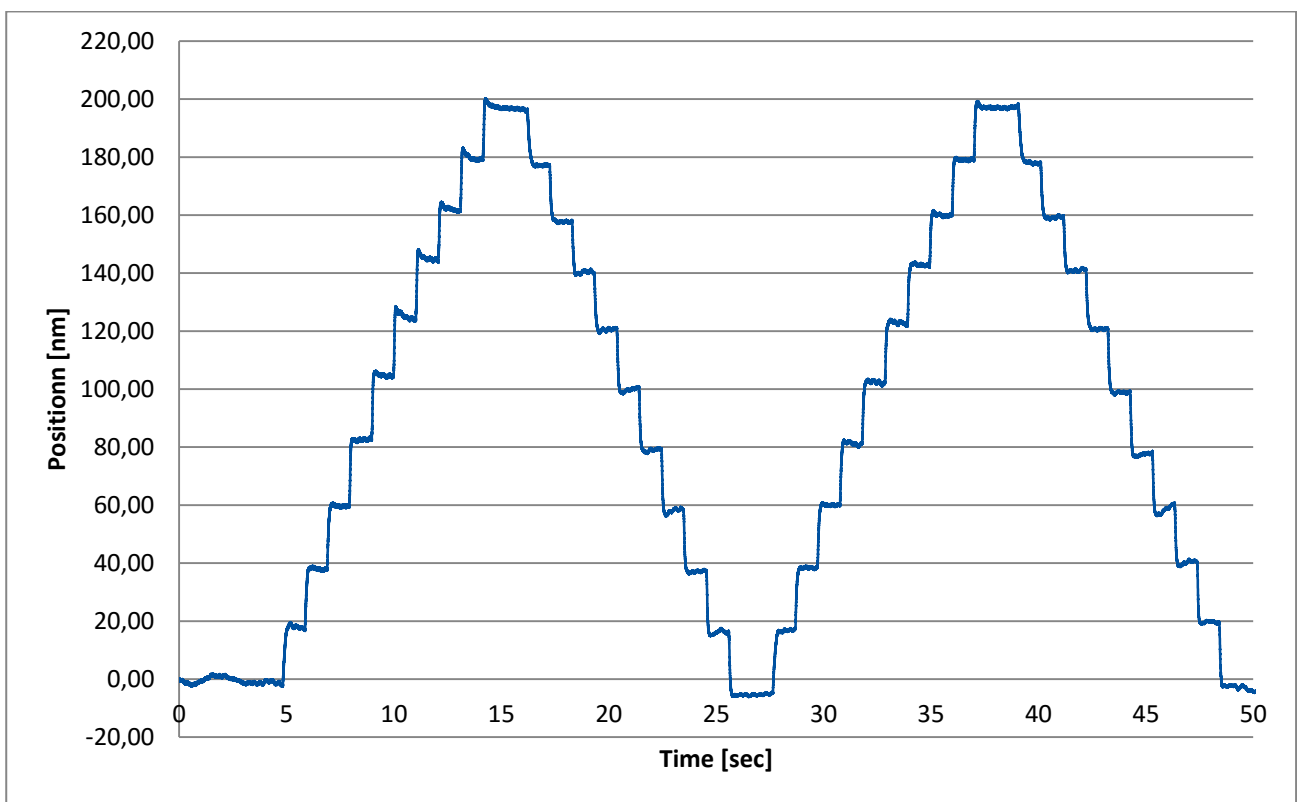


# Performance von Schrittmotorachsen

Optimierung von Präzision, Stabilität und Wiederholgenauigkeit



## 1 Grundlagen Antriebstechnik

Unabhängig von der Branche oder dem Markt, ist kaum ein Produktionsprozess vorstellbar, der nicht darauf basiert, Komponenten von einer Position in eine andere zu bringen.

Zunehmend werden solche Positioniervorgänge von Maschinen übernommen, automatisierte Abläufe schaffen Sicherheit und Reproduzierbarkeit. Zu diesem Zweck sind zuverlässige Antriebe gefragt, mit entsprechend hoher Lebensdauer. Gleichzeitig steigen die Ansprüche an die Präzision der Positionierung auch in industriellen Umgebungen.

Auf den folgenden Seiten wird dargelegt, wie Positioniersysteme mit Schrittmotorantrieb in der Präzisionspositionierung eingesetzt werden können, und welche besonderen Eigenschaften sie haben.

Drehende Elektromotoren sind weit verbreitete typische Lösungen für Antriebstechnik im industriellen Bereich. Schrittmotoren werden dabei häufig bevorzugt, da sie als besonders robust gelten und eine hohe Lebensdauer haben. Sie zeigen ein hohes Drehmoment auch bei niedriger Drehzahl = Geschwindigkeit. Sie sind außerdem preislich attraktiv und können mit kostengünstigen Motorsteuerungen (Motion Controllern) betrieben werden. Im (Dauer-) Betrieb erwärmen sich Schrittmotoren, was bei der Auslegung eines Systems beachtet werden muss.

Schrittmotoren nehmen diskrete Positionen innerhalb einer Umdrehung ein. Da diese Schritte einen konstanten Abstand haben, kann über deren Anzahl eine Position kommandiert werden, ohne dass ein Positionssensor erforderlich ist. Üblich sind 200 bis 500 Vollschritte pro Motorumdrehung. Die tatsächlich erreichbare Schrittweite wird von der Schrittmotorsteuerung bestimmt, die je nach Ausführung bis zu mehrere Tausend Mikroschritte zwischen den Vollschritten elektronisch interpoliert.

Beim Halten einer Position stehen Schrittmotoren sehr stabil, vor allem auf den Vollschritten. Schrittmotoren ohne selbsthemmendes Getriebe müssen dazu permanent bestromt werden.

PI setzt für Positionierachsen laufruhige 2-Phasen-Schrittmotoren in Hochpräzisionsmechaniken ein. Ein mechanischer Dämpfer auf der Motorwelle, der gleichzeitig als Handrad dient, unterstützt die Laufruhe. Eine Kombination mit geeigneten Linearmesssystemen und hochauflösenden Motorsteuerungen erhöht die Wiederholgenauigkeit der Positionierung.



Abb. 1 Beispiele von PI Präzisionsachsen mit Schrittmotor: L-509 Linearachse (früher PLS-85), L-511 Linearachse (früher LS-110), L-611 Rotationstische (früher PRS-110), L-310 Hubtisch (früher ES-100), MCS Kreuztisch (von oben)

## 2 Präzise Positionieren bis in den Nanometerbereich

Ein Schrittmotor mit 200 Vollschritten je Umdrehung dreht bei jedem Schritt um einen Winkel von  $1,8^\circ$ . Kombiniert mit einer Antriebsspindel mit 1 mm Steigung ergibt das einen Vorschub von  $10\ \mu\text{m}$ . Die theoretisch erreichbare Positionsauflösung errechnet sich (ohne weitere mechanische Unterersetzung) aus der Anzahl der Mikroschritte je Vollschritt, die die Motorsteuerung interpoliert. Eine Motorsteuerung mit z.B. 256 Mikroschritten erreicht also eine rechnerische Positionsaufklärung von 39 nm, bei 16 Mikroschritten sind es entsprechend 625 nm. Die Schritte, die im mechatronischen System kommandiert und sauber ausgeführt werden können, sind beschränkt auf ganzzahlige Vielfache dieser rechnerischen Auflösung.

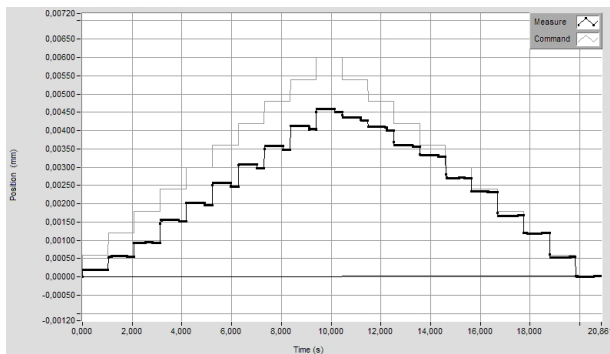
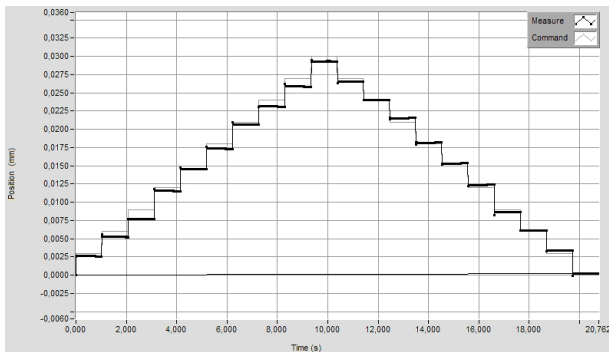
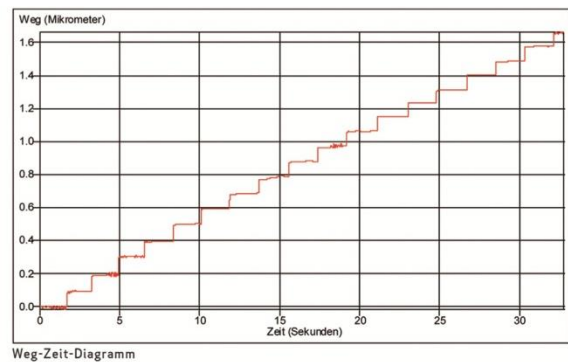


Abb. 2 Schritte eines L-511 Lineartisches mit 2 mm-Spindel, der von einer Motorsteuerung mit 16 Mikroschritten je Vollschritt angesteuert wird.  $3\ \mu\text{m}$ -Schritte (oben),  $0,6\ \mu\text{m}$ -Schritte (unten)

Schrittmotorsteuerungen mit mehr Mikroschritten zwischen den Vollschritten wie beispielsweise die SMC Hydra (3000 Mikroschritte) bewirken eine entsprechend feinere Einteilung der Motordrehwinkel. Sie erlauben quasi stufenfreie Positionen auch in kleinen und kleinsten Schritten zu kommandieren. Dadurch ergeben sich ein besonders ruhiger Lauf der Motoren, eine sehr hohe Positionsaufklärung, gleichmäßi-

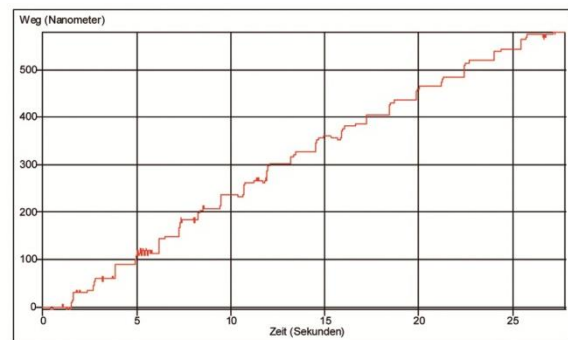
ger Vorschub und ein weiter Dynamikbereich der Geschwindigkeit und Beschleunigung. Die Effizienz dieser Motorsteuerungen ist sehr hoch, was die Erwärmung der Motoren unterdrückt.

Systeme mit derart hochauflösenden Schrittmotorsteuerungen erreichen somit theoretische Positionsaufklärungen bis in den Nanometerbereich. Das ermöglicht tatsächlich gemessene typische Schrittweiten im Bereich weniger Nanometer, die nur durch die mechanischen Eigenschaften der Positionierachse begrenzt werden. Die Schrittweiten sind durch die hohe rechnerische Auflösung nahezu beliebig wählbar. Abb. 3 und 4 zeigen Beispiele von 100 nm- und 25 nm-Schritten einer L-509-Achse mit 1 mm Spindelsteigung.



Weg-Zeit-Diagramm

Abb. 3 100 nm-Schritte eines L-509 Lineartisches mit 2-Phasen-Schrittmotor, ohne Positionsregelung



Weg-Zeit-Diagramm

Abb. 4 25 nm-Schritte eines L-509 Lineartisches mit 2-Phasen-Schrittmotor, ohne Positionsregelung

### 3 Wiederholgenauigkeit optimieren durch Positionsregelung

Ein Schrittmotor führt zuverlässig einheitliche und präzise wiederholbare Schritte aus. Die Wiederholgenauigkeit einer einmal erreichten Position eines mechatronischen Gesamtsystems hängt zusätzlich von den mechanischen Komponenten und ihrem Zusammenspiel ab: Kupplung und eventuell Getriebe, Spindel, Spindelmutter und die verwendeten Führungen bestimmen das mechanische Spiel. Diese mechanischen Effekte können konstruktiv nie vollständig ausgeschlossen werden.

Die Genauigkeit, mit der eine Position zum wiederholten Mal erreicht wird, lässt sich durch eine zusätzliche Positionsrückmeldung und -auswertung in der Motorsteuerung verbessern. Ein direkt messendes Linear- oder Winkelmesssystem in der gewünschten Auflösung unterdrückt das mechanische (Umkehr-)Spiel wirksam. Gleichzeitig ist die Linearität eines Messsystems üblicherweise höher als die des Motors, auch hier lässt sich also eine Verbesserung erreichen.

Abb. 5 bis 9 zeigen Schrittweiten einer L-511-Achse mit 2 mm Spindelsteigung, aufgenommen in Regelung. Hier sind Schrittweiten bis 20 nm sehr gut nachvollziehbar.

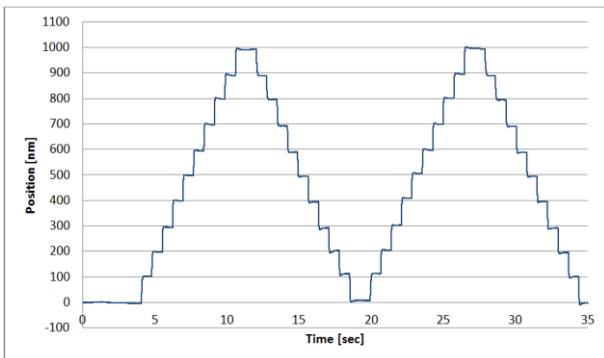


Abb. 5 100 nm-Schritte eines L-511 Lineartisches mit 2-Phasen-Schrittmotor, mit Positionsregelung (Sample-Frequenz 10 kHz, ungefiltert)

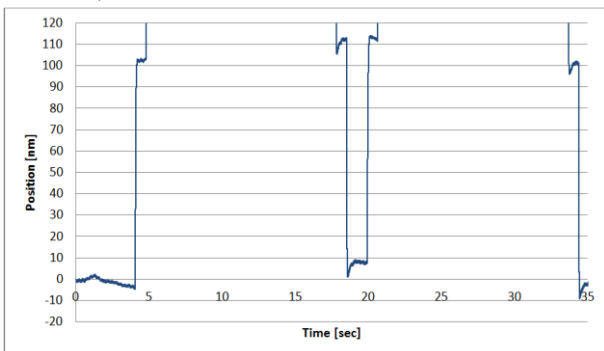


Abb. 6 Detailansicht aus Abb. 5 (vergrößert)

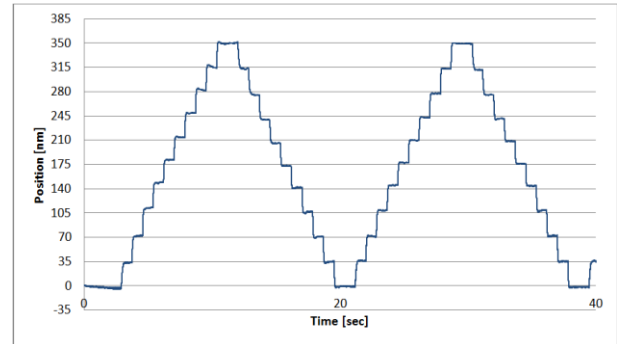


Abb. 7 35 nm-Schritte eines L-511 Lineartisches mit 2-Phasen-Schrittmotor, mit Positionsregelung

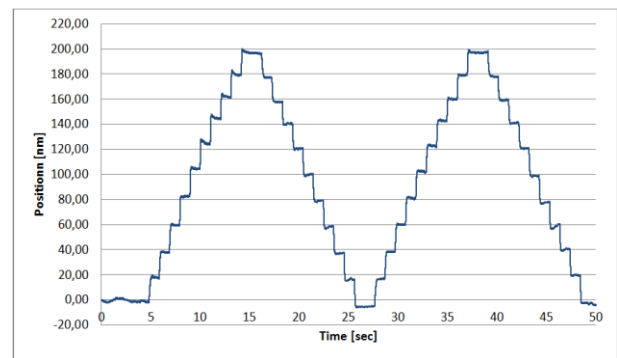


Abb. 8 20 nm-Schritte eines L-511 Lineartisches mit 2-Phasen-Schrittmotor, mit Positionsregelung

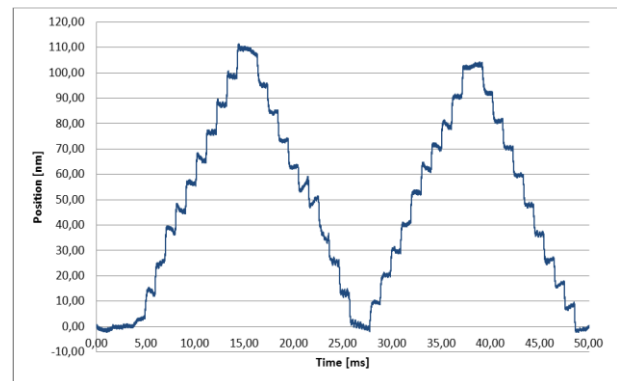


Abb. 9 10 nm-Schritte eines L-511 Lineartisches mit 2-Phasen-Schrittmotor, mit Positionsregelung. Die Schritte von 10 nm sind noch zu unterscheiden, werden aber nicht mehr optimal sauber ausgeführt

### 3.1 Stabilität und Auflösung in Regelung

Positionsgeregelte Schrittmotor-Achsen zeichnen sich durch eine sehr gute Positionsstabilität aus. Warum ist das so?

Klassische (DC-)Servosysteme zeigen typische Regler-Schwingungen mit Amplituden im Bereich der Auflösung. Abhängig von den Servoparametern können diese Vielfache der Auflösung betragen und sogar bis zur völligen Instabilität des Systems führen. Diese Effekte treten bei Schrittmotoren nicht auf.

Ein Schrittmotor benötigt für stabiles Halten einer Position zunächst keine Regelung. Sobald der Motor bestromt wird, baut er ein Moment auf, und das bereits im Stillstand. Im Gegensatz zu (DC-)Servosystemen verfügt er über eine intrinsische Geschwindigkeits-Vorsteuerung („velocity-feed-forward“). Das sind ideale Voraussetzungen für hervorragende Stabilität. Gängige Schrittmotorsteuerungen mit z.B. 256 Mikroschritten je Vollschritt erlauben eine saubere Regelung diskreter Schrittweiten. Die kommandierbaren Positionen sind auf ganzzahlige Vielfache der theoretischen Auflösung beschränkt. Beliebige Schrittweiten im Bereich einiger zehn Nanometer sind damit allerdings nicht möglich, und ein Missverhältnis von Motor- zu Encoder-Auflösung führt zu einer Quantisierung der erreichbaren Positionen.

Schrittmotorsteuerungen mit mehr Mikroschritten erlauben quasi stufenfrei Positionen auch in kleinen und kleinsten Schritten zu kommandieren. Die maximale Genauigkeit wird erreicht, wenn die Positionssignale analog als Sinus-Cosinus-Signale mit  $1 V_{pp}$  übertragen und erst in der Motorsteuerung mit hoher Auflösung digitalisiert werden. Die Positionsauflösung eines solchen Positioniersystems ist nur durch den Sensor begrenzt.

### 3.2 Einschwingverhalten auf Position

Das Einschwing- oder Settling-Verhalten einer Achse bestimmt die Prozessdurchlaufzeiten entscheidend. Zunächst beeinflussen die Steueralgorithmen in der Motorsteuerung das Einschwingen auf die Zielposition. SMC Motorsteuerungen unterdrücken hohe Frequenzen und erlauben dennoch ein dynamisches Positionieren mit nur minimalen Überschwingern. Die Achse erzeugt also auch keine Schwingungen, die wiederum in das Gesamtsystem eingetragen werden können.

Um möglichst kurze Einschwingzeiten zu erreichen, müssen die Betriebsparameter entsprechend den anwendungsseitigen Vorgaben optimiert werden. Berücksichtigt werden auf jeden Fall die bewegte Masse der Zuladung und die daraus resultierenden Momente, sowie die Orientierung der Bewegungsachse. Weitere Maßnahmen sind nicht erforderlich; das System ist stabil und dynamisch optimiert.

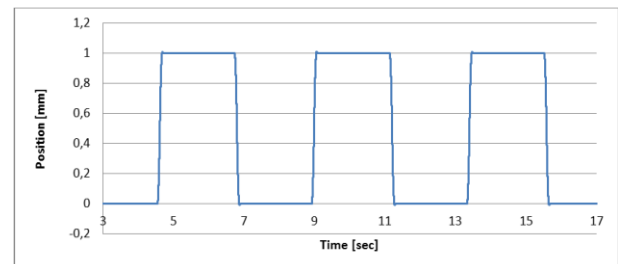


Abb. 10 1 mm-Schritte, durchgeführt mit L-511 mit Positionsregelung (Geschwindigkeit 15 mm/s; Beschleunigung 200 mm/s<sup>2</sup>)

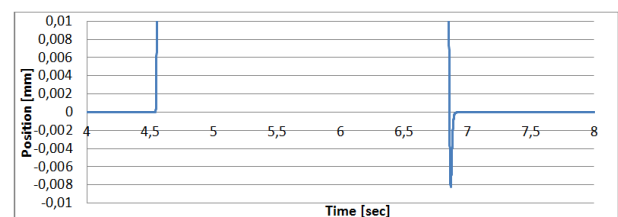


Abb. 11 Die Detailansicht aus Abb. 10 zeigt das sehr geringe Überschwingen von unter 10 µm

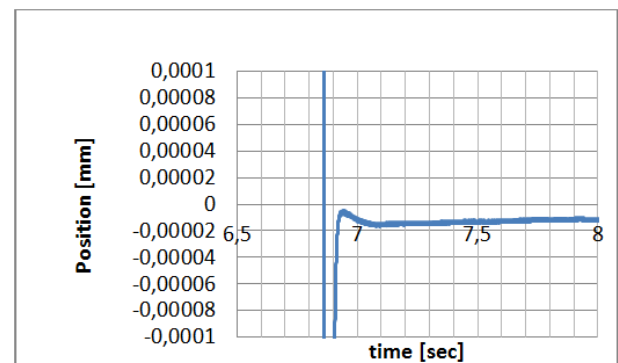


Abb. 12 Weitere Vergrößerung: Man erkennt deutlich, dass nur ein einziges wirkliches Überschwingen auftritt. Die Zielposition wird innerhalb weniger Zehntelsekunden innerhalb eines Fensters von unter 20 nm erreicht

## 4 Konstante Geschwindigkeit bei niedriger Geschwindigkeit

Einer der bestimmenden Parameter für die Auswahl eines Positioniersystems ist die Geschwindigkeit. Oft geht es darum, möglichst schnell zu bewegen und zu positionieren. Einige Anwendungen erfordern jedoch eine besonders langsame und gleichmäßige Vorschubbewegung. Vor allem die Geschwindigkeitskonstanz stellt dabei eine Herausforderung dar.

Die geforderten Geschwindigkeiten können in der Größenordnung von einigen 100  $\mu\text{m/s}$  bis zu deutlich unter 100  $\text{nm/s}$  liegen. Das entspricht einem Vorschub von wenigen Millimetern pro Tag. Für optimale gleichförmige Bewegung ist ein Positioniersystem mit einem hochauflösenden Messsystem mit Positionsaufösungen um einige Nanometer empfehlenswert.

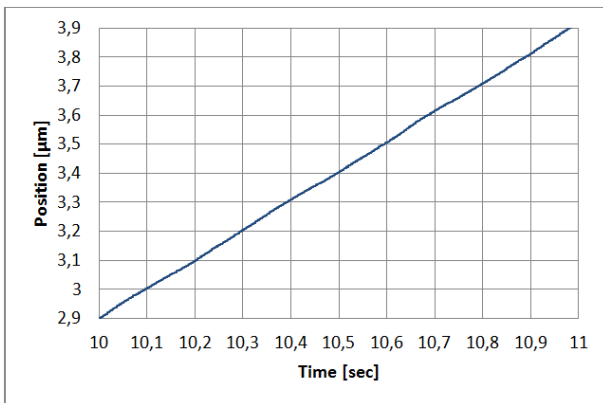


Abb. 13 Geschwindigkeitskonstanz bei 1  $\mu\text{m/s}$ , gemessen mit L-511 mit Positionsregelung

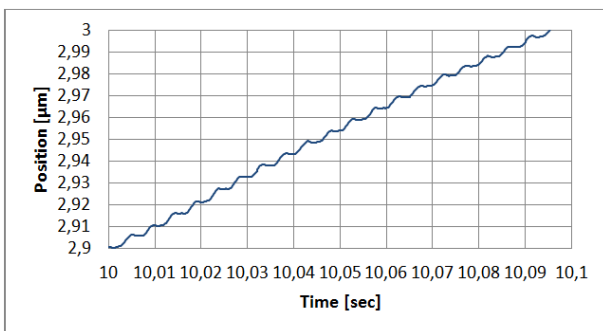


Abb. 14 Detailansicht aus Abb. 13. Die dargestellte periodische Positionsabweichung in der Größenordnung einiger Nanometer ist auf das Interferometer zurück zu führen

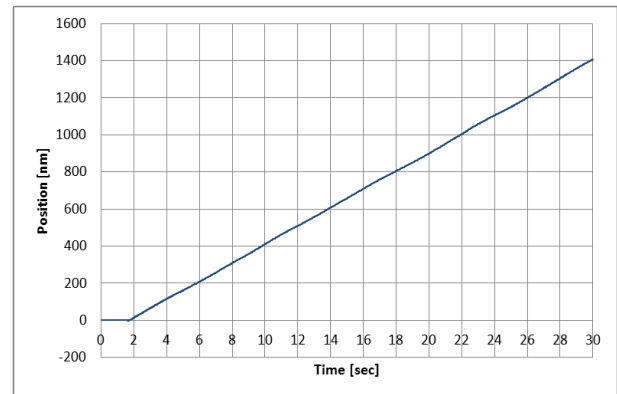


Abb. 15 Geschwindigkeitskonstanz bei 50  $\text{nm/s}$ , gemessen mit L-511 mit Positionsregelung

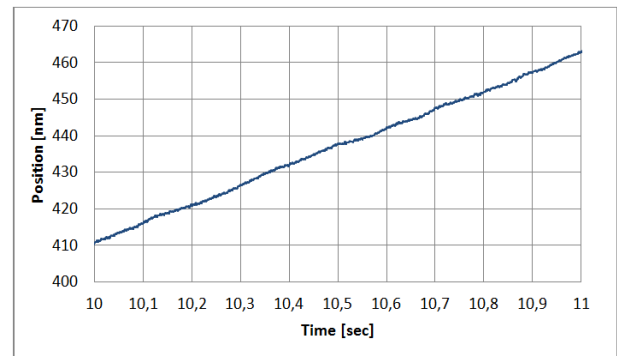


Abb. 16 Detailansicht aus Abb. 15

## Exkurs: Welchen Einfluss hat die Anzahl der Mikroschritte auf das Positionierverhalten einer Achse?

### Geschwindigkeitskonstanz

Bei nur wenigen Mikroschritten je Vollschritt wird insbesondere bei sehr langsamen Geschwindigkeiten jeder Einzelschritt bemerkbar. Dies zeigt sich im Weg-Zeit-Diagramm, bei geeignet vergrößerter Ansicht sind eindeutige Treppen sichtbar (Abb. 17 und 18).

Im Betrieb mit 3000 Mikroschritten je Vollschritt zeigt das Weg-Zeit-Diagramm eine sehr glatte angenäherte Gerade (Abb. 19 und 20) auch im Detail und damit eine wesentlich bessere Geschwindigkeitskonstanz.

Wiederholt man die Messungen mit Positionsregelung so ist im Weg-Zeit-Diagramm eine nahezu perfekte Gerade zu erkennen. Die Positionsabweichung kann durch den Einsatz des Encoders auf unter 100 nm reduziert werden (Abb. 21 und 22)!

L-511 Linearachse und C-663.11 Mercury Step Motorsteuerung (16 Mikroschritte je Vollschritt), Geschwindigkeit 5  $\mu\text{m/s}$

L-511 Linearachse und SMC Hydra Motorsteuerung (3000 Mikroschritte je Vollschritt), keine Positionsregelung (open-loop), Geschwindigkeit 5  $\mu\text{m/s}$

L-511 Linearachse mit Messsystem und SMC Hydra Motorsteuerung (3000 Mikroschritte je Vollschritt), mit Positionsregelung (closed-loop), Geschwindigkeit 5  $\mu\text{m/s}$

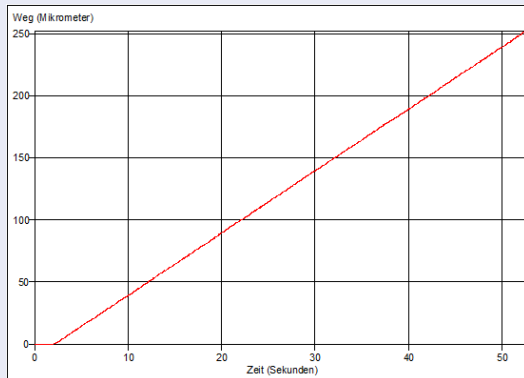


Abb. 17 Ohne Positionsregelung (open-loop)

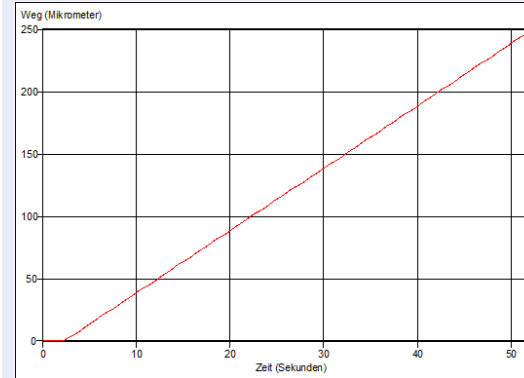


Abb. 19 Ohne Positionsregelung (open-loop)

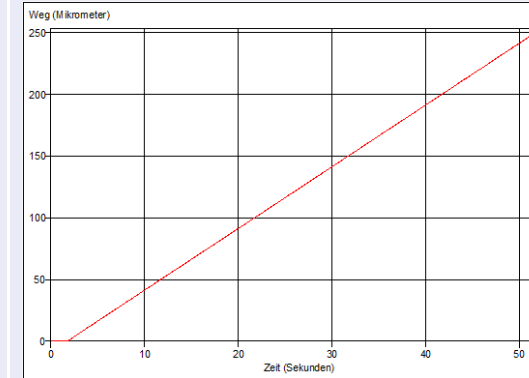


Abb. 21 Geregelter Betrieb (closed-loop)

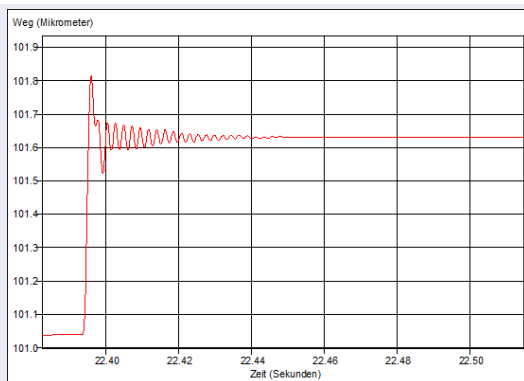


Abb. 18 Detailansicht aus Abb. 17 zeigt einen deutlichen Schritt

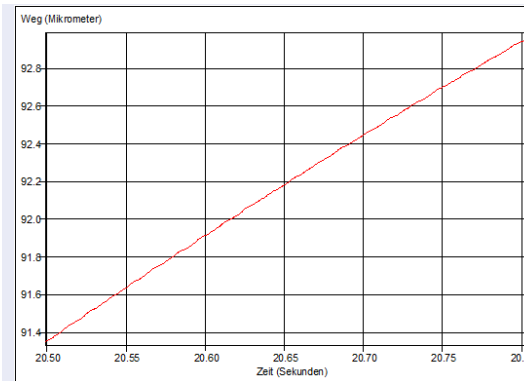


Abb. 20 Detailansicht aus Abb. 19

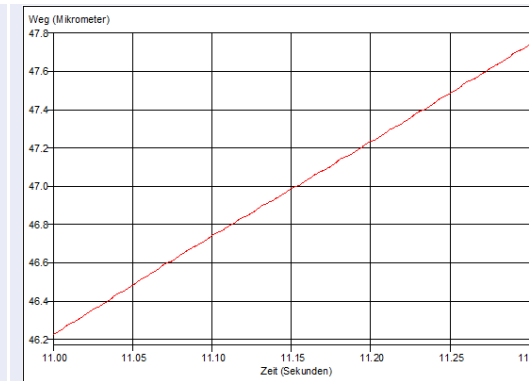


Abb. 22 Detailansicht aus Abb. 21

## Exkurs: Welchen Einfluss hat die Anzahl der Mikroschritte auf das Positionierverhalten einer Achse? (Forts.)

### Positionsabweichung und Frequenzverhalten

Bei wenigen Mikroschritten je Vollschritt hat die Positionsabweichung um 1  $\mu\text{m}$  Amplitude (Abb. 23). Das Nachschwingen der Mechanik führt zu einem Eintrag höherer Frequenzen und damit vermehrter Resonanzen (Abb. 24)

Eine Motorsteuerung mit mehr Mikroschritten je Vollschritt reduziert die absolute Positionsabweichung und das Frequenzspektrum deutlich (Abb. 25 und 26).

Resonanzen treten nur noch deutlich reduziert auf. Die Amplitude beträgt rund 100 Nanometer, das sind ca. 10% der Amplitude bei weniger Mikroschritten (Abb. 27 und 28).

L-511 Linearachse und C-663.11 Mercury Step Motorsteuerung (16 Mikroschritte je Vollschritt), Geschwindigkeit 5  $\mu\text{m/s}$

L-511 Linearachse und SMC Hydra Motorsteuerung (3000 Mikroschritte je Vollschritt), keine Positionsregelung (open-loop), Geschwindigkeit 5  $\mu\text{m/s}$

L-511 Linearachse und SMC Hydra Motorsteuerung (3000 Mikroschritte je Vollschritt), mit Positionsregelung (closed-loop), Geschwindigkeit 5  $\mu\text{m/s}$

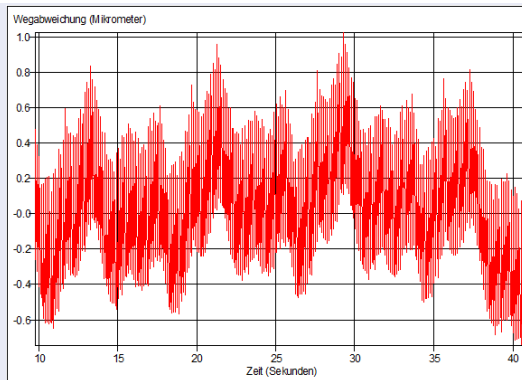


Abb. 23 Positionsabweichung

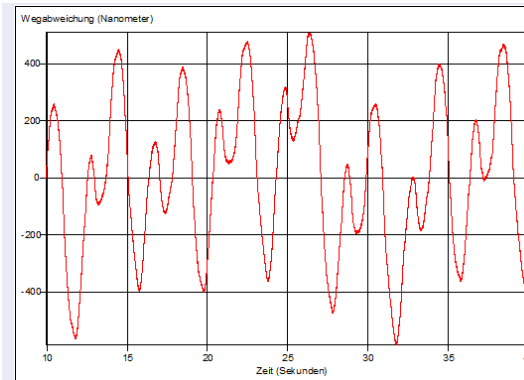


Abb. 25 Positionsabweichung

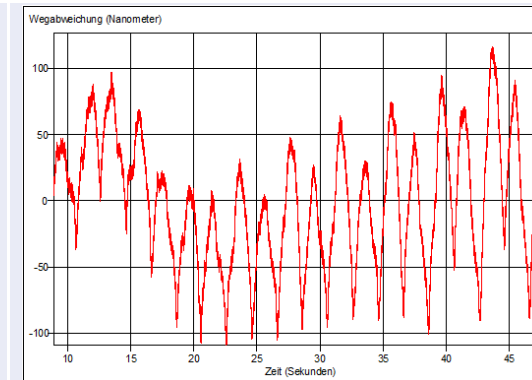


Abb. 27 Positionsabweichung

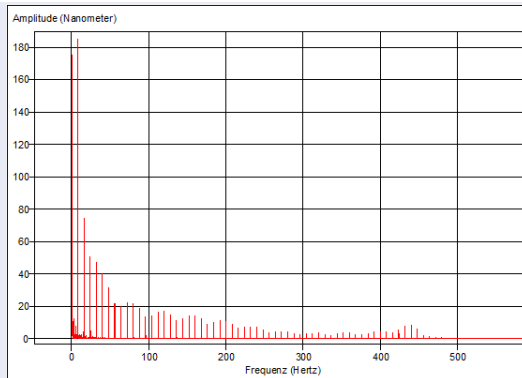


Abb. 24 Frequenzspektrum

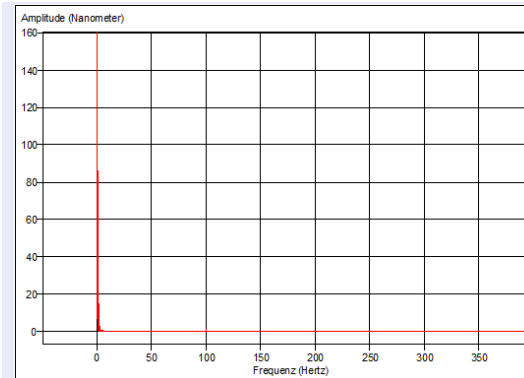


Abb. 26 Frequenzspektrum

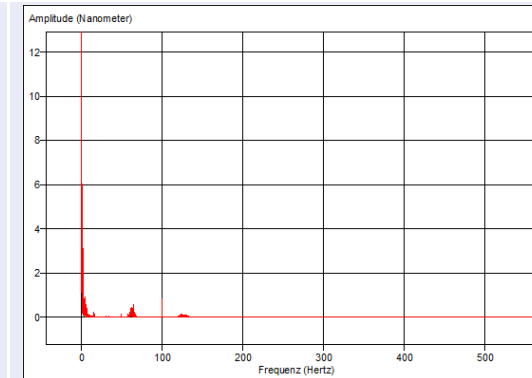


Abb. 28 Frequenzspektrum



## 5 Dynamische Positionskorrektur (Mapping)

Eine Optimierung der Gesamtgenauigkeit einer Positionierachse kann durch eine dynamische Positionskorrektur erreicht werden. Besonders bei Rotationsachsen kann man die absolute Genauigkeit wesentlich verbessern, in der Regel um einen Faktor 10.

Dazu wird zunächst die Abweichung von der Sollposition bei vordefinierter Schrittweite mithilfe eines externen Referenz-Messsystems ermittelt. Bei PI miCos steht dafür ein System mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,2$  arcsec zur Verfügung. Die gemessenen Abweichungen werden als Korrekturtabelle in der Motorsteuerung (hier: SMC Hydra) hinterlegt.

Im Betrieb erfolgt dann eine dynamische Korrektur, denn die Werte werden bereits bei der Berechnung des Bewegungsprofils im Profildgenerator verwendet. Das heißt, bereits während der Bewegung werden die Absolutfehler korrigiert.

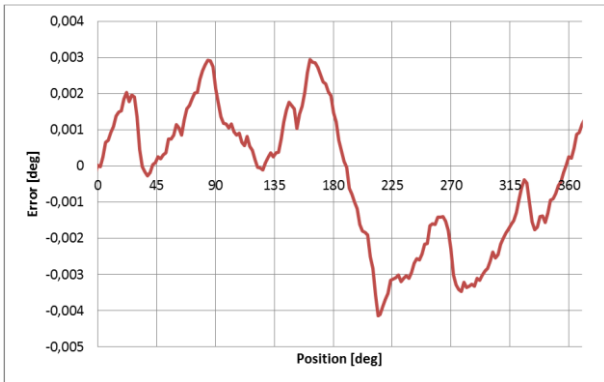


Abb. 29 Absolutgenauigkeit eines Rotationstisches PRS-110 (L-611) mit Schrittmotor und Winkelmeßsystem. Die Abweichung von der Sollposition wird in Schritten von  $1^\circ$  ermittelt. Die Winkelabweichung beträgt bis zu  $\pm 0,004^\circ$

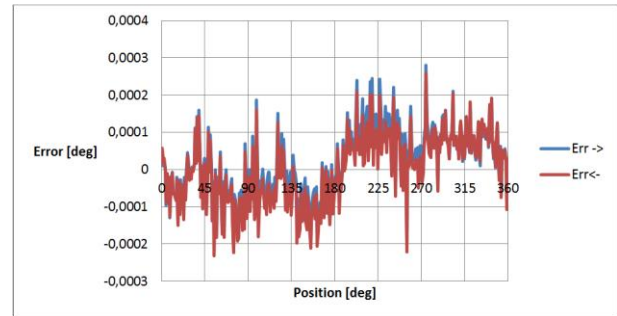


Abb. 30 Die Messwerte aus Abb. 29 wurden in der SMC Hydra Motorsteuerung hinterlegt und zur dynamischen Positionskorrektur verwendet. Deutlich erkennbar ist das symmetrische Verhalten unabhängig von der Drehrichtung. Die Positionsabweichung konnte deutlich reduziert werden und beträgt maximal  $\pm 0,0003^\circ$

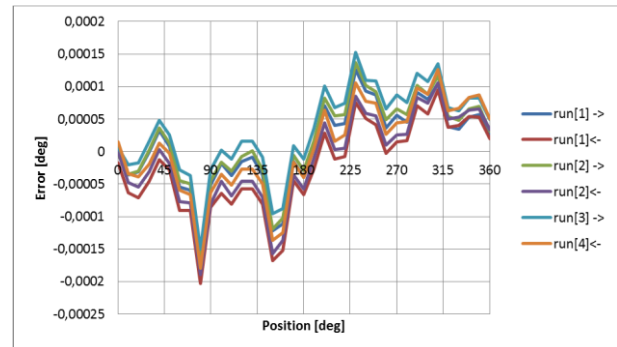


Abb. 31 Die bidirektionale Wiederholgenauigkeit ist durch die hinterlegte Fehlerkorrektur (Mapping) dauerhaft deutlich verbessert. Die Messung zeigt mehrere Wiederholungen in Schritten von  $10^\circ$  in positiver und negativer Drehrichtung

## 6 Messaufbau

### 6.1 Umgebungsbedingungen und Hilfsmittel

Alle Messungen wurden in einem Messlabor unter Standard-Laborbedingungen durchgeführt, d.h. saubere Umgebung ohne Reinraum-Klassifizierung, Raumtemperatur  $22^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ , Luftfeuchtigkeit  $43\% \pm 3\%$ . Der Messaufbau befindet sich auf einem schwingungs isolierten Tisch ohne weitere Vorrichtungen zur Isolierung von thermischen, akustischen oder anderen externen Einflüssen.

Messmittel, linear: Renishaw XL-80 Interferometer

Messmittel, rotatorisch: Heidenhain RON-905

Höhe der Referenzspiegel über der bewegten Plattform:  
25 mm

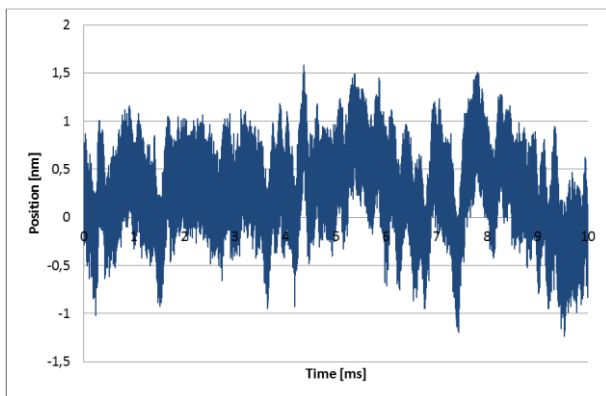


Abb. 32 Rauschmessungen der SMC Hydra Motorsteuerung. Achse in Ruhe, bestromt und in Regelung (Sample-Frequenz 10 kHz, ungefiltert). Das Rauschlevel liegt bei ungefähr 3 nm (Spitze-Spitze), die auf das Interferometer zurückzuführen sind

Grundsätzlich beeinflussen die Umgebungsbedingungen die erreichbare Präzision bei der Positionierung. Die Schwankung der Umgebungstemperatur um nur  $0,01^{\circ}\text{C}$  bewirkt bereits eine thermisch bedingte Ausdehnung eines Tisches aus Aluminium um etwa 10 nm. Die Stabilisierung der Umgebung ist also eine Grundvoraussetzung für die Präzision und die Wiederholbarkeit der Ergebnisse. Bei Bedarf kommen Ultrapräzisionsachsen mit speziellen Materialpaarungen zum Einsatz, wie zum Beispiel auf Granitbasis.

### 6.2 Positioniersysteme und Motorsteuerungen (Motion Controller)

Die Messungen wurden an Standard-Linear- und Rotations-Positioniersystemen teils mit zusätzlich integriertem Messsystem durchgeführt. Es wurden Tische aus der Serienproduktion verwendet.

Folgende Positioniersysteme wurden eingesetzt:

L-511 (früher LS-110)

L-509 (früher PLS-85)

L-611 (früher PRS-110)

Auch die Motorsteuerungen bzw. Motion Controller sind aus dem Angebot von PI.



Abb. 33 SMC Hydra Motorsteuerung mit integriertem Encoder-Interface-Modul DeltaStar Eco. 3000 Mikroschritte je Vollschrift, Auswertung von analogen Positionssignalen (sin/cos,  $1 V_{pp}$ )



Abb. 34 C-663.11 Mercury Step; 16 Mikroschritte je Vollschrift, keine Positionsregelung

## Autoren



Joachim Oberfell ist seit über 20 Jahren bei der miCos GmbH, heute PI miCos GmbH, tätig

Er ist Spezialist für komplexe Positionieraufgaben, und hat sein besonderes „Händchen“ für die Optimierung von Positioniersystemen und Motorsteuerungen schon sehr häufig unter Beweis gestellt. Ein offenes Ohr für die Kundenbedürfnisse und sein profundes Wissen über Motion Control vereinen sich zur optimalen Lösung für die jeweilige Applikation. Die präzise Kenntnis der Einsatzbedingungen ist dazu selbstverständlich wichtige Voraussetzung.

Besonderen Wert legt Oberfell auf das Verständnis der Arbeitsweise einer Motorsteuerung, um die Möglichkeiten eines Positioniersystems so gut wie möglich auszuschöpfen, sei es für eine Hochpräzisionsanwendung in der Grundlagenforschung wie z.B. die Koordination vieler Achsen in Beamline-Experimenten, oder eine optimale Lösung in der Automatisierung von Produktionsanlagen, wo Industriesteuerungen mit robusten Stellachsen zu Hightech-Anwendungen mit Zukunftspotential kombiniert.



Birgit Schulze ist Produktmanagerin bei Physik Instrumente (PI)

## Über PI

In den letzten vier Jahrzehnten hat sich Physik Instrumente (PI) mit Stammsitz in Karlsruhe zum führenden Hersteller von Positioniersystemen mit Genauigkeiten im Nanometerbereich entwickelt. Das privat geführte Unternehmen ist mit vier Sitzen in Deutschland und fünfzehn ausländischen Vertriebs- und Serviceniederlassungen international vertreten. Über 850 hochqualifizierte Mitarbeiter rund um die Welt versetzen die PI Gruppe in die Lage, fast jede Anforderung aus dem Bereich innovativer Präzisionspositioniertechnik zu erfüllen. Alle Schlüsseltechnologien werden im eigenen Haus entwickelt. Dadurch kann jede Phase vom Design bis hin zur Auslieferung kontrolliert werden: die Präzisionsmechanik und Elektronik ebenso wie die Positionssensorik.

Die dafür benötigten piezokeramischen Elemente werden bei der Tochterfirma PI Ceramic in Lederhose gefertigt, einem der weltweit führenden Unternehmen auf dem Gebiet aktiver und sensorischer Piezoprodukte.

Die PI miCos GmbH in Eschbach bei Freiburg ist spezialisiert auf flexible Positioniersysteme für Ultrahochvakuum-Anwendungen sowie parallelkinematische Positioniersysteme mit sechs Freiheitsgraden und Sonderanfertigungen.