



Technische Information

Dynamic Precision – dynamisch und mit hoher Genauigkeit bearbeiten

Produktivitätssteigerung und Kostenreduzierung sind vorrangige Ziele moderner Produktionsunternehmen. Eng damit verknüpft sind die Forderungen nach reduziertem Ausschuss, kürzeren Bearbeitungszeiten und dem Vermeiden von zusätzlichen Bearbeitungsschritten bzw. Nacharbeit. Steuerungen für Werkzeugmaschinen müssen somit in der Lage sein, im Zielkonflikt zwischen Bearbeitungszeit, Oberflächenqualität und Werkstückgenauigkeit einen für die Fräsmaschine und den Fertigungsprozess optimierten Ansatz zu finden.

Unter dem Begriff Dynamic Precision fasst HEIDENHAIN eine Gruppe von Funktionen für TNC-Steuerungen zusammen, welche die Bahn-Genauigkeit von Werkzeugmaschinen auch bei hohen Vorschüben und komplexen Bahnbewegungen erheblich verbessern. Die dynamische Genauigkeit einer Werkzeugmaschine wird von den Beschleunigungen der Vorschubachsen bestimmt, welche erforderlich sind, um eine präzise Bahnbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug zu erzeugen.

Beim Beschleunigen von Vorschubachsen können sich Maschinenkomponenten durch Trägheitskräfte verformen oder sogar zu Schwingungen angeregt werden. Mit Dynamic Precision werden die während der Bearbeitung entstehenden dynamischen Fehler am Tool Center Point (TCP) erheblich reduziert, so dass NC-Programme bei verbesserter Bauteilgenauigkeit und Oberflächengüte sogar merklich schneller abgearbeitet werden.



Mit einer deutlichen Reduktion der Fehler am Tool Center Point bei hochdynamischer Abarbeitung von NC-Programmen leistet Dynamic Precision somit einen wertvollen Beitrag zur Steigerung der Performance von Werkzeugmaschinen.

Anwender sparen Zeit und Kosten für unnötigen Ausschuss, da sich die höhere dynamische Genauigkeit von Werkzeugmaschinen mit Dynamic Precision in kürzeren Bearbeitungszeiten, einer verbesserten Werkstückgenauigkeit und einer höheren Oberflächengüte bemerkbar machen.

dynamic + precision

Dynamic Precision

Kürzere Bearbeitungszeit, höhere Genauigkeit, bessere Oberfläche

Die am Werkstück sichtbaren Oberflächenfehler sowie die messbaren Geometrieabweichungen lassen sich auf drei ursächliche Fehlerklassen zurückführen.

Unter den **kinematischen** oder **statischen Fehlern** von Werkzeugmaschinen werden die Auswirkungen der Abweichungen einer realen Maschinenkinematik von dem in der Steuerung hinterlegten Kinematikmodell zusammengefasst. Folgende Faktoren wirken sich in der Praxis auf die Genauigkeit der Maschinenkinematik aus:

- Fertigungs- und Montagegenauigkeit der Maschinenkomponenten
 - gewichtsbedingter Durchhang oder entsprechende Verbiegungen des Gestells
- Die kinematischen Fehler verändern sich bei hochwertigen Werkzeugmaschinen üblicherweise nur wenig und können über die TNC-Software-Optionen KinematicsComp und KinematicsOpt abgebildet und entsprechend kompensiert werden.

Die Klasse der **thermisch bedingten Fehler** umfasst die Auswirkungen von Temperaturschwankungen im Maschinengestell oder im Werkstück auf die Genauigkeit am Tool Center Point TCP. Temperaturschwankungen im Gestell entstehen durch:

- kalte oder warme Luftströmungen in der Maschinenhalle
- Sonneneinstrahlung
- Wärmeentwicklung von Aggregaten und Antrieben in einer Werkzeugmaschine
- kalte oder warme Kühlschmierstoffströme im Arbeitsraum der Maschine

Thermische Fehler von Werkzeugmaschinen zeigen sich am Werkstück in Zeiträumen von wenigen Minuten bis hin zu mehreren Stunden. Mit der Software-Option KinematicsOpt können Anwender fünfachsiger Maschinen die Auswirkungen von thermischen Fehlern auf die Lage der Rundachsen mit geringem Zeitaufwand effektiv kompensieren.

Die **dynamischen Fehler** einer Werkzeugmaschine umfassen kurzzeitige Abweichungen oder Schwingungen am Tool Center Point. Dynamische Fehler haben folgende Ursachen:

- Vorschubkräfte und -drehmomente sowie Bearbeitungskräfte sorgen für Positions- und Winkelfehler am Tool Center Point.
- Schleppfehler zwischen der Sollposition und der tatsächlichen Position der Vorschubachsen können von der Antriebsregelung nicht vollständig kompensiert werden.

Bearbeitung einer Ecke: Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck in den beiden Achsen X und Y

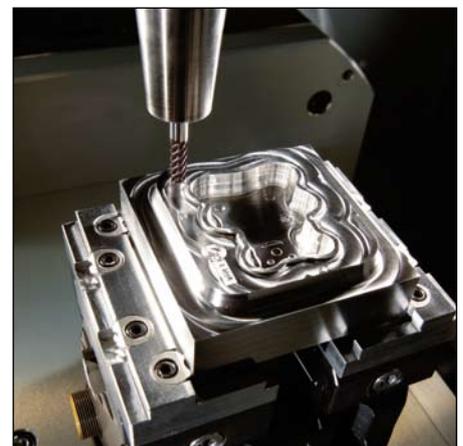
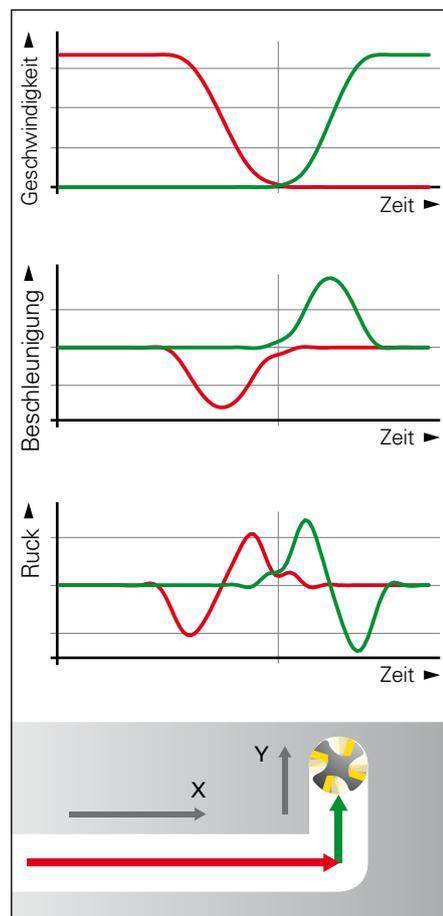
Die dynamischen Fehler nehmen im Allgemeinen zu, je schneller NC-Programme abgearbeitet werden. Soll also die Bearbeitungszeit reduziert werden, so geht dies auf Kosten der Genauigkeit und der Oberflächengüte. Und im Gegenzug muss man für exakte Konturen längere Bearbeitungszeiten in Kauf nehmen.

Dies trifft besonders auf die Bearbeitungen von **Freiformflächen** mit möglichst hoher Oberflächengüte bei hoher Genauigkeit zu. In vielen Freiformbearbeitungen kombinieren sich Ecken und leicht gekrümmte Oberflächen. Häufige Richtungswechsel der Fräsbewegung sind die Folge. Bei jedem Richtungswechsel müssen Achsen abbremsen oder beschleunigen. Das Maß für die Dauer des Beschleunigungsaufbaus ist der Ruck. Ein hoher Ruck bewirkt einen schnellen Beschleunigungsaufbau und dadurch einen Zeitgewinn. Ein hoher Ruck führt aber auch zur Anregung von Maschinenschwingungen und somit zu Ungenauigkeiten und Fehlern auf der Werkstückoberfläche. Um die Abweichungen durch dynamische Fehler möglichst gering zu halten, muss langsam verfahren werden.

Bei Werkstücken mit **schwach gekrümmten** oder leicht schrägen Flächen gibt es häufig Probleme durch Schattierungen auf der Oberfläche. Diese können aus Schwingungen der Maschine resultieren, aber auch von externen Störungen kommen.

Bei **5-Achs-Bearbeitung** kommt es in den Linearachsen aufgrund von Ausgleichsbewegungen zu hochdynamischen Bewegungen (hoher Vorschub, hohe Beschleunigung). Daraus können wiederum große Abweichungen aufgrund von Schwingungen oder anderen dynamischen Abweichungen resultieren.

Da sich die dynamische Genauigkeit der Maschine mit **zunehmendem Alter und abhängig von der Beladung** ändert, können weitere Abweichungen entstehen. Diese Effekte zeigen sich hauptsächlich in den Beschleunigungsphasen.



Unter dem Begriff **Dynamic Precision** sind optionale Funktionen für HEIDENHAIN-Steuerungen zusammengefasst, die die dynamischen Fehler von Werkzeugmaschinen wirkungsvoll reduzieren. Sie verbessern das dynamische Maschinenverhalten, erzielen eine höhere Steifigkeit am TCP und ermöglichen so das Fräsen an der Grenze des technologisch Möglichen unabhängig vom Alter der Maschine, ihrer Beladung und der Bearbeitungsposition.

Vorteile von Dynamic Precision für Endanwender

Für genaue Werkstücke mit hoher Oberflächengüte muss nicht mehr zwangsläufig langsam bearbeitet werden. Werkzeugmaschinen arbeiten mit Dynamic Precision gleichzeitig **schnell und präzise**.

Hohe Präzision bei schneller Bearbeitung bedeuten aber auch eine Erhöhung der Produktivität. Stückkosten sinken ohne Beeinträchtigung der Genauigkeit und der Oberflächenqualität.

Dynamic Precision sorgt auch dafür, dass die Genauigkeit unabhängig von der Betriebsdauer und von der Beladung erhalten bleibt. Somit müssen Vorschübe nicht alters- oder beladungsbedingt reduziert werden.

Was ist Dynamic Precision?

Die Funktionen von Dynamic Precision stehen als Optionen für Steuerungen von HEIDENHAIN zur Verfügung. Sie können sowohl einzeln als auch in Kombination eingesetzt werden.

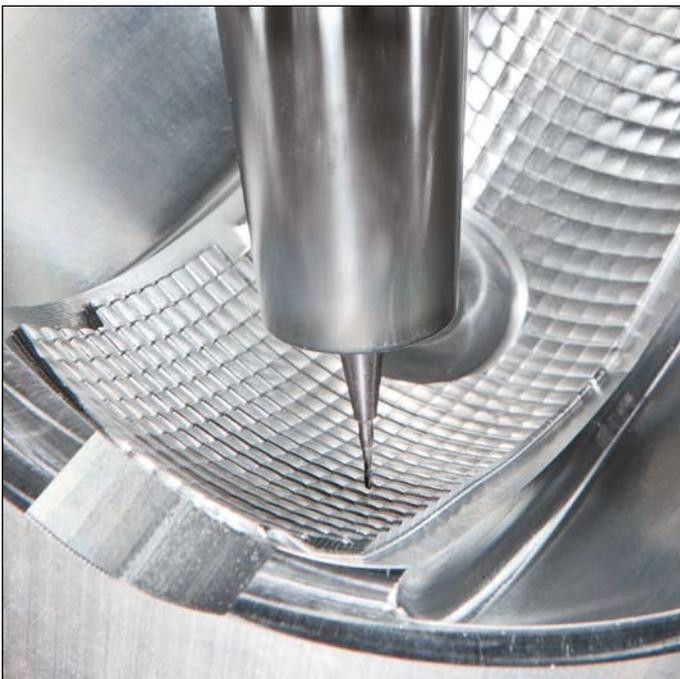
- CTC – Kompensation beschleunigungsabhängiger Positionsabweichungen am Tool Center Point, dadurch höhere Genauigkeit in den Beschleunigungsphasen
- AVD – Aktive Schwingungsdämpfung für bessere Oberflächen
- PAC – Positionsabhängige Anpassung von Regelparametern
- LAC – Lastabhängige Anpassung von Regelparametern, dadurch hohe Genauigkeit unabhängig von Beladung und Alterung
- MAC – Bewegungsabhängige Anpassung von Regelparametern

Die einzelnen Funktionen werden im Folgenden ausführlich beschrieben.

Wie arbeitet Dynamic Precision?

Die Funktionen von Dynamic Precision werden in der Regler-Einheit – einer Komponente der HEIDENHAIN-Steuerungen – mit hoher Taktrate an die Bewegungen und Belastungen der Werkzeugmaschine angepasst.

Da es sich bei Dynamic Precision um Software-Funktionen handelt, ist keinerlei Eingriff in die Maschinenmechanik oder in den Antriebsstrang notwendig. Allerdings muss der Maschinenhersteller die einzelnen Funktionen freischalten, parametrieren und an die Maschine anpassen.



CTC

Kompensation beschleunigungsabhängiger Positionsabweichungen am Tool Center Point

Durch dynamische Beschleunigungsvorgänge entstehen Kräfte, die Teile der Maschine kurzzeitig verformen können. Dies kann zu Abweichungen am Werkzeugmittelpunkt, dem Tool Center Point (TCP), führen. Neben einer Deformation in Achsrichtung kann die dynamische Beschleunigung einer Achse aufgrund mechanischer Verkopplungen auch Deformationen quer zur Beschleunigungsrichtung verursachen. Dies gilt insbesondere, wenn die Vorschubkräfte nicht im Schwerpunkt einer Achse angreifen. So können während der Brems- und Beschleunigungsphasen aufgrund der Trägheit der Massen Nickbewegungen entstehen (siehe Abbildung 1).

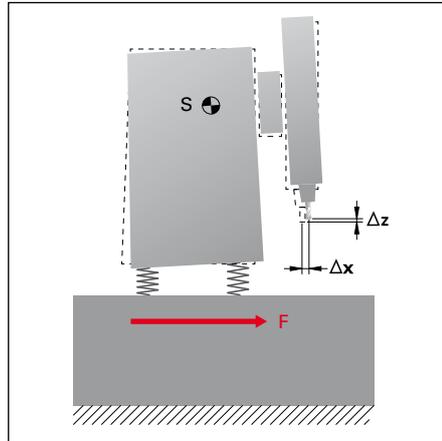


Abbildung 1: Nickbewegung einer Achse

Die resultierenden Positionsabweichungen in Richtung der beschleunigten Achse sowie der Querachsen sind proportional zur Beschleunigung der bewegten Vorschubachse (Abbildung 2). Die Abweichungen hängen zudem von der Steifigkeit der Führungen, dem Abstand zwischen dem Angriffspunkt der Vorschubkraft und dem Massenschwerpunkt sowie dem Abstand zwischen dem Massenschwerpunkt und dem TCP ab.

Diese Abweichungen werden von den Positionsmessgeräten nicht erfasst. Die Regelung der Vorschubachsen kann somit nicht darauf reagieren.

Auswirkungen am Werkstück

Der Effekt zeigt sich am deutlichsten, wenn der gleiche Punkt auf einem Werkstück einmal mit hoher und einmal mit niedriger Beschleunigung angefahren wird.

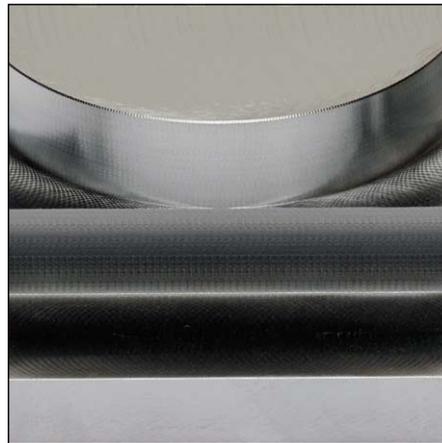


Abbildung 3: Zapfen auf Quadrat; mit CTC gefräst, keine Abflachung sichtbar

Beispiel 1: Fräsen von Kreisen

Durch eine dynamische Auffederung in der X- und Y-Achse wird der Zapfen (R32 F10000) zu groß bearbeitet. Veranschaulicht wird dies beim Fräsen des Quadrats, das unter dem Zapfen liegt. Da seine Seitenlänge exakt dem Durchmesser des Zapfens entspricht, tangiert idealerweise das Quadrat den kreisförmigen Zapfen (Abbildung 3). Da der Zapfen jedoch aufgrund der Auffederung zu groß ist, wird beim Fräsen des darunterliegenden Quadrats ein Teil des Zapfens weggenommen. Man sieht am Kreis eine Abflachung (Abbildung 4).

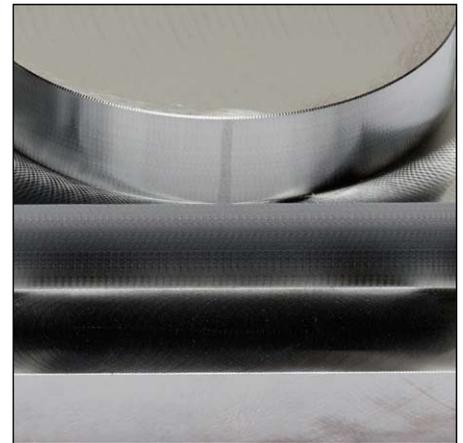


Abbildung 4: Auswirkung der elastischen Auffederung (der zu große Zapfen wurde beim Fräsen des Quadrats abgeflacht)

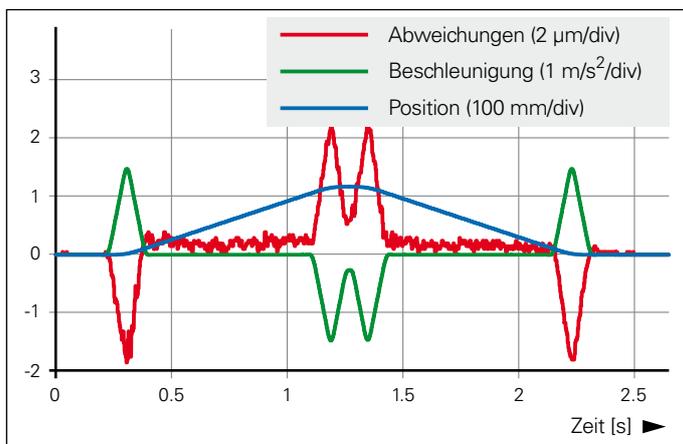


Abbildung 2: Abweichung in Abhängigkeit von der Beschleunigung bei Positionsänderungen

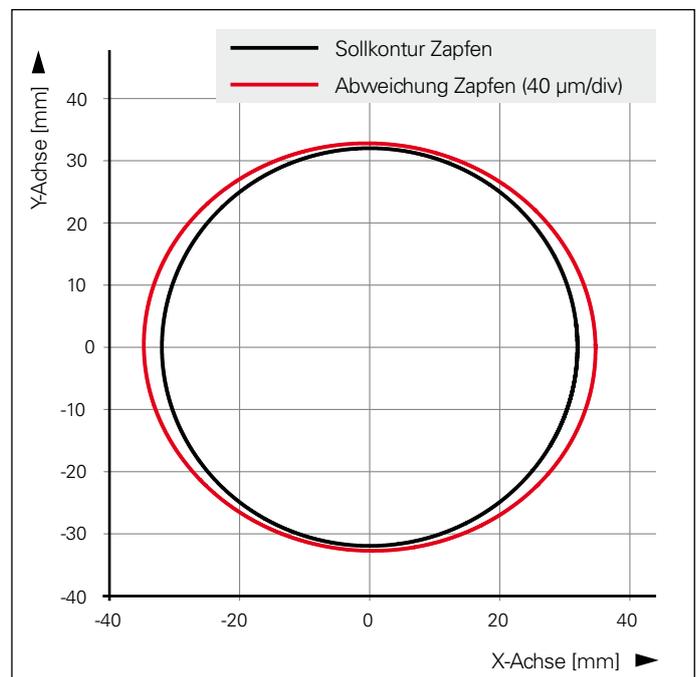


Abbildung 5: Genauigkeit der Zirkularbewegung, die Abweichung von der Sollkontur ist 500fach vergrößert dargestellt

Dieser Effekt des Auffederns ist in Abbildung 5 dargestellt. Dabei werden die aus Messungen bekannten beschleunigungsabhängigen Abweichungen auf die Istbewegung aufgeschlagen. Die resultierende Bahn zeigt aufgrund der unterschiedlichen Verhältnisse in X- und Y-Richtung (Massen, Maschinengeometrie usw.) eine leichte Ellipse.

In Abbildung 6 ist die Abweichung unvergrößert dargestellt. Man erkennt hier deutlich, dass die Auffederung eine Radiusvergrößerung in X-Richtung um ca. 5 µm verursacht, wodurch beim Fräsen der darunterliegenden Fläche eine Abflachung am Kreis von etwa 1,2 mm Breite entsteht. Dies entspricht auch dem am realen Werkstück gemessenen Fehler.

Beispiel 2: Fräsen von Taschen, Auffederung quer zur Beschleunigungsrichtung

Beim Fräsen von Taschen kann es durch beschleunigungsabhängige Verformungen der Achsen quer zur Bewegungsrichtung zu Marken auf der Oberfläche kommen (Abbildung 7). Durch den Beschleunigungsvorgang entsteht eine Nickbewegung. Der Fräser wird kurzzeitig ins Material gedrückt. Mit CTC wird diese störende Bewegung verhindert (Abbildung 8).

Kompensation durch CTC

Mit der Funktion CTC (Cross Talk Compensation) bietet HEIDENHAIN eine Steuerungsoption zur Kompensation der beschleunigungsabhängigen Positionsabweichungen am TCP. Die beteiligten Größen und Parameter sind entweder in der Steuerung bekannt (Beschleunigung) oder aber über ein Messverfahren zu ermitteln (Maschinensteifigkeit).

Ohne die Maschine mechanisch zu verändern oder die Bearbeitungszeit zu erhöhen, bietet sich die Möglichkeit, genauer zu fertigen. Desweiteren ist mit CTC die erreichbare Genauigkeit unabhängig von den gefahrenen Beschleunigungen.

Auswirkungen in der Praxis

Mit Hilfe von CTC ließ sich an Testkonturen die mit einem Kreuzgittermessgerät gemessene mittlere Abweichung um bis zu 80% reduzieren. Dies erlaubte es, den Ruck (Maß für die Dauer des Beschleunigungsaufbaus) zu erhöhen und damit die Bearbeitungszeit deutlich zu verkürzen.

Mit einer Erhöhung des Rucks um den Faktor 2 konnten die Bahnzeiten um bis zu 15% verkürzt werden. Dennoch betragen die mittleren Abweichungen dank CTC nur 50% der Abweichungen, die ohne CTC erreicht wurden.

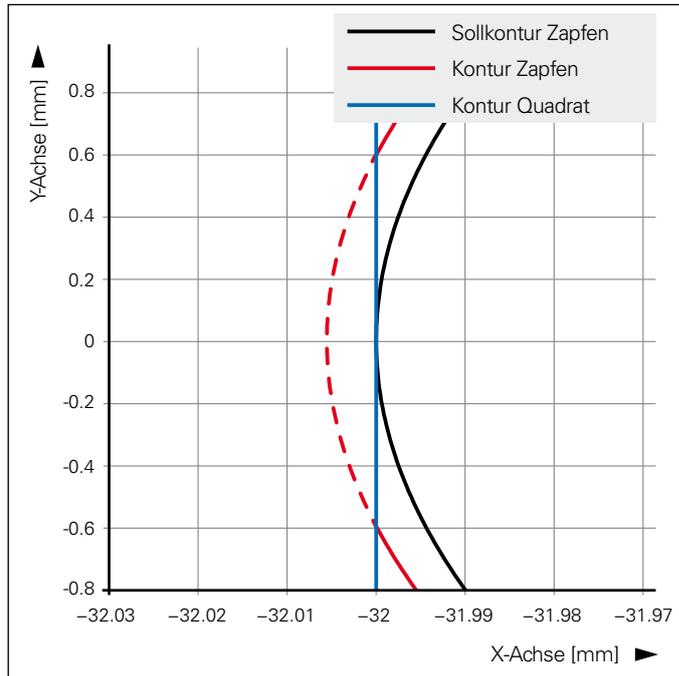


Abbildung 6: Der Ausschnitt zeigt die Beschädigung des Zapfens beim Fräsen des Quadrats.



Abbildung 7: Bearbeitung ohne CTC



Abbildung 8: Bearbeitung mit CTC

AVD

Aktive Schwingungsdämpfung

Auf schrägen oder gekrümmten Flächen kommt es häufig zu Oberflächenproblemen in Form von sichtbaren Schatten oder Kontrastschwankungen. Sie wirken insbesondere störend, da das Auge bei den typischen Betrachtungsabständen von 30 cm bis 60 cm für Kontrastschwankungen mit einer Ortsperiode von 0,5 mm bis 5 mm sehr empfindlich ist. Die Schatten können auf grundlegend verschiedene Ursachen zurückzuführen sein:

- mechanische Schwingungen, die aus Elastizitäten im Antriebsstrang oder der Aufstellung der Maschine herrühren
- Positionsabweichungen innerhalb einer Signalperiode (Interpolationsfehler) aufgrund des verwendeten Messgeräts (siehe hierzu Technische Information *Perfekte Oberflächen durch HEIDENHAIN-Messgeräte*).

In dieser Technischen Information werden die Oberflächenfehler aufgrund mechanischer Schwingungen betrachtet.

Periodische Schattierungen haben ihre Ursache zumeist in niederfrequenten Schwingungen mit Frequenzen bis 100 Hz. Bei den üblichen Schlichtvorschüben von 3000 mm/min bis 6000 mm/min bilden sich solche Schwingungen genau im Bereich dieser Ortsperioden ab. Bei entsprechendem Lichteinfall können dabei Konturabweichungen von 1 μm und kleiner sichtbar werden.

Zwei häufige Ursachen für Störungen der Oberflächenqualität sind:

- **Elastizitäten im Antriebsstrang**

In Antriebssträngen kann es z. B. durch elastische Verformungen des Kugelgewindetriebs oder Elastizitäten des Zahnriemens zu einer Schwingung zwischen der Antriebsseite (Motor) und Abtriebsseite (Schlitten) kommen.

- **Aufstellerschwingungen**

Aufstellerschwingungen sind unvermeidbar. Typischerweise befinden sich Aufstellerschwingungen im Frequenzbereich zwischen 10 Hz bis 30 Hz.

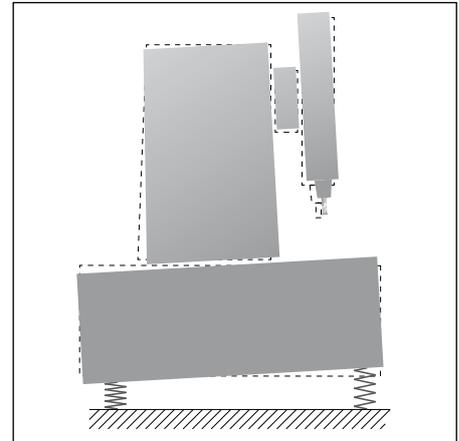


Abbildung 1: Aufstellerschwingungen

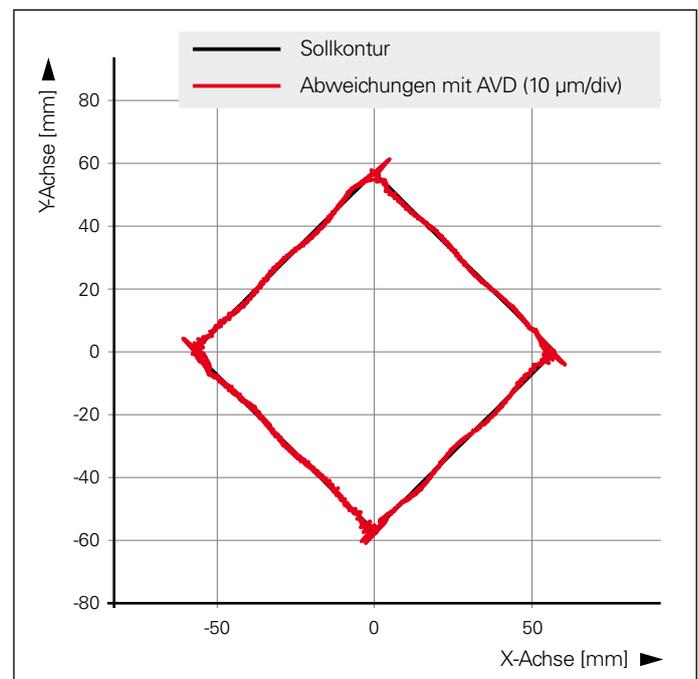
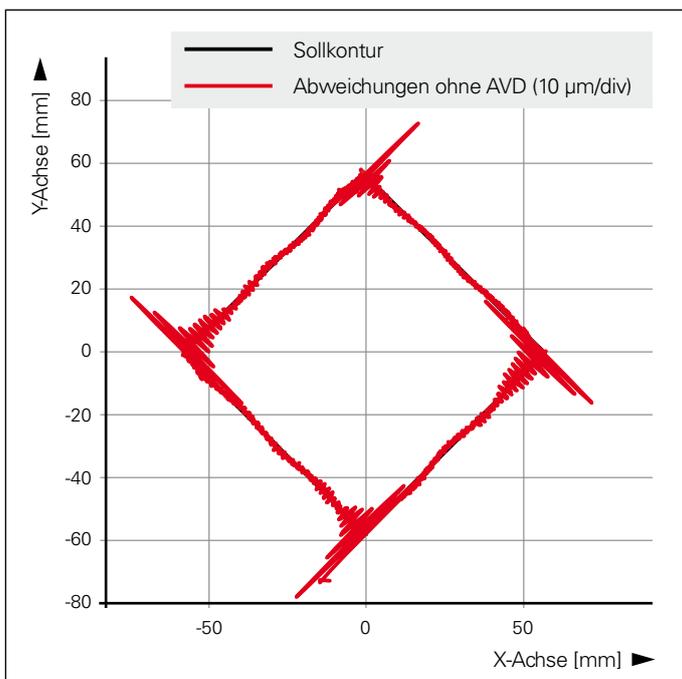


Abbildung 2 und 3: Abweichungen aufgrund von Schwingungen

Konventionelle Gegenmaßnahmen

Schwingungen können durch Beschleunigungsvorgänge der Maschine oder durch Einkopplungen über den Boden, durch den Fräseingriff sowie durch Momentenwelligkeiten des Motors angeregt werden. Anregungen durch Beschleunigungsvorgänge können zwar durch Reduzieren des Rucks verringert werden, dies führt jedoch zu längeren Bearbeitungszeiten.

Kompensation durch AVD

Die Funktion AVD (Active Vibration Damping) unterdrückt dominante niederfrequente Schwingungen (Aufstellerschwingungen oder Elastizität im Antriebsstrang).

AVD ermöglicht ein schnelles und vibrationsfreies Fräsen. Durch die Unterdrückung der aus Beschleunigungsvorgängen resultierenden Störungen können hohe Ruckwerte und damit höhere Beschleunigungen erreicht werden. Dadurch reduzieren sich die Bearbeitungszeiten, ohne dass darunter die Oberflächenqualität des Werkstücks leidet.

Auswirkungen in der Praxis

Am Beispielwerkstück sind zwei Quadrate in unterschiedlichen Winkeln zueinander angeordnet. Die Beschleunigungsvorgänge an den Ecken regen die X- und Y-Achse zu Schwingungen an (Abbildung 2 und 3). Die Schwingungsanteile senkrecht zur Werkstückoberfläche werden in Form von Schattierungen sichtbar (Abbildung 4). Die Periodenlänge von 2 mm bei einem Vorschub von 2000 mm/min resultiert aus der gemessenen Aufstellerschwingung mit 16,5 Hz. Durch AVD konnte die Amplitude der Schwingung nahezu eliminiert werden (Abbildung 5).

Um vergleichbare Oberflächen ohne AVD zu erhalten, müssten die Ruckwerte um Faktor 3 reduziert werden.

Fazit

AVD erhöht die Produktivität einer Werkzeugmaschine und/oder verbessert die Oberflächenqualität der Werkstücke.

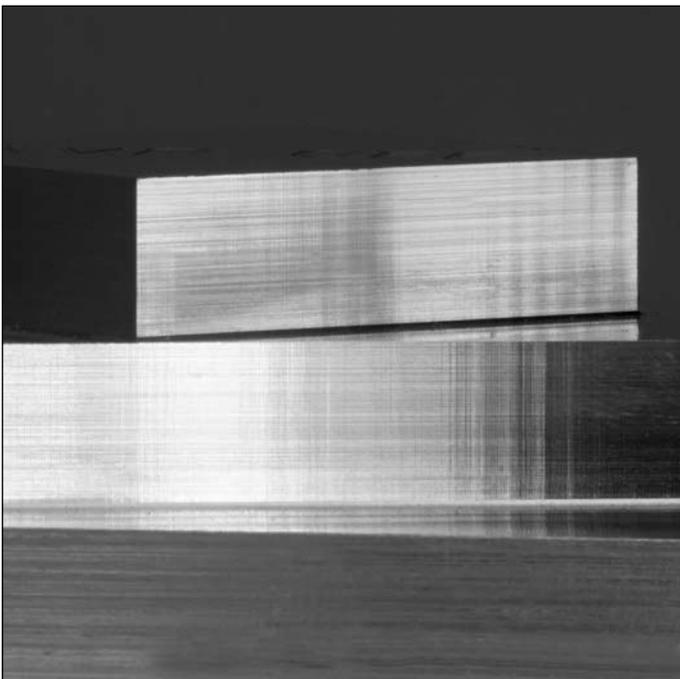


Abbildung 4: Schwingungen können die Oberflächenqualität signifikant beeinträchtigen.

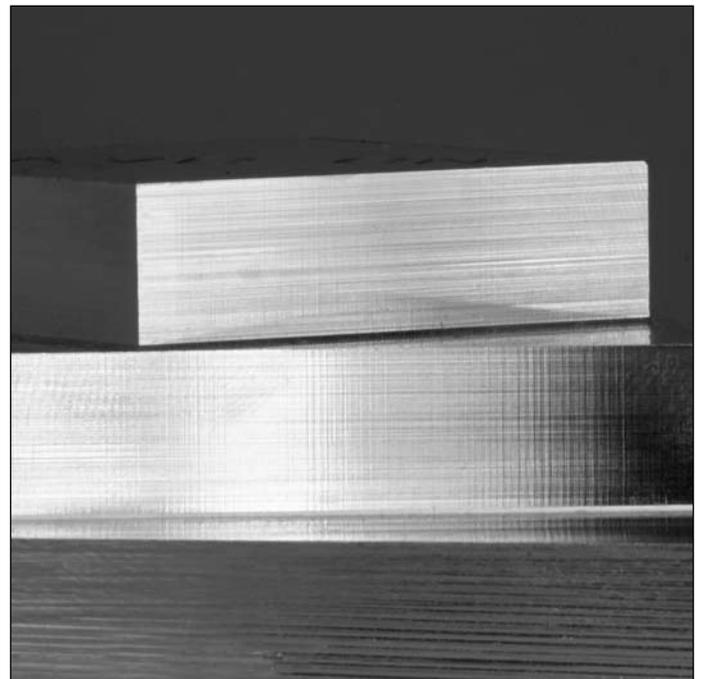


Abbildung 5: Mit AVD wird eine deutlich verbesserte Oberflächenqualität erzielt.

Bedingt durch die Kinematik einer Maschine ergibt sich, je nach Stellung der Achsen im Arbeitsraum, ein variables dynamisches Verhalten, das die Stabilität bzw. die Qualität der Regelung in Abhängigkeit der Achspositionen negativ beeinflussen kann.

Durch Verändern von Achspositionen ändern sich die Massenverhältnisse in einer Maschine (siehe Abbildung). Des Weiteren können sich positionsabhängig auch Steifigkeiten verändern, wie z. B. bei Kugelgewindeantrieben. Die veränderten Massenverhältnisse und Steifigkeiten führen zu einer Verschiebung von Eigenfrequenzen im Antriebsstrang. Dadurch ergibt sich positionsabhängig ein variierendes Regelverhalten.

Als Maß für die Güte der Regelung kann der Schleppfehler dienen. Er ist ein Indikator dafür, wie gut die Regelung einer Sollkontur nachfährt.

Konventionelle Maßnahmen

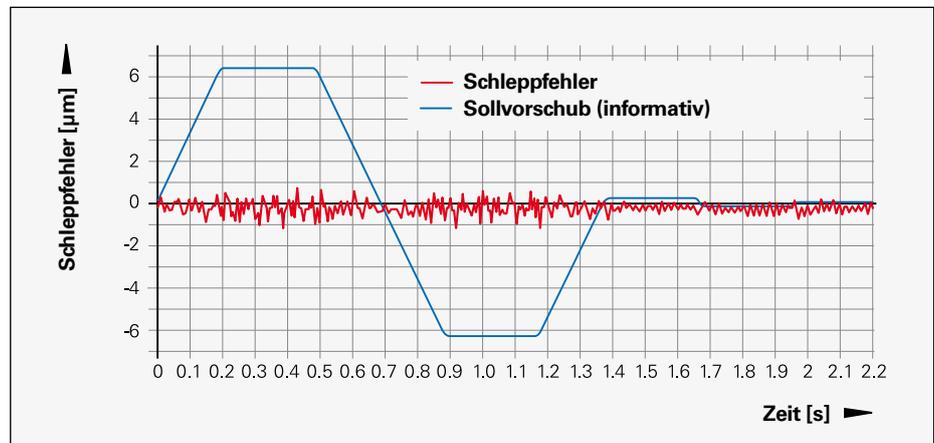
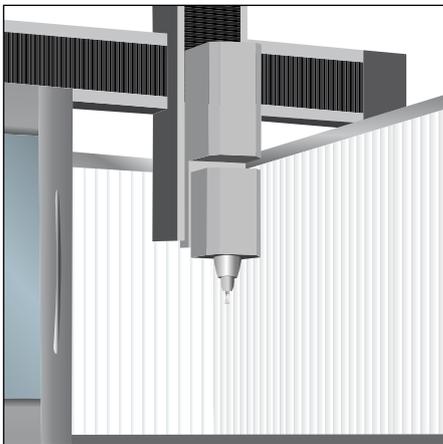
Die Regelkreise der Achsen müssen immer so abgeglichen werden, dass sie an jeder möglichen Position stabil und robust arbeiten. Es ist deshalb immer ein Abgleich auf die schwächste Position notwendig. Häufig befinden sich diese Positionen am Rand des Verfahrbereichs (Randbereich des Bearbeitungsraums, Werkzeugwechsler, Beladeposition des Tisches usw.). Im Zentrum des Bearbeitungsraums, in dem der Großteil der genauigkeitskritischen Bearbeitungen stattfindet, könnte die Reglerdynamik und die daraus resultierende dynamische Genauigkeit deutlich erhöht werden. Durch den Abgleich auf die schwächste Position bleibt Potential zur Verbesserung der dynamischen Genauigkeit ungenutzt.

Vorteile mit PAC

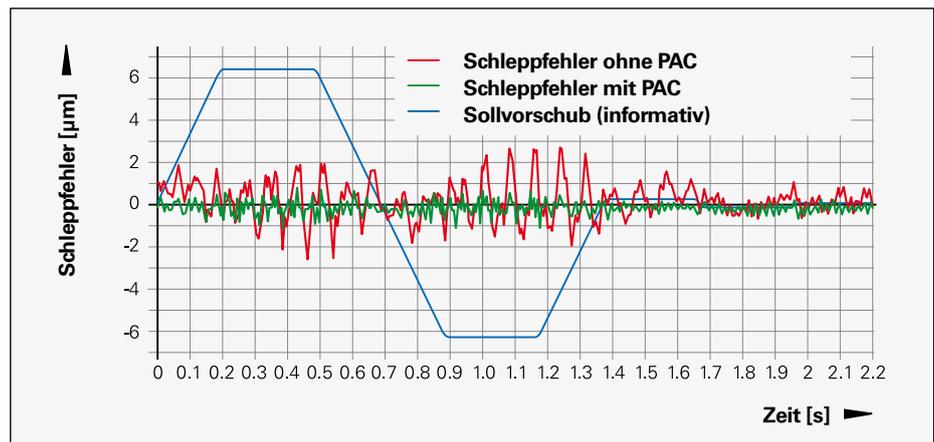
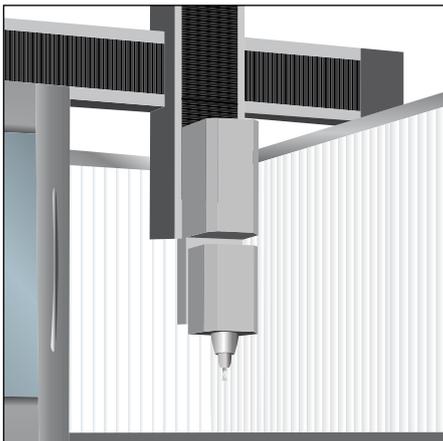
Mit der Option PAC (Position Adaptive Control) von HEIDENHAIN können Maschinenparameter in Abhängigkeit von den Achspositionen verändert werden. Dies erlaubt die volle Ausnutzung der Maschinendynamik.

Durch positionsabhängige Filtereinstellungen und Reglerfaktoren kann die Regelung optimal auf die Maschine eingestellt werden, um an jeder Position im Arbeitsraum das beste Bearbeitungsergebnis zu erzielen. Dazu kann die dynamische Genauigkeit an den Positionen erhöht werden, die für den Großteil der Bearbeitungen relevant ist.

Je höher die Reglerfaktoren gewählt werden können, desto besser können Störungen (z. B. Getriebefehler, Momentenwelligkeit des Motors, ...) unterdrückt werden und umso geringer wird der Schleppfehler. Das bedeutet wiederum eine bessere Konturtreue.



Regelung optimiert für Z = 0, Schleppfehler innerhalb des Toleranzbandes ($\pm 1 \mu\text{m}$)



Regelung bei Z = -500

- ohne PAC: mit deutlich erkennbaren Schwingungen und Schleppfehler außerhalb des Toleranzbandes ($\pm 3 \mu\text{m}$)
- mit aktiver PAC: Schleppfehler innerhalb des Toleranzbandes ($\pm 1 \mu\text{m}$)

Bei Maschinen mit bewegten Maschinentischen kann deren dynamisches Verhalten in Abhängigkeit der Masse (Linearachse) bzw. Massenträgheit (Rundachse) des aufgespannten Werkstücks variieren. Die Werte für die Reibungs- und Beschleunigungsvorsteuerung einer Achse gelten nur für die Masse bzw. für die Massenträgheit, die während des Abgleichvorgangs vorhanden war. Bei einer anderen Beladung passen die Vorsteuerwerte nicht mehr zur tatsächlichen Situation. Dies äußert sich in einem vergrößerten Schleppfehler während der Beschleunigungsphasen. Dadurch kann es hier zu Konturabweichungen kommen.

Konventionelle Maßnahmen

Für unterschiedliche Beladungssituationen können Maschinenhersteller Parametersätze vorbereitet, die über einen Zyklusaufbau aktiviert werden können. Dadurch reduzieren sich zwar die Schleppfehler, abhängig von den Beladungsstufen bleiben aber immer noch Restfehler übrig.

Typisch sind z. B. zwei Parametersätze für die Beladungsstufen 0 bis 150 kg (Abgleich mit 75 kg) und 150 kg bis 500 kg (Abgleich

mit 325 kg). Im ungünstigsten Fall weicht hier die tatsächliche Masse von der abgegleichen Beladungssituation um bis zu 175 kg ab.

Kritischer ist die Situation bei einem Rundtisch. Hier ist für die Parametrierung der Vorsteuerung die Trägheit und nicht die Masse relevant. Durch ungünstige Aufspannung kann sich bei gleicher Masse das Massenträgheitsmoment problemlos vervielfachen.

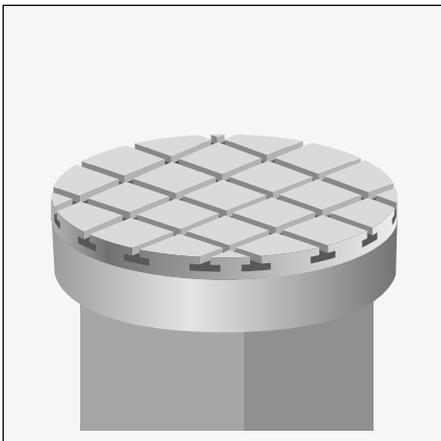
Kompensation durch LAC

Mit der Option LAC (Load Adaptive Control) von HEIDENHAIN ist die Steuerung in der Lage, die aktuelle Masse bei Linearachsen bzw. Massenträgheit bei Rundachsen sowie die aktuellen Reibkräfte automatisch zu ermitteln. Um das geänderte Regelverhalten bei unterschiedlicher Beladung zu optimieren, können adaptive Vorsteuerungen bezüglich der Beschleunigung, des Haltemoments, der Haftreibung und der Reibung bei hoher Drehzahl aufgeschaltet werden. Die Steuerung ist auch während der Bearbeitung des Werkstücks in der Lage, die Parameter der adaptiven Vorsteuerung kontinuierlich an die aktuelle Masse bzw. Massenträgheit des Werkstücks anzupassen. Die Adaptionsgeschwindigkeit wird mittels Parameter vorgegeben. Da der Maschinenbediener den Beladungszustand nicht selbst bestimmen muss, sind Bedienungsfehler ausgeschlossen.

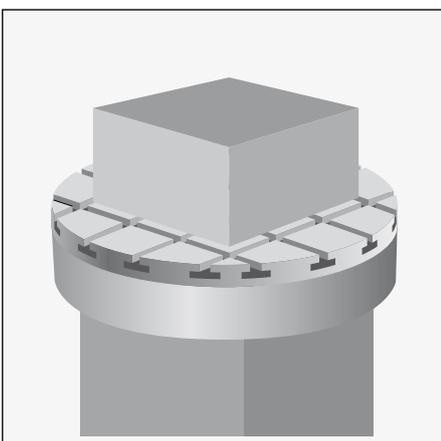
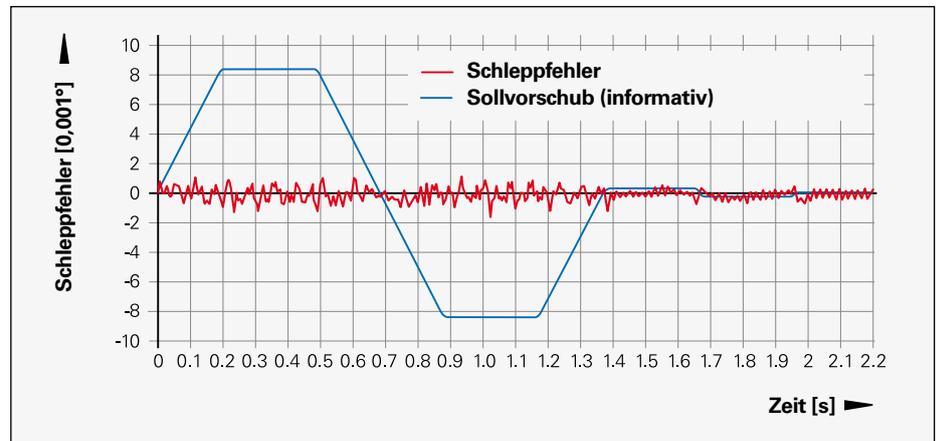
erung kontinuierlich an die aktuelle Masse bzw. Massenträgheit des Werkstücks anzupassen. Die Adaptionsgeschwindigkeit wird mittels Parameter vorgegeben. Da der Maschinenbediener den Beladungszustand nicht selbst bestimmen muss, sind Bedienungsfehler ausgeschlossen.

Weitere Vorteile von LAC

Durch Alterung von Maschinenkomponenten wie z. B. Führungen oder Kugelgewindetriebe können sich die Reibkräfte über die Lebensdauer einer Werkzeugmaschine stark verändern. Somit ist die im Auslieferungszustand optimal eingestellte Vorsteuerung nach einigen Jahren nicht mehr gültig. Mit der Option LAC wird permanent ein optimaler Abgleich der Achse erreicht. Aber auch sich schnell ändernde Reibverhältnisse, die sich zum Beispiel bei Gleitführungen aus Schmierimpulsen ergeben, können durch LAC optimal kompensiert werden.

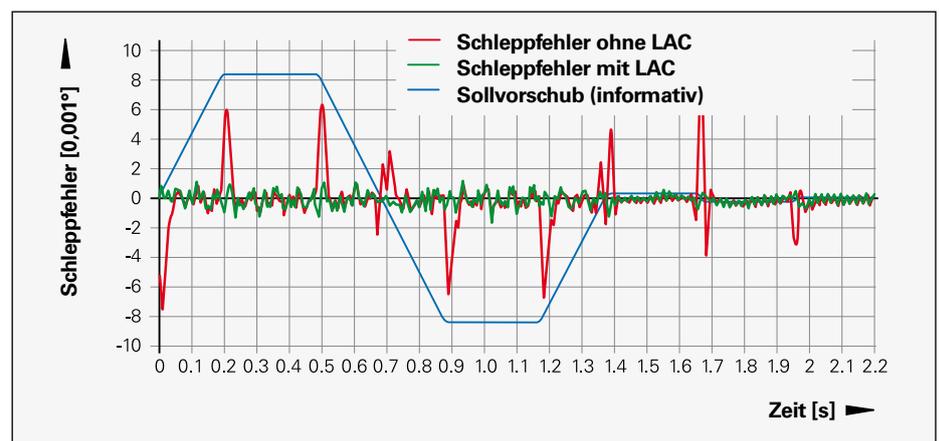


Optimale Vorsteuerung für Rundtisch ohne Zuladung mit Schleppfehler innerhalb des Toleranzbandes ($\pm 0,001^\circ$)



Zuladung verändert

- ohne LAC: bei unveränderter Vorsteuerung ist Schleppfehler außerhalb des Toleranzbandes ($\pm 0,008^\circ$)
- mit LAC: bei Vorsteuerung mit aktiver LAC ist Schleppfehler innerhalb des Toleranzbandes ($\pm 0,001^\circ$)



MAC

Bewegungsabhängige Anpassung von Regelparametern

Das Maschinenverhalten kann sich nicht nur abhängig von der Stellung der Achsen im Arbeitsraum sondern auch abhängig von der Geschwindigkeit ändern. Dies ist unter anderem auf den Einfluss der Geschwindigkeit auf die Reibung in Führungen zurückzuführen. Veränderte Reibverhältnisse können sich auf das Schwingungsverhalten einer Werkzeugmaschine auswirken. Eine optimale Reglereinstellung, die typischerweise für den Stillstand durchgeführt wird, kann im Eilgang zu einer starken Schwingung führen.

Darüber hinaus lässt sich mit MAC die Vorspannung für einen Zahnstangenantrieb mit zwei unabhängigen Vorschubmotoren bequem geschwindigkeitsabhängig verändern.

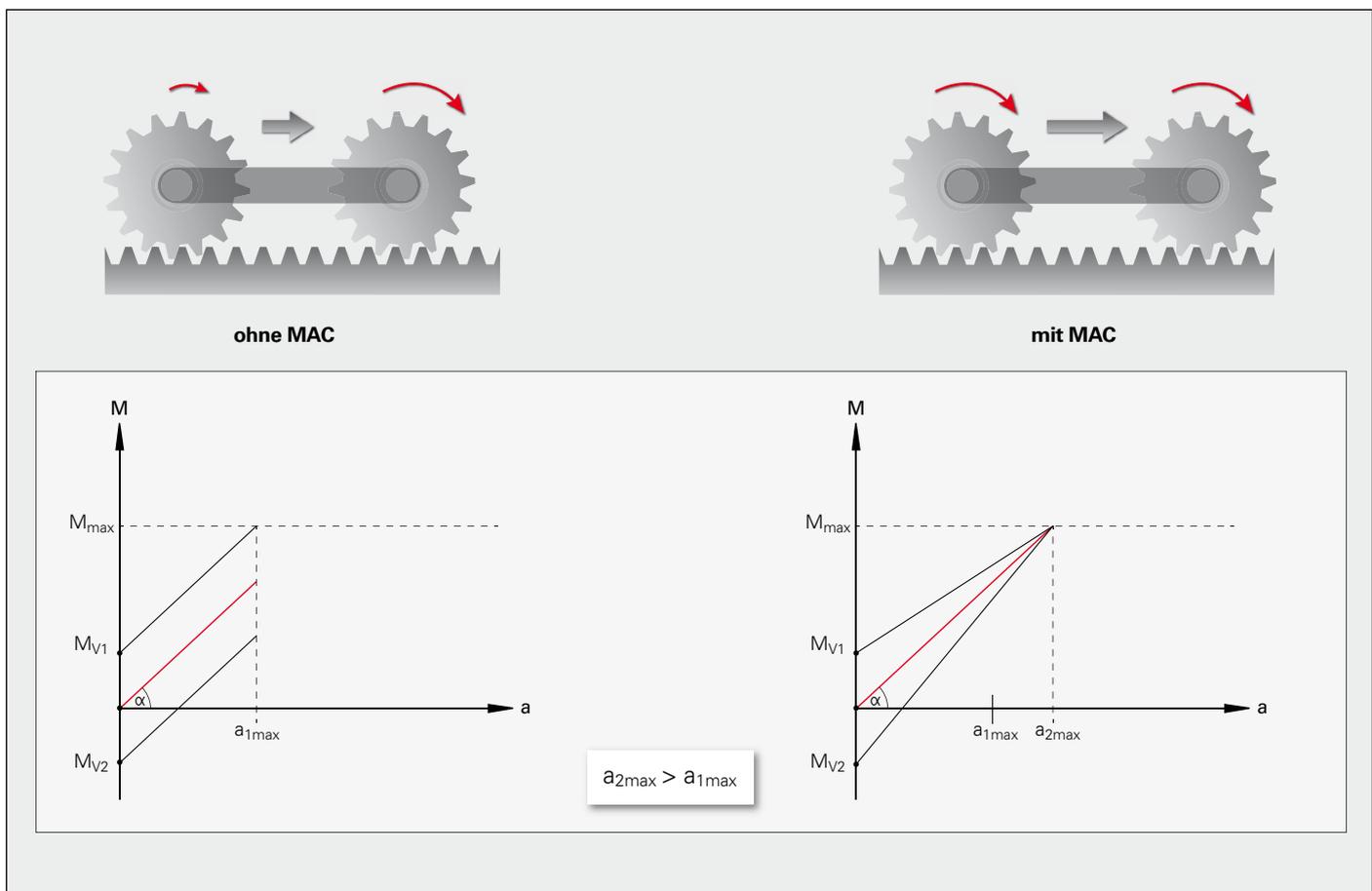
Vorteile mit MAC

Beispiel 1

Die Option MAC (Motion Adaptive Control) bietet die Möglichkeit, Maschinenparameter in Abhängigkeit von anderen Eingangsgrößen wie Geschwindigkeit, Schleppfehler oder Beschleunigung eines Antriebs zu ändern. Durch diese bewegungsabhängige Anpassung der Regelparameter kann bei Antrieben, deren Stabilität sich durch die unterschiedlichen Verfahrensgeschwindigkeiten ändert, z. B. eine geschwindigkeitsabhängige Anpassung des kV-Faktors realisiert werden. Dadurch kann für jede Bearbeitungssituation die optimale Reglereinstellung verwendet werden. Dies ermöglicht eine optimale Störunterdrückung und verbessert das dynamische Verhalten der Maschine.

Beispiel 2

Ein weiterer Anwendungsfall ist die beschleunigungsabhängige Änderung des Verspannmoments zwischen Master- und Slave-Achse bei der Momenten-Master-Slave-Regelung. Mit der Option MAC kann bei dieser Anordnung, z. B. durch eine mit zunehmender Beschleunigung parametrisierte Reduzierung des Verspannmoments, eine deutlich höhere Maximalbeschleunigung bei Eilgangbewegungen erreicht werden. Durch eine Reduzierung des Verspannmoments im Stillstand wird des Weiteren der Wärmeeintrag in die Maschine deutlich vermindert und somit auch temperaturbedingte Verformungen bzw. Verschiebungen reduziert.



Dynamic Precision

Funktionen ergänzen sich optimal

Die unter Dynamic Precision zusammengefassten Funktionen ergänzen sich gegenseitig optimal. Eine einfache Beispielkontur – sie ist in den Grafiken jeweils schwarz dargestellt – zeigt dies für CTC und AVD. Die Abweichungen am TCP wurden mit einem Kreuzgittermessgerät bei einer Vorschubgeschwindigkeit von 10000 m/s aufgezeichnet. In der Grafik sind die Abweichungen von der Kontur um den Faktor 500 verstärkt dargestellt.

In Abbildung 1 sind die Abweichungen von der Sollkontur als rote Linie eingezeichnet. Gerade in den Beschleunigungsphasen an den Ecken weisen sie aufgrund der hohen Geschwindigkeit recht hohe Werte auf.

Mit Dynamic Precision, hier durch Zuschalten der Optionen CTC und AVD, werden diese Abweichungen kompensiert (grüne Linie). Die Bearbeitung erfolgt bei gleich hohem Vorschub wesentlich konturtreuer. Aufgrund der reduzierten Abweichungen kann der Ruck erhöht werden, um ein dynamischeres Verhalten der Maschine zu erreichen.

Hohe Rucke regen die Maschine stärker an. Die dadurch entstehenden Schwingungen können sich am Werkstück als Schattierungen zeigen. Diese stärkeren Schwingungen werden wiederum durch die Option AVD verringert.

Abbildung 2 vergleicht den Ausgangszustand (rote Linie: ohne Dynamic Precision bei 100% Ruck) mit der Bearbeitung mit Dynamic Precision und 200% Ruck (grüne Linie). Hier wird deutlich, dass durch Dynamic Precision bei hoher Dynamik eine immer noch um Faktor 2 bessere mittlere Abweichung erreicht wird. Durch die Verdoppelung des Rucks konnte des Weiteren die Bahnzeit bei dieser Kontur um 12% reduziert werden.

	Mittlere Abweichung	Zeit
CTC aus AVD aus R100%	2,6 µm	1,04 s
CTC ein AVD ein R100%	0,4 µm	1,04 s
CTC ein AVD ein R200%	0,6 µm	0,91 s

Fazit

Mit Dynamic Precision bearbeiten Sie deutlich genauer oder – wenn der Ruck erhöht wird – genauer und schneller.

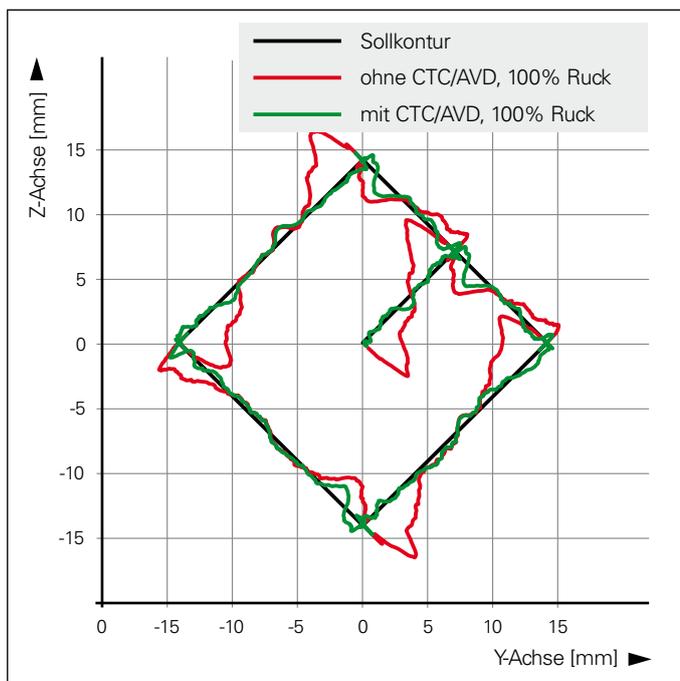


Abbildung 1: Abweichungen ohne und mit Dynamic Precision bei 100% Ruck

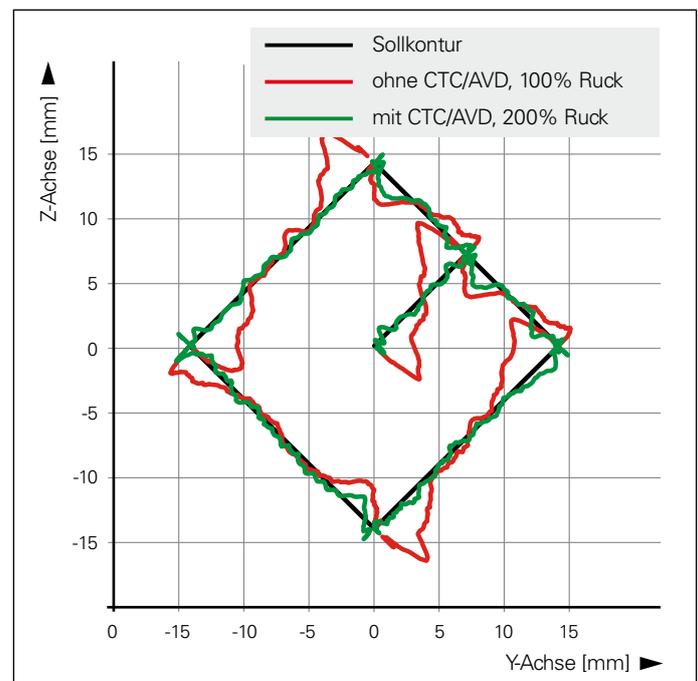


Abbildung 2: Abweichungen ohne Dynamic Precision bei 100% Ruck und mit Dynamic Precision bei 200% Ruck

HEIDENHAIN-Steuerungen

Steuerungen für Fräs-, Fräs-Dreh- und Bohrmaschinen sowie Bearbeitungszentren

Die TNC-Steuerungen von HEIDENHAIN bilden eine durchgängige Linie: Von der einfachen, kompakten 3-Achs-Streckensteuerung TNC 128 bis hin zur Bahnsteuerung iTNC 530 (bis 18 Achsen plus Spindel) lässt sich nahezu jeder Anwendungsfall abdecken. Mit der TNC 640 steht auch eine Steuerung für die Fräs-Dreh-Bearbeitung zur Verfügung.

Die HEIDENHAIN-TNCs sind vielseitig: werkstattgerecht in der Bedienung, aber auch extern programmierbar und somit für die automatisierte Fertigung geeignet. Einfache Fräsbearbeitungen bewältigen sie ebenso zuverlässig wie z. B. TNC 640 und iTNC 530 das Hochgeschwindigkeitsfräsen – mit besonders ruckgeglätteter Bewegungsführung – oder die 5-Achs-Bearbeitung mit Schwenkkopf und Rundtisch.

Innovative Steuerungsfunktionen zur hochgenauen und effizienten Bearbeitung fasst HEIDENHAIN unter den Oberbegriffen **Dynamic Efficiency** und **Dynamic Precision** zusammen.

Dynamic Efficiency unterstützt den Anwender, die Schruppbearbeitung effizienter, aber auch prozesssicherer zu gestalten.

Dynamic Efficiency ist auf den Steuerungen TNC 640 und iTNC 530 verfügbar.

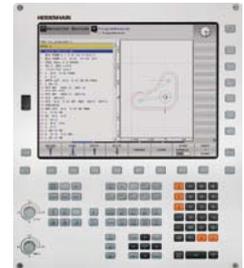
Dynamic Precision ermöglicht genauere Werkstücke mit sauberen Oberflächen bei schneller Bearbeitung, also hohe Präzision bei hoher Produktivität. Die Software-Optionen von **Dynamic Precision** können Sie mit TNC 640, iTNC 530 und TNC 620 nutzen.



TNC 640



iTNC 530



TNC 620

	TNC 640	iTNC530	TNC 620
Dynamic Precision	x	x	x
CTC – Kompensation von Positionsabweichungen durch Nachgiebigkeiten	Option	Option	Option
AVD – Aktive Schwingungsdämpfung	Option	Option	Option
PAC – Positionsabhängige Anpassung von Regelparametern	Option	Option	Option
LAC – Lastabhängige Anpassung von Regelparametern	Option	Option	Option
MAC – Bewegungsabhängige Anpassung von Regelparametern	Option	Option	Option
Dynamic Efficiency	x	x	–
ACC – Aktive Ratterunterdrückung	Option	Option	Option
AFC – Adaptive Vorschubregelung	Option	Option	–
Wirbelfräsen	•	•	•

x Funktionen möglich
• Standardfunktion

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 *TNC 640*
- Katalog *iTNC 530*
- Katalog *TNC 620*
- Technische Information *Dynamic Efficiency*

