



Technische Information

## Drehgeber an Servomotoren linearer Vorschubachsen: Einfluss auf die Oberflächenqualität gefräster Werkstücke

In vielen Bereichen der Werkzeugmaschinen-Industrie, insbesondere im Formenbau, sind eng tolerierte Werkstücke mit makellosen Oberflächen das Ziel. Dieses Ziel in möglichst kurzer Zeit zu erreichen, ist eine besondere Herausforderung. Der Formenbau fordert dafür zuerst große Zerspanvolumina während der Schruppbearbeitung und dann hohe Oberflächenqualitäten im anschließenden Schlichtprozess (Abbildung 1). Nur bei hoher Güte der gefrästen Oberflächen können Folgekosten, z. B. durch manuelles Polieren, vermieden werden.

Neben der Maschinenmechanik, der Steuerung und den eingesetzten Werkzeugen ist die verwendete Achsmesstechnik für ein hochwertiges Fräsergebnis ausschlaggebend. Insbesondere in einem Wellenlängenbereich zwischen 0,5 mm und 5 mm sind periodisch wiederkehrende Formabweichungen auf der Werkstück-Oberfläche für das menschliche Auge sichtbar und erweisen sich vor allem im Formenbau als störend. Verantwortlich für diese Abweichungen können unter anderem die Interpolationsfehler der Achsmessgeräte sein. Um die geforderte hohe Oberflächenqualität der Werkstücke zu erreichen, sind daher neben hochwertigen Längenmessgeräten auch Drehgeber mit besonders geringem Interpolationsfehler in den Servomotoren der linearen Vorschubachsen von Bedeutung.



# Ursachen sichtbarer Oberflächenfehler

## Der Interpolationsfehler und seine Auswirkungen

### Oberflächenfehler fallen auf

Das menschliche Auge ist sehr empfindsam für Strukturänderungen oder kleinste Fehler auf einer Oberfläche. So ist beispielsweise ein einziger Pixelfehler an einem Monitor, dessen Anzeige aus bis zu fünf Millionen Pixeln bestehen kann, sofort erkennbar. Noch sensibler reagiert das menschliche Auge auf periodische Oberflächenfehler.

Gerade im Formenbau sind periodische Formabweichungen störend und müssen aufwendig nachbearbeitet werden. Die Formabweichungen sind auf den Oberflächen als Schatten oder Kontrastschwankungen sichtbar. Sie können auf verschiedene Ursachen zurückgeführt werden, z. B.:

- Schwingungen der Maschine, die den Bearbeitungsprozess stören (siehe [1])
- Interpolationsfehler der verwendeten Achsmessgeräte (siehe [2])

### Signalabweichungen verursachen Interpolationsfehler

Die heutzutage üblicherweise in Werkzeugmaschinen eingesetzten Achsmessgeräte bilden den Positionswert einer Vorschubachse prinzipiell aus zwei Anteilen:

- einem absoluten Teil, der nach dem Einschalten der Maschine die Position der Vorschubachse mit begrenzter Genauigkeit bestimmt
- einem inkrementalen Teil, welcher zwei Sinussignale (A und B) mit 90° Phasenversatz liefert

Um die erforderliche hohe Auflösung zu erzielen, werden die periodischen analogen Signale A und B mittels Interpolationsverfahren weiter unterteilt. Die Interpolationsverfahren arbeiten fehlerfrei, solange die beiden sinusförmigen Ausgangssignale ideal und genau um 90° el. zueinander versetzt sind. Abweichungen davon generieren Fehler, die mit jeder Periode der Abtastsignale (Signalperiode) wiederkehren. Es wird daher vom Interpolationsfehler gesprochen (Abbildung 2).

Maßgebend für die Höhe des Interpolationsfehlers sind viele Faktoren, beispielsweise:

- die Feinheit der Signalperiode
- die Homogenität und Periodenschärfe der Teilung
- die Güte der Filterstrukturen der Abtastung
- die Charakteristik der Sensoren
- die Stabilität und Dynamik der Weiterverarbeitung der analogen Signale

### Auswirkungen des Interpolationsfehlers

Der Formenbau fordert Werkstücke mit immer komplexeren Geometrien. Bei der 5-Achs-Bearbeitung sind alle Kombinationen an Achsbewegungen üblich. Wird beispielsweise eine schräge oder gekrümmte Bearbeitungsfläche durch die Interpolation mehrerer NC-Achsen gefertigt, können die Interpolationsfehler direkt am Werkstück sichtbar werden.

Bei der Bearbeitung einer Schräge mit einem kleinen Winkel ist dieser Zusammenhang besonders gut erkennbar. Der Interpolationsfehler eines Messgeräts (z. B. in Z-Richtung) kann durch Projektion auf die schräge Werkstück-Oberfläche sichtbar gemacht werden (Abbildung 3). Aufgrund der Schräge entsteht eine n-fache Streckung der Signalperiode in der Bahn des Werkzeugs. Während die Achse in Z-Richtung nur eine Signalperiode verfährt, bewegt sich die X-Achse um n Signalperioden mehr. Auf der Werkstückschräge entsteht dadurch ein Wellenbild mit einer Wellenlänge, die der n-fachen Signalperiode des Messgeräts der Z-Achse entspricht. Eine Wellenlänge von 0,5 mm bis 5 mm ist für das menschliche Auge besonders deutlich zu erkennen.

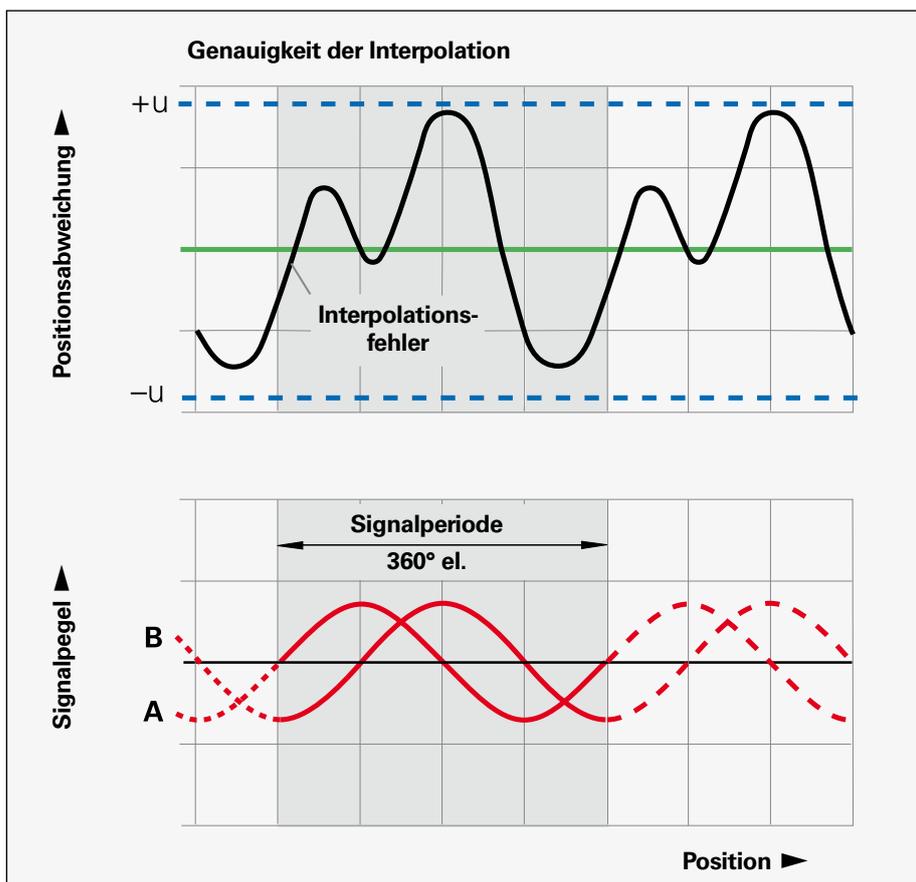


Abbildung 2: Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode (Interpolationsfehler)

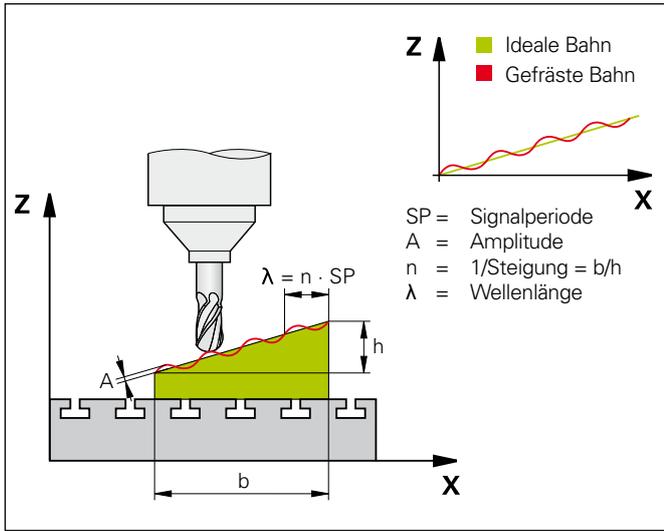


Abbildung 3: Abbildung des Interpolationsfehlers auf einer Werkstückschräge

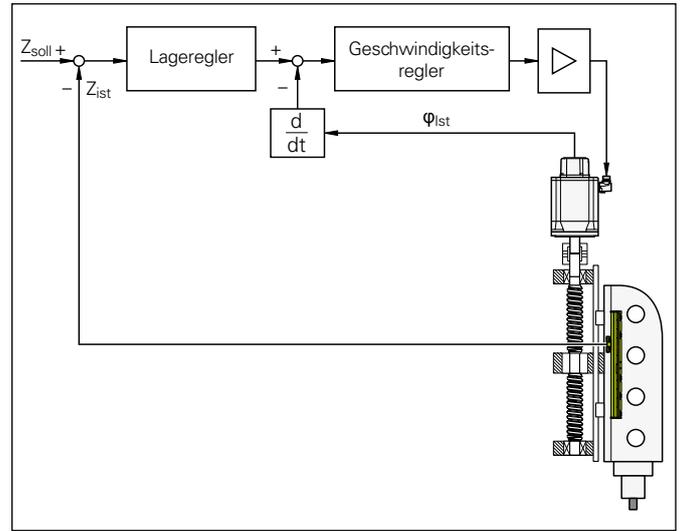


Abbildung 4: Prinzipdarstellung einer Vorschubachse

### Lage- und Geschwindigkeitsmessung in Vorschubachsen

In Abbildung 4 ist der prinzipielle Aufbau einer geregelten Vorschubachse mit Servomotor, Kugelgewindtrieb, Spindelachstruktur und Achsmesstechnik dargestellt. Die Position der Spindelachse wird mittels eines Längenmessgeräts erfasst und als Lage-Istwert in den Lageregelkreis der Achse zurückgeführt. Als weiterer Messwertgeber befindet sich ein Drehgeber zur Erfassung des Motorwellenwinkels im Servomotor der Vorschubachse. Das Signal dieses Gebers wird zur Bestimmung der Istgeschwindigkeit verwendet.

In [2] werden Ergebnisse aus Bearbeitungsversuchen dargestellt, in denen Interpolationsfehler von Längenmessgeräten in einer Größenordnung von  $\pm 200$  nm als Formabweichungen auf der Werkstück-Oberfläche sichtbar werden. Die für den Vergleich eingesetzten HEIDENHAIN-Längenmessgeräte LC 100 mit einem Interpolationsfehler deutlich kleiner als  $\pm 100$  nm verursachen keine sichtbaren Oberflächenwellen.

Die im Rahmen der nachfolgend beschriebenen Untersuchungen eingesetzte Bearbeitungsmaschine besitzt in allen linearen Achsen HEIDENHAIN-Längenmessgeräte vom Typ LC 483. Diese weisen ebenfalls einen Interpolationsfehler deutlich kleiner  $\pm 100$  nm auf, wodurch keine sichtbaren Oberflächenwellen zu erwarten sind. Aufbauend auf dieser Basis erfolgt die Betrachtung und Beschreibung des Einflusses des Drehgeber-Interpolationsfehlers auf die Formabweichungen gefräster Werkstück-Oberflächen.

Der Interpolationsfehler eines Drehgebers entspricht einer kurzweiligen Winkelabweichung innerhalb einer Signalperiode. Um die gewünschten Genauigkeiten von Werkstückform und Oberfläche zu erzielen, kommen üblicherweise Bearbeitungsmaschinen mit hoher geometrischer Genauigkeit zum Einsatz. Bei einer spielfrei und mechanisch steif aufgebauten Vorschubachse wird der Interpolationsfehler des Drehgebers durch die Kinematik des Kugelgewindetriebs in einen linearen Fehler umgesetzt. Das bedeutet, dass ab einer gewissen Größe des Interpolationsfehlers des Drehgebers sowie bei weiteren Randbedingungen, die im Folgenden beschrieben werden, mit Formabweichungen auf dem Werkstück zu rechnen ist.

Ein sich periodisch über die gesamte Messlänge wiederholender Fehler weist bei zunehmender Überfahrgeschwindigkeit des Abtastkopfs eine ansteigende Frequenz auf. Das bedeutet, die Frequenz des Interpolationsfehlers ist von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig. Aufgrund der unterschiedlichen Grenzfrequenzen (Bandbreite) von Lage- und Geschwindigkeitsregelkreis macht sich der Interpolationsfehler des Drehgebers abhängig von der Vorschubgeschwindigkeit unterschiedlich stark am Tool Center Point bemerkbar. Bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten (kleine Frequenz des Interpolationsfehlers) wird der Interpolationsfehler des Drehgebers durch den Lageregler ausgeglichen. Überschreitet die Frequenz des Drehgeber-Interpolationsfehlers die Grenzfrequenz des Lageregelkreises (höhere Vorschubgeschwindigkeit), so erfolgt keine Ausregelung mehr. Es ist mit einem verstärkten Erscheinen dieses Interpolationsfehlers am Tool Center Point zu rechnen.

# Einflussfaktoren auf den Interpolationsfehler

## Vorschubgeschwindigkeit und Bandbreite des Lage- sowie Geschwindigkeitsreglers

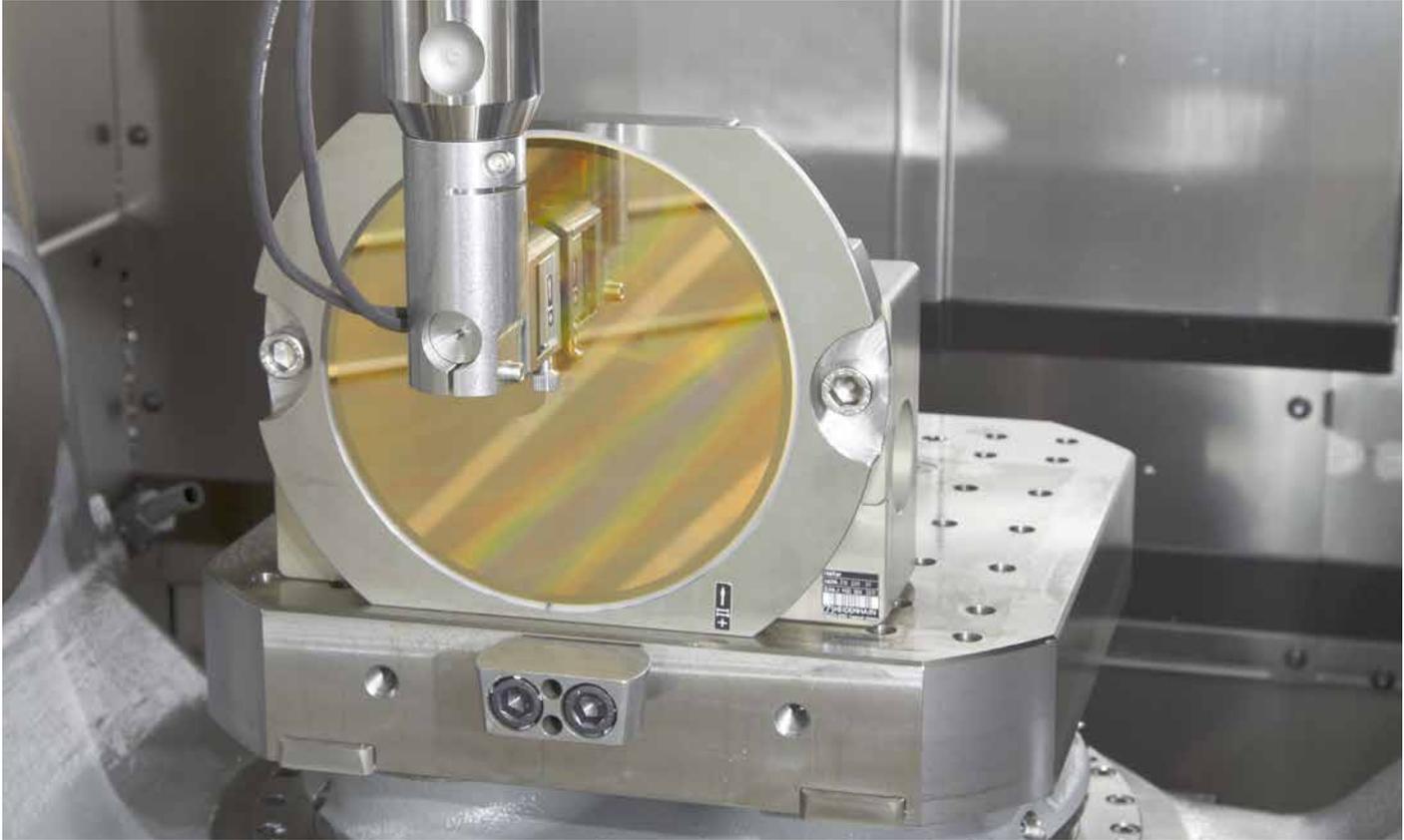


Abbildung 5: Messtechnischer Versuchsaufbau mit Kreuzgitter-Messgerät KGM 181

### Versuchsanordnung mit Kreuzgitter-Messgerät

Um die Effekte des Zerspanprozesses und der Bewegung des Tool Center Points trennen zu können, erfolgt vor der spanenden Bearbeitung die Ermittlung der am Tool Center Point auftretenden Bahnabweichungen mittels eines HEIDENHAIN-Kreuzgitter-Messgeräts KGM 181. Das Kreuzgitter-Messgerät ermöglicht die berührungslose Erfassung der Bahnabweichungen zwischen Tool Center Point und Maschinentisch in der Ebene der beiden bewegten Vorschubachsen. In Abbildung 5 ist die Versuchsanordnung dargestellt. Als Versuchsmaschine kommt eine hochwertige Werkzeug- und Formenbaumaschine zum Einsatz.

Die Messebene wird durch die X- und Z-Achse der Maschine aufgespannt. Der Servomotor der Z-Achse ist über eine Kupplung direkt mit der Kugelgewindtrieb-Spindel verbunden, sodass neben dem Kugelgewindtrieb keine weiteren Übersetzungen im Antriebsstrang vorliegen. Die Spindelsteigung des Kugelgewindtriebs beträgt  $P = 20 \text{ mm}$ .

Die für die Betrachtungen relevante Achse ist die Z-Achse der Maschine. Für die Untersuchungen wird der Drehgeber des Servomotors der Z-Achse variiert. Zum Einsatz kommen zwei hochwertige, anbaukompatible Drehgeber mit jeweils 2048 Strichen auf der Teilscheibe. Drehgeber 1 weist jedoch einen 3-fach höheren Interpolationsfehler als Drehgeber 2 auf.

Wie beschrieben, werden die Interpolationsfehler des Drehgebers durch den Kugelgewindtrieb in einen linearen Fehler umgesetzt. Die entsprechende Signalperiode der linearen Bewegung wird mittels der Kugelgewindtrieb-Steigung sowie der Strichanzahl des Drehgebers berechnet:

$$SP_{DGlin} = \frac{P}{sz} = \frac{20 \text{ mm}}{2048} \approx 9,8 \mu\text{m} \quad (\text{Gleichung 1})$$

Mit Blick auf die zu fertigenden Werkstücke wird bereits für die Kreuzgittermessung eine zu verfahrenende Bahn mit  $b = 60 \text{ mm}$  und  $h = 0,4 \text{ mm}$  festgelegt. Diese Größen ergeben sich aus der in Abbildung 3 auf Seite 3 angegebenen Gleichung zur Berechnung der Wellenlänge unter Berücksichtigung von  $SP_{DGlin}$  sowie der Sensibilität des menschlichen Auges für periodische Formfehler bei  $\lambda = 0,5 \text{ mm}$  bis  $5 \text{ mm}$ .

Folglich würde – bei zu großem Interpolationsfehler – eine Signalperiode von  $9,8 \mu\text{m}$  zu einer Bahnabweichung mit  $\lambda \approx 1,5 \text{ mm}$  führen.

### Messergebnisse bestätigen Zusammenhänge

Abbildung 6 zeigt die Messergebnisse bei Verwendung des Drehgebers 1 sowie zwei unterschiedlichen Bahnvorschubgeschwindigkeiten. Die niedrigere Geschwindigkeit ( $500 \text{ mm/min}$ ) repräsentiert tendenziell die Bearbeitung von Stahlwerkstücken mit kleinem Fräserdurchmesser (z. B.  $\varnothing 6 \text{ mm}$ ), die höhere Geschwindigkeit von  $4000 \text{ mm/min}$  die der Aluminiumbearbeitung.

In den dargestellten Messkurven ist erkennbar, dass bei einer eingestellten Vorschubgeschwindigkeit von  $4000 \text{ mm/min}$  wellenförmige Bahnabweichungen in Z-Richtung auftreten. Bei Vergrößerung eines Ausschnitts der Kurve ist eine Wellenlänge von ca.  $1,5 \text{ mm}$  abzulesen. Dies entspricht der erwarteten Wellenlänge aufgrund des Interpolationsfehlers des Drehgebers im Servomotor der Z-Achse.

Abbildung 6:  
Messergebnisse mit  
Drehgeber 1 und 3-fach  
höherem Interpolations-  
fehler

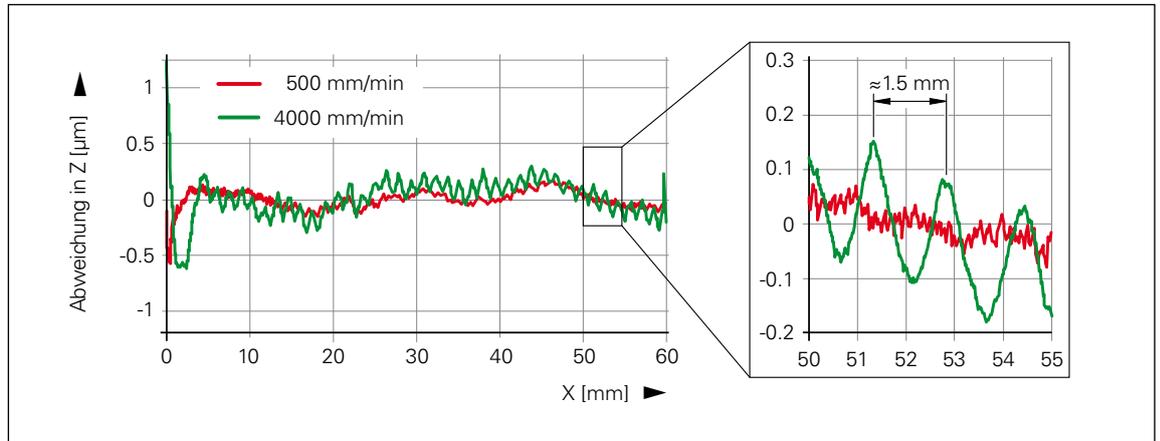
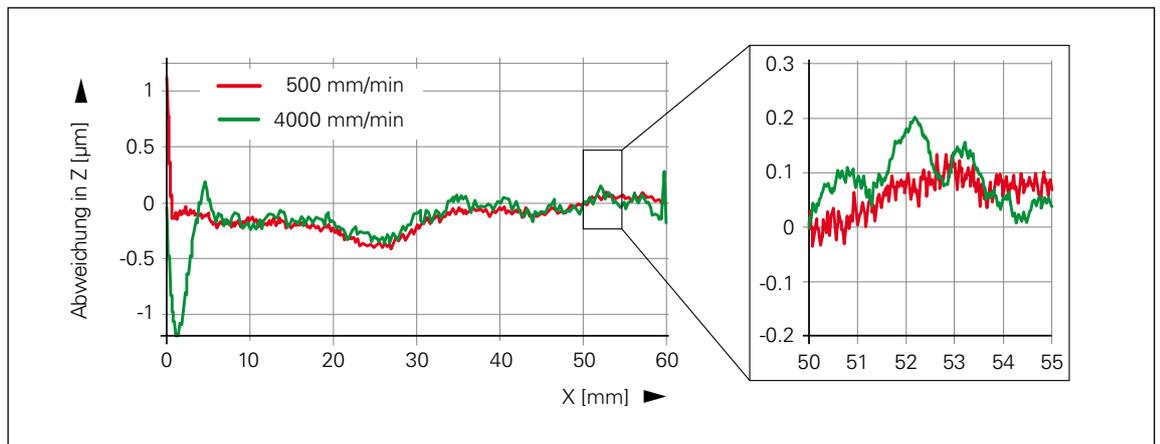


Abbildung 7:  
Messergebnisse mit  
Drehgeber 2



Wie beschrieben, ist die Frequenz des Interpolationsfehlers von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig. Ob der Interpolationsfehler des Drehgebers als Bahnabweichung am Tool Center Point auftritt oder ausgeregelt wird, hängt weiterhin von der Bandbreite des Lage- und Geschwindigkeitsreglers ab. Anhand Gleichung 2 (Berechnung der Z-Achsgeschwindigkeit) sowie Gleichung 3 wird die Frequenz bestimmt, mit der der Interpolationsfehler im Drehgebersignal vorliegt und in den Geschwindigkeitsregelkreis der Z-Achse zurückgeführt wird:

$$v_z = \sqrt{\frac{v_B^2}{1 + \left(\frac{b}{h}\right)^2}} = \sqrt{\frac{4000^2}{1 + \left(\frac{60}{0,4}\right)^2}} \left[ \frac{\text{mm}}{\text{min}} \right]$$

$$= 26,7 \frac{\text{mm}}{\text{min}} \quad (\text{Gleichung 2})$$

$$f_{\text{SP}} = \frac{v_z}{\text{SP}_{\text{DGlin}}} = \frac{26,7 \text{ mm/min}}{9,8 \mu\text{m}}$$

$$\approx 45 \text{ Hz} \quad (\text{Gleichung 3})$$

Bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 4000 mm/min und der vorliegenden Schräge bildet sich der Interpolationsfehler mit einer Frequenz von ca. 45 Hz im Drehgebersignal ab. Durch die Rückführung und Differenzierung des Drehgebersignals (Abbildung 4 auf Seite 3) wird die Frequenz des Drehgeber-Interpolationsfehlers nicht beeinflusst und liegt damit auch im Signal der Istgeschwindigkeit vor.

Der Geschwindigkeitsregler, der eine Bandbreite von über 80 Hz aufweist, folgt der Schwingung des Drehgeber-Interpolationsfehlers. Die an der Z-Achsstruktur umgesetzte Vorschubbewegung weist nun eine Schwingung auf, die der Frequenz des Interpolationsfehlers entspricht. Im vorliegenden Fall überschreitet die Frequenz des Drehgeber-Interpolationsfehlers mit 45 Hz die Grenzfrequenz des Lageregelkreises ( $f_{\text{g\_LR}} < 40 \text{ Hz}$ ). Ist nun die Amplitude des Interpolationsfehlers groß genug, wird eine entsprechende Bahnabweichung am Tool Center Point sichtbar (vergleiche hierzu die Messergebnisse mit Drehgeber 1).

Abbildung 7 stellt die Messergebnisse für den im Servomotor der Z-Achse eingebauten Drehgeber 2 bei ansonsten unveränderten Randbedingungen dar. Aufgrund des um Faktor 3 geringeren Interpolationsfehlers des Drehgebers 2 treten nun weder in der Kurve der niedrigen noch in der Kurve der hohen Vorschubgeschwindigkeit überlagerte Wellen auf. Der Interpolationsfehler des Drehgebers im Servomotor der Z-Achse ist nun so gering, dass dieser keine erkennbare periodische Bahnabweichung zwischen Tool Center Point und Maschinenstisch verursacht. Dass dies auch für die Relativbewegungen zwischen Werkzeug und Werkstück bzw. die gefertigte Oberfläche gilt, zeigen die nachfolgend gefrästen Werkstücke.

# Kleiner Interpolationsfehler vermeidet Bahnabweichungen

## Oberflächenqualität beginnt schon beim Drehgeber

### Werkstückbearbeitung

Um den Einfluss des Interpolationsfehlers auf die gefertigte Oberflächenqualität darzustellen, wird die zuvor beschriebene Schräge von  $b = 60 \text{ mm}$  und  $h = 0,4 \text{ mm}$  unter Verwendung von Drehgeber 1 bzw. Drehgeber 2 auf einem Werkstück eingebracht. Für die Erzeugung der schrägen Fläche wird das Werkstück in Y-Richtung im Gleichlauf abgezeit. Der Zeilenabstand in Y-Richtung sowie das Schlichtaufmaß betragen jeweils  $0,1 \text{ mm}$ . Abbildung 8 zeigt die Bearbeitungssituation in der Maschine und führt die eingestellten Technologieparameter auf.

Die in Abbildung 9 gezeigten Werkstücke stellen das Ergebnis der Fräsbearbeitung dar. Im oberen Bild ist die Oberfläche bei Verwendung von Drehgeber 1 zu sehen. Die durch den Interpolationsfehler dieses Drehgebers hervorgerufenen Wellen mit  $\lambda \approx 1,5 \text{ mm}$  sind trotz der geringen Amplitude von nur ca.  $0,1 \mu\text{m}$  als störende Schattierungen erkennbar. Das bedeutet, die zuvor bei den Messungen mit dem Kreuzgitter-Messgerät ermittelten Bahnabweichungen führen zu einer sichtlich verminderten Oberflächenqualität am Werkstück.



### Technologieparameter

<b>Werkzeugdurchmesser in mm</b>	6
<b>Zähnezahl</b>	2
<b>Drehzahl in <math>\text{min}^{-1}</math></b>	18000
<b>Vorschubgeschwindigkeit in mm/min</b>	4000
<b>Schneidematerial</b>	PKD
<b>Werkstückwerkstoff</b>	Aluminium

Abbildung 8: Bearbeitungssituation und Technologieparameter

Durch den Wechsel des Drehgebers im Servomotor der Z-Achse auf Drehgeber 2 mit 3-fach kleinerem Interpolationsfehler und ansonsten gleichbleibenden Randbedingungen folgt eine deutliche Verbesserung der Oberflächenqualität (Abbildung 9, unten). Die zuvor vorhandenen regelmäßigen Oberflächenwellen sind aufgrund des geringen Interpolationsfehlers des Drehgebers nun nicht mehr sichtbar. Einen im Vergleich zu Drehgeber 2 nochmals reduzierten Interpolationsfehler weist der HEIDENHAIN-Drehgeber ERN 1387 auf. Dieser wird unter anderem für die Drehzahlregelung elektrischer Antriebe eingesetzt.

### Fazit

Achsmessgeräte mit geringem Interpolationsfehler sind erforderlich, um qualitativ hochwertige Oberflächen zu erzeugen. Da die Interpolationsfehler bei jeweils unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten als Bahnabweichungen zwischen Werkzeug und Werkstück auftreten, betrifft dies nicht nur die Längenmessgeräte der Vorschubachsen, sondern auch die in den Servomotoren befindlichen Drehgeber. Für die Vermeidung der beschriebenen Bahnabweichungen sind somit durchgängig hochwertige Achsmessgeräte mit geringem Interpolationsfehler in den Vorschubachsen einer Werkzeugmaschine nötig.

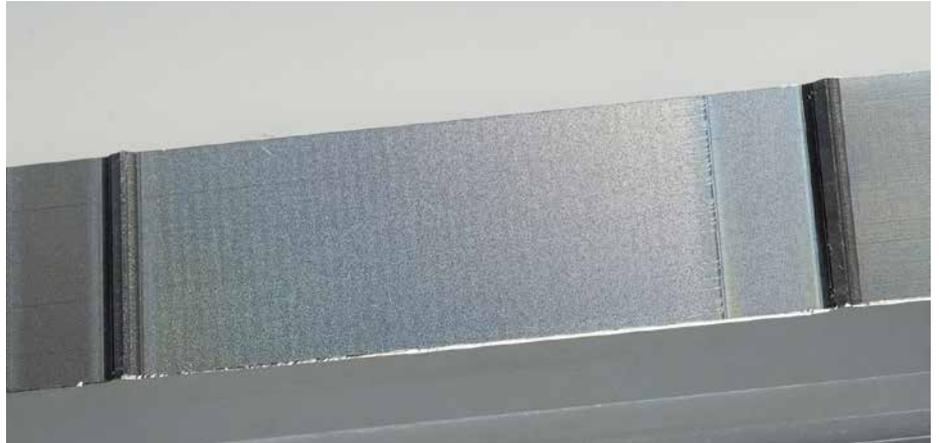


Abbildung 9: Gefräste Oberflächen: Drehgeber 1 (oben) mit 3-fach größerem Interpolationsfehler als Drehgeber 2 (unten)

# Drehgeber mit sehr kleinem Interpolationsfehler

## ERN 1387

Inkrementaler Drehgeber mit Eigenlagerung und angebauter Statorkupplung.



	Inkremental ERN 1387
<b>Schnittstelle</b>	$\sim 1 V_{SS}^{1)}$
Strichzahl/ Systemgenauigkeit	2048/±20"
Referenzmarke	eine
Ausgangsfrequenz Grenzfrequenz -3 dB	- ≥ 210 kHz
<b>Kommutierungssignale</b>	$\sim 1 V_{SS}^{1)}$
Breite	Z1-Spur <sup>2)</sup>
Spannungsversorgung	DC 5 V ±0,25 V
<b>Welle</b>	Konuswelle Ø 9,25 mm; Konus 1:10
Mech. zul. Drehzahl n	≤ 15000 min <sup>-1</sup>
Anlaufdrehmoment	≤ 0,01 Nm (bei 20 °C)
Trägheitsmoment Rotor	2,6 · 10 <sup>-6</sup> kgm <sup>2</sup>
Eigenfrequenz der Statorkupplung	≥ 1800 Hz
Zul. Axialbewegung der Antriebswelle	±0,5 mm
<b>Vibration</b> 55 Hz bis 2000 Hz <b>Schock</b> 6 ms	≤ 300 m/s <sup>2</sup> <sup>3)</sup> (EN 60068-2-6) ≤ 2000 m/s <sup>2</sup> (EN 60068-2-27)
<b>Max. Arbeitstemperatur</b>	120 °C
<b>Schutzart</b> EN 60529	IP40 im angebauten Zustand

<sup>1)</sup> eingeschränkte Toleranzen  
 Signalgröße: 0,8 V<sub>SS</sub> bis 1,2 V<sub>SS</sub>  
 Symmetrieabweichung: 0,05  
 Signalverhältnis: 0,9 bis 1,1  
 Phasenwinkel: 90° ±5° el.  
 Störabstand E, F: 100 mV

<sup>2)</sup> ein sinus- und ein kosinusförmiges Signal pro Umdrehung; siehe Katalog *Schnittstellen von HEIDENHAIN-Messgeräten*

<sup>3)</sup> gültig nach Norm bei Raumtemperatur;  
 bei Arbeitstemperatur gelten bis 100 °C: ≤ 300 m/s<sup>2</sup>  
 bis 120 °C: ≤ 150 m/s<sup>2</sup>

## 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](http://www.heidenhain.de)

### Weitere Informationen:

[1] Technische Information *Dynamic Precision*

[2] Technische Information *Perfekte Oberflächen mit HEIDENHAIN-Messgeräten*

