



Technische Information

Einfluss der Positionserfassung auf die Genauigkeit in der 5-Achs-Bearbeitung

Produktivität und Genauigkeit sind entscheidende Merkmale im Wettbewerb bei Werkzeugmaschinen. Die 5-achsige Bearbeitung bietet erhebliche Potentiale zur Steigerung der Produktivität. Im Vergleich zu einer 3-achsigen Bearbeitung lassen sich in vielen Fällen höhere Zeitspanvolumina erreichen. Fertigungszeiten können durch die Möglichkeit zur Reduktion von Umspannvorgängen bis hin zur Komplettbearbeitung in einer Aufspannung erheblich verkürzt werden. Mit zunehmender Komplexität der Geometrie von Werkstücken wird die 5-Achs-Bearbeitung ohnehin zum unersetzlichen Bestandteil eines Fertigungsprozesses.

Da für eine 5-achsige Bearbeitung meist deutlich größere Verfahrbereiche der Linearachsen erforderlich sind, werden Maschinen mit einer hohen Genauigkeit im gesamten Arbeitsraum benötigt. Zudem können die beiden Rundachsen einer 5-achsigen Werkzeugmaschine die erreichbare Werkstückgenauigkeit entscheidend beeinflussen. Für eine Änderung der Orientierung des Fräasers zur Werkstückoberfläche müssen neben den Rundachsen in den meisten Fällen auch die Linearachsen bewegt werden. Dadurch können sich Fehler im Verfahrbereich von bis zu fünf Achsen innerhalb eines kleinen Bereiches auf der Werkstückoberfläche bemerkbar machen. Genauigkeitsbegrenzende Effekte in den Antrieben, wie Steigungs- und Getriebefehler, Umkehrspiel oder thermisch bedingte Verlagerungen können somit in der 5-achsigen Bearbeitung deutlich schneller zur Produktion von Ausschussteilen führen. Die Positioniergenauigkeit der Linear- und Rundachsen spielt hier eine entscheidende Rolle für die Performance einer 5-achsigen Werkzeugmaschine.

Die 5-Achs-Bearbeitung ist aus vielen Bereichen der spanenden Bearbeitung nicht mehr wegzudenken. Klare wirtschaftliche Vorteile ergeben sich durch die Möglichkeit, Bauteile in einer Aufspannung fertig zu bearbeiten: Die Durchlaufzeiten eines Bauteils lassen sich deutlich reduzieren. Gleichzeitig kann die Genauigkeit eines Bauteils erheblich gesteigert werden.

Darüber hinaus erlauben die zusätzlichen Rundachsen einen leichteren Zugang zu komplexen Werkstückkonturen, wie z.B. Kavitäten in Formen. Vielfach lassen sich auch kürzere Werkzeuge mit geringerer Neigung zum Rattern einsetzen, so dass auch höhere Zeitspanvolumina erreichbar sind.

Mit der 5-Achs-Simultanbearbeitung können zudem die Schnittgeschwindigkeiten an der Schneide auch bei komplexen Konturen innerhalb enger Grenzen gehalten werden. Dadurch entstehen deutliche Vorteile in Bezug auf die erreichbare Oberflächengüte. Außerdem wird der Einsatz von hochproduktiven Werkzeugen (z.B. Torusfräsern) beim Fräsen von Freiformkonturen durch die 5-Achs-Simultanbearbeitung überhaupt erst möglich.



Anwendungsfelder der 5-Achs-Bearbeitung

Bauteile der Luft- und Raumfahrt

Hohe Festigkeiten und ein geringes Gewicht sind für Bauteile der Luft- und Raumfahrtindustrie zwingend notwendig. Zur Minimierung des Gewichts von „fliegenden“ Bauteilen hat sich die Integralbauweise durchgesetzt: Bauteile mit komplexer Struktur werden vollständig aus einem Rohling herausgearbeitet. Dabei wird ein hoher Zerspanungsgrad von bis zu 95 % erreicht. Diese hohe „Buy-to-Fly-Rate“ führt zu erheblichen Kosten für das Rohmaterial der Bauteile.

Im Bereich der Strukturbauteile ermöglicht die 5-Achs-Bearbeitung neue Möglichkeiten zur Gewichtsreduktion ohne Einbußen in der Bauteilfestigkeit. Dazu wird zunächst eine rechnergestützte Topologie-Optimierung durchgeführt, welche die Geometrie eines Bauteils auf die jeweiligen Belastungsfälle anpasst. Die Konsequenz: Das Material wird im Bauteil besonders dort eingebracht, wo hohe mechanische Beanspruchungen entstehen können. In den restlichen Bereichen wird gezielt Material eingespart. Zum Beispiel kann die Dicke von versteifenden Stegen auf einfache Art an die Verteilung der Belastung im Bauteil angepasst werden. Die Stegdicke kann zum Beispiel mit zunehmender Höhe abnehmen. Diese Werkstückgeometrie lässt sich auf einfache Art über das 5-achsige Tischenfräsen realisieren.



Für Bauteile von Strahltriebwerken ist die 5-Achs-Bearbeitung längst ein Standard. Hohe Effizianz Anforderungen zwingen zu einer stetigen Verbesserung der Strömungseigenschaften aller Komponenten eines Triebwerks. Die entstehenden Bauteilgeometrien sind sehr komplex und daher ausschließlich über 5-achsig simultane Fräsbewegungen zu fertigen.

5-Achs-Bearbeitung im Automobilbau

Im Automobilbau werden zahlreiche Formwerkzeuge für die Blech- und Kunststoffverarbeitung benötigt. Die bis zu 6 m langen Werkzeuge für die Blechumformung müssen mit sehr hoher Genauigkeit von $\pm 0,02$ mm gefräst werden, damit Ober- und Unterwerkzeug mit korrektem Spaltmaß zusammenarbeiten können. Zudem ist eine sehr hohe Oberflächengüte aller Funktionsflächen erforderlich, um eine lange Standzeit der Umformwerkzeuge zu gewährleisten.



Beim Fertigen der Werkzeugkontur muss ein sehr kleiner Abstand der Fräsbahnen eingehalten werden, um den Anforderungen an die hohe Oberflächengüte gerecht zu werden. Damit ergeben sich automatisch lange Durchlaufzeiten der NC Programme. Die geforderte Genauigkeit der Umformwerkzeuge stellt die Fräsmaschinen vor eine große Herausforderung: Hohe Genauigkeit bei langen Programmlaufzeiten und großen Bauteilen erfordern eine hohe thermische Stabilität der Maschinenstruktur und der Vorschubantriebe.

Die 5-Achs-Bearbeitung eröffnet neue Perspektiven zur Verkürzung der Bearbeitungszeit, da auch stark gekrümmte Konturen der Umformwerkzeuge besser zugänglich werden. Darüber hinaus können Spezialwerkzeuge, wie zum Beispiel Torus- oder Radiusfräser, eingesetzt werden, welche deutlich größere Bahnabstände und damit kürzere Programmlaufzeiten ermöglichen.

5-Achs-Bearbeitung im Bereich der Medizintechnik

Im medizintechnischen Bereich entsteht ein hoher Bedarf an Geräten, die speziellen Untersuchungen oder Therapien angepasst sind. Auf diese Weise können Behandlungen deutlich präziser und mit weniger Nachwirkungen für den Patienten durchgeführt werden. Die Geräte weisen oft eine sehr komplexe Geometrie auf, so dass sich eine 5-achsige Bearbeitung der Einzelteile auf Fräsmaschinen anbietet.

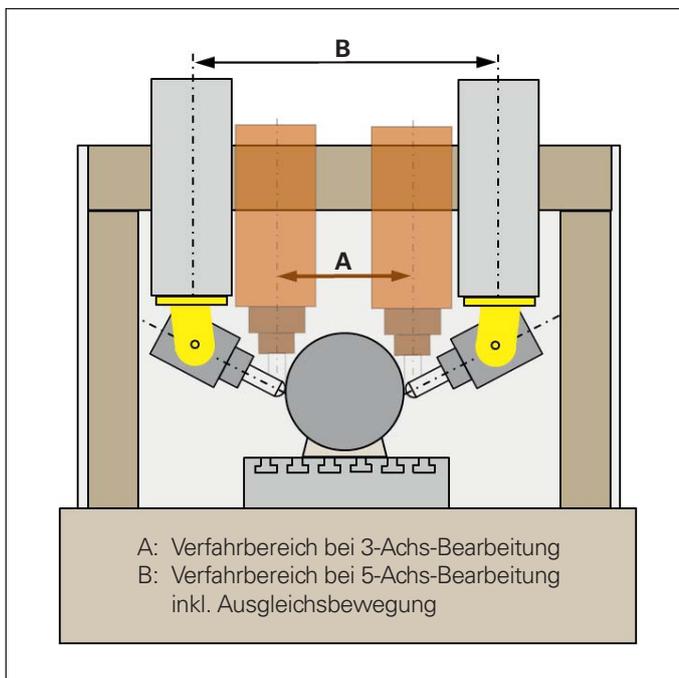
Mit der steigenden Lebenserwartung zeichnet sich auch ein höherer Bedarf an Zahn- und Gelenkimplantaten ab. Schon heute bietet der Ersatz von Hüft- oder Kniegelenken für viele Menschen die Chance auf eine deutlich höhere Lebensqualität. Sowohl Zahn- als auch Gelenkimplantate müssen sich bezüglich Ihrer äußeren Form perfekt an die Gegebenheiten des menschlichen Körpers anpassen. Die Fertigung der Implantate erfolgt meist auf Fräsmaschinen, da das Fräsen eine wirtschaftliche Fertigung auch bei kleinen Losgrößen ermöglicht. Aufgrund der komplexen Formgebung der Implantate gehört die Medizintechnik zu den großen Anwendungsfeldern der 5-Achs-Bearbeitung. Für eine wirtschaftliche Fertigung der anspruchsvollen Bauteile werden Maschinen mit hochgenauer Positionserfassung für genaue und präzise Vorschubbewegungen vorausgesetzt.



Anforderungen an die Positionserfassung

Beim 3-achsigen Fräsen bewegen sich die Vorschubachsen innerhalb der Abmessungen des Werkstücks zuzüglich des Werkzeugdurchmessers. Im Unterschied zur 3-achsigen Bearbeitung kann die Anstellung des Fräasers zur Werkstückoberfläche bei der 5-achsigen Bearbeitung eingestellt werden. Bei unveränderter Position des Werkzeugmittelpunkts (TCP) erfordert eine Änderung der Fräserorientierung meist zusätzliche Bewegungen der Linearachsen. Diese Ausgleichsbewegungen vergrößern zwangsläufig den benötigten Verfahrbereich der Linearachsen. Da mit zunehmendem Verfahrbereich auch größere Positionierfehler auftreten können, müssen Vorschubachsen 5-achsiger Maschinen eine deutlich höhere Genauigkeit und Reproduzierbarkeit aufweisen.

Die Ausgleichsbewegungen der Linearachsen überlagern sich mit den vom NC-Programm vorgegebenen Bewegungen des Werkzeugmittelpunktes in X, Y und Z. Durch diese Überlagerung können die Achsvorschübe den für den Werkzeugmittelpunkt programmierten Vorschub deutlich überschreiten. Der Anstieg der Vorschubgeschwindigkeit führt zur erhöhten Wärmeentwicklung in den Motoren, Getrieben und Kugelgewindetrieben. Abhängig von der Positionserfassung können durch die Wärmeentwicklung erhebliche Positionsfehler entstehen. Um fehlerhafte Werkstücke zu vermeiden, ist eine präzise Positionserfassung in den Vorschubachsen direkt an den bewegten Maschinenkomponenten unumgänglich.



Positionserfassung an Linearachsen

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

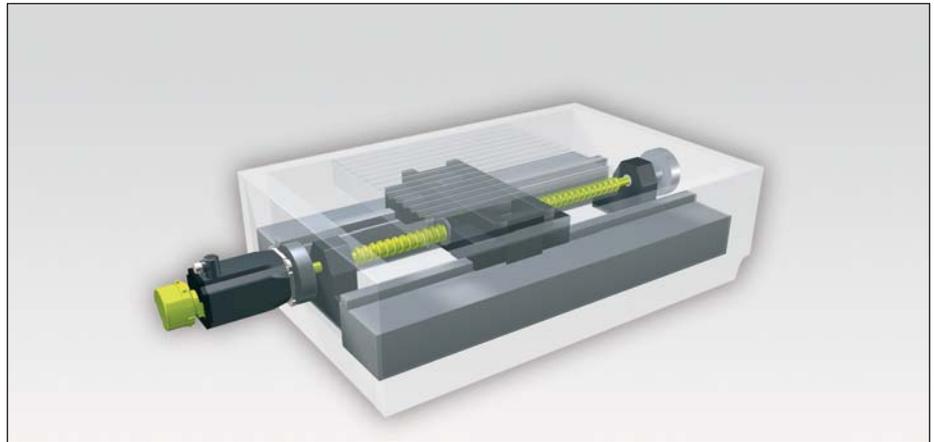
Wird ein Längenmessgerät zur Erfassung der Schlittenposition verwendet (Abbildung Mitte), so umfasst die Positionsregelschleife die komplette Vorschubmechanik. Man spricht von einem Betrieb im **Closed Loop**. Spiel und Ungenauigkeiten in den Übertragungselementen der Maschine haben keinen Einfluss auf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

Unterschiedliche Einsatzbedingungen sowie wechselnde Vorschubgeschwindigkeiten und -kräfte führen zu ständigen Änderungen des thermischen Zustands von Kugelgewindespindeln. Es entstehen lokale Temperaturüberhöhungen auf einer Kugelgewindespindel, welche sich mit jeder Veränderung der Position verlagern und die Genauigkeit im Semi-Closed Loop entscheidend verringern.

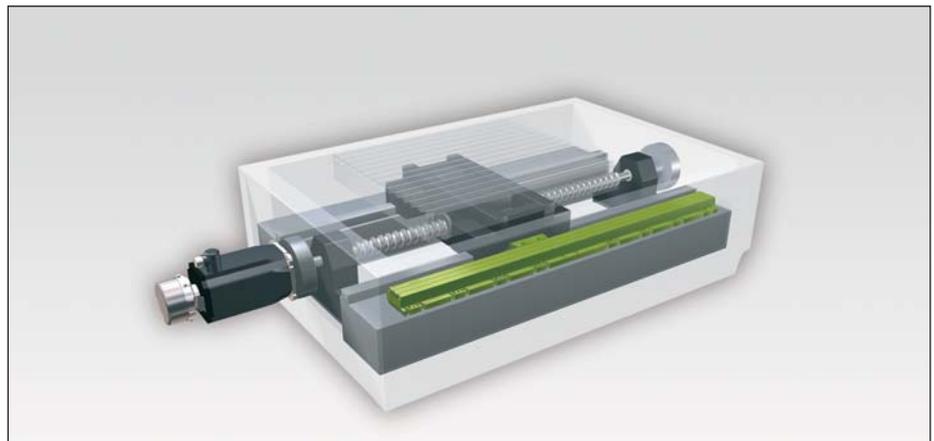
Hohe Reproduzierbarkeiten und Genauigkeiten über den gesamten Verfahrbereich von Linearachsen können daher ausschließlich durch den Betrieb im Closed Loop erreicht werden. Präzise Werkstücke und eine drastisch reduzierte Ausschussrate sind die Folge.

Lineare Vorschubachsen können alternativ zu einem Kugelgewindetrieb über einen Linearmotor direkt angetrieben werden. In diesem Fall wird die Position der Maschinenachse über ein Längenmessgerät ebenfalls direkt am Achsschlitten erfasst. Linearmotoren sind für einen hochdynamischen

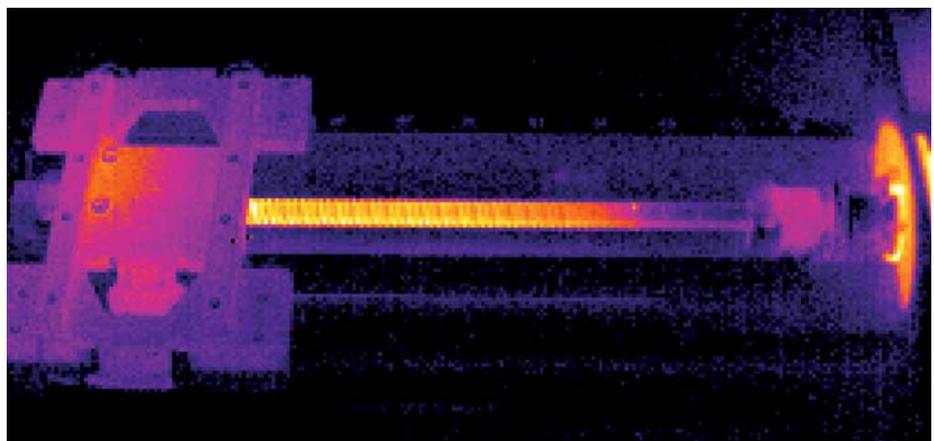
und gleichzeitig geräuscharmen Betrieb ohnehin auf hochauflösende und genaue Längenmessgeräte angewiesen. Für diese Antriebsart gelten die Vorteile eines Closed Loop Betriebs somit uneingeschränkt.



Semi-Closed Loop: Positionserfassung der Linearachse über Drehgeber im Vorschubmotor



Closed Loop: Positionserfassung der Linearachse über ein Längenmessgerät



Thermographieaufnahme eines erwärmten Kugelgewindetriebs

Positionserfassung an Rundachsen

Die grundlegende Betrachtung für Linearachsen gilt gleichermaßen für Rundachsen. Auch hier lässt sich die Position über einen Drehgeber am Motor oder über ein hochgenaues Winkelmessgerät an der Maschinenachse erfassen.

Wird die Achsposition über einen **Drehgeber** am Vorschubmotor erfasst, so spricht man ebenfalls vom **Semi-Closed Loop**, da die Übertragungsfehler der Getriebemechanismen nicht über den geschlossenen Positionsregelkreis kompensiert werden.

Übertragungsfehler von Getrieben in Rundachsen werden durch

- Exzentrizitäten der Zahnräder,
- Spiel oder
- Reibung und elastische Verformungen in den Zahnkontakten und in den Lagern der Getriebewellen

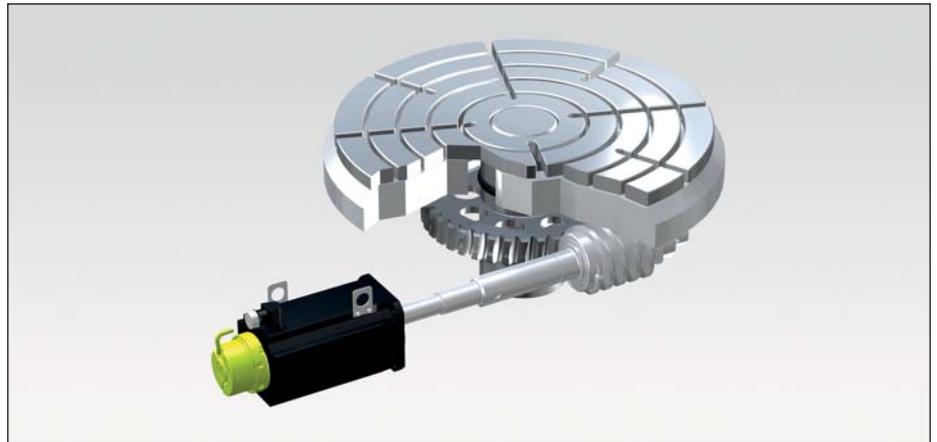
hervorgerufen. Darüber hinaus entsteht in den meist vorgespannten Getrieben erhebliche Reibung, die zur Erwärmung der Rundachsen und dadurch – abhängig von der mechanischen Ausführung – auch zu Positionierfehlern führen kann.

Die Übertragungsfehler der Getriebe von Rundachsen führen im Semi-Closed Loop zu erheblichen Positionierfehlern und zu einer deutlich reduzierten Wiederholgenauigkeit. Die Fehler der Rundachsen übertragen sich auf die Geometrie der zu fertigenden Werkstücke, so dass die Anzahl der Ausschussteile deutlich zunehmen kann.

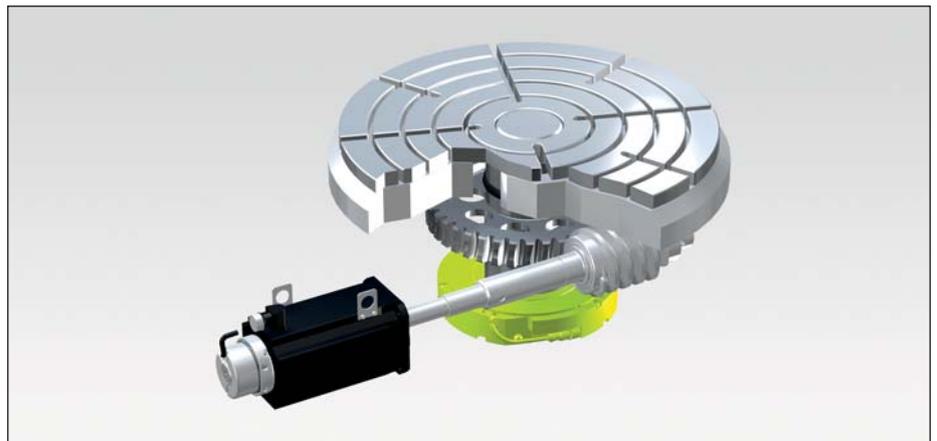
Positionier- und Wiederholgenauigkeit von Rundachsen lassen sich durch den Einsatz von präzisen **Winkelmessgeräten** erheblich steigern. Da die Achspositionen dann nicht mehr am Motor sondern direkt an den Rundachsen der Maschine gemessen werden, spricht man auch vom **Closed Loop** Betrieb. Übertragungsfehler der Getriebe von Rundachsen haben hier keinen Einfluss auf die Positioniergenauigkeit. Die Genauigkeit, mit der eine Rundachse eine bestimmte Achsposition über einen längeren Zeitraum wiederholt anfahren kann, wird ebenfalls erheblich gesteigert. Eine wirtschaftliche Fertigung bei minimalem Ausschuss ist die Konsequenz.

Eine Sonderstellung nehmen die Rundachsen ein, die über einen **Torque-Motor** direkt angetrieben werden. Die spezielle Bauweise von Torque-Motoren ermöglicht sehr hohe Drehmomente ohne zusätzliches mechanisches Getriebe. Rundachsen mit

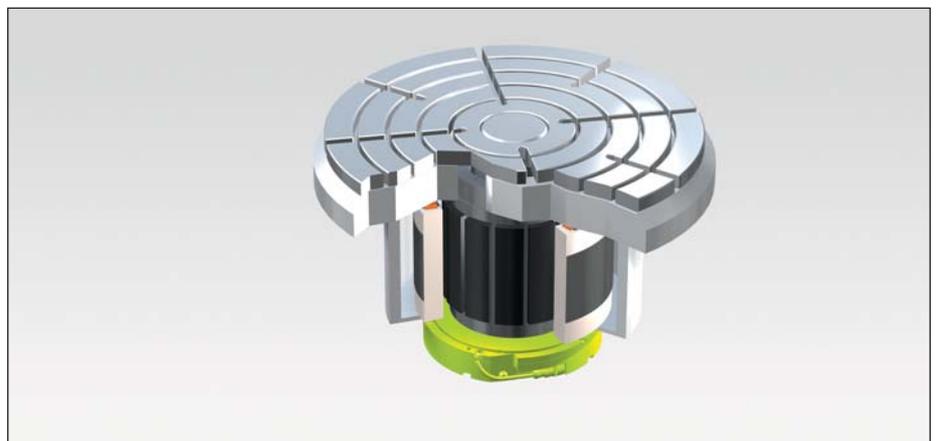
Torque-Motoren benötigen ein hochauflösendes Winkelmessgerät direkt an der Maschinenachse. Sie werden deshalb generell im **Closed Loop** betrieben.



Semi-Closed Loop: Positionsbestimmung über Drehgeber am Vorschubmotor, Fehler in der Antriebsmechanik werden nicht erkannt.



Closed Loop: Positionserfassung über ein Winkelmessgerät an der Maschinenachse, Fehler der Antriebsmechanik werden kompensiert.



Torque-Motor: Rundachsen mit Torque-Motor werden im Closed Loop betrieben.

Bearbeitungsbeispiele

5-Achs-Simultanbearbeitung mit höchster Präzision

Telstar-Fußball

Der Fußball der FIFA WM von 1970 und 1974 wurde nach dem ersten zivilen Kommunikationssatelliten Telstar benannt, welcher 1963 von der Nasa und AT&T ins All geschossen wurde. Der Telstar-Ball verfügt über 20 weiße hexagonale und 12 schwarze pentagonale Formstücke, die miteinander vernäht wurden.

Dieser Ball dient als Vorlage für ein Werkstück, welches auf einer 5-achsigen Werkzeugmaschine gefräst werden kann. Das entstandene Werkstück findet als Testwerkstück zum Nachweis der Bearbeitungsgenauigkeit beim 5-achsigen Fräsen Verwendung.

Das Telstar-Werkstück wurde in drei Bearbeitungsschritten auf der Basis vorgefertigter Rohlinge hergestellt:

- 3-achsige Fräsbearbeitung der Fünfecke mit vertikalen Bahnen und angestelltem Fräser,
- 3-achsige Fräsbearbeitung der Sechsecke mit horizontalen Bahnen und angestelltem Fräser,
- 5-achsige Fräsbearbeitung der Nähte

Ein optisch einwandfreies Erscheinungsbild des Telstar-Werkstücks setzt voraus, dass die „Nähte“ zwischen Fünfecken und Sechsecken trotz einer Dauer der Bearbeitung von über zwei Stunden mit gleichbleibend hoher Präzision gefräst werden.



5-Achs-Fertigung des WM-Balls „Telstar“ von 1970 und 1974

Bearbeitungsreihenfolge der 5-Achs-Bearbeitung am Telstar-Werkstücks



Fünfecke fräsen: 3-achsig angestellt

Gleichlaufräsen
Bearbeitungszeit: 22 min
Vorschub: 6 m/min
Fräser: $\varnothing = 16$ mm
Zeilenabstand: 1,5 mm
Anstellwinkel: 40°



Sechsecke fräsen: 3-achsig angestellt

Gleichlaufräsen
Bearbeitungszeit: 2 h 17 min
Vorschub: 6 m/min
Fräser: $\varnothing = 16$ mm
Zeilenabstand: 0,2 mm
Anstellwinkel: 40°



Naht fräsen: 5-achsig simultan

Bearbeitungszeit: 11 min
Vorschub: 0,4 m/min
Fräser: $\varnothing = 25$ mm
Anstellwinkel: 55°

In den Schnittpunkten treffen sich jeweils drei Nähte, die mit unterschiedlichen Werkzeuganstellungen gefräst werden. Ein Schnittpunkt kann somit nur dann genau gefertigt werden, wenn der Werkzeugmittelpunkt (TCP) des Fräsers mit drei unterschiedlichen Anstellungen exakt an den gleichen Punkt positioniert wird.

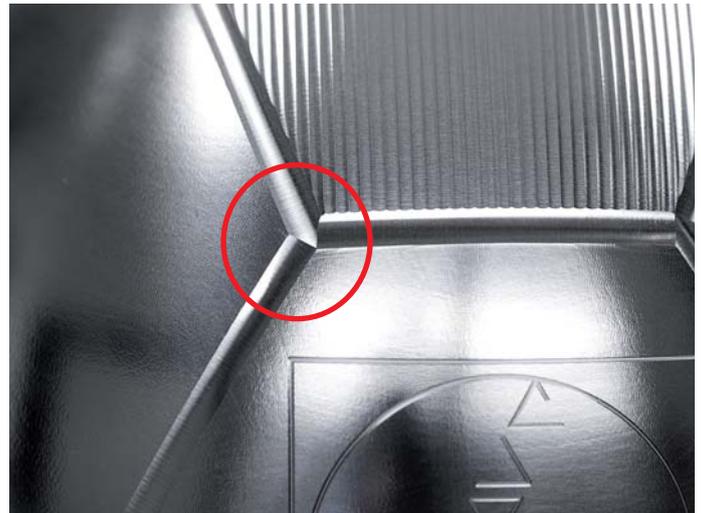
Die drei Anstellwinkel des Fräsers erfordern jedoch große Ausgleichsbewegungen der Linearachsen. Für jede Naht ergibt sich somit eine stark unterschiedliche Stellung der Linear- und der Rundachsen in der TCP-Position eines Schnittpunktes.

Positionierfehler einer oder mehrerer Vorschubachsen führen zwangsläufig dazu, dass die TCP-Position beim Fräsen der drei Nähte im Schnittpunkt nicht übereinstimmt. Für eine präzise Bearbeitung der Nähte einschließlich der Schnittpunkte ist daher eine hohe Genauigkeit der Positionierung aller Vorschubantriebe unumgänglich.

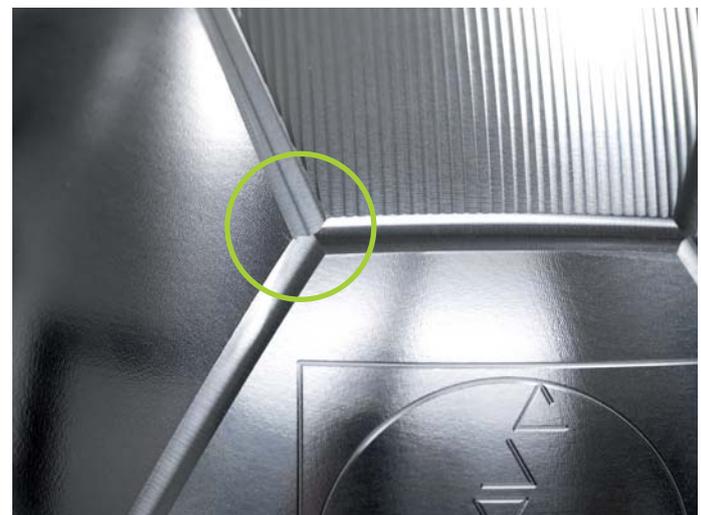
Für eine einfache visuelle Bewertung der Genauigkeit vom Telstar-Werkstück wird die 0,15 mm tiefe Naht durchgehend mit einem Fräser gefertigt, der einen Durchmesser von 25 mm aufweist. Damit ergibt sich ein sehr flacher Nahtquerschnitt, so dass sich bereits kleinste Fehler in der Tiefe der Naht ($\pm 10 \mu\text{m}$ und weniger) in deutlichen Schwankungen der Nahtbreite auswirken.

Wird das Telstar-Werkstück auf einer Maschine im **Semi-Closed Loop** gefertigt, so ist die Positionier- und Wiederholgenauigkeit durch die Übertragungsfehler der Kugelgewindetriebe in den Linearachsen und der Getriebe in den Rundachsen eingeschränkt. Die Folge: Das Telstar-Werkstück weist eine schwankende Nahtbreite auf. Die Schnittpunkte können nicht mit jeder Naht exakt getroffen werden, so dass ein deutlicher Versatz des Mittelpunktes der Nähte entsteht.

Im **Closed Loop** erreichen die Vorschubachsen über dem gesamten Verfahrbereich eine sehr hohe Positionier- und Wiederholgenauigkeit. Damit können benachbarte Bereiche auf dem Werkstück auch mit großen Änderungen der Fräseranstellung und mit erheblichem Zeitabstand zwischen den einzelnen Bearbeitungsschritten präzise gefertigt werden. Die erreichbare Präzision wird in den Schnittpunkten der Nahtbahnen deutlich. Jeder Schnittpunkt wird über alle drei angrenzenden Nähte exakt angefahren. Zudem bleibt die Nahtbreite über dem gesamten Umfang des Telstar-Werkstücks konstant.



Semi-Closed Loop: Einflüsse aus der Antriebsmechanik beeinträchtigen die Bearbeitungsgenauigkeit. Die Nahtbreite variiert. Die Schnittpunkte der Nähte sind sichtbar unsauber.



Closed Loop: Durch die präzisen Längen- und Winkelmessgeräte von HEIDENHAIN haben Fehler der Antriebsmechanik keinen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Die Naht wird in der richtigen Breite mit exaktem Verhalten an den Nahtübergängen gefräst.

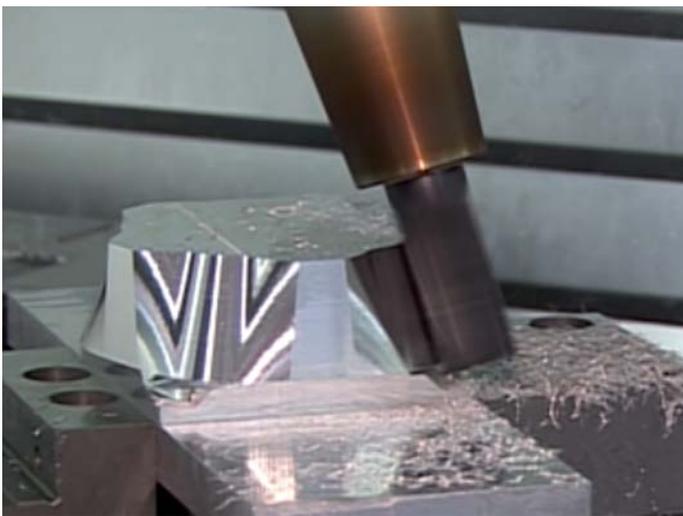
5-achsig simultanes Wälzfräsen

Polygonwerkstück

Die 5-Achs-Bearbeitung bietet erhebliche Potentiale zur Reduktion von Bearbeitungszeiten. Die Mantelfläche eines Polygonwerkstücks wird mit einem Wälzfräser 5-achsig simultan in einer Umdrehung des Werkstücks geschichtet. Im Vergleich zur 3-achsigen Bearbeitung der Mantelfläche mit einem Kugelfräser reduziert die 5-Achs-Bearbeitung die Fertigungszeit auf 30%.

Eine präzise Bearbeitung mit fünf simultan bewegten Vorschubachsen stellt hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Vorschubantriebe. Abhängig von der Art der Positionserfassung können die Fehler der zusätzlich benötigten Rund- und Schwenkachsen erhebliche Einschränkungen der Werkstückqualität hervorrufen. Auf die Wahl des richtigen Messgeräts und seine Einbindung in den Regelkreis ist daher besonderes Augenmerk zu legen.

Das Polygonwerkstück wird in einer Umdrehung der C-Achse bei gleichzeitig interpolierter Schwenkbewegung der B-Achse umfangsbearbeitet. Während der Bearbeitung der Mantelfläche wird die B-Achse fünfmal in einem Schwenkbereich zwischen 1° und 19° ein- und ausgeschwenkt.

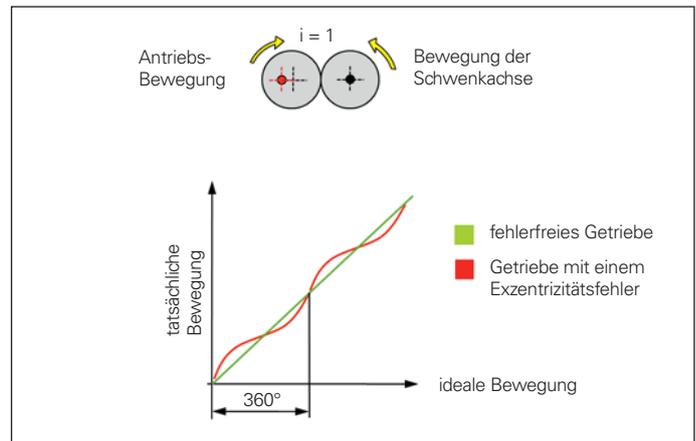


Um die Wirkung der Positionserfassung auf das Bearbeitungsergebnis zu untersuchen, wurden Werkstücke im Closed Loop Betrieb und im Semi-Closed Loop Betrieb der B-Achse gefertigt. Alle anderen Achsen befinden sich permanent im Closed Loop.

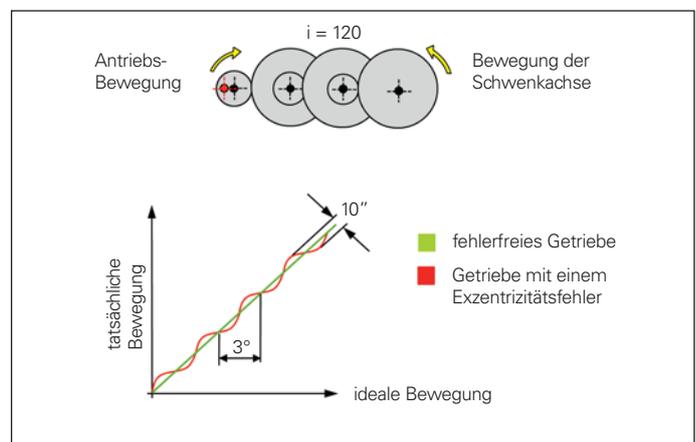
Mechanische Fehler von Rundachsen können im Semi-Closed Loop zu Positionsabweichungen und somit zu Ungenauigkeiten am Werkstück führen. Schwenkachsen weisen häufig einen Antrieb mit mehrstufigem Getriebe auf. Für eine gleichförmige Bewegung einer Schwenkachse müssen alle Getriebekomponenten eine hohe Fertigungsgenauigkeit aufweisen und präzise montiert sein. Bereits durch geringe Exzentrizitätsfehler eines Zahnrades können deutliche Gleichlaufschwankungen der Schwenkachse entstehen.

Die Wirkung einer Exzentrizität in einer Getriebestufe wird in den Abbildungen verdeutlicht. Ein Getriebe mit exakt montierten Zahnradern überträgt die Bewegung des Antriebsmotors fehlerfrei auf die Schwenkachse. Weist ein Getriebezahnrad eine Exzentrizität auf, so zeigt sich in der Bewegung der Schwenkachse eine sinusförmige Abweichung.

Das dargestellte Polygonwerkstück wurde auf einer Fräsmaschine gefertigt, deren Schwenkachse eine Getriebeuntersetzung von $i = 120$ aufweist. Das Motorritzel weist einen Durchmesser von 40 mm auf. Der Rundlauffehler des Ritzels beträgt $\pm 0,058$ mm.



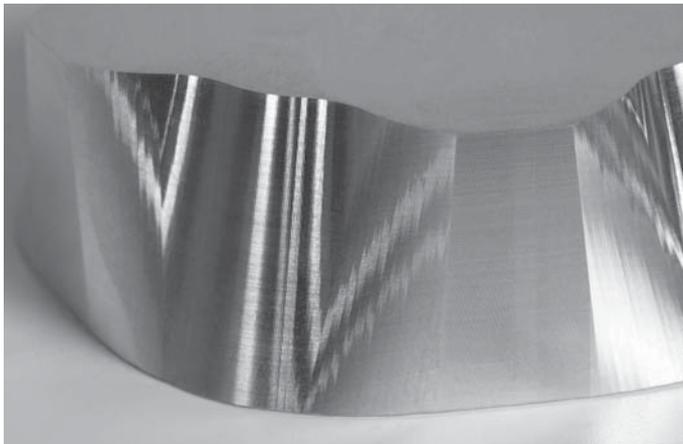
Positionsabweichungen an Rundachsen durch eine Exzentrizität im Getriebe, Untersetzung $i = 1$



Positionsabweichungen an Rundachsen durch eine Exzentrizität im Getriebe, Untersetzung $i = 120$

Wird die Schwenkachse im **Semi-Closed Loop** betrieben, so können die vom Getriebe generierten, sinusförmigen Positionsabweichungen nicht von der Antriebsregelung erkannt werden. Eine Umdrehung des Antriebsmotors mit exzentrischem Ritzel verursacht Abweichungen im Bereich von ± 10 Winkelsekunden in der Bewegung der Schwenkachse. Diese Abweichungen wiederholen sich alle 3° bezogen auf den Schwenkwinkel.

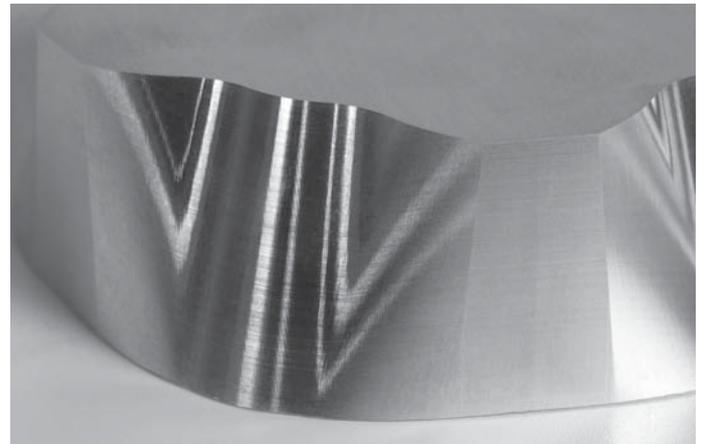
In einem ersten Versuch wird das Polygonwerkstück im Semi-Closed Loop gefertigt. Die vom Getriebe generierten Positionsabweichungen bilden sich deutlich an der Mantelfläche des Polygonwerkstückes als Oberflächenwelligkeit ab. Die resultierende Formabweichung beträgt $\pm 0,015$ mm. Der Getriebefehler wird nur in den Teilflächen des Werkstückes sichtbar, in denen sich die Schwenkachse bewegt.



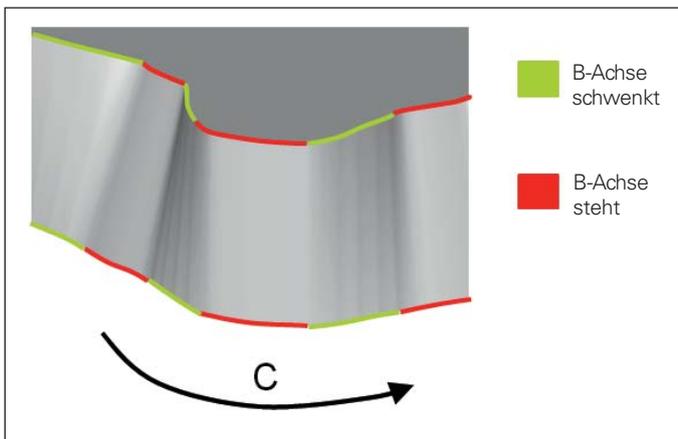
Semi-Closed Loop: Polygonwerkstück mit Oberflächenabweichung.

In einem zweiten Versuch wurde die Schwenkachse im **Closed Loop** betrieben. Dabei kam ein HEIDENHAIN-Winkelmessgerät mit optischer Abtastung zum Einsatz. Das Winkelmessgerät erfasst die Achsposition direkt an der Schwenkachse. Auf diese Weise wird die Wirkung des Übertragungsfehlers vom Getriebe unmittelbar erkannt. Die Antriebsregelung reagiert sofort auf kleinste gemessene Abweichungen und erzeugt eine entsprechende Gegenbewegung des Vorschubmotors. Die Getriebefehler bleiben somit ohne Wirkung auf das Bearbeitungsergebnis.

Dank der HEIDENHAIN-Winkelmessgeräte in den Rundachsen lässt sich die Mantelfläche somit 5-achsig simultan mit kurzer Bearbeitungszeit bei gleichzeitig hoher Oberflächengüte und Genauigkeit fräsen.



Closed Loop: Polygonwerkstück mit höchster Oberflächengüte.



Bearbeitung eines Polygonwerkstückes im Wälzfräsen mit Rund- und Schwenkachse

Umschlagbearbeitung

Anforderungen an die Genauigkeit von Rundtischen

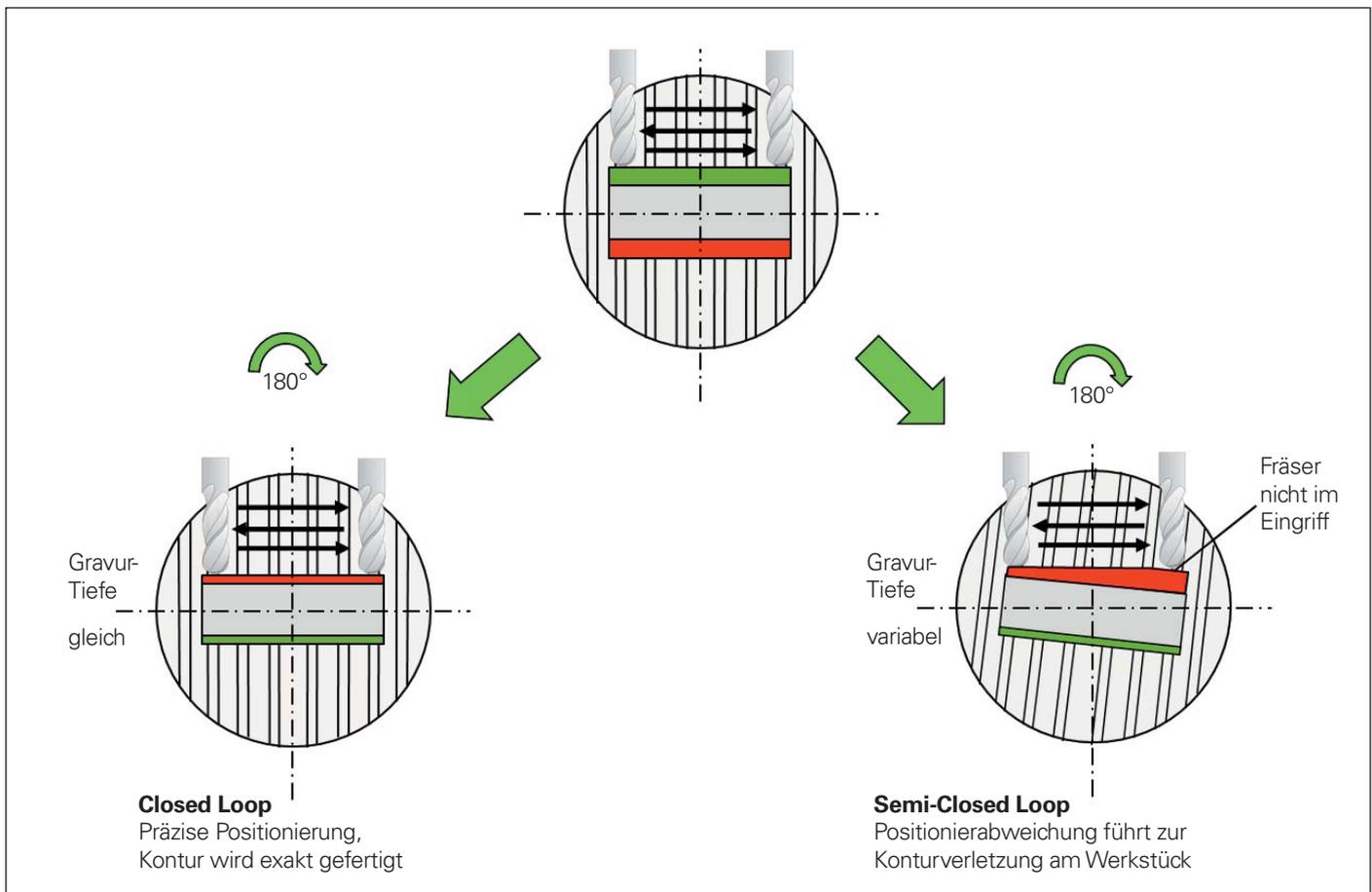
Die Seitenflächen von prismatischen Bauteilen werden häufig auf Umschlag bearbeitet. Dabei wird – gegebenenfalls durch Anstellen des Werkstücks zum Werkzeug mit einer Schwenkachse – zunächst eine Seitenfläche bearbeitet. Anschließend wird das Werkstück über einen Rundtisch um 180° gedreht, um die gegenüberliegende Seitenfläche zu bearbeiten.

Die Umschlagbearbeitung stellt hohe Anforderungen an die Positioniergenauigkeit des Rundtisches. Bereits geringe Winkelfehler in der Umschlagbewegung führen zu Parallelitätsfehlern von gegenüberliegenden Seitenflächen des Werkstücks. Ein Positionierfehler von nur 2 Milligrad erzeugt bei einem mittig auf dem Rundtisch aufgespannten Werkstück mit 500 mm Kantenlänge einen Fehler von 0,01 mm normal zur Seitenfläche.

Positionierfehler können bei Rundachsen entstehen, wenn die Position an der Welle des Antriebsmotors gemessen wird (Semi-Closed Loop), da die Fehler im Getriebe der Rundachse (Spiel, Elastizität, Rundlauffehler der Getriebewellen) nicht von der Positionsregelung erfasst und kompensiert werden können. Je nach Ausführung der Antriebsmechanik können im Semi-Closed Loop Positionierfehler in der Umschlagbewegung von ± 10 Milligrad und mehr entstehen.

Die Genauigkeit eines Rundtisches lässt sich durch den Einsatz präziser Winkelmessgeräte, welche die Tischbewegung direkt erfassen, erheblich steigern. Die Übertragungsfehler in den Getrieben von Rundtischen werden über das Winkelmessgerät erfasst und somit von der Positionsregelung kompensiert (Closed Loop). Im Closed Loop Betrieb bestimmt die Präzision des Winkelmessgeräts weitgehend die Genauigkeit der Umschlagbewegung. Winkelmessgeräte mit optischer Abtastung können dabei Werte kleiner 0,3 Milligrad ermöglichen.

Zur Veranschaulichung des Einflusses der Positioniergenauigkeit von Rundtischen auf die Umschlagbearbeitung wurde ein Schriftzug aus den Seitenflächen eines quaderförmigen Bauteils herausgearbeitet. Dazu wird das Bauteil auf einer 5-achsigen Fräsmaschine zunächst in der geschwenkten Ebene an einer der Seitenflächen angefasst. Dann wird im 3-achsig interpolierten Gleich- und Gegenlaufräsen ein Schriftzug mit einem Kugelfräser herausgearbeitet. Die Buchstaben haben dabei eine Höhe von 0,025 mm. Anschließend wird das Bauteil mit dem Rundtisch um 180° gedreht, um auf der gegenüberliegenden Seite einen zweiten Schriftzug mit gleicher Buchstabenhöhe herauszuarbeiten.

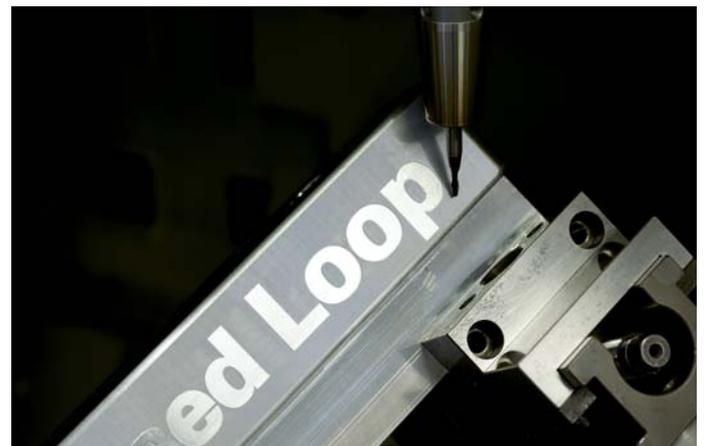


Zunächst wurde ein Werkstück im **Closed Loop** gefräst (siehe auf dem Werkstück). Anschließend wurde auf der gleichen Maschine ein zweites Werkstück im **Semi-Closed Loop** gefertigt (siehe auf dem Werkstück). Der Unterschied wird sehr schnell deutlich. Während die Schriftzüge im Closed Loop Betrieb mit präzisen Längen und Winkelmessgeräten auf beiden Seitenflächen fehlerfrei herausgearbeitet werden, zeigen sich im Semi-Closed Loop Bearbeitungsfehler: Auf der Rückseite des

im Semi-Closed Loop gefrästen Bauteils ist die Gravur links tiefer gefertigt, während rechts der Fräser nicht mehr im Eingriff ist. Positions- und richtungsabhängige Positionierfehler verursachen im Semi-Closed Loop eine Schiefstellung von Maschinentisch und Werkstück. Dies führt zur deutlich fehlerhaft gefertigten Gravur und zum Ausschuss des Werkstücks.



Semi-Closed Loop: Einflüsse aus der Antriebsmechanik (z.B. Getriebefehler) können die Genauigkeit der Maschine und somit die Bearbeitungsgenauigkeit und Oberflächengüte beeinträchtigen.



Closed Loop: Genauigkeitsbegrenzende Einflüsse aus der Antriebsmechanik haben keinen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Durch die präzisen Winkelmessgeräte von HEIDENHAIN werden eine hohe Bearbeitungsgenauigkeit und eine hervorragende Oberflächengüte erreicht

Messgeräte

Die 5-Achs-Bearbeitung stellt besonders hohe Anforderungen an die Genauigkeit der Vorschubantriebe, da die Verfahrbereiche und die Achsvorschübe im Vergleich zur 3-Achs-Bearbeitung größer werden. Die Wärmeentwicklung und die mechanischen Übertragungsfehler in den Vorschubantrieben führen dazu, dass Positionserfassung der Vorschubantriebe die Bearbeitungsgenauigkeit entscheidend bestimmt. Ausschuss und Kosten werden bei der richtigen Positionserfassung minimiert.

Für Maschinen mit hohen Anforderungen an die Positioniergenauigkeit und an die Bearbeitungsgeschwindigkeit sind Längenmessgeräte für Linearachsen sowie Winkelmessgeräte für Schwenk- und Rundachsen unerlässlich.

Denn Längen- bzw. Winkelmessgeräte von HEIDENHAIN erfassen die Bewegung der Achse direkt und unmittelbar. Mechanische Übertragungselemente haben somit keinen Einfluss auf die Positionserfassung – sowohl kinematische als auch thermische Fehler oder Kräfteinflüsse werden vom Messgerät erfasst und im Lageregelkreis berücksichtigt. Dadurch lässt sich eine Reihe von möglichen Fehlerquellen ausschließen:

bei Linearachsen:

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

bei Schwenk- und Rundachsen:

- Getriebefehler
- Umkehrfehler
- Fehler infolge Verformung der Antriebsmechanik durch Bearbeitungskräfte



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*
- Katalog *Absolute Winkelmessgeräte*
- Katalog *Winkelmessgeräte ohne Eigenlagerung*