



Technische Information

## Schnelles, konturgenaues Fräsen mit hoher Oberflächengüte

Fertigungsprozesse im Werkzeug- und Formenbau sowie in der Luft- und Raumfahrttechnik lassen sich durch moderne Frästechnologien wie HSC (High Speed Cutting) deutlich optimieren. Wirtschaftliche Vorteile können jedoch nur dann erreicht werden, wenn sowohl die eingesetzten Werkzeugmaschinen als auch die Steuerung höhere Bahnvorschübe im Vergleich zur herkömmlichen Bearbeitung beherrschen.

Schnelle, konturgenaue Maschinenbewegungen erfordern eine sehr präzise Steuerung der Beschleunigungs- und Abbremsvorgänge entlang einer programmierten Bahn. Moderne Steuerungen müssen in der Lage sein, im Zielkonflikt zwischen Bearbeitungszeit, Oberflächenqualität und geometrischer Genauigkeit einen für die Fräsmaschine und den Fertigungsprozess optimierten Ansatz zu erreichen. Endanwender benötigen darüber hinaus die Möglichkeit, das Fräsergebnis mit einfachen Parameteränderungen zu beeinflussen. Die Bewegungsführung der CNC hat einen entscheidenden Einfluss auf die Optimierung von Bearbeitungszeiten bei gegebenen Anforderungen an die Genauigkeit und Oberflächengüte.

### HSC im Formenbau: Anforderungen an Steuerungen für Werkzeugmaschinen

Die HSC-Technologie bietet viele neue Bearbeitungsmöglichkeiten für gehärtete und legierte Werkzeugstähle. Neben dem klassischen Erodieren gewinnt daher das direkte HSC-Fräsen von Formen in harten Werkstoffen an wirtschaftlicher Bedeutung. Im Vergleich zur herkömmlichen Fräsbearbeitung liegt der wesentliche Vorteil der HSC-Bearbeitung in der Verteilung und Abfuhr der durch den Schneidprozess entstehenden Wärme. Hohe Schnittgeschwindigkeiten und Bahnvorschübe in Verbindung mit kleinen Spantiefen ermöglichen, dass der Hauptanteil der Schnittwärme über die Späne abgeführt wird.

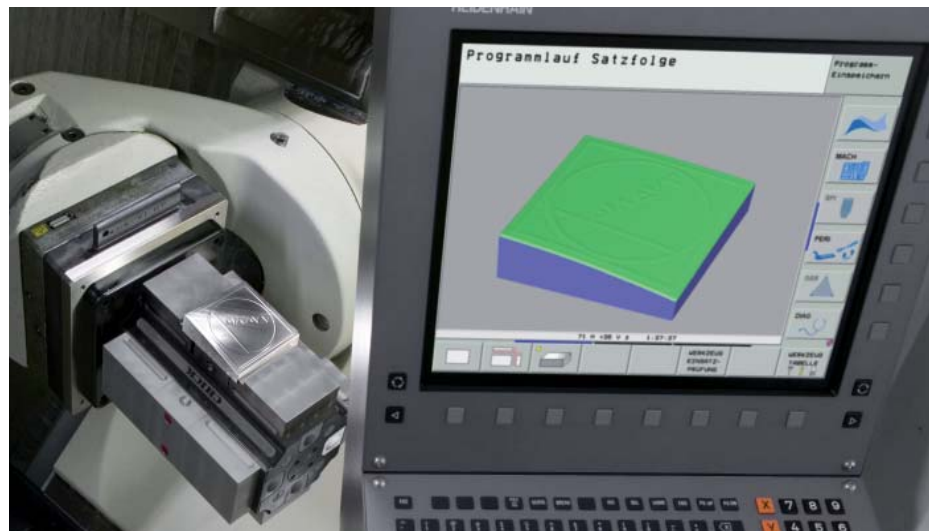


Abbildung 1: Freiformbearbeitung (zweifach gekrümmte Fläche)

# HSC-Bearbeitung

## – Voraussetzungen und Einflüsse

Mit den hohen Vorschubgeschwindigkeiten der HSC-Bearbeitung entsteht zwangsläufig die Forderung nach höheren Bahnbeschleunigungen an gekrümmten Werkstückkonturen. Damit geraten die mechatronischen Eigenschaften einer Werkzeugmaschine stark in den Vordergrund der Betrachtung. Steigen die Beschleunigungen der Vorschubantriebe, so werden größere Beschleunigungskräfte in die Struktur einer Werkzeugmaschine eingeleitet. Folglich steigt auch das Risiko einer Anregung von störenden Maschinenschwingungen, welche zu Einbußen in der Oberflächenqualität führen können. Die Steuerung benötigt daher eine Strategie der Bewegungsführung, welche gleichzeitig die Bearbeitungszeit minimiert und eine optimierte Oberflächenqualität unter Einhaltung vorgegebener Konturgenauigkeiten erreicht. Dabei muss die Steuerung sowohl Herstellern als auch Anwendern von Werkzeugmaschinen Möglichkeiten zur Optimierung der Bewegungsführung bieten.

Für Maschinenhersteller ergibt sich die Anforderung, eine optimale Anpassung der Steuerung an die Eigenschaften der Maschine zu gewährleisten. Die Steuerung muss hierzu ein klar gegliedertes Parametrierungskonzept für die Bewegungsführung und für die Regelkreise der Vorschubmotoren aufweisen. Werkzeugmaschinen werden häufig an Hand der Breite des möglichen Teilespektrums bewertet. Für jede Bearbeitungsaufgabe muss sichergestellt werden, dass auch bei hochdynamischen Bahnbewegungen keine Einbußen in der Werkstückoberfläche durch störende Maschinenschwingungen entstehen. Daher muss der Abgleich zwischen Steuerung und Maschine eine hohe Robustheit bezüglich der Bearbeitungsaufgabe gewährleisten.

Anwenden von Werkzeugmaschinen muss die Steuerung Möglichkeiten bieten, auftragsbezogene Anforderungen bezüglich Bearbeitungszeit und Werkstückgenauigkeit zu berücksichtigen. Festgelegte Anforderungen müssen bereits im ersten Frästeil umgesetzt werden, ohne dass langwierige Vorversuche durchlaufen werden. Die Anforderungen müssen im NC-Programm definiert werden, um einen festen Bezug zu den Fertigungsaufträgen zu gewährleisten. Um darüber hinaus die Fertigungszeiten von Formen in einem akzeptablen Rahmen zu halten, werden Freiformflächen häufig mit Richtungsumkehr zwischen benachbarten Bahnen gefräst. Die Steuerung muss dabei reproduzierbare Werkzeugbahnen beim Anfahren von Konturelementen aus entgegengesetzten Richtungen erzeugen. Andernfalls ist mit Einbußen in der Oberflächenqualität zu rechnen.

### Einfluss der Datenverarbeitung auf die Werkstückgenauigkeit

Das Fertigen eines Bauteils mit spanabhebenden Verfahren erfordert zahlreiche Zwischenschritte, in denen die Daten der CAD-Modellgeometrie in Werkzeugbahnen umgesetzt werden:

- **CAD** (Computer Aided Design): Die Werkstückkontur wird üblicherweise mit NURBS abgebildet (Non uniform rational B-Splines). Mit NURBS lassen sich Freiformflächen mathematisch beschreiben.
- **CAM** (Computer Aided Manufacturing): Die Werkzeugbahnen werden punktweise unter Berücksichtigung der Frässtrategie und Werkzeugkorrekturen aus der CAD-Geometrie berechnet. Der voreingestellte Sehnenfehler (Modellgenauigkeit) bestimmt dabei den Abstand der Punkte.
- **CNC** (Computerized Numerical Control): Das NC-Programm wird punktweise in Achsbewegungen und Geschwindigkeitsprofile umgewandelt. Dabei werden Vorgaben zur Bahntoleranz berücksichtigt. Um hohe Oberflächengüten zu erreichen, müssen die Abweichungen zwischen benachbarten Fräsbahnen deutlich kleiner als die definierten Bahntoleranzen bleiben.
- **Mechatronik:** Die Achsbewegungen liegen im festen Zeitraster als Soll- und Ist-Bewegungen vor und werden über die Maschinengeometrie in Werkzeug- bzw. Werkstückbewegungen umgesetzt. Schleppfehler der Vorschubachsen, Abweichungen von der Sollgeometrie der Maschine, thermische Einflüsse und Schwingungen in Gestell und Antrieben können die Werkstückgenauigkeit einschränken.

<b>CAD</b>	Design
<b>CAM</b>	Bahngenerierung
	Werkzeugkorrektur
<b>CNC</b>	NC-Programm-Interpreter
	Bewegungsführung
	Toleranzüberwachung
	Geschwindigkeitsprofile
<b>Mechatronik</b>	Vorschubregelung
	Maschine und Antriebe

Im Hinblick auf die Optimierung von Bearbeitungszeiten, Oberflächenqualität und Werkstückgenauigkeit ergeben sich folgende Kernanforderungen an die CNC:

- Konturtoleranzen wirkungsvoll kontrollieren,
- benachbarte Bahnen bei Richtungsumkehr genau reproduzieren,
- Schwingungen bei hochdynamischen Bewegungen effektiv vermeiden.

Für zweidimensionale Bahnbewegungen können die Einflüsse der Datenverarbeitungskette auf die Werkstückgenauigkeit mit einem Kreuzgitter-Messgerät KGM 182 von HEIDENHAIN untersucht werden. Die Eigenschaften der Bewegungsführung einer HEIDENHAIN-Steuerung iTNC 530 werden an Hand einer Vorführeinheit basierend auf einer Gantry-Maschine veranschaulicht. Das KGM dient dabei als Basis zur Bewertung der erzielbaren Konturgenauigkeit.



# Schnell, genau, konturtreu

## – Hochgeschwindigkeitsfräsen mit der iTNC 530

### Wirkungsvolle Kontrolle der Kontur-toleranzen

NC-Programme für Freiformflächen werden in der Regel mit einem CAM-System erstellt und bestehen aus einfachen Geraden-sätzen. HEIDENHAIN-Steuerungen glätten automatisch die Satzübergänge, wodurch das Werkzeug kontinuierlich auf der Werkstückoberfläche verfährt. Gesteuert wird die automatische Glättung über eine interne Funktion zur Kontrolle der Konturabweichungen. Diese Funktion (Zyklus 32) ermöglicht dem Anwender die zulässige Konturabweichung beliebig zu definieren. Voreingestellt ist ein Wert, den der Maschinenhersteller in einem Maschinenparameter in der Steuerung festlegt (typisch 0,01 bis 0,02 mm). Zusätzlich wirkt die Toleranz auch bei Verfahrbewegungen auf programmierten Kreisbögen.

Die Abweichung zur CAD-Modell-Geometrie kann bei Freiformflächen im ungünstigsten Fall aus der Summe der eingestellten Konturtoleranz und dem im CAM-System eingestellten Sehnenfehler bestehen. Das Ergebnis am Werkstück hängt schließlich von den Gesamteigenschaften der Maschine und von den eingestellten Werten für Ruck und Beschleunigung der Vorschubachsen ab.

Die abgebildete Ecke des Werkstücks ergibt eine Kreisbahn für den Mittelpunkt eines Kugelfräsers (TCP = Tool Center Point, siehe Abbildung 2). Ohne Glättung der Sollbahndaten müsste die Y-Achse der Maschine im Übergangspunkt schlagartig beschleunigen. Der dadurch entstehende Ruck regt die Maschine zu erheblichen Schwingungen an. Zudem können übliche Antriebe bedingt durch physikalische Grenzen keinen unendlichen Ruck generieren. Ohne erweiterte Maßnahmen in der Bewegungsführung entstehen somit zwangsläufig Bahnabweichungen, welche je nach Krümmungsänderung und Bahngeschwindigkeit erhebliche Ausmaße annehmen können.

Die Bewegungsführung der iTNC 530 erreicht eine Glättung des Rucks, wobei die vorgegebene Konturtoleranz auch bei starken Änderungen der Bahngeschwindigkeit eingehalten wird. (Abbildung 3). Kann eine größere Toleranzvorgabe gewählt werden, so lassen sich Fertigungszeiten signifikant verkürzen. Im gezeigten Beispiel verringert sich die Bearbeitungszeit um etwa 12 % bei einer Vergrößerung der Konturtoleranz von 0,01 mm auf 0,02 mm.

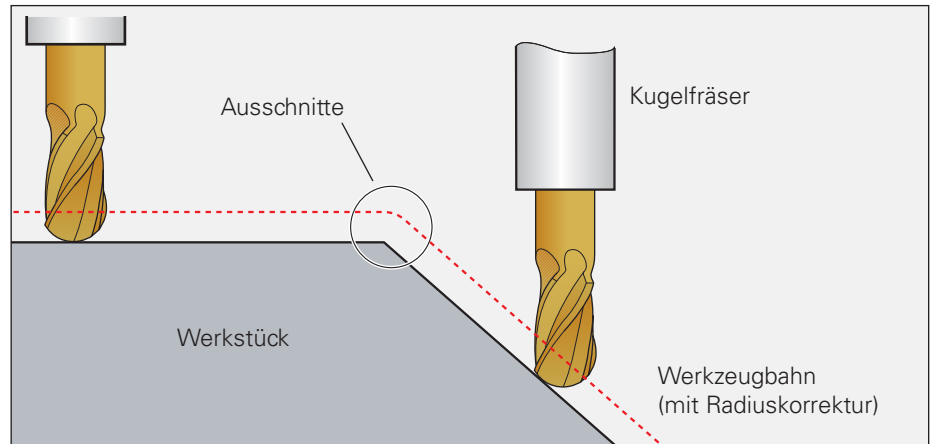


Abbildung 2: TCP-Werkzeugbahn für einen Kugelfräser

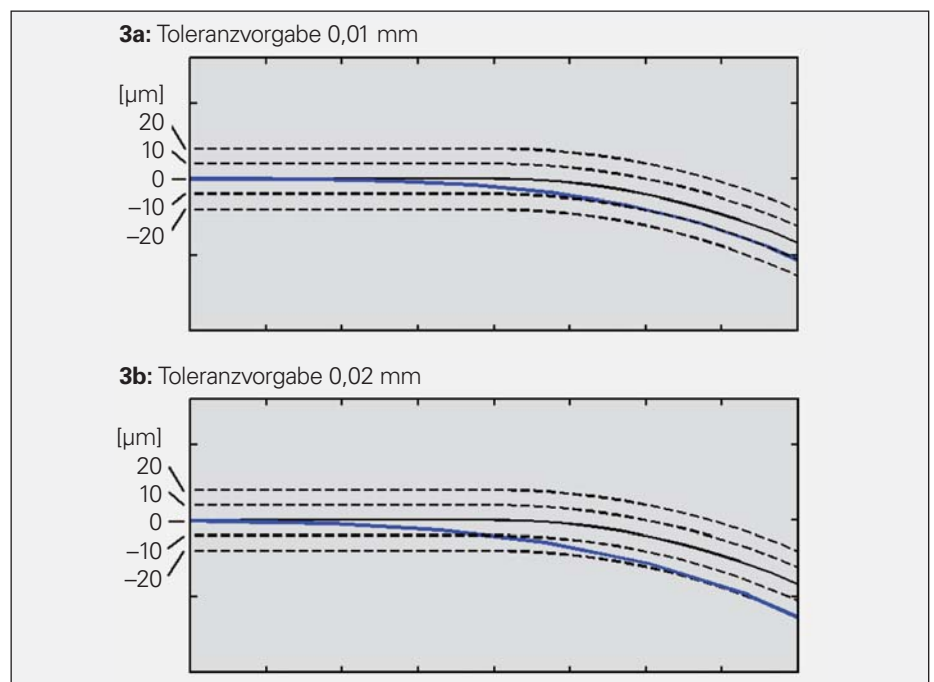


Abbildung 3: Vergrößerte Darstellung der konturüberwachten Sollbahn vom TCP



### Hohe Reproduzierbarkeit in benachbarten Bahnen mit Richtungsumkehr

Abbildung 4 zeigt einen Ausschnitt aus einem Werkstück sowie die entsprechenden Liniensätze der TCP-Bewegung. Beim Fräsen wurden benachbarte Bahnen zeiteffektiv mit Vor- und Rückwärtsbewegungen bearbeitet (Abzeilen mit Richtungsumkehr). Die Einzelbahn besteht aus nur wenigen Geradensätzen mit sehr unterschiedlichen Längen. Der im CAM-System eingestellte Sehnenfehler beträgt  $3\ \mu\text{m}$ .

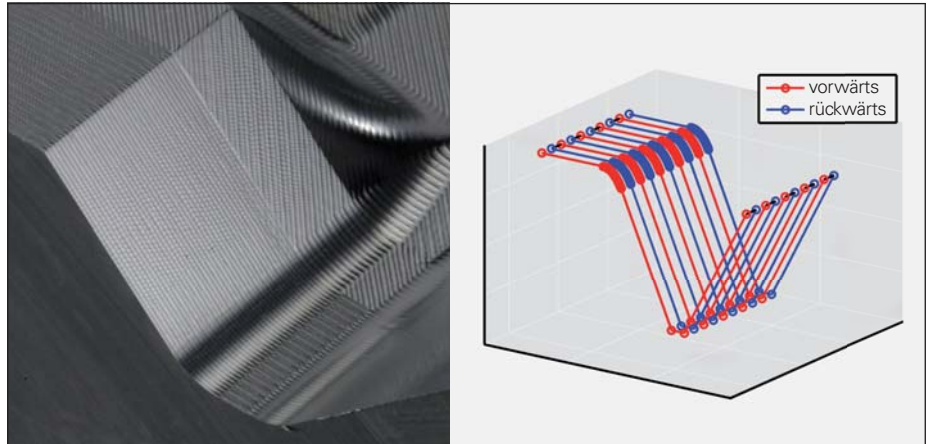


Abbildung 4: Werkstückkontur und zugehörige Liniensätze mit Vor- und Rückwärtsbewegung. Die eingezeichneten Punkte geben die Stützstellen im Programm an.

Abbildung 5 zeigt die vergrößerte Abweichung der Werkzeugbewegungen zur programmierten Kontur. Die Abweichungen beziehen sich auf den idealen Geraden-Kreis-Übergang, wohingegen das NC-Programm (Abb. 4) aus Liniensätzen mit einem Sehnenfehler zum Modell von  $3\ \mu\text{m}$  besteht. Der Sehnenfehler wirkt sich nur in den gekrümmten Bereichen aus und überlagert die auf der CNC eingestellte Konturtoleranz. HEIDENHAIN-Steuerungen erreichen eine sehr hohe Reproduzierbarkeit in Abzeilbewegungen mit Richtungsumkehr (Abb. 5). Konturabweichungen zwischen Vor- und Rückwärtsbahnen bleiben vernachlässigbar, wodurch eine sehr hohe Oberflächengüte der Werkstücke erreichbar ist.

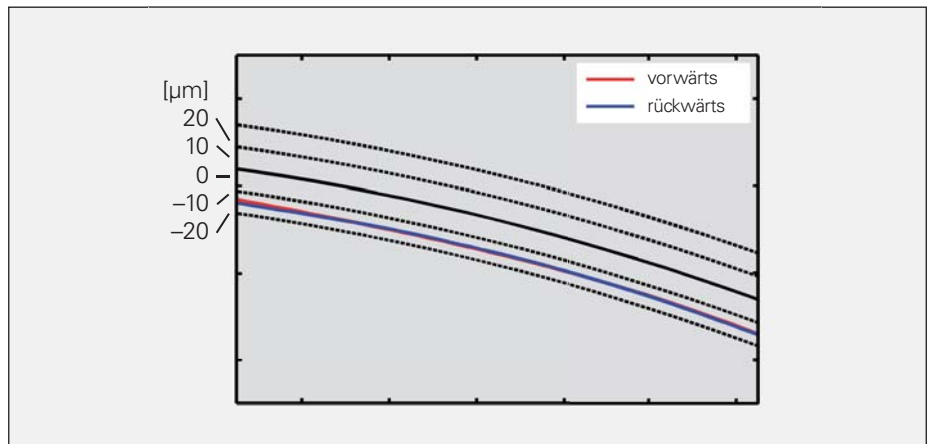


Abbildung 5: Abweichung der Werkzeugbahn im gekrümmten Bereich der Werkstückkontur (Vorschub =  $10\ \text{m/min}$ , Toleranz =  $0,01\ \text{mm}$ ).

Die Werkstückfotos in Abbildung 6 zeigen die mit einer optimierten Bewegungsführung erreichbaren Unterschiede. Die dargestellten Freiformflächen entstanden durch Abzeilen mit Richtungsumkehr (programmierter Vorschub  $10\ \text{m/min}$ , Schlichtaufmaß  $0,1\ \text{mm}$ ). Die Oberflächenqualität des in Abb. 6a dargestellten Werkstücks ist nicht akzeptabel. In dem in Abb. 6b dargestellten Bearbeitungsergebnis mit einer iTNC 530 zeigt sich die hohe Reproduzierbarkeit benachbarter Bahnen.

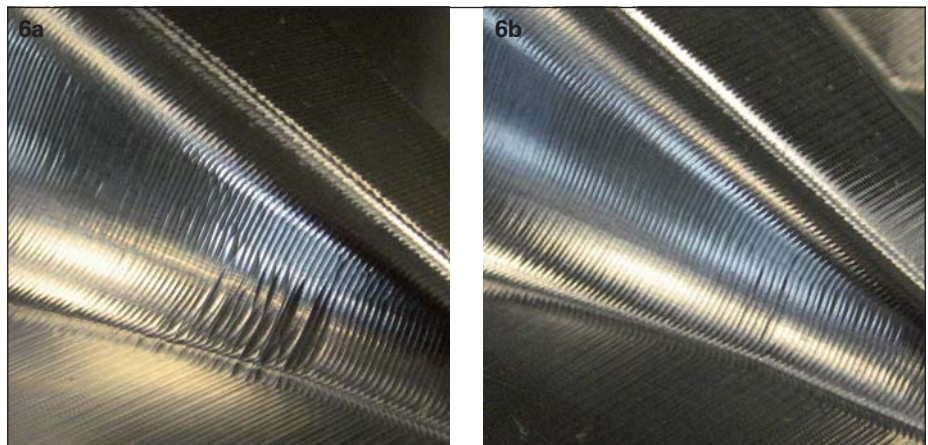


Abbildung 6: Abzeilprozess mit Richtungsumkehr: Reproduzierbarkeit benachbarter Fräsbahnen

6a: Abweichungen zwischen benachbarten Bahnen führen zu einer schlechten Oberfläche  
6b: Fräsergebnis mit einer iTNC 530: Gleichmäßige Oberfläche bei Vorwärts-/Rückwärts-Bewegungen

## Effektive Vermeidung von Schwingungen bei hochdynamischen Bewegungen

Die für die HSC-Frästechnologie benötigten Vorschubgeschwindigkeiten stellen Werkzeugmaschinensteuerungen vor eine große Herausforderung. Kurze Bearbeitungszeiten lassen sich nur erzielen, wenn ein hoher mittlerer Bahnvorschub erreicht wird. An engen Radien der Fräsbahnen muss die Geschwindigkeit jedoch drastisch reduziert werden, um Bahnabweichungen innerhalb des zulässigen Toleranzbandes zu halten. Die Beschleunigungs- und Abbremsmanöver können darüber hinaus Gestellschwingungen verursachen, welche die Werkstückoberfläche negativ beeinträchtigen.

In der speziellen Bewegungsführung von HEIDENHAIN-Steuerungen werden Ruck und Beschleunigung geglättet. Dadurch können Maschinenschwingungen sehr wirksam unterdrückt werden. Falls erforderlich, verringert die Steuerung den programmierten Vorschub automatisch, um die Anregung von Schwingungen auf ein Minimum zu reduzieren. Durch die effektive Vermeidung von Maschinenschwingungen lässt sich ein NC-Programm mit sehr hoher Geschwindigkeit abarbeiten, wodurch deutliche Vorteile in Bezug auf die Fertigungszeiten entstehen.

Abbildung 7 zeigt die Ist-Bewegungen einer Werkzeugmaschine bei Vorgabe einer zweidimensionalen Kontur. Ohne Glättung des Rucks werden Schwingungen in den Beschleunigungsphasen der Maschine angeregt (Abbildung 7a). Über die Bewegungsführung der eingesetzten iTNC 530 von HEIDENHAIN lassen sich Schwingungen effektiv vermeiden (Abbildung 7b). Die in Abbildung 8 dargestellte Werkstückoberfläche zeigt die Vorteile der Bewegungsführung von HEIDENHAIN-Steuerungen noch einmal besonders deutlich. Die Bahnbewegung entlang des dargestellten Kreissegments erfordert in jedem Punkt eine Anpassung der Achsbeschleunigungen, wodurch im Regelfall Maschinenschwingungen angeregt werden (Abbildung 8a). Über die Glättung des Rucks lässt sich mit der iTNC 530 eine hohe Oberflächenqualität ohne störende Auswirkungen von Schwingungen erzielen (Abbildung 8b).

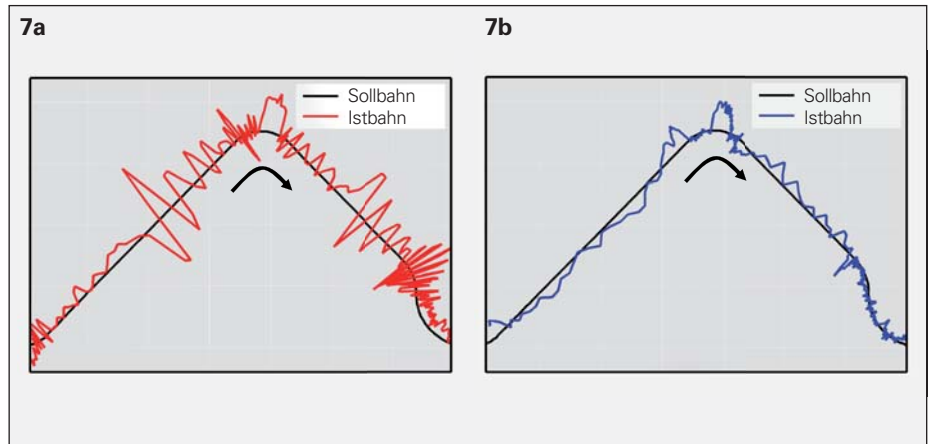


Abbildung 7: Gemessene Ist-Positionen, aufgenommen mit einem Kreuzgitter-Messgerät, an einer verrundeten Ecke ohne (7a) und mit (7b) Lage-Sollwertfilterung der NC-Daten

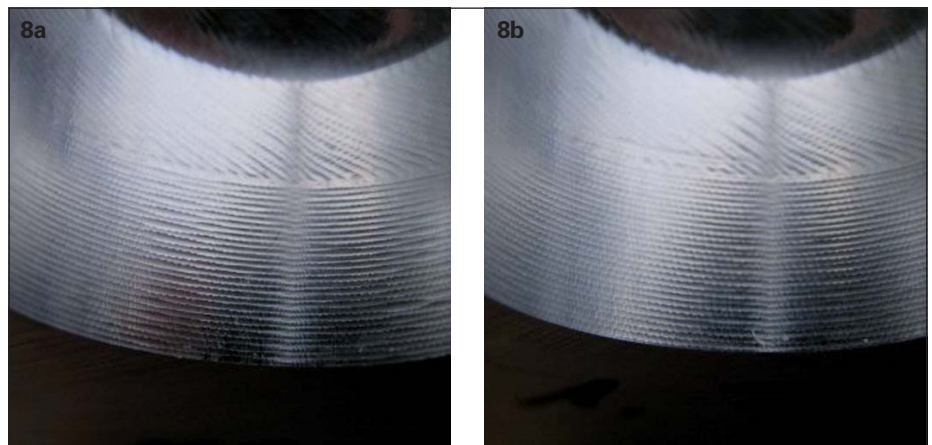


Abbildung 8: Auswirkung von Maschinenschwingungen am Werkstück:

8a: Ohne Glättung des Rucks führt eine Schwingung in der Z-Achse zu Kerben in der Oberfläche

8b: Die Bewegungsführung der iTNC 530 vermeidet gezielt Oberflächenprobleme durch Schwingungen

## Zusammenfassung

Fertigungsprozesse im Formenbau und in der Luft- und Raumfahrttechnik werden maßgeblich durch die HSC-Frästechnologie bestimmt. Die benötigten Vorschubgeschwindigkeiten stellen Werkzeugmaschinensteuerungen vor eine große Herausforderung. Im Zielkonflikt zwischen Bearbeitungszeiten, Konturgenauigkeiten und Oberflächengüte stellt die HEIDENHAIN-Steuerung iTNC 530 sicher, dass gewählte Präferenzen eingehalten werden. Dazu werden die Bahnbewegungen so geplant, dass

- Maschinenschwingungen vermieden,
- Genauigkeitsanforderungen eingehalten und
- Bearbeitungszeiten minimiert werden.

Darüber hinaus erreicht die iTNC 530 eine hohe Reproduzierbarkeit auf benachbarten Fräsbahnen, so dass auch höchste Ansprüche an die Oberflächengüte über ein zeiteffektives Abzählen mit Richtungsumkehr umsetzbar sind.

In der Abstimmung zwischen Steuerung, Antrieben und Maschinengestell setzt die iTNC 530 neue Maßstäbe. Auf diese Weise lässt sich in einem breiten Bauteilspektrum bereits ab dem ersten Teil akzeptable Qualität fertigen.

# Konsequent aufwärtskompatibel

## – zukunftssicher mit HEIDENHAIN-Bahnsteuerungen

Seit mehr als 25 Jahren liefert HEIDENHAIN Bahnsteuerungen für Fräs- und Bohrbearbeitung. In diesem Zeitraum wurden die Steuerungen kontinuierlich weiterentwickelt: viele neue Funktionen kamen hinzu – auch für komplexere Maschinen mit vielen Achsen. Das grundlegende Bedienkonzept blieb jedoch unverändert. Der Facharbeiter, der bisher an einer Werkzeugmaschine mit TNC arbeitet, muss nicht umlernen. Er wendet auf der iTNC 530 sofort seine ganze TNC-Erfahrung an und programmiert und arbeitet wie gewohnt.



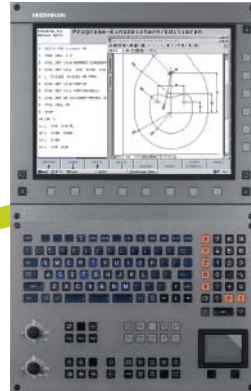
1993: TNC 426C/P



1997: TNC 426M  
TNC 430



2001: iTNC 530



2003: iTNC 530 mit  
Windows 2000



2004: iTNC 530  
mit smarTNC



1988: TNC 407  
TNC 415



1987: TNC 355



1984: TNC 155



1983: TNC 150



1981: TNC 145, die  
erste Bahnsteuerung  
von HEIDENHAIN



Diese Bahnfunktionstasten der TNC 145  
finden Sie auch auf der iTNC 530

# HEIDENHAIN

**DR. JOHANNES HEIDENHAIN GmbH**

Dr.-Johannes-Heidenhain-Straße 5

83301 Traunreut, Germany

☎ +49 (8669) 31-0

FAX +49 (8669) 50 61

E-Mail: info@heidenhain.de

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

### Weitere Informationen:

- Katalog *Bahnsteuerung iTNC 530*

