



Technische Information

Genauigkeit von Vorschubachsen

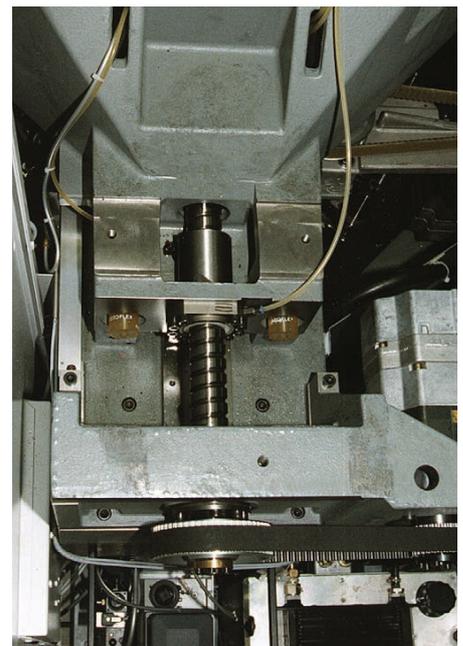
Jahr für Jahr werden bei neuen Werkzeugmaschinen Effizienz- und Leistungssteigerungen nachgewiesen. Durch immer höhere Vorschubgeschwindigkeiten und Beschleunigungen werden Bearbeitungszeiten fortlaufend reduziert. Gleichzeitig ermöglichen ständig steigende Arbeitsgenauigkeiten immer engere Tolerierungen der Werkstücke. Dadurch lassen sich einerseits zunehmend kritische Teile fertigen, andererseits wird der Zusammenbau komplexer Baugruppen vereinfacht. Selektive Handmontagen und Nachbearbeitungsschritte können oft entfallen. Eine höhere Genauigkeit der Teile hat zudem meist eine Erhöhung der Funktionsfähigkeit von Baugruppen zur Folge. So steigt zum Beispiel die Lebenserwartung von Getrieben bei gleichzeitig geringerer Geräuschentwicklung.

Im Gesamtfehlerbudget einer Werkzeugmaschine spielen die Positionierfehler der Vorschubachsen eine entscheidende Rolle. Sie werden im Folgenden näher betrachtet und anderen Fehlern gegenübergestellt. Dabei stellt sich die thermische Dehnung der Kugelgewindespindel als das Hauptproblem bei der Positionserfassung mit Spindel und Drehgeber heraus. Der dadurch verursachte Positionierfehler überwiegt oft die thermisch bedingten Strukturdeformationen und geometrischen Fehler von Bearbeitungszentren. In mehreren Versuchen wird der Einfluss der Erwärmung des Kugelgewindetriebs – auch in Abhängigkeit von seiner Lagerung – auf das Bearbeitungsergebnis dargestellt. Wird ein Längenmessgerät zur Positionserfassung verwendet, spielt jedoch die thermische Dehnung der Spindel keine Rolle – die Positionsdrift ist vernachlässigbar. Bei steigenden Anforderungen an Genauigkeit und Geschwindigkeit von Werkzeugmaschinen gewinnt deshalb die Positionserfassung mit einem Längenmessgerät zunehmend an Bedeutung.

Die Genauigkeit heutiger Werkzeugmaschinen wird mit einer zunehmenden Zahl neuer und überarbeiteter Prüf- und Abnahmetests ermittelt. Waren früher rein geometrische Abnahmetests an der Tagesordnung, so werden heutzutage verstärkt dynamische Tests wie Kreis- und Freiformtests, thermische Untersuchungen z.B. nach ISO/DIS 230-3 und – im Fall von Produktionsmaschinen – Fähigkeitsuntersuchungen bei der Abnahme bzw. routinemäßigen Überprüfung eingesetzt. Die unterschiedlichen Einflüsse des Schneidprozesses, der geometrischen und thermischen Genauigkeit, der statischen und dynamischen Steifigkeit sowie des Positionierverhaltens der Vorschubachsen auf die erzielbare Genauigkeit des Werkstücks lassen sich immer differenzierter analysieren. Für den Anwender der Maschine werden dadurch deren Fehler immer transparenter.

Das Reduzieren thermischer bzw. systematischer Fehler einer Werkzeugmaschine durch langwieriges Optimieren einzelner Fertigungsschritte ist bei ständig wechselnden Aufträgen und der damit verbundenen sinkenden Größe der Fertigungslose kaum noch möglich. Die *Genauigkeit des ersten Teils* gewinnt immer größere Bedeutung. Insbesondere die thermischen Fehler von Werkzeugmaschinen finden dadurch zunehmend Beachtung.

Die folgende Betrachtung zeigt, dass thermische Fehler gerade bei den Vorschubachsen sehr ausgeprägt sein können. Im Gegensatz zu den Strukturdeformationen können Fehler der Vorschubachsen durch die Wahl einer geeigneten Messtechnik mit einfachen Mitteln deutlich reduziert werden.



Vorschubeinrichtung eines Fräs-Bearbeitungszentrums

Aufbau von Vorschubsystemen

Eine genauere Fehleranalyse der Positionserfassung über Vorschubspindel und Drehgeber beginnt mit der Betrachtung üblicher Vorschubsysteme. Trotz der Vielzahl verschiedener Bauformen von Werkzeugmaschinen ist der Aufbau der Vorschubmechanik weitgehend standardisiert (Abbildung 1). Zur Wandlung der Drehbewegung des Servomotors in die lineare Bewegung des Schlittens hat sich der Kugelgewindtrieb in fast allen Fällen durchgesetzt. Seine Lagerung nimmt alle axialen Kräfte des Schlittens auf. Zur Verbindung von Servomotor und Kugelgewindtrieb werden meist direkte Kopplungen eingesetzt. Wegen der kurzen Bauform und der möglichen Drehzahlanpassung sind auch Zahnriemengetriebe weit verbreitet.

Zur Positionserfassung an Vorschubachsen von NC-Werkzeugmaschinen besteht grundsätzlich die Möglichkeit, Längenmessgeräte oder Kugelgewindespindeln in Verbindung mit Drehgebern einzusetzen. Im Fall der Lageregelung über Vorschubspindel und Drehgeber umfasst die Regelschleife nur den Servomotor (Abbildung 1 gestrichelte Linie). D. h., eine Lageregelung des Schlittens im eigentlichen Sinn findet nicht statt, denn es wird lediglich die Rotorlage des Servomo-

tors geregelt. Um dennoch Rückschlüsse auf die Schlittenposition ziehen zu können, muss die Vorschubmechanik zwischen Servomotor und Schlitten ein a priori bekanntes und vor allem reproduzierbares Übertragungsverhalten haben. Bei der Lageregelung mit einem Längenmessgerät hingegen schließt der Regelkreis die gesamte Vorschubmechanik ein. Übertragungsfehler der Mechanik werden vom Längenmessgerät am Schlitten erkannt und von der Regel-elektronik ausgeglichen.

Unterschiedliche Lageregelungen

Die Bezeichnung dieser beiden Methoden der Lageregelung ist unterschiedlich. Im deutschen und teilweise im englischen Sprachraum wird von der direkten bzw. indirekten Methode gesprochen. Diese Bezeichnungen sind wenig zutreffend, weil strenggenommen beide Verfahren direkt sind. Im einen Fall wird die Strichteilung auf dem Maßstab, im anderen Fall die Steigung der Kugelgewindespindel als Maßverkörperung genutzt. Der Drehgeber dient dabei lediglich als Interpolationshilfe. Geeigneter erscheinen die japanischen Bezeichnungen „Semi – Closed Loop“ und „Closed Loop“. Sie treffen den eigentlichen Zusammenhang besser.

Trend der Antriebstechnik in Richtung digitaler Achse

Durch den Trend der Antriebstechnik in Richtung digitaler Achsen verfügt ein großer Teil der neuen Servomotoren über Antriebsdrehgeber, die zusammen mit der Vorschubspindel prinzipiell zur Lageregelung verwendet werden können. Mit einem solchen Antrieb muss entschieden werden, ob ein zusätzliches Längenmessgerät eingesetzt wird, oder ob die Vorschubspindel zusammen mit dem ohnehin vorhandenen Antriebsdrehgeber ausreicht.

Die im Folgenden betrachteten Probleme der Positionserfassung mit Spindel/Drehgeber-Systemen sollten bei solchen Entscheidungen nicht aus den Augen verloren werden. Sie können eine vermeintlich preiswerte Maschine teuer werden lassen, wenn festgestellt wird, dass deren Genauigkeit nicht ausreicht.

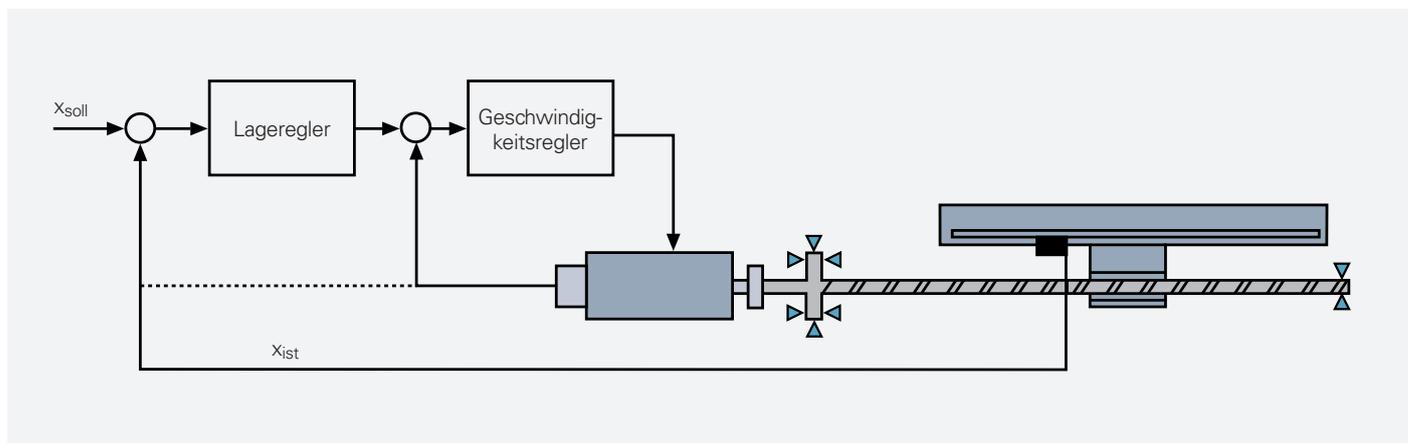


Abbildung 1: Typisches Vorschubsystem einer numerisch gesteuerten Werkzeugmaschine mit Längenmessgerät und Antriebsdrehgeber. Im Gegensatz zur Lageregelung mit Spindel/Drehgeber wird mit dem Längenmessgerät die Vorschubmechanik vom Regelkreis eingeschlossen.

Positionierfehler durch mechanische Einflüsse

Kinematische Fehler

Kinematische Fehler, die der Positionserfassung über Vorschubspindel und Drehgeber direkt zugeordnet werden können, entstehen durch Steigungsfehler der Kugelgewindespindel, durch Spiel in der Vorschubmechanik und den sogenannten Steigungsverlust. Steigungsfehler wirken sich direkt auf das Messergebnis aus, weil die Gewindesteigung des Kugelgewindetriebs als Maßverkörperung für die Längenmessung genutzt wird. Spiel in der Vorschubmechanik führt zu Umkehrspannen. Steigungsverlust tritt beim Anfahren von Kugelgewindetrieben mit Zwei-Punkt-Vorspannung infolge einer Verlagerung der Kugeln auf und kann zu Umkehrfehlern in der Größenordnung von $1\ \mu\text{m}$ bis $10\ \mu\text{m}$ führen (vgl. Schröder, Wilhelm: Feinpositionierung mit Kugelgewindetrieben).

Fehlerkompensation

Die Kompensation von solchen Steigungsfehlern und Umkehrspannen ist mit den meisten Steuerungen möglich. Zur Bestimmung der Kompensationswerte sind jedoch aufwendige Messungen mit externen Messgeräten wie Interferometern und Kreuzgittermessgeräten nötig. Zudem sind die Umkehrspannen oft nicht über längere Zeiträume stabil und müssen deshalb entsprechend nachkalibriert werden (Abbildung 2).

Verformung der Vorschubmechanik durch Kräfte

Kräfte, die zur Verformung der Vorschubmechanik führen, bewirken eine Verschiebung der tatsächlichen Achsschlitten-Position gegenüber der mit Vorschubspindel und Drehgeber erfassten Position. Sie sind im Wesentlichen Massenkräfte beim Beschleunigen des Schlittens, Prozesskräfte der Zerspanung und Reibungskräfte in den Führungen. Die mittlere axiale Steifigkeit einer Vorschubmechanik nach Abbildung 1 liegt im Bereich von $100\ \text{N}/\mu\text{m}$ bis $200\ \text{N}/\mu\text{m}$ (bei Abstand zwischen Kugelgewindemutter und Festlager von $0,5\ \text{m}$ und einem Durchmesser der Kugelgewindespindel von $40\ \text{mm}$).

Schnittkräfte

Die Schnittkräfte können zwar ohne weiteres im kN-Bereich liegen, wirken aber nicht nur auf das Vorschubsystem, sondern auf die gesamte Struktur der Maschine und somit zwischen Werkstück und Werkzeug. Die Verformung des Vorschubsystems hat somit an der Gesamtverformung der Maschine in der Regel nur einen geringen Anteil. Mit einem Längenmessgerät kann dementsprechend maximal dieser geringe Anteil erkannt und ausgeregelt werden. Maßkritische Bauteile werden zudem meist mit kleinen Vorschubkräften und dementsprechend geringen Verformungen der Maschine geschliffen.

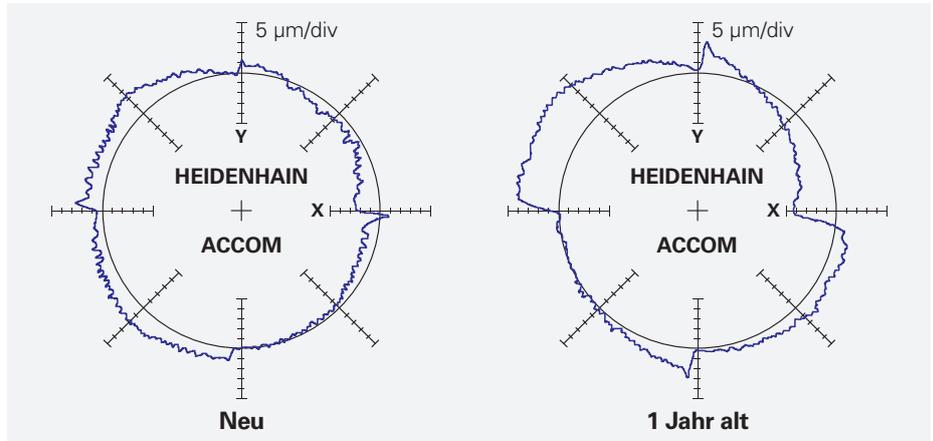


Abbildung 2: Kreisformtests eines Bearbeitungszentrums ohne Längenmessgeräte im Neuzustand und nach einem Jahr. Das Umkehrspiel hat in der X-Achse deutlich zugenommen.

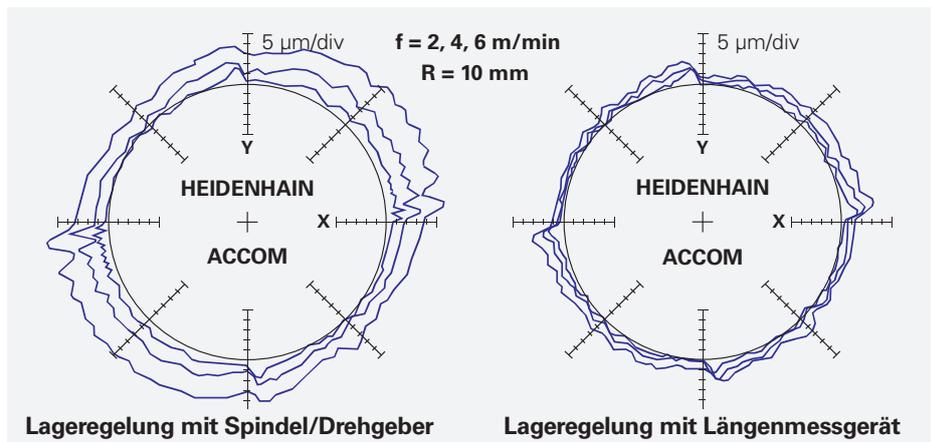


Abbildung 3: Kreisformtests eines mit Längenmessgeräten nachgerüsteten Bearbeitungszentrums. Mit Lageregelung via Spindel/Drehgeber weichen die Kreise bei höheren Vorschubgeschwindigkeiten von der Idealform erheblich ab. Mit Längenmessgeräten ist die Konturtreue deutlich besser.

Beschleunigungskräfte

In Verbindung mit einer typischen Schlittenmasse von $500\ \text{kg}$ und einer moderaten Beschleunigung von $4\ \text{m}/\text{s}^2$ ergeben sich Verformungen von $10\ \mu\text{m}$ bis $20\ \mu\text{m}$, die vom Spindel/Drehgeber-System nicht erkannt werden können. Da der allgemeine Trend der möglichen Beschleunigungen in deutlich höhere Bereiche geht, werden hier zunehmend große Verformungen auftreten.

Reibungskräfte

Die Reibungskräfte in den Führungen liegen je nach Art der Lagerung zwischen $1\ \%$ bis $2\ \%$ der Normalkraft für Rollenführungen und $3\ \%$ bis $12\ \%$ der Normalkraft für Gleitführungen (vgl. VDW-Bericht 0153: Untersuchung von Wälzführungen zur Ver-

besserung des statischen und dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen). Mit einer Normalkraft von $5000\ \text{N}$ ergeben sich somit Verformungen der Vorschubmechanik von $0,25\ \mu\text{m}$ bis $6\ \mu\text{m}$.

Kreisformtest zur Überprüfung von Werkzeugmaschinen

Ein typisches Beispiel für beschleunigungs- und geschwindigkeitsabhängige Fehler sind die an einem Vertikal-Bearbeitungszentrum aufgenommenen Kreisformtests (Abbildung 3). Im Fall der Lageregelung mit Spindel und Drehgeber weichen die Kreise bei höheren Bahngeschwindigkeiten erheblich von der Idealform ab. Mit Längenmessgeräten zeigt dasselbe Bearbeitungszentrum eine deutlich bessere Konturtreue.

Positionierfehler aufgrund der Erwärmung der Spindel

Positionierfehler aufgrund der Erwärmung der Kugelgewindespindel stellen das größte Problem der Positionserfassung über Spindel und Drehgeber dar. Ihre Ursache liegt in der Doppelfunktion des Kugelgewindetriebs, der einerseits die Drehbewegung des Servomotors möglichst steif in eine lineare Vorschubbewegung umsetzen soll, andererseits aber auch als präzise Maßverkörperung dienen muss. Diese Doppelfunktion stellt einen problematischen Kompromiss dar, weil sowohl die Steifigkeit als auch die Erwärmung von der Vorspannung der Kugelgewindemutter und der Festlager abhängen. In erster Näherung ist die axiale Steifigkeit der Kugelgewindemutter ebenso wie ihr Reibmoment der Vorspannung proportional.

Reibung in der Spindelmutter

In der Kugelgewindemutter wird in der Regel der größte Teil der Reibung eines Vorschubsystems erzeugt. Die Ursache hierfür liegt in der komplexen Kinematik einer Kugelgewindemutter. Entgegen der auf den ersten Blick rollenden Bewegung der Kugeln tritt in Kugelgewindetrieben ein erheblicher Anteil an Gleitreibung auf. Neben dem Mikroschlupf infolge von Relativbewegungen in den eingedrückten Kontaktbereichen tritt vor allem Makroschlupf infolge kinematischer Zwangsbedingungen auf. Die Kugeln

sind in den Gewindegängen nicht vollständig geführt und taumeln deshalb wie „Tennisbälle in der Regenrinne.“ Ein ständiges Drängeln und Schieben mit zeitweisem Rutschen der Kugeln ist die Folge. Die Reibung zwischen den Kugeln ist durch die hohe Flächenpressung infolge des fehlenden Trennkäfigs beträchtlich. Wie in jedem Schrägkugellager tritt Bohrreibung wegen des nicht orthogonal zur Drehachse der Kugeln stehenden Berührungsdurchmessers auf. Jede Kugel dreht sich deshalb um den Berührungsdurchmesser. Untersuchungen haben zudem gezeigt, dass die Bewegung der Kugeln im Gewinde nur durch einen von der Gewindesteigung verursachten zusätzlichen Gleitanteil möglich ist (vgl. Weule, Hartmut / Rosum, Jens: Optimization of the friction behaviour of ball screw drives through WC/C coated roller bodies).

Das Rückführsystem ist eine besondere Problemzone von Kugelgewindetrieben. Bei jedem Eintritt in das Rückführsystem wird ebenso wie beim Austritt die Bewegung der Kugel vollständig verändert. Unter anderem muss die Rotationsenergie der Kugel, die sich im Eilgang mit typisch 8000 U/min dreht, jeweils auf- und abgebaut werden. Im Gegensatz zum vorgespannten Gewindebereich stehen die Kugeln in der Rückführung nicht unter Vorspannung. Aus energetischen

Gründen ist das Rückführsystem deshalb ein bevorzugter Aufenthaltsort für die Kugeln. Ohne trickreiche Maßnahmen zum Wiedereinführen der Kugeln in das Gewinde am Ende des Rückführsystems entsteht ein Stau im Rückführsystem, der zum bekannten Klemmen des Kugelgewindetriebs führen kann.

Das Reibmoment eines geschliffenen Präzisionskugelgewindetriebs mit 40 mm Durchmesser und 10 mm Steigung wurde von Golz (vgl. Golz, Hans Ulrich: Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben) für verschiedene Vorspannungen und Drehzahlen gemessen (Abbildung 4). Deutlich erkennbar ist die Stribeck-Charakteristik des Reibmoments. Sie bestätigt den hohen Anteil an Festkörper- und Mischreibung in Kugelgewindetrieben bei niedrigen Drehzahlen. Bei hohen Drehzahlen dominiert die viskose Reibung. Interessant ist, dass für diesen typischen Kugelgewindetrieb die normalen Bearbeitungsvorschübe weit unterhalb des Minimums im Reibmoment liegen. Die Eilgangvorschübe liegen hingegen weit oberhalb. Der optimale Wirkungsgrad dieses Kugelgewindetriebs ist deshalb nicht nutzbar. Das Reibmoment ist nur schwach abhängig von der axialen Belastung der Kugelgewindemutter (vgl. ebd.).

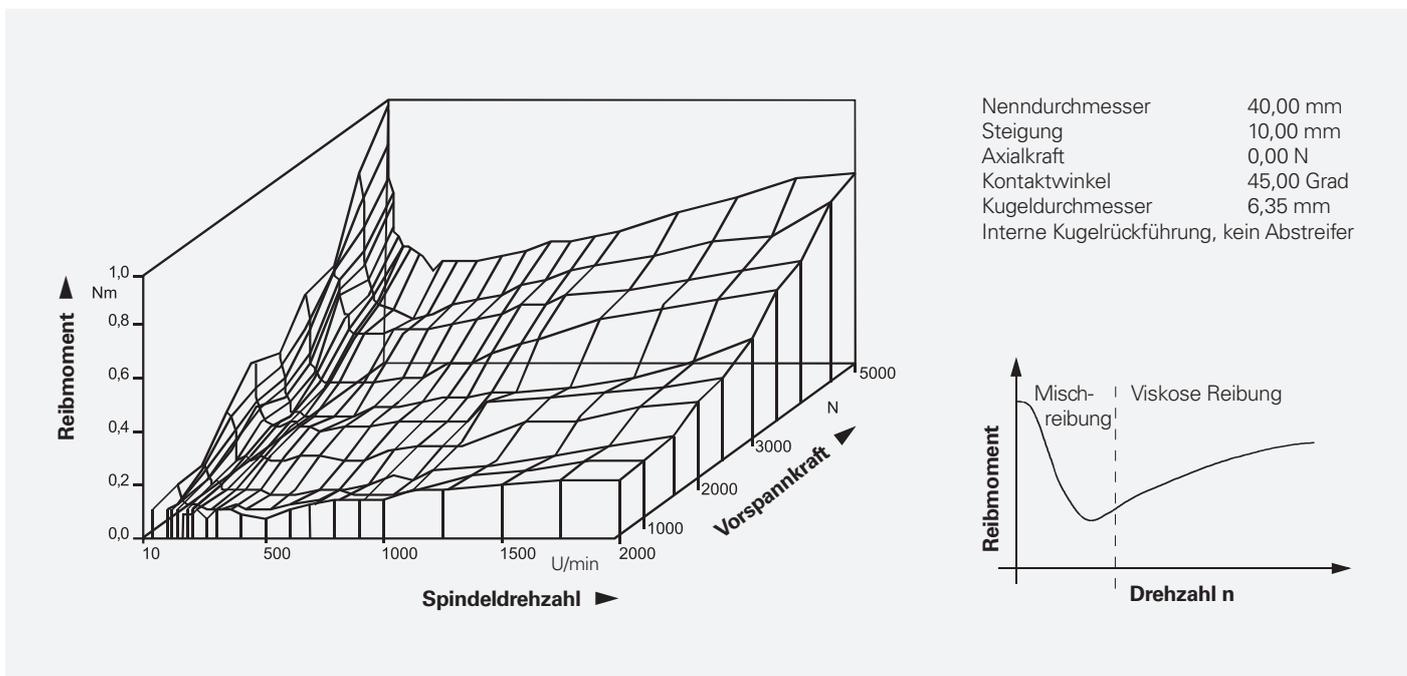


Abbildung 4: Gemessenes Reibmoment eines 2-Punkt-vorgespannten Kugelgewindetriebs (vgl. ebd.). Die Stribeck-Charakteristik ist deutlich zu erkennen.

In der Spindelmutter erzeugte Reibungswärme

Mit einer typischen Vorspannung von 3 kN und unter Berücksichtigung des fehlenden Abstreifers ergibt sich ein Leerlauf- oder Reibmoment von 0,5 Nm bis 1 Nm. Das bedeutet, dass im Eilgang bei einer Drehzahl der Kugelgewindespindel von 2000 U/min ca. 100 W bis 200 W Reibungswärme in der Kugelgewindemutter erzeugt werden.

Zukünftig mehr Reibungswärme

Mit zunehmender Eilganggeschwindigkeit muss entweder die Steigung oder die Drehzahl der Kugelgewindespindel erhöht werden. In den letzten 5 Jahren wurde die maximal zulässige Drehzahl von Kugelgewindetrieben verdoppelt, die Vorspannung und damit die Reibung der Mutter konnte wegen der ständig steigenden Anforderung an das Beschleunigungsvermögen der Kugelgewindetribe nicht reduziert werden. Die Wärmeentwicklung in Kugelgewindetrieben hat deshalb deutlich zugenommen und wird auch in Zukunft weiter steigen.

Messung der Positioniergenauigkeit nach ISO 230-3

Der Einfluss dieser Reibungswärme auf das Positionierverhalten der Vorschubachse wird deutlich, wenn Positioniertests nach der internationalen Norm ISO/DIS 230-3 durchgeführt werden. Diese Norm beinhaltet Vorschläge, wie thermische Verlagerungen von Dreh- und Fräsmaschinen infolge von externen und internen Wärmequellen einheitlich gemessen werden können (Abbildung 5).

Verformungen der Maschinenstruktur als Folge von Veränderungen der Umgebungsbedingungen oder durch Wärmeentwicklung im Hauptspindeltrieb werden mit Hilfe von 5 Tastern, die gegen einen in der Werkzeugaufnahme eingespannten Messzylinder messen, aufgenommen. Dadurch ist die Bestimmung aller 5 relevanten Freiheitsgrade möglich. Zum Testen der Vorschubachsen wird vorgeschlagen, eine wiederholte Positionierung auf zwei Punkte, die möglichst nahe an den Enden

des Verfahrbereichs liegen, mit einem vorher vereinbarten Prozentsatz der Eilganggeschwindigkeit durchzuführen. Die Veränderung der Positionen gegenüber den Ausgangswerten wird protokolliert. Der Test ist bis zum sicheren Erkennen eines Sättigungseffekts durchzuführen. Außer dem Laserinterferometer können auch einfachere Testmittel wie z. B. Messuhren für den Achsentest verwendet werden. Dadurch sind solche Untersuchungen in jeder Werkstatt ohne großen Aufwand durchführbar.

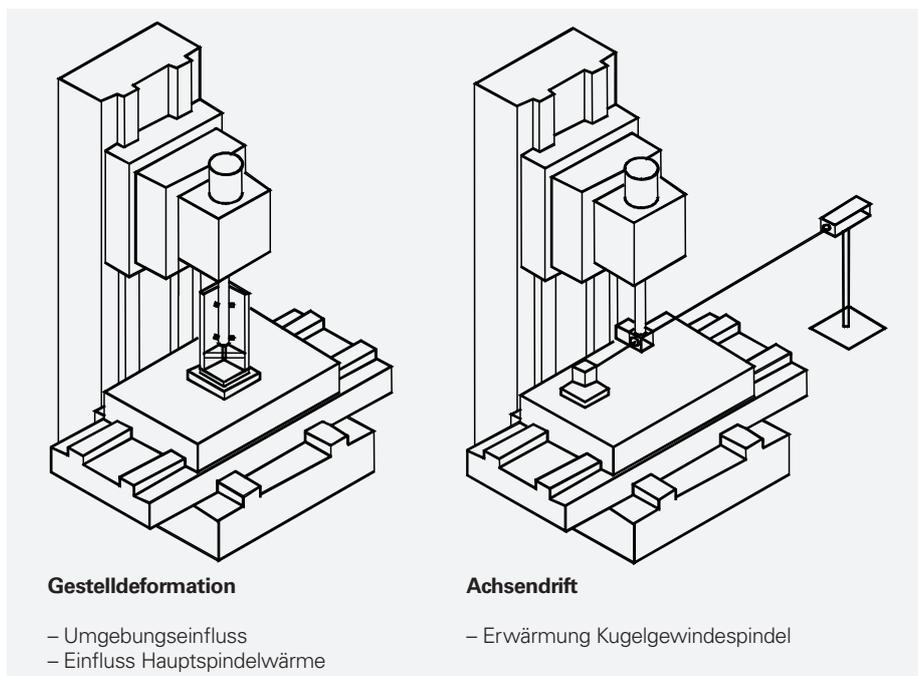


Abbildung 5: Messung der thermischen Verlagerungen eines Bearbeitungszentrums nach ISO/DIS 230-3.

Einfluss der Lagerung des Kugelgewindetriebs auf die Positioniergenauigkeit

Je nachdem ob die Kugelgewindespindel sich frei ausdehnen kann oder nicht sind unterschiedliche Verhalten bei solchen Achsentests zu erwarten. Die verschiedenen Arten der Lagerung von Kugelgewindespindeln sind in Abbildung 6 dargestellt.

Einseitig feste Lagerung

Im Fall der fest/lose Lagerung wird sich die Kugelgewindespindel entsprechend ihres Temperaturprofils ausgehend vom Festlager frei ausdehnen. Der thermische Nullpunkt einer solchen Vorschubachse liegt am Ort des Festlagers. D. h., theoretisch würde nur dann keine thermische Verlagerung feststellbar sein, wenn die Kugelgewindemutter sich am Ort des Festlagers befindet. Alle anderen Positionen sind von der thermischen Dehnung der Kugelgewindespindel betroffen.

Abbildung 7 zeigt das Ergebnis eines Positionierversuchs nach ISO/DIS 230-3 an einem mit Längenmessgeräten nachgerüsteten Vertikal-Bearbeitungszentrum (Baujahr 1998). Drei Positionen auf der X-Achse wurden insgesamt 100-mal mit 10 m/min angefahren. Unter Berücksichtigung der Stillstandszeiten zur Messwerterfassung betrug die mittlere Verfahrgeschwindigkeit während des Tests ca. 4 m/min. Zusätzlich zu den zwei in der Norm empfohlenen Positionen an den Endlagen wurde eine dritte Position in der Mitte des Verfahrbereichs mit aufgenommen. Abbildung 7 zeigt die einseitigen, auf ihren Anfangswert bezogenen Positionswerte. Die Lageregelung erfolgte zuerst über das Spindel/Drehgeber-System. In einem zweiten Versuch wurden die Längenmessgeräte unter ansonsten gleichen Bedingungen verwendet. Das Vergleichsmessgerät war ein VM 101 der Firma HEIDENHAIN.

Trotz der moderaten Vorschubgeschwindigkeit von 10 m/min (Eilgang 24 m/min) verschiebt sich die weit vom Festlager der Kugelgewindespindel entfernte Position innerhalb von 40 min um mehr als 110 µm. Interessant ist, dass die Drift sofort nach dem Einschalten sehr schnell ansteigt. Jede Änderung der durchschnittlichen Vorschubgeschwindigkeit in einem Fertigungsprozess wirkt sich deshalb sofort auf die Positioniergenauigkeit aus. Ähnliche Ergebnisse wurden auch von Schmitt veröffentlicht (vgl. Schmitt, Thomas: Modell der Wärmeübertragungsvorgänge in der mechanischen Struktur von CNC-gesteuerten Vorschubsystemen).

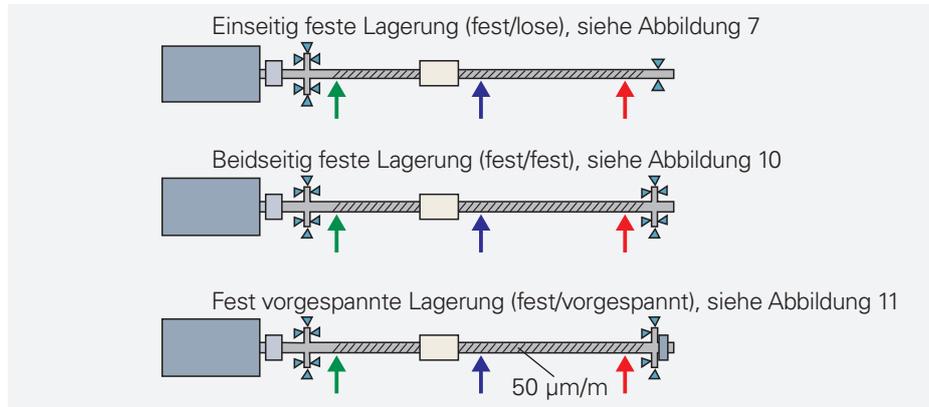


Bild 6: Unterschiedliche Arten der Lagerung von Kugelgewindespindeln in Vorschubachsen.

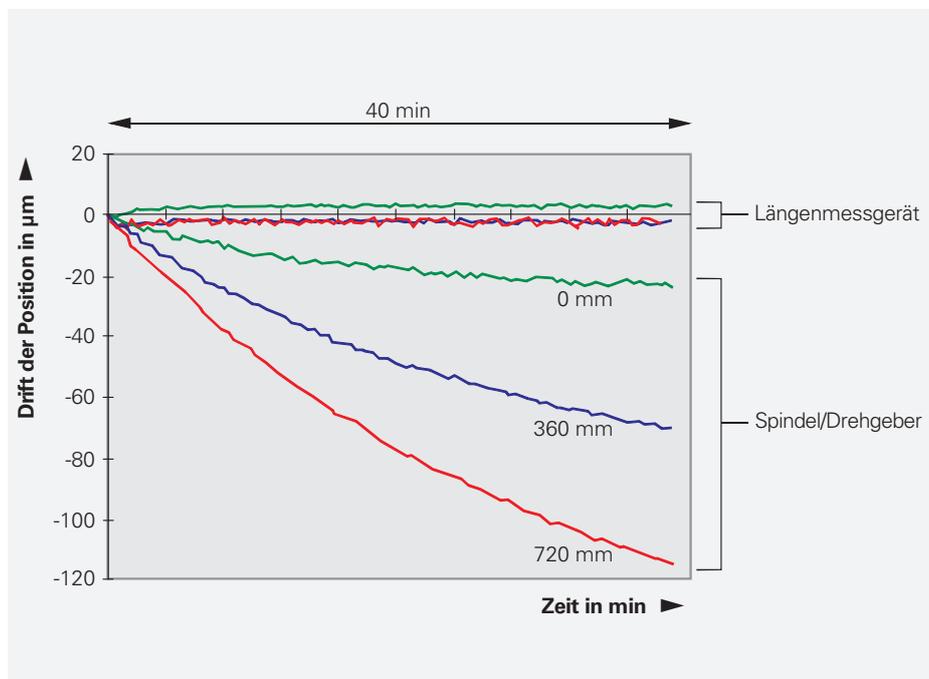


Abbildung 7: Drift dreier Positionen bei der Messung der Positioniergenauigkeit nach ISO/DIS 230-3 an einem BAZ mit fest/lose gelagerten Kugelgewindespindeln. Bei der Positionserfassung mit Spindel und Drehgeber ist eine deutliche Drift der Positionen infolge des thermischen Wachstums der Kugelgewindespindel zu erkennen.

Keine Drift der mit Längenmessgeräten erfassten Position

Die gemessene Positioniergenauigkeit hängt gerade im Fall weniger Wiederholungen direkt von der Anzahl der Wiederholungen ab. Die Messung mit den nachgerüsteten Längenmessgeräten zeigt keine Drift.

Serienfertigung

Um die Übertragbarkeit dieses Versuchs auf reale Produktionsbedingungen zu demonstrieren, wurde auf der gleichen Maschine eine kleine Serie von Aluminiumwerkstücken gefertigt. Dazu wurden 8 Spannpositionen eingerichtet und Werkstücke von 70 mm x 70 mm Grundfläche nach dem Einschalten bearbeitet. Mit insgesamt 4 Werkzeugen wurden 4 Taschen und 2 Radien mit einer Zustellung in Z von 1 mm gefräst (Abbildung 8).

Nach der 6minütigen Bearbeitung wurden die 8 Teile nicht ausgetauscht, sondern lediglich die Zustellung in Z um 1 mm erhöht. Infolge der Dehnung der Kugelgewindespindel zeigen alle Werkstücke auf der linken Seite ein Treppnmuster. Besonders deutlich ausgeprägt ist dieses Muster bei dem am weitesten vom Festlager aufgespannten Werkstück. Die rechten Seiten sind glatt, weil durch die Verschiebung der Werkstücke in positiver X-Richtung bei jeder neuen Bearbeitung auch die alten Stufen weggefräst wurden. In Y-Richtung ist prinzipiell derselbe Effekt wie in der X-Achse zu beobachten. Wegen der geringen Bewegung der Y-Achse ist das Treppnmuster jedoch deutlich schwächer. In X-Richtung zeigt die Vermessung des Treppnmusters eine Drift von ca. 90 µm mit einer Zeitkonstante der Erwärmung von einer knappen Stunde (Abbildung 9).

Wenn vorbearbeitete Werkstücke mit kritischen Anschlussmaßen weiterbearbeitet werden sollen, muss während dieser Stunde der Maschinennullpunkt ständig überprüft und korrigiert werden. Nach einer Stunde ist die Maschine zwar im thermischen Gleichgewicht, driftet aber bei einem Bearbeitungsstopp genauso in umgekehrter Richtung. Wenn das Bearbeitungsprogramm und damit die mittlere Vorschubgeschwindigkeit gewechselt wird, dauert es ebenfalls wieder ca. 1 Stunde, bis die Kugelgewindespindel ihr thermisches Gleichgewicht erreicht hat.

Beidseitig feste Lagerung

Im Fall der fest/fest Lagerung sind die Zusammenhänge komplizierter. Mit ideal steifen Lagern würde die Dehnung der Kugelgewindespindel an ihren Endpunkten verhindert. Die hierzu erforderlichen Kräfte sind jedoch beträchtlich. Um die Dehnung einer Kugelgewindespindel mit 40 mm Durchmesser zu verhindern, sind pro Grad Erwärmung 2,6 kN von den Lagern aufzubringen. Ein übliches Schrägkugellager wäre bei größerer Erwärmung schnell überfordert. Unter realen Bedingungen liegt die Steifigkeit der 'Festlager' mit ihren Lagersitzen in der Größenordnung von 800 N/µm. D. h., bei Erwärmung der Kugelgewindespindel werden sich die Lager deutlich verformen. Die Endpunkte der Kugelgewindespindel verbleiben nicht an ihrem ursprünglichen Ort. Der gleiche Versuch wie in Abbildung 7 wurde an einem Vertikal-BAZ (Baujahr 1998) mit beidseitig fest gelagerter Kugelgewindespindel durchgeführt. Der mechanische Aufbau der untersuchten 1 m langen Vorschubachse war sehr steif. Auf beiden Seiten der Kugelgewindespindel wurden gleiche Lager mit direkt im Guss eingearbeiteten Lagersitzen verwendet.

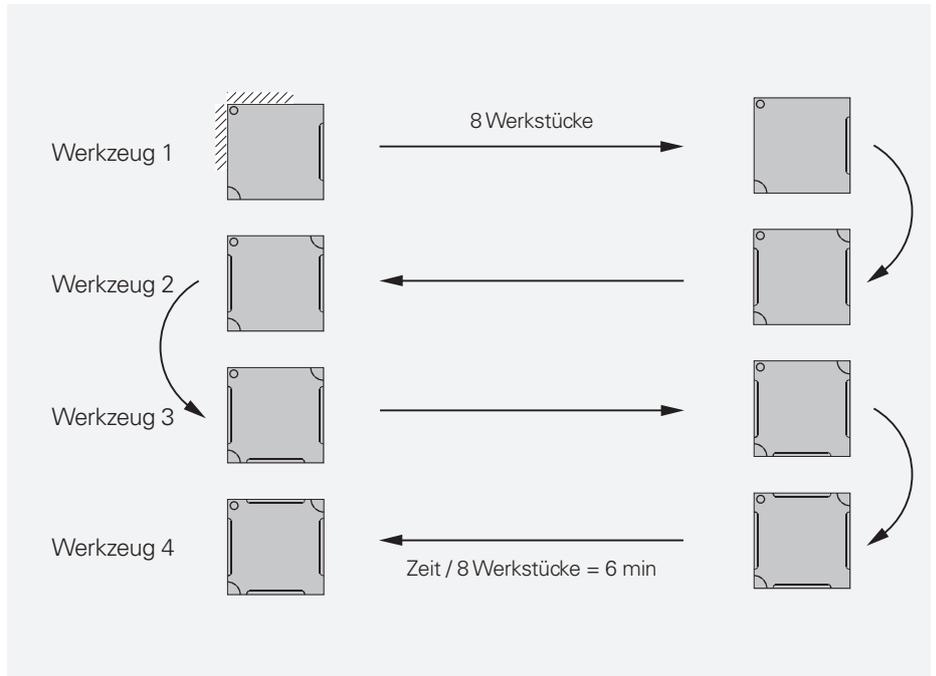


Abbildung 8: Versuchsanordnung zur Serienfertigung mit Mehrfachaufspannung. Mit insgesamt 4 Werkzeugen wurden 4 Taschen und 2 Radien jeweils 1 mm tief gefräst. Zum Nachweis der thermischen Drift infolge der Erwärmung der Kugelgewindespindel wurden die Werkstücke nach der Bearbeitung nicht ausgetauscht, sondern lediglich die Tiefenzustellung erhöht.

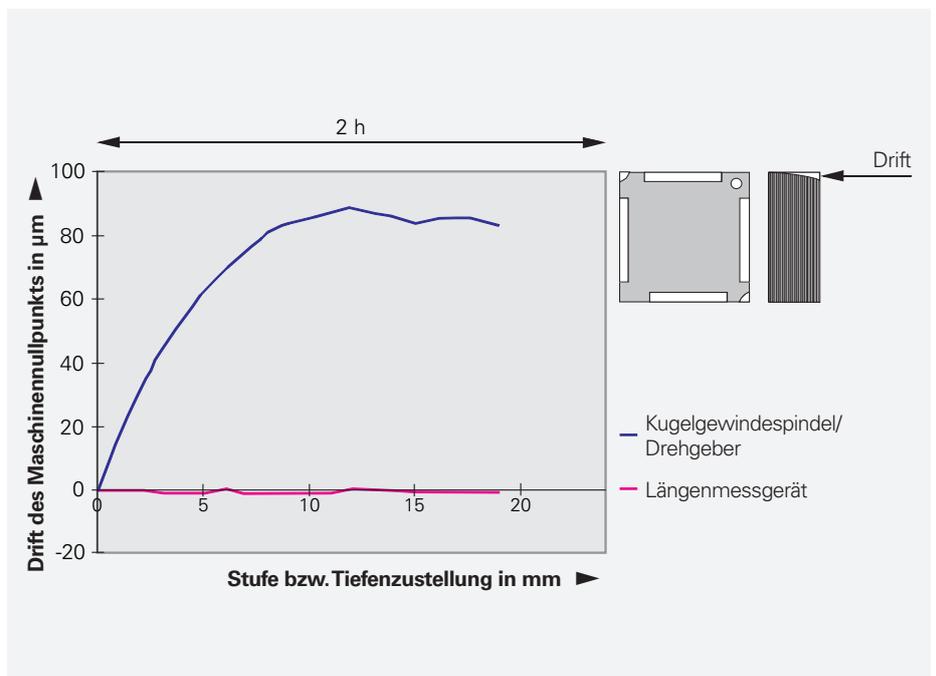


Abbildung 9: Ergebnis des Versuchs zur Abbildung 8. Die linke Tasche der gefertigten Werkstücke zeigt ein deutliches „Treppnmuster“ infolge der Erwärmung der Kugelgewindemutter.

Die Messergebnisse in Abbildung 10 zeigen den theoretisch erwarteten Verlauf. Die Endpunkte der Kugelgewindespindel können nicht an ihrem Ort gehalten werden und bewegen sich jeweils um 20 μm bis 30 μm in Richtung der durch Erwärmung erzeugten Kraft. Im Vergleich zu Abbildung 7 ist die Gesamtdehnung der Kugelgewindespindel um ca. 50 % geringer. D. h., die beidseitig feste Lagerung konnte die Dehnung halbieren. Der thermische Nullpunkt der Vorschubachse scheint in der Mitte des Verfahrbereichs zu liegen. Das ist auch zu erwarten, weil die Lager in guter Näherung gleiche Steifigkeiten haben, und die Kugelgewindespindel gleichmäßig über ihre gesamte Länge erwärmt wurde.

Fest vorgespannte Lagerung

Für Verfahrprogramme mit hohen Durchschnittsgeschwindigkeiten ist diese Art der Lagerung problematisch, weil die Belastung der Lager zu Lasten der Lebenserwartung geht und die aufzunehmenden Kräfte zur Verformung der Maschinenstruktur führen. Deshalb wird oft im Sinne eines Überdruckventils die fest/vorgespannte Lagerung verwendet (Abbildung 6). Mit einer üblichen Vorspannung von 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ würde man erwarten, dass sich eine solche Lageranordnung bis zu einer Erwärmung um ca. 5 K wie eine fest/fest-Kombination verhält, darüber hinaus wie eine fest/lose-Kombination.

Abbildung 11 zeigt das Ergebnis eines entsprechend den vorab beschriebenen Versuchs durchgeführten Positioniertests an einem Bearbeitungszentrum mit fest/vorgespannt gelagerten Kugelgewindespindeln. Erstaunlicherweise kann trotz fest/vorgespannter Lagerung eine Positionsdrift wie in Abbildung 7 beobachtet werden. D. h., die Vorschubachse verhält sich in erster Näherung wie eine fest/lose-Anordnung. Der thermische Nullpunkt scheint in der Nähe des Festlagers zu liegen. Im Gegensatz zu den beiden vorangegangenen Versuchen konnte diese Achse nicht um einen Meter sondern nur um 500 mm verfahren werden. Die Größenordnung der Drift ist deshalb nicht vergleichbar. Dieser Versuch zeigt, dass das einfache Modell der fest/vorgespannt gelagerten Kugelgewindespindel der Realität nicht standhält. In der Regel ist die Seite mit dem abhebbaren Lager deutlich weniger steif als die Festlagerseite. Die Ursache hierfür liegt in dem notwendigerweise unterschiedlichen Aufbau der beiden Lagerstellen. Während die eine Seite als echtes Festlager mit in sich verspannten Lagern auch dann noch als Festlager fungieren muss, wenn die zweite Seite abgehoben hat, verliert die zweite Seite mit zunehmender Erwärmung ihre Vorspannung und damit auch ihre Steifigkeit.

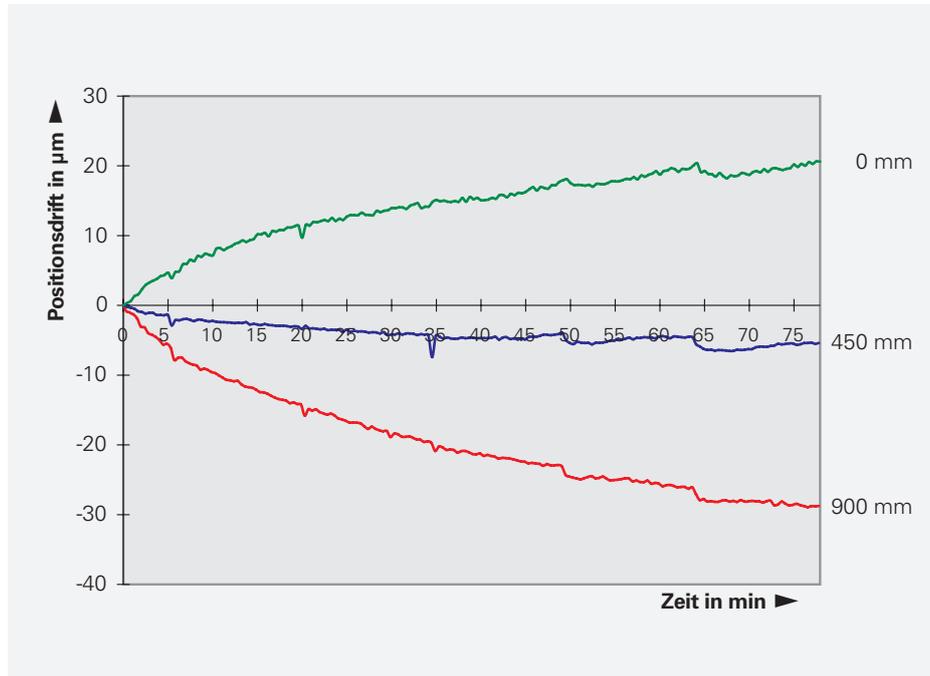


Abbildung 10: Drift dreier Positionen bei der Messung der Positioniergenauigkeit nach ISO/DIS 230-3 an einer Vorschubachse mit beidseitig fest gelagerter Kugelgewindespindel. Infolge der Positionserfassung mit Spindel und Drehgeber ist eine deutliche Drift der Positionen infolge des thermischen Wachstums der Kugelgewindespindel zu erkennen.

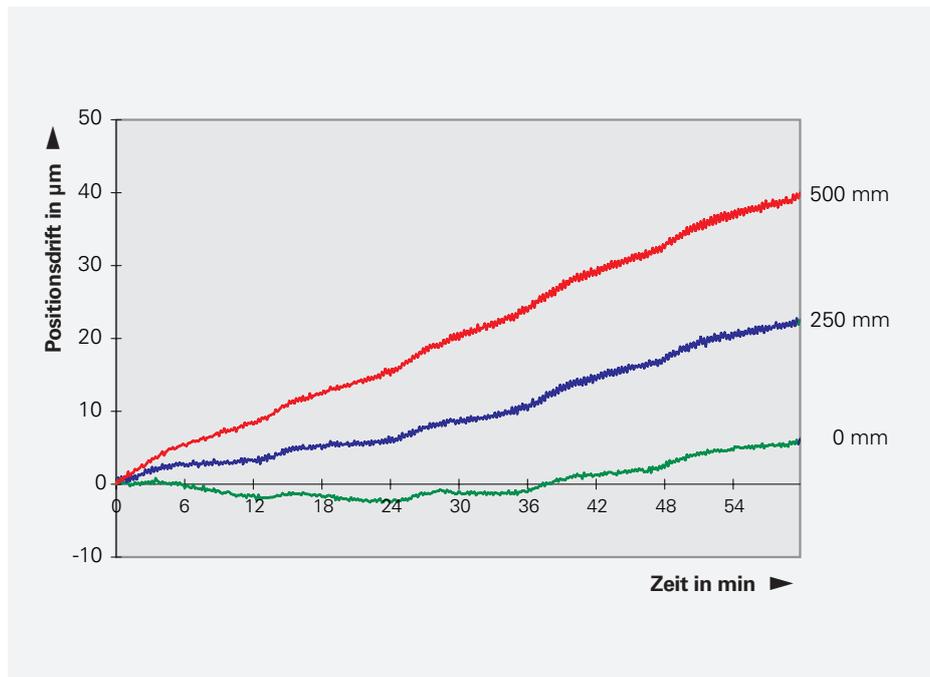


Abbildung 11: Drift dreier Positionen bei der Messung der Positioniergenauigkeit nach ISO/DIS 230-3 an einer Vorschubachse mit fest/vorgespannt gelagerter Kugelgewindespindel. Infolge der Positionserfassung mit Spindel und Drehgeber ist eine deutliche Drift der Positionen zu erkennen.

Einfluss der Temperaturverteilung entlang der Kugelgewindespindel

Neben dem Verhältnis der Lagersteifigkeiten hängt die Lage des thermischen Nullpunkts insbesondere von der Temperaturverteilung entlang der Kugelgewindespindel ab. Abbildung 12 zeigt eine Thermographieaufnahme eines Kugelgewindetribs nach mehrstündigem Reversierbetrieb zwischen zwei 150 mm voneinander entfernten Punkten. Wie deutlich zu erkennen ist, verbleibt die Erwärmung auch nach mehreren Stunden fast ausschließlich in dem Bereich, den die Kugelgewindemutter beim Verfahren überdeckte. Die Erwärmung der Kugelgewindespindel und damit die thermische Dehnung ist demnach sehr lokal begrenzt.

Da von den Lagern der Kugelgewindespindel bestenfalls eine gleichmäßige mechanische Spannung und damit eine konstante Dehnung entlang der Kugelgewindespindel erzeugt werden kann, ist die Kompensation von thermischen Dehnungen infolge lokaler Erwärmung nicht möglich.

Ein einfaches Rechenbeispiel zeigt dies deutlich (Abbildung 13). Eine lokale Erwärmung um 10 K entsprechend dem rot angedeuteten Temperaturverlauf würde bei einer 1 m langen Kugelgewindespindel mit einseitig fester Lagerung Positionierfehler entsprechend der grünen Fehlerkurve erzeugen. Eine beidseitig feste Lagerung mit 700 N/μm Lagersteifigkeit würde eine Fehlerkurve entsprechend der blauen Kurve erzeugen. Infolge der von den Lagern ausgeübten Kräfte wird die Kugelgewindespindel an den nicht erwärmten Enden gestaucht. Der mittlere Teil der Kugelgewindespindel dehnt sich infolge der Erwärmung mit nahezu der gleichen Steigung wie im fest/lose gelagerten Fall. Der maximale Positionierfehler im fest/fest gelagerten Fall erreicht mit 22 μm etwa 2/3 des Fehlers, der im fest/lose gelagerten Fall auftritt.

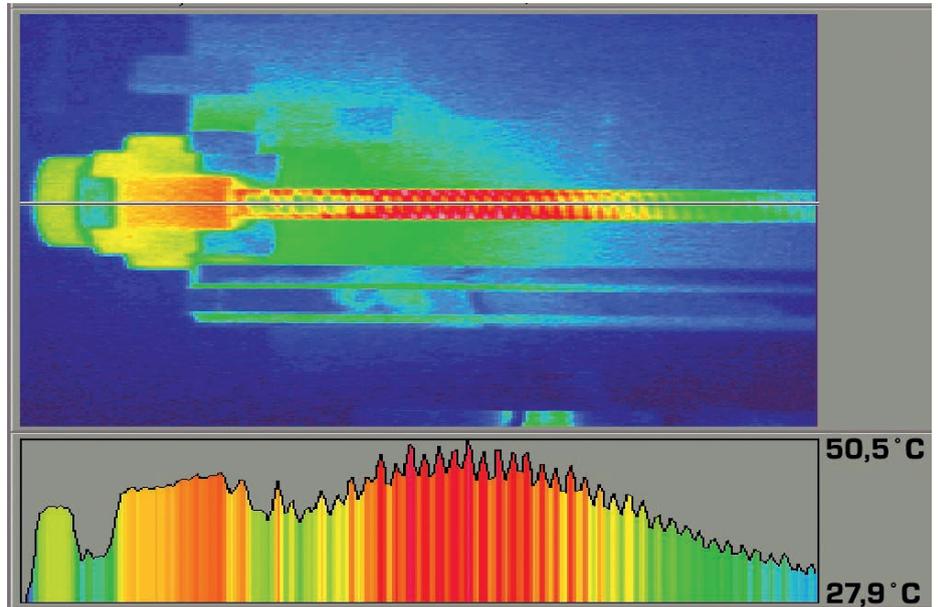


Abbildung 12: Lokale Erwärmung einer Kugelgewindespindel im Verfahrensbereich der Kugelgewindemutter nach 6-stündigem Reversierbetrieb mit 24 m/min zwischen zwei 150 mm voneinander entfernten Punkten (vgl. A. Frank / F. Ruech: Position measurement in CNC Machines). Für diese Thermografieaufnahme wurde der Maschinentisch am Ende des Verfahrenprogramms zur Seite gefahren. Zu erkennen ist der Riemenantrieb, das Festlager und die Kugelgewindespindel.

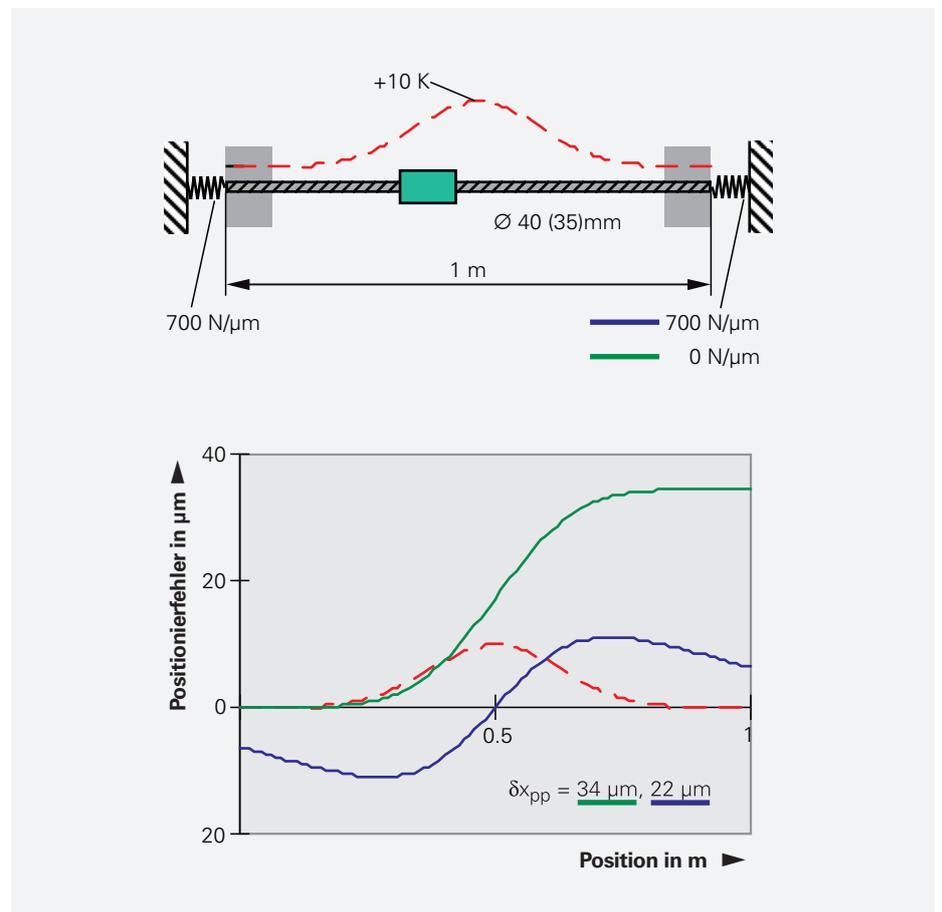


Abbildung 13: Positionierfehler einer Semi-Closed-Loop Anordnung infolge lokaler Erwärmung der Kugelgewindespindel.

Gegenmaßnahmen

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Erwärmung der Kugelgewindespindel infolge der Reibung in den Lagern und vor allem in der Kugelgewindemutter zu erheblichen Positionierfehlern führt, wenn die Achse im Semi-Closed Loop betrieben wird. Um diese Fehler zu vermeiden, werden neben der Verwendung von Längenmessgeräten auch der Einsatz von hohlgebohrten Kugelgewindespindeln, die mit einem Kühlmedium durchströmt werden sowie rein softwaretechnische Kompensationen in der Steuerung diskutiert.

Gekühlte Kugelgewindespindel

Der Kreislauf des Kühlmediums erfordert eine Bohrung in der Kugelgewindespindel und Drehdurchführungen in der Nähe der Spindellager. Abgesehen von den Dichtungsproblemen wird durch die Bohrung die mechanische Steifigkeit der Kugelgewindespindel in der ohnehin schwachen Zug/Druck-Richtung reduziert. Das größte Problem stellt jedoch die Bereitstellung eines ausreichend genau temperierten Kühlmediums dar. 1 °C Temperaturänderung ändert die Länge einer 1 m langen Kugelgewindespindel um 11 µm. Vor dem Hintergrund der beträchtlichen abzuführenden Wärmemengen ist die Einhaltung einer Temperaturkonstanz von < 1 K nicht einfach. Dies gilt insbesondere, wenn die Hauptspindel bzw. deren Lagerung mit demselben System gekühlt wird. Die erforderlichen Kühlleistungen können dann leicht im kW-Bereich liegen. Die Temperaturkonstanz von vorhandenen Hauptspindelkühlungen ist meist deutlich schlechter als 1 K. Ihr Einsatz zur Temperierung der Kugelgewindespindel ist deshalb oft nicht möglich. Um Kosten zu sparen, werden in

den Kühlsystemen gerne schaltende Regler eingesetzt. Da jeder Schaltvorgang von einer Temperaturüberschreitung ausgelöst wird, kann der einzelne Schaltvorgang auch als Längenänderung der gekühlten Kugelgewindespindel und damit als Positionierfehler der Achse beobachtet werden. Abbildung 14 zeigt das Ergebnis eines Positionierversuchs an einem vertikalen BAZ mit flüssigkeitsgekühlten, fest/lose gelagerten Kugelgewindespindeln. Während des Versuchs wurde die Achse mit 2,5 m/min langsam zwischen zwei 500 mm voneinander entfernten Punkten bewegt. Der max. Verfahrbereich betrug 800 mm. Die Positiondrift der vom Festlager weiter entfernten Position wurde beobachtet. Deutlich sichtbar ist das Schalten des Temperaturreglers. Seine Hysterese betrug 1 K. Gegenüber der ungekühlten Semi-Closed Loop Anordnung wird die Positiondrift deutlich reduziert. Die Schaltvorgänge erzeugen jedoch relativ schnelle Positionsänderungen, die sich bei der Bearbeitung von Werkstücken mit kurzer Bearbeitungszeit stärker auswirken als die langsame Positiondrift im Fall der ungekühlten Semi-Closed Loop Anordnung.

Software-Kompensation

Die Kompensation thermischer Verformungen mit Hilfe von analytischen Modellen, neuronalen Netzen und empirischen Gleichungen wird vielfach untersucht. Das Interesse gilt hierbei jedoch meist den Verformungen der Werkzeugmaschinenstruktur infolge von internen und externen Wärmequellen. Untersuchungen zur Kompensation der Achsdrift haben dagegen einen geringen Stellenwert. Insgesamt werden die Möglichkeiten solcher Softwarekompensationen im heutigen

EDV-Umfeld häufig überschätzt. Eine im Labor einwandfrei arbeitende Kompensation ist in der Regel mit viel Aufwand an die spezielle Testmaschine angepasst worden. Die einfache Übertragung auf Maschinen aus einer Serienproduktion ist ohne aufwendige, individuelle Anpassung in der Regel nicht möglich. Am Beispiel der Vorschubachse zeigt sich mit welchen Variationen der Eingangsparameter zu rechnen ist.

Zur Kompensation der Dehnung der Kugelgewindespindeln muss deren Temperatur in Abhängigkeit von der Position bekannt sein, weil je nach Verfahrprogramm lokale Erwärmungen auftreten. Die direkte Temperaturmessung der rotierenden Kugelgewindespindel ist jedoch sehr aufwendig. Deshalb wird oft versucht, die Temperaturverteilung zu berechnen. Dies ist analytisch möglich, wenn für einzelne Abschnitte der Kugelgewindespindel die Wärmebilanz aufgestellt werden kann. Der Wärmeeintrag in einen solchen Abschnitt erfolgt durch Reibung in der Kugelgewindemutter, durch Wärmeleitung entlang der Kugelgewindespindel und durch Wärmeaustausch mit der Umgebung. Die Reibung der Kugelgewindemutter hängt nahezu linear von der Vorspannung der Mutter und in komplizierter Weise von der Art, Menge und Temperatur des Schmiermittels ab. Die Vorspannung der Mutter ändert sich üblicherweise um $\pm 10\%$ bis $\pm 20\%$ in individuell von der Kugelgewindespindel abhängiger Weise über deren Verfahrbereich. Im Laufe der ersten 6 Monate sind Abnahmen der durchschnittlichen Vorspannung auf 50% des ursprünglichen Wertes üblich. Aufgrund der statisch mehrfach überbestimmten Einbausituation der Kugelgewindespindel sind Klemmeffekte mit entsprechender Reibungszunahme nicht zu vermeiden. Schon diese wenigen Beispiele zeigen, dass die Berechnung der tatsächlichen Reibungswärme problematisch ist. Die Berechnung der Wärmeabgabe gestaltet sich ähnlich schwierig, weil sie stark von den meist unbekanntesten Umgebungsbedingungen abhängt. Schon die Lufttemperatur in der Umgebung der Kugelgewindespindel ist in der Regel unbekannt, spielt aber eine entscheidende Rolle bei der Berechnung der Wärmeabgabe.

Insgesamt läßt sich sicherlich feststellen, dass eine Softwarekompensation der Ausdehnung der Kugelgewindespindel ohne zusätzliche Temperatursensorik schon im einfachen Fall der fest/lose gelagerten Kugelgewindespindel wenig erfolgversprechend ist. Im Fall der fest/fest und fest/vorgespannten Lagerung müssen zusätzlich die Lagersteifigkeiten und die vorspannungsabhängige Reibung in den Lagern berücksichtigt werden. Die Kompensation erschwert sich dadurch noch weiter.

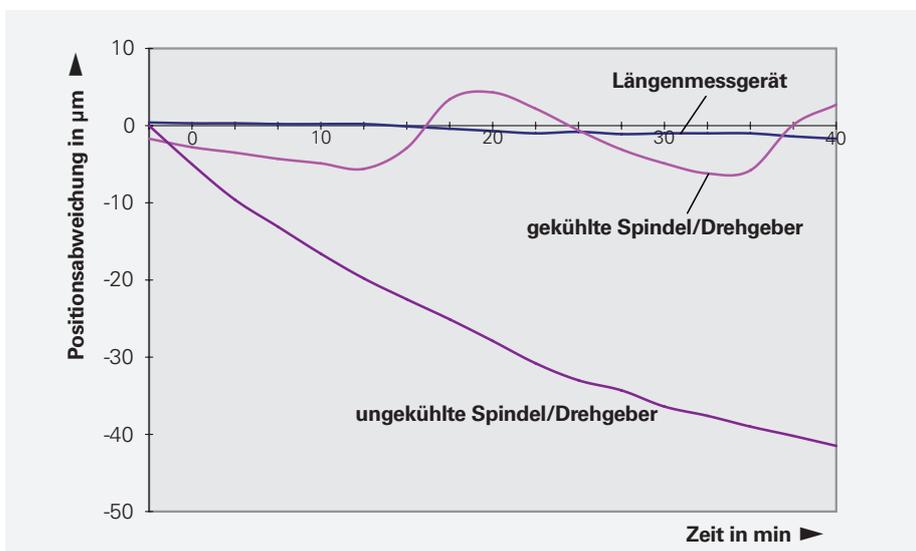


Abbildung 14: X-Achse eines Vertikal-BAZ mit flüssigkeitsgekühlter Kugelgewindespindel mit fest/lose Lagerung. Drift der vom Festlager entfernten Endposition bei Reversierbetrieb über 500 mm (Verfahrbereich 800 mm) mit 2,5 m/min. Die Achse war zu Testzwecken zusätzlich mit einem Längenmessgerät ausgerüstet.

Vergleich der Positionierfehler mit anderen Fehlern

Nach dieser Betrachtung der temperaturbedingten Positionierfehler von Vorschubachsen bleibt noch die Einordnung dieser Fehler in die anderen statischen und quasistatischen Fehler der untersuchten Bearbeitungszentren. Bei allen drei Maschinen wurden entsprechend ISO/DIS 230-3 auch die Gestelldeformationen infolge der im Hauptspindeltrieb freigesetzten Wärme untersucht. Das erste BAZ zeigte nach mehrstündigem Betrieb mit der maximalen Spindeldrehzahl von 6000 U/min maximale lineare Verformungen von {X: 5 µm, Y: 60 µm, Z: 15 µm}. Die rotatorischen Verformungen betragen maximal {A: 40 µm/m, B: 70 µm/m}.

Die Verformungen des zweiten BAZ sind in Abbildung 15 dargestellt. Es zeigte unter gleichen Bedingungen bei ebenfalls 6000 U/min maximale lineare Verformungen von {X: 5 µm, Y: 45 µm, Z: 55 µm}. Die rotatorischen Verformungen betragen maximal {A: 25 µm/m, B: 10 µm/m}. Das Dritte war mit einer höher drehenden Spindel und einer Mantelkühlung ausgerüstet. Es zeigte bei 12000 U/min lineare Verformungen von {X: 5 µm, Y: 5 µm, Z: 40 µm} und rotatorische Verformungen von maximal {A: 20 µm/m, B: 30 µm/m}. Im Vergleich zu den Strukturdeformationen erreichen die gemessenen Achsendriften mindestens die gleiche Größenordnung. Insbesondere bei fest/lose gelagerten Kugelgewindespindeln oder Maschinen mit effektiver Kühlung der Hauptspindel sind die Positionierfehler der im Semi-Closed-Loop betriebenen Vorschubachsen deutlich größer als die gemessenen Strukturdeformationen.

Der Vergleich mit den üblichen geometrischen Fehlern führt auf ähnliche Ergebnisse. Betrachtet man die Nick-, Roll- und Gierfehler von Vorschubachsen von 16 verschiedenen NC-Maschinen, so zeigt sich, dass diese Fehler üblicherweise in der Größenordnung von 10 µm/m bis 50 µm/m liegen (Abbildung 16). Multipliziert man diese Werte mit dem jeweiligen Abbe-Abstand, so ergibt sich der Positionierfehler. Erst bei mehr als 1 m werden Werte erreicht, die den Fehlern der Vorschubachse entsprechen.

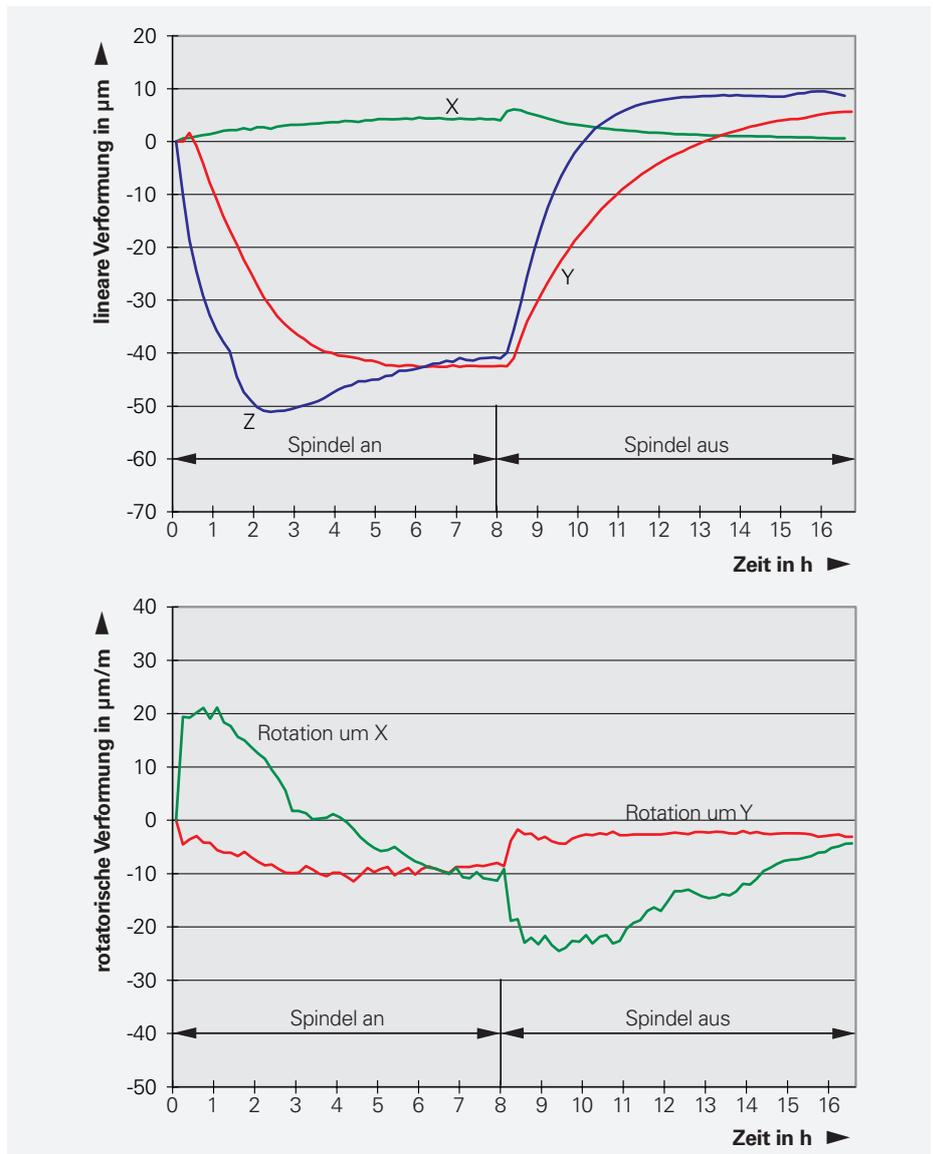


Abbildung 15: Gestelldeformation eines Vertikal-Bearbeitungszentrums infolge der im Hauptspindeltrieb bei 6000 U/min ohne Last erzeugten Wärme.

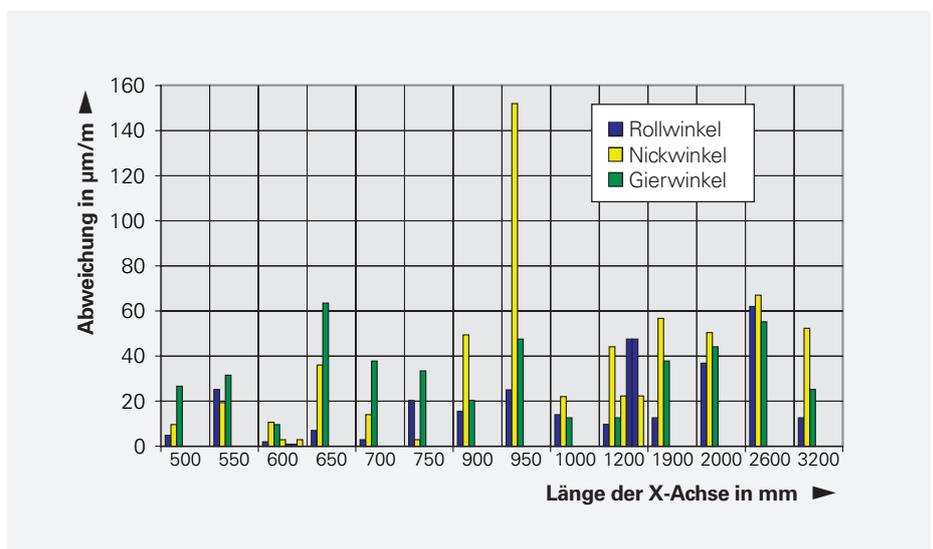


Abbildung 16: Nick-, Roll- und Gierwinkel von Vorschubachsen von 16 verschiedenen NC-Maschinen

Fazit

Die thermische Dehnung der Kugelgewindespindel ist das Hauptproblem der Positionserfassung mit Spindel und Drehgeber. Mit typischen Zeitkonstanten von 1 bis 2 Stunden entstehen je nach Art des Bearbeitungsprogramms Fehler in der Größenordnung von 0,1 mm. Dadurch überwiegen diese Positionierfehler oft die thermisch bedingten Strukturdeformationen und geometrischen Fehler von Bearbeitungszentren.

Nach jedem Wechsel des Bearbeitungsprogramms benötigt die Kugelgewindespindel ca. 1 Stunde, um einen thermisch stabilen Zustand zu erreichen. Dies gilt entsprechend auch für die Pausen in der Bearbeitung. Als Daumenregel für die thermische Dehnung einer 1 m langen, kalten, einseitig fest gelagerten Kugelgewindespindel gilt, dass sie nach jedem Doppelhub über die gesamte Länge um ca. 0,5 µm bis 1 µm wächst. Die Bewegungen summieren sich dabei innerhalb der Zeitkonstanten.

Wenn die Anforderungen an Werkzeugmaschinen bezüglich Genauigkeit und Geschwindigkeit steigen, gewinnt die Positionserfassung mit einem Längenmessgerät deshalb zunehmend an Bedeutung. In der Diskussion um das richtige Messkonzept sollte dies beachtet werden.

Literatur

Schröder, Wilhelm: Feinpositionierung mit Kugelgewindetrieben, Fortschrittsbericht VDI Reihe 1 Nr. 277, Düsseldorf; VDI Verlag 1997

VDW-Bericht 0153: „Untersuchung von Wälzführungen zur Verbesserung des statischen und dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen“

Weule, Hartmut / Rosum, Jens: Optimization of the friction behaviour of ball screw drives through WC/C coated roller bodies, Production Engineering Vol. 1/1 (1993)

Golz, Hans Ulrich: Analyse, Modellbildung und Optimierung des Betriebsverhaltens von Kugelgewindetrieben, Dissertation Uni Karlsruhe, 1990

Schmitt, Thomas: Modell der Wärmeübertragungsvorgänge in der mechanischen Struktur von CNC-gesteuerten Vorschubsystemen, Verlag Shaker, 1996

A. Frank / F. Ruech: Position measurement in CNC Machines ... Lamdamap conference, Newcastle 1999

HEIDENHAIN

DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH

Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5

83301 Traunreut, Germany

☎ +49 8669 31-0

FAX +49 8669 32-5061

E-mail: info@heidenhain.de

www.heidenhain.de



Weitere Informationen:

- Prospekt *Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen*
- Prospekt *Drehgeber*
- Prospekt *Messgeräte für elektrische Antriebe*