



Technische Information

## Perfekte Oberflächen mit HEIDENHAIN-Messgeräten

Perfekte Oberflächen herzustellen erfordert viel Zeit und Aufwand. So wurde z. B. „Cloud Gate“ – eine Skulptur des Künstlers Anish Kapoor im Milleniumpark von Chicago – von 24 Spezialisten im finalen Bearbeitungsschritt mehrere Monate lang poliert. Diese über 99 Tonnen schwere Edelstahlskulptur mit den gigantischen Ausmaßen von 10 m x 20 m x 13 m besitzt eine perfekte, nahtlose Oberfläche, in der sich die Skyline von Chicago spiegelt.

Auch in der Werkzeugmaschinenindustrie, insbesondere im Formenbau sind makellose Oberflächen oft das Ziel. Allerdings haben hier wirtschaftliche Gesichtspunkte eine große Bedeutung. Es ist eine besondere Herausforderung, eng tolerierte Werkstücke mit hoher Oberflächenqualität in kurzer Zeit herzustellen. Die Fertigung von hochwertigen Werkstücken im Formenbau fordert zum einen große Zerspanvolumina während der Schruppbearbeitung und zum anderen eine perfekte Oberfläche als Schlichtergebnis. Nur bei optimaler Oberflächenqualität können Folgekosten, wie z. B. durch manuelles Polieren, vermieden werden. Neben der Güte der Maschinenmechanik und der entsprechenden Performance der Steuerung ist die verwendete Messtechnik die dritte Säule, die für ein optimales Fräsergebnis verantwortlich ist.

Um die hohe Oberflächenqualität der Werkstücke zu erreichen, sind bei den verwendeten Messgeräten Ausgangssignale mit besonders geringen Abweichungen innerhalb einer Signalperiode (Interpolationsfehler) von entscheidender Bedeutung. Interpolationsfehler sind unter anderem für periodisch wiederkehrende Formabweichungen auf der Werkstückoberfläche verantwortlich, die sich vor allem im Formenbau als störend erweisen.



Skulptur Cloud Gate – Beispiel für eine perfekte Oberfläche

### **Oberflächenfehler fallen auf**

Das menschliche Auge ist sehr empfindsam für Strukturänderungen oder kleinste Fehler auf einer Oberfläche. So ist beispielsweise ein 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. An Testwerkstücken kann man zeigen, dass periodische Formabweichungen bereits ab 0,2 µm deutlich erkennbar sind. Gerade im Formenbau sind diese Formabweichungen – obwohl ohne Einfluss auf die Genauigkeit – störend und müssen aufwendig nachbearbeitet werden.

# Voraussetzungen für eine hohe Oberflächenqualität

## Mögliche Ursachen für periodische Oberflächenfehler

Die Formabweichungen sind auf den Oberflächen als Schatten oder Kontrastschwankungen sichtbar. Das menschliche Auge empfindet sie bei den üblichen Betrachtungsabständen als störend. Sie können auf grundlegend verschiedene Ursachen zurückzuführen sein:

- Schwingungen der Maschine, die den Bearbeitungsprozess stören (siehe hierzu Technische Information *Dynamic Precision*)
- Kurzperiodische Fehler des verwendeten Achs-Messgerätes (Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode bzw. Interpolationsfehler)

In dieser Technischen Information werden die Oberflächenfehler aufgrund der Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode betrachtet.

## Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode

Die direkt aus der Maßverkörperung eines Messgerätes resultierende Auflösung ist für moderne Werkzeugmaschinen in aller Regel nicht ausreichend. Es werden deshalb Interpolationsverfahren angewandt, welche die periodisch analogen – typischerweise sinusförmigen – Abtastsignale A und

B weiter unterteilen. Interpolationsfaktoren von 4096 (12 bit) und mehr sind dabei durchaus üblich. Damit lassen sich auch aus Maßverkörperungen mit relativ großen Teilungsperioden die zur Regelung von Werkzeugmaschinen notwendigen Messschritte von  $0,1 \mu\text{m}$  und feiner erzielen. HEIDENHAIN-Messgeräte LC 100 und LC 400 erreichen Messschritte von  $0,001 \mu\text{m}$ .

Die Interpolationsverfahren arbeiten fehlerfrei solange die beiden sinusförmigen Ausgangssignale ideal sind, d. h. exakt gleiche Form, Amplitude, Tastverhältnisse aufweisen und sie genau um  $90^\circ$  el. zueinander versetzt sind. Abweichung davon generieren Fehler, die mit jeder Periode der Abtastsignale wiederkehren. Man spricht deshalb von Abweichungen innerhalb einer Signalperiode oder vom Interpolationsfehler.

Maßgebend für die Höhe der Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode sind

- 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 der Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode

Der Formenbau fordert Werkstücke mit immer komplexere 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 des Messgerätes in Z-Richtung kann durch Projektion auf die schräge Werkstückoberfläche sichtbar gemacht werden. Aufgrund der Schräge entsteht eine n-fache Vergrößerung der Signalperiode in der Bahn des Werkzeuges. Während die Achse in Z-Richtung nur eine Signalperiode verfährt, bewegt sich die X-Achse n mal mehr. Auf der Werkstückschräge entsteht ein Wellenbild mit einer Wellenlänge, die der n-fachen Signalperiode des Messgerätes der Z-Achse entspricht.

Da bei der Bearbeitung der Freiformflächen im Formenbau alle erdenklichen Schrägen gefertigt werden, ist die entsprechende Verstärkung der Signalperiode immer gegeben. Eine Wellenlänge von  $0,5 \text{ mm}$  bis  $5 \text{ mm}$  ist für das menschliche Auge besonders leicht zu erkennen.

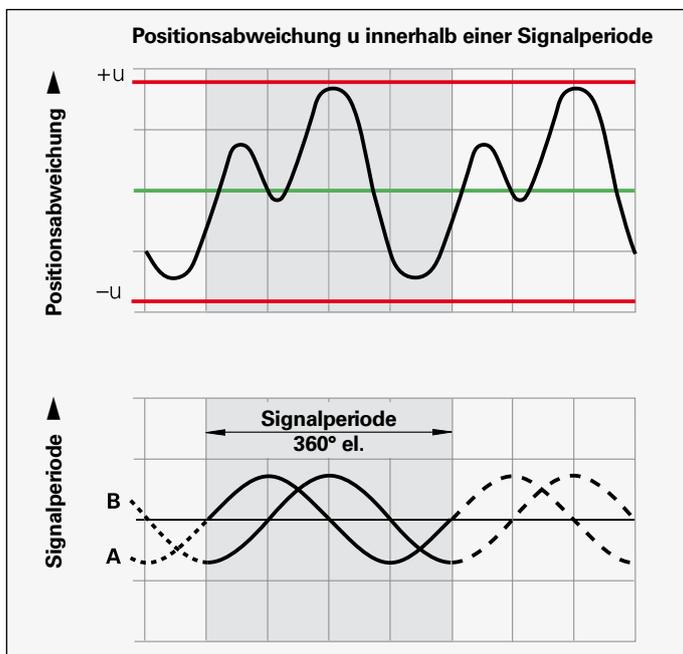


Abbildung 1: Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode (Interpolationsfehler)

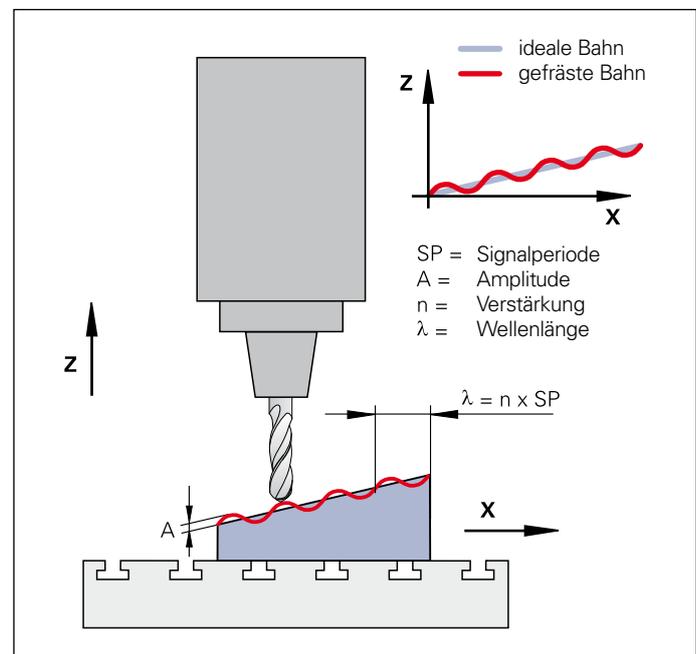


Abbildung 2: Abbildung des Interpolationsfehlers auf einer Werkstückschräge

Bei einer Amplitude des Interpolationsfehlers von kleiner 100 nm erscheint die Werkstückoberfläche makellos. Bereits ab einer Amplitude des Interpolationsfehlers von ca. 200 nm kann man die Auswirkungen auf das Fräsergebnis als wesentlich erkennen. Bei größeren Interpolationsfehlern entstehen optisch störende Formabweichungen.

### Bearbeitungsbeispiel

Das Beispielwerkstück (Abbildung 4) wird durch Abzeilen im Gleichlauf mit einem Kugelfräser,  $\varnothing$  12 mm gefertigt. Für jede der drei Bearbeitungsflächen wirken unterschiedlich große Interpolationsfehler.

Für die Oberfläche in Abbildung 4 oben kam ein Messgerät mit sehr kleinem Interpolationsfehler, wie z. B. ein HEIDENHAIN-Längenmessgerät der Baureihe LC 100, zum Einsatz. Der typische Interpolationsfehler ist in diesem Fall deutlich kleiner als 100 nm. Die Werkstückoberfläche erscheint perfekt.

Bei Messgeräten mit größeren Interpolationsfehlern ergibt sich ein anderes Bild: Da die Vorschubachsen dem hohen Interpolationsfehler folgen, kommt es zu diesem deutlichen Wellenbild auf der Oberfläche des Werkstücks.

Abbildung 4 Mitte zeigt das Fräsergebnis, wenn das Messgerät einen Interpolationsfehler von 200 nm aufweist. Es ist bereits ein Wellenbild deutlich sichtbar. Bei 500 nm Interpolationsfehler hat die Werkstückoberfläche ein recht ausgeprägtes Wellenbild (Abbildung 4 unten).

### Fazit

Um Werkstückoberflächen ohne ein zu erkennendes Wellenbild zu fräsen, sind Messgeräte mit sehr kleinen Interpolationsfehlern nötig, wie z. B. die HEIDENHAIN-Längenmessgeräte LC 100, LC 400 oder LF.

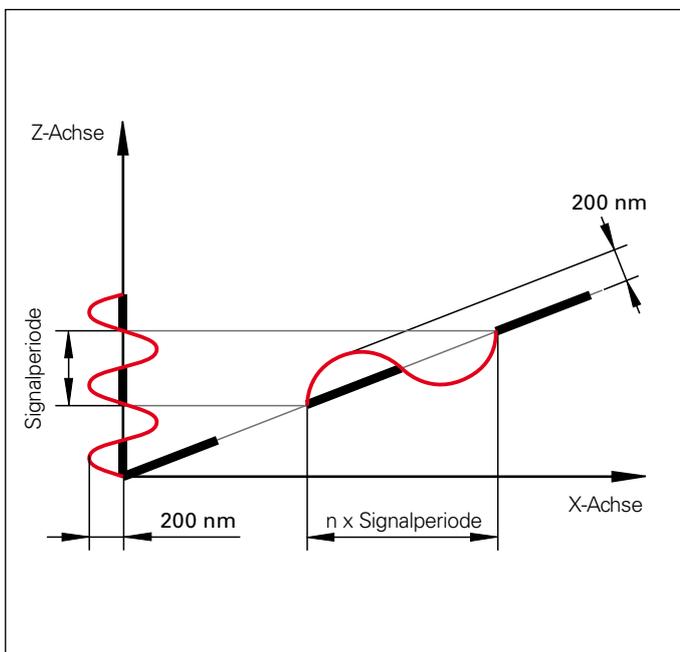


Abbildung 3: Auswirkung des Interpolationsfehlers (z. B. 200 nm) auf einer schrägen Ebene

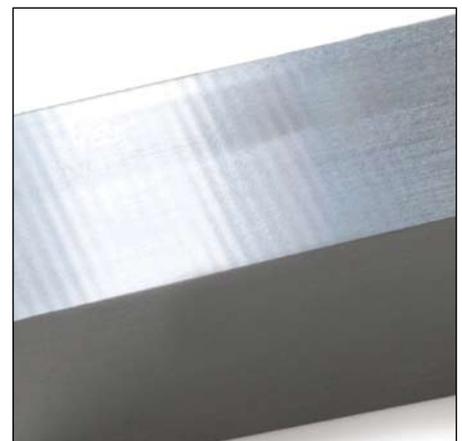


Abbildung 4: Bearbeitete Oberfläche bei verwendetem Messgerät mit Interpolationsfehler besser 100 nm (oben) bzw. 200 nm (Mitte) und 500 nm (unten)

# Längenmessgeräte von HEIDENHAIN

Längenmessgeräte von HEIDENHAIN zeichnen sich durch höchste Genauigkeit und Robustheit aus. Die hohe Signalqualität wird durch eine äußerst präzise DIADUR-Maßverkörperung sowie der hochgenauen Einfeldabtastung erreicht. Dies ist die Basis für Messgeräte mit höchster Präzision und sehr geringen Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode.

Der maximale Interpolationsfehler bei HEIDENHAIN-Längenmessgeräten vom Typ LC liegt beispielsweise deutlich unter 100 nm.

Die Abbildung 5 zeigt die RMS-Werte der Interpolationsfehler einer Serienmessung von 1000 Geräten des Typs LC 183. Der RMS-Wert des Interpolationsfehlers beträgt für 85 % der getesteten Geräte weniger als 12 nm. Das LC 115 als Nachfolgergerät weist geringere RMS-Abweichungen auf.

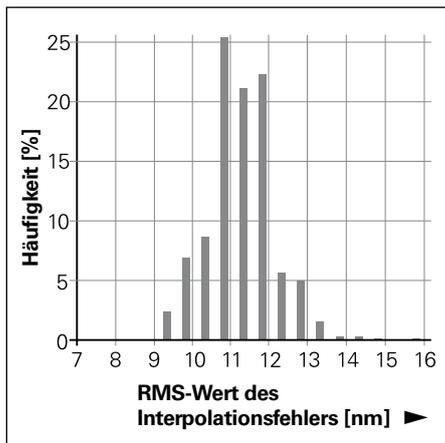


Abbildung 5: Verteilung der Interpolationsfehler (RMS-Wert) beim LC 183 von HEIDENHAIN

	Signalperiode	maximale Positionsabweichungen pro Signalperiode	Messlänge	Schnittstelle	Typ
<b>Längenmessgeräte mit kleinprofiligem Maßstabsgehäuse</b>					
<b>Absolut</b>	–	± 100 nm	bis 2040 mm <sup>1)</sup>	EnDat 2.2	<b>LC 415</b>
<b>Inkremental</b>	4 µm	± 40 nm	bis 1220 mm	~ 1 V <sub>SS</sub>	<b>LF 485</b>
<b>Längenmessgeräte mit großprofiligem Maßstabsgehäuse</b>					
<b>Absolut</b>	–	± 100 nm	bis 4240 mm	EnDat 2.2	<b>LC 115</b>
<b>Inkremental</b>	4 µm	± 40 nm	bis 3040 mm	~ 1 V <sub>SS</sub>	<b>LF 185</b>

<sup>1)</sup> über Messlänge 1240 mm mit Montagesciene



LC 415



LF 485



LC 115



LF 185

## HEIDENHAIN

**DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH**  
Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5  
83301 Traunreut, Germany

☎ +49 8669 31-0  
☎ +49 8669 5061

E-mail: info@heidenhain.de

www.heidenhain.de

### Weitere Informationen:

- Katalog *Längenmessgeräte für NC-gesteuerte Werkzeugmaschinen*
- Technische Information *Bearbeitungs-genauigkeit von Werkzeugmaschinen*
- Technische Information *Längenmess-geräte verbessern die Bearbeitungs-genauigkeit*

