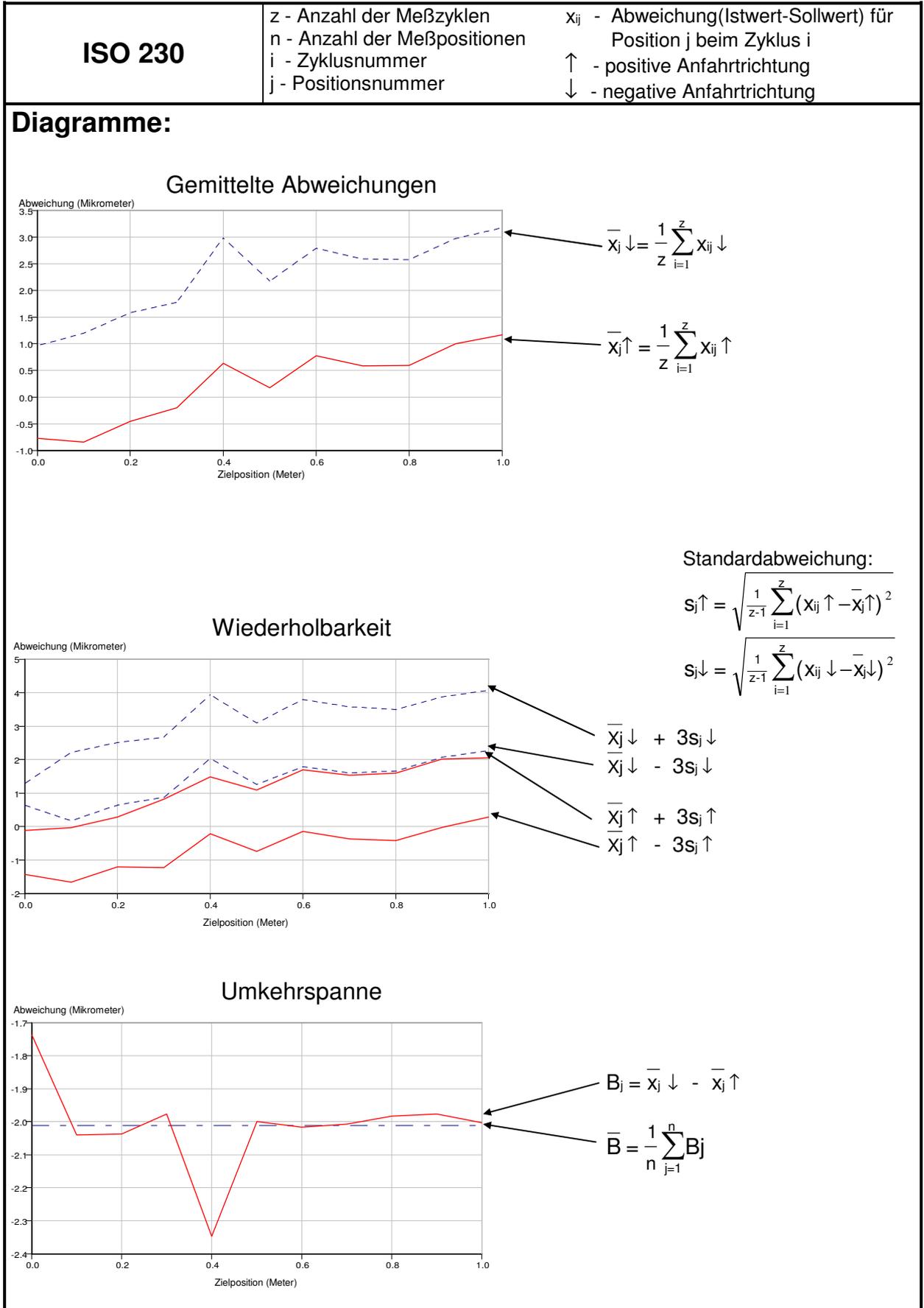
Positionsstreuung:  $P_{s\max} = \max[P_{sj}]_{j=1}^n$        $P_{s\text{mit}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{sj}$

Umkehrspanne:  $U_{\max} = \max[U_j]_{j=1}^n$        $U_{\text{mit}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n U_j$

Positionsabweichung:  $P_a = \left| \max[\bar{x}_j]_{j=1}^n - \min[\bar{x}_j]_{j=1}^n \right|$

Positionsunsicherheit:  $P = \max \left[ \bar{x}_j + \frac{1}{2} (U_j + P_{sj}) \right]_{j=1}^n - \min \left[ \bar{x}_j - \frac{1}{2} (U_j + P_{sj}) \right]_{j=1}^n$





Standardabweichung:

$$s_j \uparrow = \sqrt{\frac{1}{z-1} \sum_{i=1}^z (x_{ij} \uparrow - \bar{x}_j \uparrow)^2}$$

$$s_j \downarrow = \sqrt{\frac{1}{z-1} \sum_{i=1}^z (x_{ij} \downarrow - \bar{x}_j \downarrow)^2}$$

|                |                              |   |
|----------------|------------------------------|---|
| <b>ISO 230</b> | z - Anzahl der Meßzyklen     | $x_{ij}$ - Abweichung(Istwert-Sollwert) für |
|                | n - Anzahl der Meßpositionen | Position j beim Zyklus i                    |
|                | i - Zyklusnummer             | ↑ - positive Anfahrtrichtung                |
|                | j - Positionsnummer          | ↓ - negative Anfahrtrichtung                |

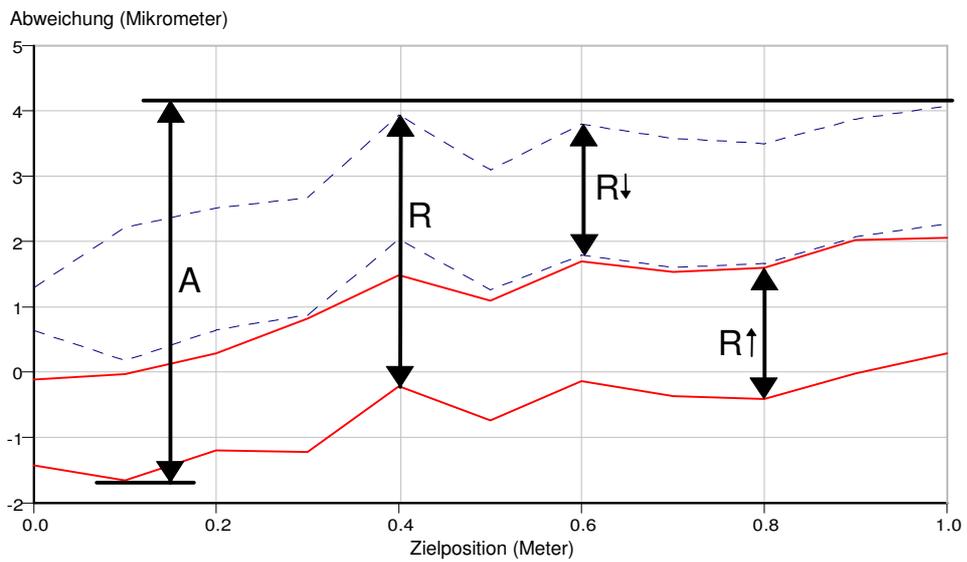
**Kenngößen:**

Positionsstreuung  $R = \max \left[ \max \left[ 6s_{j\uparrow}, 6s_{j\downarrow}, 3s_{j\uparrow} + 3s_{j\downarrow} + |B_j| \right] \right]_{j=1}^n$

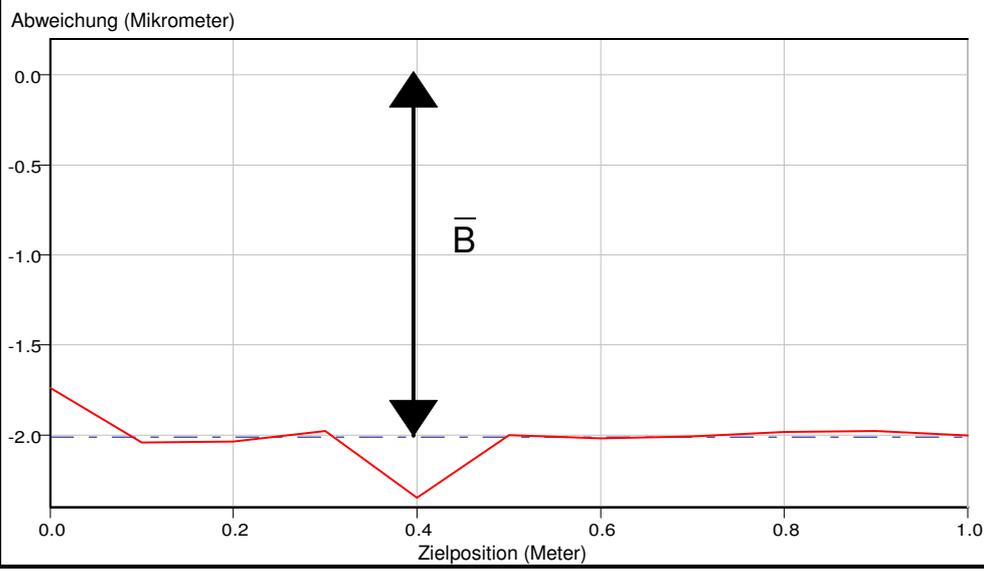
$R\uparrow = \max [6s_{j\uparrow}]_{j=1}^n$

$R\downarrow = \max [6s_{j\downarrow}]_{j=1}^n$

Positionsunsicherheit  $A = \max \left[ \max [\bar{x}_{j\uparrow} + 3s_{j\uparrow}, \bar{x}_{j\downarrow} + 3s_{j\downarrow}] \right]_{j=1}^n - \min \left[ \min [\bar{x}_{j\uparrow} - 3s_{j\uparrow}, \bar{x}_{j\downarrow} - 3s_{j\downarrow}] \right]_{j=1}^n$



Mittlere Umkehrspanne  $\bar{B} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_{j\downarrow} - x_{j\uparrow})$

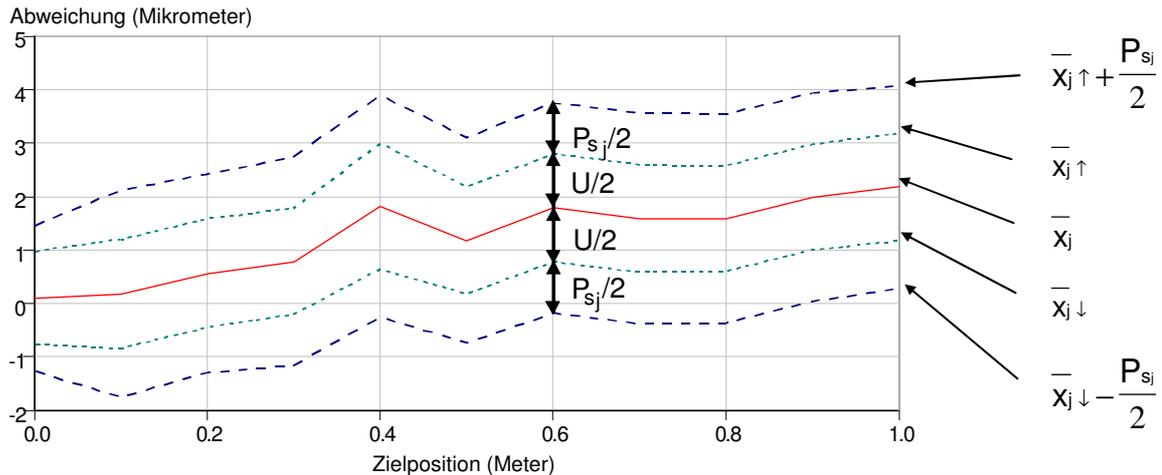


|              |                              |   |
|--------------|------------------------------|---|
| <b>NMTBA</b> | z - Anzahl der Meßzyklen     | $x_{ij}$ - Abweichung(Istwert-Sollwert) für |
|              | n - Anzahl der Meßpositionen | Position j beim Zyklus i                    |
|              | i - Zyklusnummer             | ↑ - positive Anfahrtrichtung                |
|              | j - Positionsnummer          | ↓ - negative Anfahrtrichtung                |

**Diagramm:**

Mittlere Abweichung: 
$$\bar{x}_j = \frac{1}{2 \cdot z} \sum_{i=1}^z (x_{ij \uparrow} + x_{ij \downarrow})$$

Positionsstreubreite: 
$$P_{sj} = 6 \cdot \sqrt{\frac{1}{2 \cdot z - 1} \sum_{i=1}^z \left\{ (x_{ij \uparrow} - \bar{x}_j)^2 + (x_{ij \downarrow} - \bar{x}_j)^2 \right\}}$$



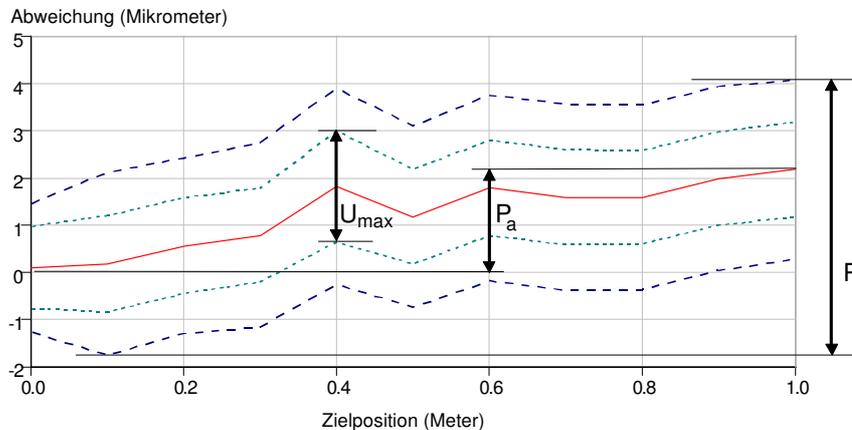
**Kenngößen:**

Positionsstreubreite 
$$P_{s \max} = \max [P_{sj}]_{j=1}^n \quad P_{s \text{ mit}} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n P_{sj}$$

Offset 
$$O = -\frac{1}{2} \cdot \left( \max \left[ x_j + \frac{P_{sj}}{2} \right]_{j=1}^n + \min \left[ x_j - \frac{P_{sj}}{2} \right]_{j=1}^n \right)$$

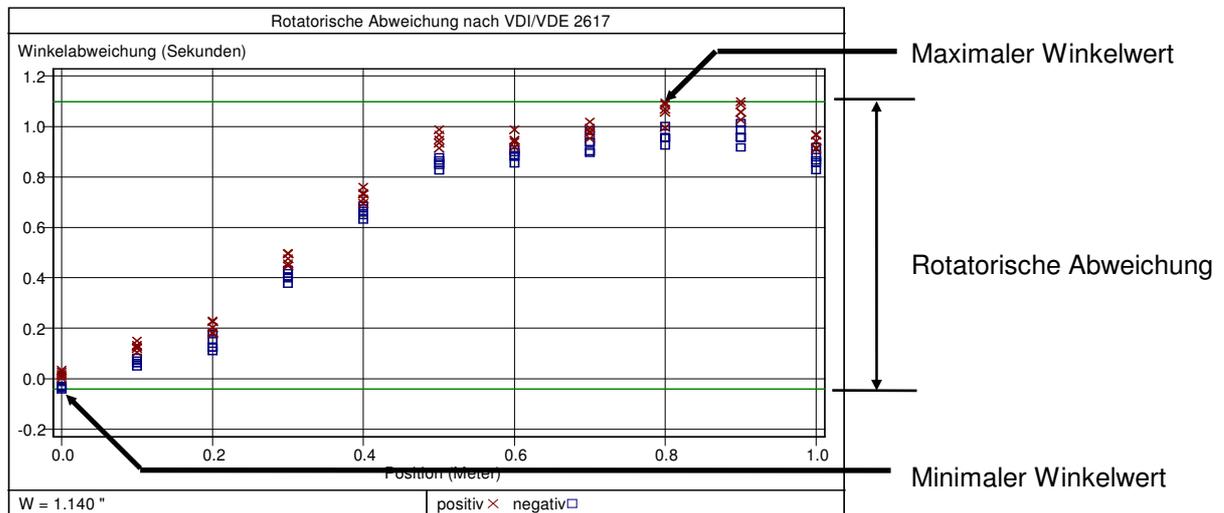
Positionsabweichung 
$$P_a = \left| \max [x_j]_{j=1}^n - \min [x_j]_{j=1}^n \right|$$

Positionsunsicherheit 
$$P = \max \left[ x_j + \frac{P_{sj}}{2} \right]_{j=1}^n - \min \left[ x_j - \frac{P_{sj}}{2} \right]_{j=1}^n$$



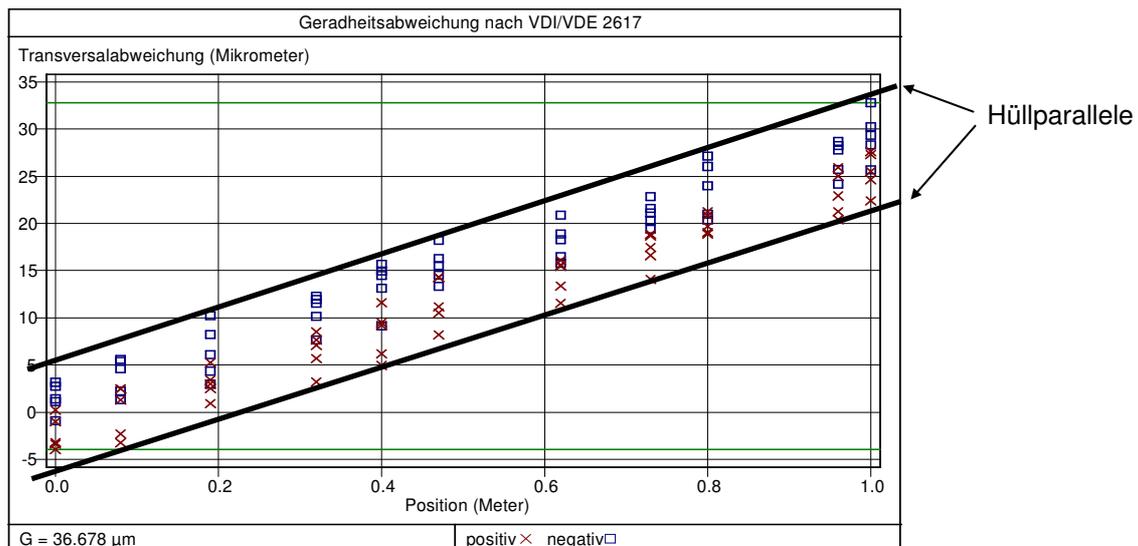
Neben den statistischen Auswertungen von Positionsmessungen enthält die ISO 230 noch die Verfahren zur Bestimmung der „**Rotatorischen Abweichungen**“ und der „**Geradheitsabweichungen**“.

Bei einer Winkelmessung wird eine Anzahl von Winkeln für jede Meßposition aufgenommen. Als „**Rotatorische Abweichung R**“ versteht man die Differenz vom Winkel mit dem größten Wert und dem Winkel mit dem kleinsten Wert. Dabei werden alle Winkelwerte unabhängig von der Meßposition und Anfahrtrichtung betrachtet.

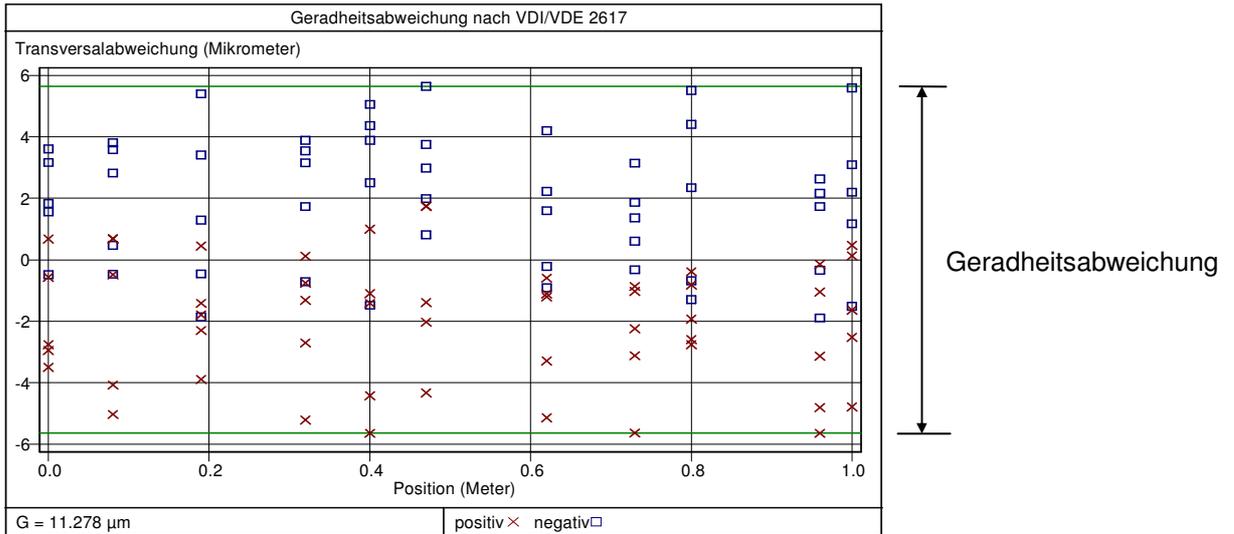


Bei einer Geradheitsmessung ist i.A. der Laserstrahl nicht exakt in Richtung der Meßachse ausgerichtet. Dies hat sehr große Abweichungen zur Folge, wenn man die Differenz von Maximal- und Minimalwert als Kenngröße definieren würde .

Die „**Geradheitsabweichung G**“ wird deshalb als Abstand zweier paralleler Geraden mit der Eigenschaften definiert, daß zwischen den Geraden alle Meßpunkte liegen und die Geraden dabei minimalen Abstand haben. Im Programm werden diese Geraden als „Hüllparallele“ bezeichnet.



Im Programm werden beim Hüllparallelenangleich alle Meßwerte so transformiert, daß die beiden Geraden anschließend parallel zur Ordinatenachse verlaufen.



Das Programm bietet auch einen Quadratmittelangleich, bei dem eine Gerade bestimmt wird, bei der die Summe der Quadrate des Abstands von dieser Gerade minimal ist. Auch hier wird anschließend eine Transformation durchgeführt, so daß die Gerade parallel zur Ordinatenachse verläuft. Die Differenz von Maximum und Minimum ist hier aber stets größer oder gleich der Differenz von Maximum und Minimum beim Hüllparallelenangleich.