



Technische Information

Bearbeitungsgenauigkeit von Werkzeugmaschinen

Produktivität und Genauigkeit sind entscheidende Wettbewerbsaspekte von Werkzeugmaschinen. Schnelle Wechsel der Einsatzbedingungen von Werkzeugmaschinen erschweren jedoch Produktivitäts- und Genauigkeitssteigerungen erheblich. So müssen in der Teilefertigung immer kleinere Losgrößen wirtschaftlich und genau gefertigt werden. In der Luft- und Raumfahrt ist höchste Zerspanleistung beim Schruppen gefordert, während im anschließenden Schlichtprozess mit sehr hoher Genauigkeit gefräst werden muss. Beim Fräsen hochwertiger Formen sind große Zerspanraten beim Schruppen und eine makellose Oberflächenqualität als Schlichtergebnis erforderlich. Gleichzeitig werden aber höchste Bahnvorschübe benötigt, um die notwendigen feinen Bahnabstände mit vertretbaren Bearbeitungszeiten fertigen zu können.

Im Hinblick auf stark wechselnde Einsatzbedingungen in der Fertigung gewinnt die thermische Genauigkeit von Werkzeugmaschinen immer mehr an Bedeutung. Besonders bei kleinen Fertigungslosen und damit ständig wechselnden Maschinenaufträgen kann kein thermisch stabiler Zustand erreicht werden. Gleichzeitig gewinnt aber die Genauigkeit des ersten Werkstücks eine große Bedeutung für die Wirtschaftlichkeit von Fertigungsaufträgen. Ständige Wechsel zwischen Bohren, Schruppen und Schlichten verstärken die Schwankungen im thermischen Zustand einer Werkzeugmaschine. Während der Schruppbearbeitung steigt die Fräsleistung auf Werte oberhalb von 80 % an, beim Schlichten werden Werte unterhalb von 10 % erreicht. Die zunehmenden Beschleunigungen und Vorschubgeschwindigkeiten sind verantwortlich für die Erwärmung der Kugelumlaufspindeln in den linearen Vorschubantrieben. Daher spielt die Positionserfassung in den Vorschubantrieben eine zentrale Rolle bei der Stabilisierung des thermischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen.

Thermische Stabilität von Werkzeugmaschinen

Lösungen zur Vermeidung thermisch bedingter Maßabweichungen an Werkstücken rücken stärker denn je in den Fokus des Werkzeugmaschinenbaus. Aktive Kühlungen, symmetrisch aufgebaute Maschinenstrukturen und Temperaturmessungen sind heute bereits gängige Maßnahmen.

Eine wesentliche Quelle thermischer Verlagerungen sind die Vorschubachsen auf Basis von Kugelgewindespindeln. Abhängig von den Vorschubgeschwindigkeiten und -kräften können sich die Temperaturverteilungen auf den Kugelgewindespindeln sehr schnell ändern. Die dabei entstehenden Längenänderungen (typisch: 100 $\mu\text{m}/\text{m}$ innerhalb von 20 min) können auf Werkzeugmaschinen ohne Längenmessgeräte zu signifikanten Fehlern am Werkstück führen.

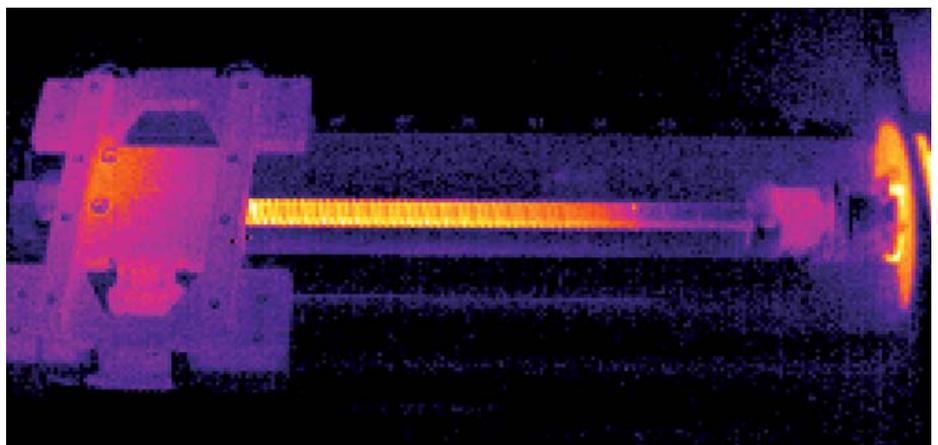


Abbildung 1 Erwärmung eines Kugelgewindetriebs beim Abzeilen mit einem mittleren Vorschub von 10 m/min. Die Thermografie-Aufnahme zeigt Temperaturen von 25 °C bis 40 °C.

Positionserfassung an Vorschubantrieben

Die Position einer NC-Vorschubachse lässt sich grundsätzlich über die Kugelgewindespindel in Verbindung mit einem Drehgeber oder über ein Längenmessgerät erfassen. Wird die Antriebsposition anhand der Steigung des Kugelgewindetriebes in Verbindung mit einem Drehgeber ermittelt (Abbildung 2 oben), so übt der Kugelgewindetrieb eine Doppelfunktion aus: Als Antriebssystem muss er große Kräfte übertragen, in der Eigenschaft als positionsbestimmende Komponente aber werden hohe Genauigkeit und Reproduzierbarkeit der Spindelsteigung erwartet. Die Positionsregelschleife umfasst jedoch lediglich den Drehgeber. Da verschleiß- und temperaturbedingte Veränderungen in der Antriebsmechanik nicht kompensiert werden können, spricht man in diesem Fall von einem Betrieb im Semi-Closed Loop. Positionsfehler der Antriebe werden unausweichlich und können die Werkstückqualität erheblich beeinflussen.

Wird ein Längenmessgerät zur Erfassung der Schlittenposition verwendet (Abbildung 2 unten), so umfasst die Positionsregelschleife die komplette Vorschubmechanik. Man spricht deshalb von einem Betrieb im Closed Loop. Spiel und Ungenauigkeiten in den Übertragungselementen der Maschine haben keinen Einfluss auf die Genauigkeit der Positionserfassung. Die Genauigkeit der Messung hängt praktisch nur von der Präzision und dem Einbauort des Längenmessgerätes ab.

Diese grundlegende Betrachtung für Linearachsen gilt gleichermaßen für Rundachsen. Auch hier lässt sich die Position über die Getriebeuntersetzung in Verbindung mit einem Drehgeber am Motor oder über ein hochgenaues Winkelmessgerät an der Maschinenachse erfassen. Bei der Verwendung von Winkelmessgeräten werden deutlich höhere Genauigkeiten und Reproduzierbarkeiten erzielt.

Zusatzmaßnahmen im Semi-Closed Loop

Kugelgewindespindeln werden gelegentlich hohl gebohrt und von innen gekühlt, um eine Erwärmung der Spindeln und der umliegenden Gestellbauteile zu verhindern. Im Semi-Closed Loop hängt die Positioniergenauigkeit bedingt durch die Temperaturdehnung des Gewindetriebs von der schnellveränderlichen Temperatur des Kühlmediums ab. Bereits mit einer Temperaturerhöhung von 1 Kelvin ergeben sich auf

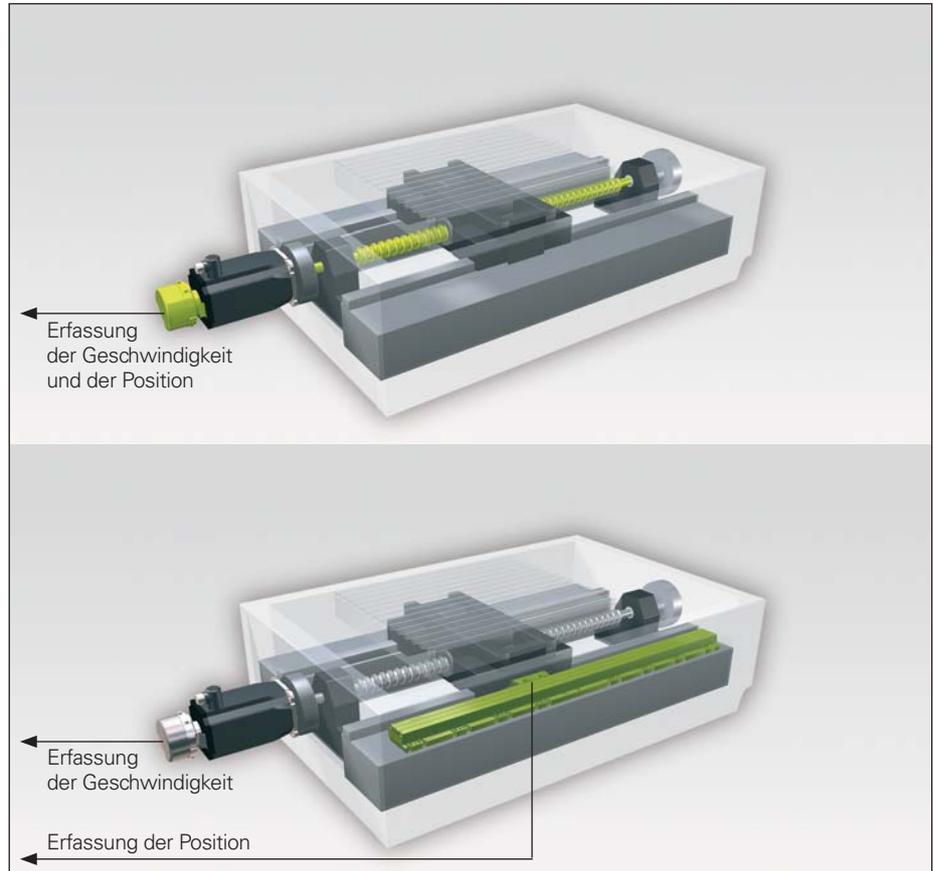


Abbildung 2 Positionsregelung im Semi-Closed Loop (oben) und im Closed Loop (unten)

einem Verfahrbereich von 1 m Positionierfehler bis 10 μm . Mit der Forderung nach Temperaturschwankungen deutlich unterhalb von 1 Kelvin sind übliche Kühlmechanismen jedoch schnell überfordert.

Bei Antrieben im Semi-Closed Loop wird vereinzelt die Temperaturdehnung der Kugelgewindetriebe über ein Modell in der Steuerung angenähert. Da das Temperaturprofil im Betrieb nur schwer messbar ist und darüber hinaus von einer Vielzahl von Einflussfaktoren abhängt (Verschleißzustand der Kugelumlaufmutter, Vorschub, Bearbeitungskräfte, genutzter Verfahrbereich etc.), können mit diesem Verfahren erhebliche Restfehler bis zu 50 $\mu\text{m}/\text{m}$ auftreten.

Zur Versteifung der Antriebsmechanik werden Kugelgewindetriebe gelegentlich an beiden Enden mit Festlagern versehen.

Die Dehnung infolge lokaler Erwärmung lässt sich jedoch auch bei sehr steifer Auslegung der Lager nicht verhindern. Die entstehenden Kräfte sind erheblich. Sie verformen auch steifste Lageranordnungen und können sogar Gestellbauteile verbiegen. Durch mechanische Verspannungen ändert sich zudem das Reibungsverhalten des Antriebs, was sich nachteilig auf die Bahn Genauigkeit der Maschine auswirkt. Aufgrund der genannten Einschränkungen sind die vorgestellten Zusatzmaßnahmen in Bezug auf die erreichbare Antriebsgenauigkeit nicht mit dem Closed Loop Betrieb über Längenmessgeräte vergleichbar. Darüber hinaus können die Auswirkungen von verschleißbedingten Änderungen der Vorspannung oder elastischen Deformationen der Antriebsmechanik mit den Zusatzmaßnahmen zum Semi-Closed Loop nicht kompensiert werden.

Auswirkung der Antriebsgenauigkeit in der Teilefertigung

Im Bereich des Maschinenbaus zeigt sich ein deutlich zunehmender Bedarf an Kleinteilen mit geringer Losgröße. Für die Fertigungsbetriebe wird die Präzision des ersten Werkstücks somit zu einem bedeutenden wirtschaftlichen Faktor. Werkzeugmaschinen für die präzise Fertigung geringer Losgrößen werden vor eine echte Herausforderung gestellt. Ständige Wechsel zwischen Rüsten, Bohren, Schruppen und Schlichten führen zu permanenten Veränderungen des thermischen Zustands einer Maschine.

In der Teilefertigung liegen typische Vorschubgeschwindigkeiten beim Schruppen zwischen 3 m/min und 4 m/min, während beim Schlichten Vorschübe von 0,5 m/min bis 1 m/min erreicht werden. Eilgangbewegungen in den Werkzeugwechseln erhöhen die durchschnittlichen Geschwindigkeiten noch einmal deutlich. Beim Bohren und Reiben sind die mittleren Vorschübe in Bezug auf die Erwärmung der Kugelgewindespindeln vernachlässigbar. In den einzelnen Prozessschritten ändern sich somit die Temperaturverteilungen auf den Kugelgewindetrieben bedingt durch die stark unterschiedlichen Vorschübe. Die wechselnden Belastungszustände der Kugelgewindetribe können im Semi-Closed Loop selbst bei einer Komplettbearbeitung in einer Aufspannung zu Genauigkeitseinbußen am Werkstück führen. Für eine präzise Fertigung von Kleinteilen sind daher Werkzeugmaschinen mit Längenmessgeräten (Closed Loop) eine zwingende Voraussetzung.

Bearbeitungsbeispiel: Fertigung mehrerer Teile aus einem Rohling

Ein 500 mm langer Rohling aus Aluminium wird auf einer Werkzeugmaschine zunächst gebohrt und anschließend gerieben. Die mittleren Vorschübe während dieser beiden Bearbeitungen sind gering, die Wärmeentwicklung in den Kugelgewindespindeln bleibt vernachlässigbar. Im nächsten Fertigungsschritt wird die Kontur gefräst, wobei der mittlere Vorschub und damit die Wärmeentwicklung in den Kugelgewindetrieben deutlich steigt (Abbildung 3).

Durch die Wärmedehnung der Kugelgewindetribe entstehen Maßabweichungen zwischen Bohr- und Fräsbild, sofern die Fräsmaschine im Semi-Closed Loop betrieben wird. Die maximalen Abweichungen sind in Antriebspositionen nahe der Loslager der Kugelgewindetribe zu finden und betragen 135 µm. Im Closed Loop können diese Fehler vollständig vermieden werden (Abbildung 4).

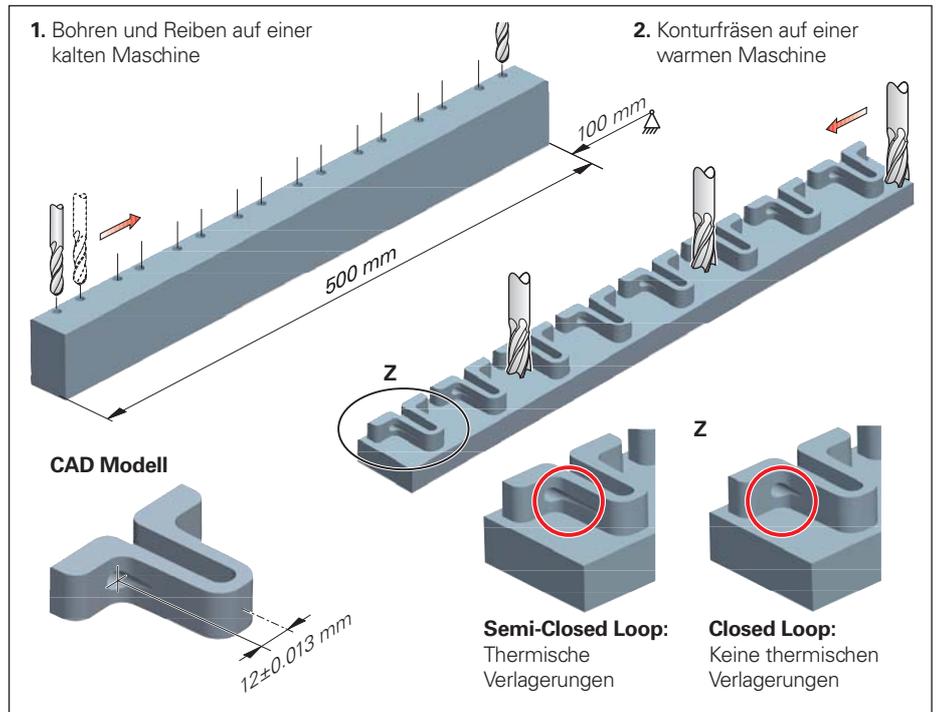


Abbildung 3 Auswirkung der Antriebsgenauigkeit auf die Fertigung von Kleinteilen
 = Festlager der Kugelgewindespindel

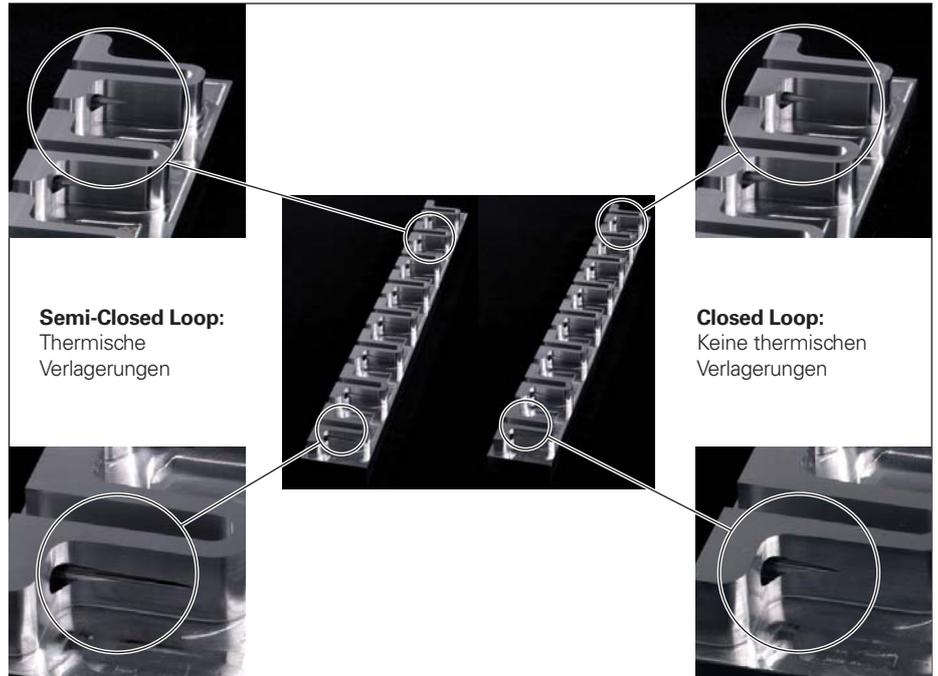


Abbildung 4 Auswirkung der Antriebsgenauigkeit auf die Serienfertigung von Kleinteilen

Das Funktionsmaß zwischen der Lage der Bohrung und der Symmetrielinie des Einzelwerkstücks beträgt 12 mm und ist im betrachteten Beispiel mit der Klasse IT8 toleriert. Es ergibt sich eine zulässige Abweichung von $\pm 13 \mu\text{m}$. Bei der Bearbeitung

im Closed Loop liegen alle Werkstücke innerhalb dieser Toleranz bzw. deutlich darunter. Die gemessenen Abweichungen im Semi-Closed Loop betragen bis zu 135 µm. Anstatt der geforderten Toleranzklasse IT8 wird lediglich die Klasse IT13 erreicht.

Integralbauteile mit hohem Zerspanungsgrad für die Luft- und Raumfahrt

Der Nutzen von Integralbauteilen in der Luft- und Raumfahrtstechnik liegt in der Möglichkeit, eine optimale Ausnutzung der Materialeigenschaften bei minimalem Gewicht in einem Bauteil zu vereinen. Typische Integralbauteile haben einen Zerspanungsgrad von 95 % und darüber. Die Fertigungsprozesse werden heute auf sehr leistungsstarken HSC Werkzeugmaschinen mit hohen Vorschüben und Schnittgeschwindigkeiten bearbeitet. Durch den beachtlichen Zerspanungsgrad der Bauteile sind hohe Zeitspannvolumina beim Schrumpfen von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Bedingt durch die resultierenden Vorschübe und Bearbeitungskräfte entsteht jedoch auch eine beachtliche Reibungswärme in den Kugelgewindespindeln. Die Reibungsverluste und damit auch die Wärmedehnungen der Kugelgewindetriebe variieren zudem im Laufe eines Bearbeitungsprozesses, zum Beispiel durch unterschiedliche Vorschübe beim Schrumpfen und Schlichten. Werden die Vorschubantriebe im Semi-Closed Loop (ohne Längenmessgeräte) betrieben, so unterscheiden sich die Bauteiltoleranzen bei kleinen Losgrößen und kurzen Durchlaufzeiten mit jedem gefertigten Einzelteil. Geforderte Fertigungstoleranzen werden bedingt durch die Wärmedehnung gegebenenfalls nicht mehr erreicht. Solche Fehlerquellen können durch den Einsatz von Längenmessgeräten verhindert werden, da im Closed Loop die Wärmedehnung der Kugelgewindespindeln vollständig kompensiert wird.

Bearbeitungsbeispiel: Anlenkhebel für Flächenleitwerk

Abbildung 5 beschreibt die Entstehung eines Anlenkhebels, bei dem zwei Bohrungen im Abstand von 350 mm mit einer Toleranzklasse IT7 gefertigt werden müssen. Um die erreichbare Genauigkeit im Semi-Closed Loop zu bewerten, wird die Fertigung des Integralbauteils zweimal auf dem gleichen Rohenteil wiederholt. Dabei wird das zweite Werkstück lediglich um 10 mm nach unten versetzt gefräst. Zwischen beiden Bearbeitungen werden zwanzig Bearbeitungszyklen des gleichen Teils über dem Rohenteil abgearbeitet.

Wird im Semi-Closed Loop bearbeitet, so weichen die beiden Konturen der Werkstücke voneinander ab, was durch eine Kante zu erkennen ist (Abbildung 6). Die Wärmedehnung der Kugelgewindetriebe zeigt sich am Bauteil umso deutlicher, je weiter sich die Antriebe bei der Bearbeitung von den Festlagern der Kugelgewindespindeln entfernen.

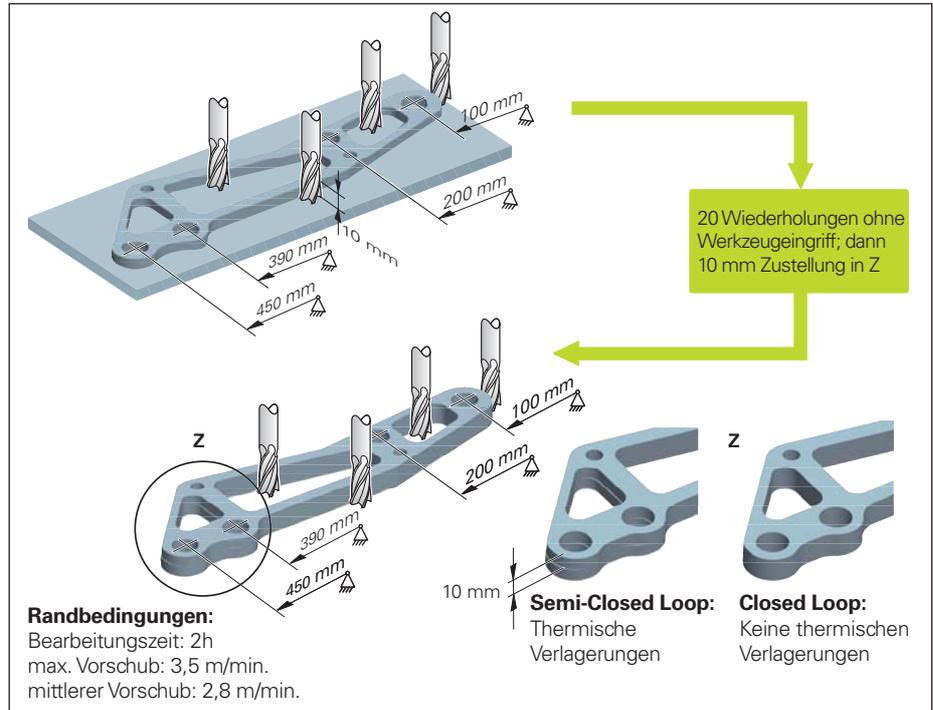


Abbildung 5 Entstehung des Anlenkhebels
 ≙ = Festlager der Kugelgewindespindel



Abbildung 6 Hebelbauteil, zweifach auf einem Rohling gefertigt

Das einzuhaltende Funktionsmaß von 350 mm mit einer Toleranzklasse von IT7 entspricht einer zulässigen Abweichung von $\pm 28 \mu\text{m}$. Diese kann im Semi-Closed Loop für das zweite gefertigte Teil nicht mehr eingehalten werden. Die Abweichung beträgt $44 \mu\text{m}$. Bei Verwendung von Längenmessgeräten im Closed Loop entsteht bei diesem Versuch keine Kante zwischen den

beiden Werkstücken. Die verbleibenden Restabweichungen im Closed Loop betragen $10 \mu\text{m}$ und sind auf thermische Verlagerungen im Maschinengestell zurückzuführen. Das angegebene Stichmaß der beiden Bohrungen kann damit sogar auf IT5 verbessert werden. Auf diese Weise kann eine reproduzierbare Genauigkeit vom ersten Teil an gewährleistet werden.

Auswirkungen im Formenbau

Die Fertigung von Formen für Spritzgussteile ist eine zeitintensive Aufgabe aufgrund der benötigten Oberflächengüte bei zum Teil feinsten Strukturen. Um den kosten- und zeitintensiven Erodierprozess zu umgehen, werden viele Formen heutzutage direkt gefräst. Dabei werden immer kleinere Fräser mit einem Durchmesser bis zu 0,12 mm eingesetzt. Der Fräsformenbau zeichnet sich nicht nur durch hohe Anforderungen an die Formgenauigkeit aus. Er erfordert darüber hinaus hohe Vorschübe, auch in gehärteten Materialien, um Bearbeitungszeiten zu kürzen. Typische Bearbeitungszeiten von Formen liegen zwischen 10 Minuten und mehreren Tagen. Der schnellen Abarbeitung darf die Maßhaltigkeit allerdings nicht zum Opfer fallen, damit die erste und letzte Bearbeitungsbahn zueinander passen und der gewonnene Zeitvorteil nicht durch aufwendige Nacharbeit wieder zunichte gemacht wird.

Die Erwärmung der Kugelumlaufspindeln in den Vorschubachsen hängt maßgeblich von dem durch das NC-Programm vorgegebenen Verfahrensprofil der Einzelachsen ab. Dabei können sich Längenänderungen der Kugelumlaufspindeln von bis zu 150 µm/m ergeben. Eine Formgenauigkeit kann unter diesen Umständen im Semi-Closed Loop nicht gewährleistet werden. Schon bei einer Form mit einer Länge von 150 mm würde eine typische Erwärmung der Kugelgewindetriebe zu einer Abweichung der Formflanken von mehr als 20 µm führen. Eine Gesenkschale würde durch die Dehnung der Kugelumlaufspindeln zu groß ausfallen, so dass der Fehler durch Nacharbeit nicht mehr behebbbar ist.

Bearbeitungsbeispiel: 3D-Fräsen von Freiformflächen

Im folgenden Beispiel ist die Bearbeitung einer Form dargestellt, die das markante Profil des Watzmanns zeigt – einem sagenumwobenem Berg im Berchtesgadener Land. Ein 500 mm langes Werkstück wird durch Abzeilzyklen im Gleich- und Gegenaufräsen in der X-Richtung mit einem Kugelfräser von 12 mm im Durchmesser und einem maximalen Vorschub von 4,5 m/min gefertigt. Die Bearbeitungszeit der Kontur beträgt ca. 60 Minuten bei einer Z- und Y-Zustellung von 0,2 mm. Der hohe Vorschub von 4,5 m/min und die permanenten Beschleunigungs- und Abbremsmanöver erwärmen den Kugelgewindetrieb und ver-

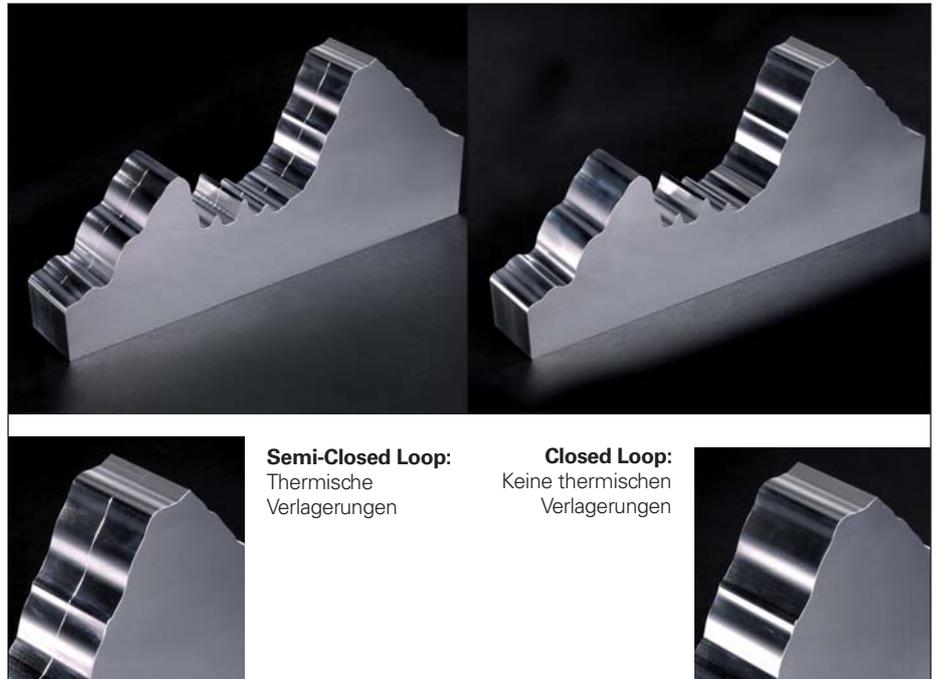


Abbildung 7 Watzmann-Profil nachgebildet mit Freiformflächen

ursachen thermisch bedingte Längenabweichungen, die im Semi-Closed Loop 130 µm betragen. Da die vorhandene Längenabweichung an diesem Formenbauteil jedoch schwer zu visualisieren ist, wurde die Bearbeitung bewusst in der Mitte des Werkstückes begonnen. Die Start- und Endbahn liegen somit nebeneinander und zeigen die thermische Drift deutlich. Je weiter die Werkstückposition vom Festlager entfernt ist, desto höher ist die thermische Drift.

Um den hohen Anforderungen im Formenbau gerecht zu werden, ist es daher notwendig die Ausdehnung der Kugelumlaufspindel durch den Einsatz von genauen Längenmessgeräten zu kompensieren. Abbildung 7 stellt das im Closed Loop gefertigte Werkstück der Watzmann-Kontur von höchster Genauigkeit und Oberflächengüte einer im Semi-Closed Loop gefertigten Variante gegenüber.

Zusammenfassung

Das erfolgreiche Bearbeiten von Fertigungsaufträgen setzt Werkzeugmaschinen mit hoher thermischer Stabilität voraus. Auch eine stark schwankende Auslastung der Maschinen darf keinen signifikanten Einfluss auf die Maschinengenauigkeit haben. Folglich müssen Vorschubachsen die

geforderten Genauigkeiten über den gesamten Verfahrensbereich auch bei stark wechselnden Geschwindigkeiten und Bearbeitungskräften erreichen. Störend wirkt dabei die geschwindigkeits- und lastabhängige Wärmedehnung in den Kugelgewindespindeln der linearen Vorschubachsen. Während einer Bearbeitung können innerhalb von 20 min Positionsfehler bis zu 100 µm und mehr entstehen, sofern die Antriebsposition nur über die Spindelsteigung und einen Drehgeber bestimmt wird. Da wesentliche Antriebsfehler mit dieser Methode nicht im Regelkreis kompensiert werden, spricht man vom Betrieb des Vorschubantriebs im Semi-Closed Loop. Mit dem Einsatz von Längenmessgeräten kann diese Fehlerquelle vollständig unterdrückt werden. Vorschubantriebe mit Längenmessgeräten werden im Closed Loop betrieben, da sich die Fehler im Kugelgewindetrieb in der Positionserfassung abbilden und somit von der Steuerung kompensiert werden. Ähnliche Vorteile ergeben sich auch über Winkelmessgeräte an den Rundachsen, da auch hier thermische Dehnungen in den mechanischen Antriebskomponenten auftreten. Längen- und Winkelmessgeräte sichern daher auch bei stark wechselnden Einsatzbedingungen von Werkzeugmaschinen eine hohe Präzision der zu fertigenden Bauteile.

Längenmessgeräte für Werkzeugmaschinen

Für eine hohe Positioniergenauigkeit von Werkzeugmaschinen sind Längenmessgeräte zur Lage-Rückmeldung unerlässlich. Sie erfassen den Verfahrweg der Vorschubachse direkt und unmittelbar. Mechanische Übertragungselemente haben somit keinen Einfluss auf die Positionserfassung – sowohl kinematische Fehler als auch Abweichungen aufgrund thermischer oder Kräfteinflüsse werden vom Längenmessgerät erfasst und im Lageregelkreis berücksichtigt. Dadurch lässt sich eine Reihe von möglichen Fehlerquellen ausschließen:

- Positionierfehler aufgrund der Erwärmung der Kugelumlaufspindel
- Umkehrfehler
- Fehler infolge Verformung der Antriebsmechanik durch Bearbeitungskräfte
- kinematischer Fehler durch Steigungsfehler der Kugelumlaufspindel

Für Maschinen mit hohen Anforderungen an die **Positioniergenauigkeit** und an die **Bearbeitungsgeschwindigkeit** sind deshalb Längenmessgeräte unerlässlich.

Die HEIDENHAIN-Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen sind universell einsetzbar. Sie eignen sich für Maschinen und Anlagen, an denen Vorschubachsen geregelt verfahren werden – wie z. B. für Fräsmaschinen, Bearbeitungszentren, Bohrwerke, Dreh- und Schleifmaschinen.

Das günstige dynamische Verhalten der Längenmessgeräte, ihre hohe zulässige Verfahrgeschwindigkeit und Beschleunigung in Messrichtung prädestinieren sie sowohl für den Einsatz an hochdynamischen konventionellen Achsen als auch für Direktantriebe.

	Genauigkeitsklasse	Signalperiode	Messlänge	Schnittstelle	Typ
Längenmessgeräte mit kleinprofiligem Maßstabsgehäuse					
Absolut	± 5 µm; ± 3 µm	–	bis 2040 mm ¹⁾	EnDat 2.2	LC 415
Inkremental	± 5 µm; ± 3 µm	4 µm	bis 1220 mm	~ 1 V _{SS}	LF 485
	± 5 µm; ± 3 µm	20 µm	bis 2040 mm ¹⁾	~ 1 V _{SS}	LS 487
Längenmessgeräte mit großprofiligem Maßstabsgehäuse					
Absolut	± 5 µm; ± 3 µm	–	bis 4240 mm	EnDat 2.2	LC 115
	± 5 µm	–	bis 28040 mm	EnDat 2.2	LC 211
Inkremental	± 3 µm; ± 2 µm	4 µm	bis 3040 mm	~ 1 V _{SS}	LF 185
	± 5 µm; ± 3 µm	20 µm	bis 3040 mm	~ 1 V _{SS}	LS 187
	± 5 µm	40 µm	bis 30040 mm	~ 1 V _{SS}	LB 382

¹⁾ über Messlänge 1240 mm mit Montagewise



LC 415



LC 115



LC 211

HEIDENHAIN

DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH

Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5

83301 Traunreut, Germany

☎ +49 8669 31-0

FAX +49 8669 5061

E-mail: info@heidenhain.de

www.heidenhain.de

Weitere Informationen:

- Katalog *Längenmessgeräte für gesteuerte Werkzeugmaschinen*
- Technische Information *Genauigkeit von Vorschubachsen*

