

**B. KARPUSCHEWSKI**, Prof. Dr.-Ing. habil.,  
**D. MOUREK**, Dipl.-Ing.,  
**O. KUSHNARENKO**, Dr.-Ing., Magdeburg, Germany

## **ENTWICKLUNG EINES POSTPROZESSORS FÜR DAS 5-ACHS-SCHLEIFEN**

У статті представлені результати по розробці постпроцесора для п'ятивісної шліфувальної машини Walter Helitronic. Для деференціювання функцій формоутворення використовували множення матриць перетворення. Для розробленої кінематичної моделі шліфувального верстата визначена інверсна кінематично для поступальної й обертальної осі. Алгоритми були виконані мовою програмування JAVA і перевірені експериментально при виготовленні двох різних типів різальних інструментів.

В статье представлены результаты по разработке постпроцессора для пяти осной шлифовальной машины Walter Helitronic. Для деференцирования функций формообразования использовалось умножение матриц преобразования. Для разработанной кинематической модели шлифовального станка определена инверсная кинематически для поступательной и вращательной оси. Алгоритмы были выполнены языке программирования JAVA и проверены экспериментально при изготовлении двух различных типов режущих инструментов.

In this article, the postprocessor for a five-axis tool grinder Walter Helitronic was developed. For the derivation of a form shaping function the multiplication of transformation matrices is used. For developed kinematic model of the grinder the solution of inverse kinematics for rotational and translational axes was found. The algorithms were implemented in JAVA and used for experimental verification during manufacturing of two different types of cutting tools.

### *Einleitung*

Die frei geformten Bauteile können in bestimmten Fällen neben dem Fräsen auch mithilfe des Schleifens effektiv bearbeitet werden. Für das Fünf-Achs-Schleifen lassen sich die Werkzeugschleifmaschinen sehr gut anwenden. Für die technologische Fertigungsvorbereitung auf den NC-Maschinen sind folgende Schwerpunkte von sehr hoher Bedeutung. Es handelt sich um die CAD/CAM (Computer Aided Design/ Computer Aided Manufacturing) Systeme, CNC-Postprozessoren, Werkzeugschleifmaschinen und Schleifscheiben. All diese Elemente haben einen deutlichen Einfluss auf die Qualität und Effektivität des Fertigungsprozesses und sollen daher beobachtet werden.

### *CAD/CAM Systeme*

Die Systeme für rechnerunterstützte Konstruktion, bzw. Fertigung oder Analyse, finden zurzeit in der Industrie eine breite Anwendung. Sie dienen zur Erhöhung der Produktivität und der Qualität während des ganzen Lebenszyklus eines Produkts.

Die Historie der CAD/CAM Systeme fängt in den fünfzig Jahren mit der Entwicklung der Programmiersprache APT (Automatically Programming Tools) an. Mithilfe dieser Sprache konnten die NC-Maschinen programmiert werden. Das APT-System wurde für die Bearbeitung der komplizierten dreidimensionalen Bauteile, die in der Luftfahrtindustrie benötigt wurden, entwickelt. Die festgestellten Koordinaten der NC-Bahn wurden in einem standardisierten Dateiformat CLDATA (Cutter Location Data) gespeichert und in den Postprozessor exportiert. Um die Möglichkeiten der neuentwickelten NC-Werkzeugmaschinen zu unterstützen, wurde das APT-System mehrfach um neue Funktionalität erweitert [1, 2].

In der Mitte der siebziger Jahre wurde die Entwicklung der CAx Systeme CATIA (Conception Assistée Tri-dimensionnelle InterActive) und UNIGRAPHICS angefangen. Beide Systeme wurden für die Bedürfnisse der Luftfahrtindustrie entwickelt und mit ihren Funktionen umfassen die Ingenieursarbeiten während des Produktlebenszyklus. So können die Arbeiten auf einem Produkt ab ersten Entwürfen über die Konstruktion, die Analysen, die Fertigung bis hin zur Demontage in einem System durchgeführt werden [3, 4].

### *Eigenschaften der CAD Systeme*

Die modernen CAD Systeme basieren vor allem auf der dreidimensionalen Modelldarstellung. Die zweidimensionale Visualisierung findet ihre Anwendung nur bei den einfachen Systemen oder bei speziellen Lösungen, wie z. B. für die Bildung der 2D-Skizzen in 3D Systemen. Die Modellierung in den meisten CAD Systemen kann mithilfe der Volumen oder Flächen, bzw. mit der Kombination beider Methoden, realisiert werden. Die Volumenmodellierung arbeitet nur mit den Daten auf der Körperebene. Bei den Flächenmodellen können im Vergleich zur Volumenmodellierung nur die einzelnen Oberflächen erzeugt und manipuliert werden. Weil bei der Volumenmodellierung die einzelnen Oberflächen nicht manuell erzeugt werden müssen, ist dieses Verfahren im Vergleich zur Flächenmodellierung schneller. Auf der anderen Seite können die Volumenmodelle auf der Oberflächenebene nicht modifiziert werden, d. h. es die Produkte, deren Form durch Freiformflächen beschrieben ist, nicht modelliert werden. Die besseren modernen CAD Systemen bieten eine Möglichkeit der Hybridmodellierung, so dass die Modelle mithilfe der beiden Verfahren erzeugt werden können [5].

In Zusammenhang mit der Modellierung in CAD Systemen werden oft drei Techniken verwendet. Es handelt sich um die Features, der parametrischen Modellierung und der Assoziativität. Diese Features (Funktionen) sind die geometrischen Objekte, die bei der Bildung eines Volumenmodells nacheinander verwendet werden. Ein Beispiel dieser Modellierungstechnik stellt das Feature Bohrung dar. Bei einer Bohrung können die geometrischen Kenngrößen, wie z. B. Lage und Durchmesser, sowie die anderen Kenngrößen, wie z. B. Oberflächengüte bestimmt werden. Die modernen CAD Systemen unterstützen oft die parametrisch-assoziative Modellierung. Parametrisierung bedeutet, dass die Kenngrößen des Modells, wie z. B. Bemaßungen, beliebig geändert werden können. Die Assoziativität ist mit der vernetzten Struktur des Modells, in der jedes Objekt aus den Vorgabeobjekten entsteht und für weitere Objekte als eine Vorgabegeometrie dienen kann, verknüpft [3].

### *Geometrische Modellierung in CAD/CAM Systemen*

Die interne Datenrepräsentation kann mithilfe vieler Verfahren beschrieben werden. Es können die CSG (Constructive Solid Geometry) Modelle [6] als auch B-Rep (Boundary Representation) Modelle [7] verwendet werden. Die Kerne von den CAD/CAM Systemen können bei manchen geometrischen Objekten, wie z. B. planaren oder zylindrischen Flächen, die mathematisch exakten Lösungen berechnen. Außerdem verfügen die Kerne über Ansätze, die nur die angenäherten Lösungen angeben.

Die Kurven und Flächen werden oft mithilfe der parametrischen Funktionen beschrieben. Bei der parametrischen Beschreibung sind die Koordinaten des Punktes auf der Kurve bzw. der Fläche, aufgrund der expliziten Beziehungen des unabhängigen Parameters beschrieben. Da bei der Arbeit mit CAD/CAM Systemen die ebenflächige oder zylindrische Geometrie nur eine beschränkte Anwendung findet, werden in Kernen von CAD/CAM Systemen auch die Ansätze von Modellierung der gekrümmten Kurven und Flächen verwendet.

Die Freiformkurven und –flächen können auf unterschiedliche Weise mathematisch beschrieben werden. Allgemein können zwei Verfahren unterschieden werden und zwar die Approximations- und Interpolationskurven und –flächen. Beide Gruppen der geometrischen Objekte sind u. A. durch Kontrollpunkte angegeben. Die Approximationskurve nähert sich den Kontrollpunkten an. Die Interpolationskurve im Unterscheid zur Approximationskurve läuft genau durch die angegebenen Punkte.

Bei den Freiformkurven und –flächen ist meistens ein ganz konkreter Stetigkeitsgrad gewünscht, z. B. C1 (Tangentialität) bzw. C2 (Krümmung), bei

den A-Klasse -Freiformflächen auch C3 (tangentialer Krümmungsverlauf). Für die Modellierung der Freiformkurven und -flächen wurden verschiedene Methoden entwickelt. Für die Modellierung der Interpolationskurven können z. B. kubische Spline-Kurven verwendet werden. Ein kubischer Spline ist eine glatte Kurve, die aus einzelnen Stücken (kubischen Parabeln) zusammengesetzt ist. Die Modellierung besteht in der Lösung eines Systems von Gleichungen, die aufgrund der Randbedingungen definiert sind. Die Lösung des Gleichungssystems sind die Koeffizienten der kubischen Funktionen, die die einzelnen Stücke der kubischen Spline-Kurve bestimmen. Ein Nachteil des kubischen Splines ist eine globale Mimik (Änderung der Lage eines Punktes beeinflusst die Form der ganzen Kurve).

Die approximativen Kurven können z. B. mithilfe der Bézier-Kurven oder der B-Spline-Kurven modelliert werden. Zu den Eigenschaften der Bézier-Kurven und -Flächen gehört z. B. die affine Invarianz. Das bedeutet, dass das Kontrollpolygon zuerst transformiert und die Bézier-Kurve erst danach berechnet werden kann. Die Bézier-Kurven und -flächen verfügen ähnlich wie die kubischen Spline über eine globale Mimik. In Bild 1 ist ein Beispiel einer Bézier-Fläche zusammen mit dem Kontrollpolygon dargestellt.

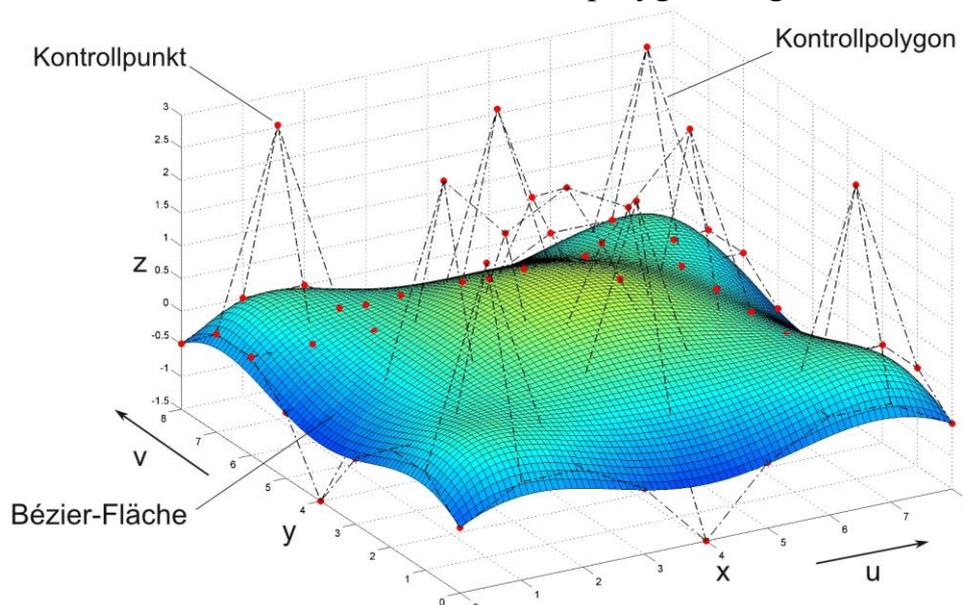


Bild 1 – Bézier-Fläche mit Kontrollpolygon

Für die Berechnung der Koordinaten eines Punktes auf der Bézier-Fläche der  $(n, m)$ -ter Ordnung kann die Formel 1 verwendet werden.  $P_{i,j}$  sind die Punkte des Kontrollpolygons und  $B_{i,n}(u)$  und  $B_{j,m}(v)$  stellen die Bernsteinpolynome dar. Die Koordinaten des beliebigen Punktes können durch einsetzen der beiden Parametern berechnet werden.

$$S(u, v) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m P_{i,j} B_{i,n}(u) B_{j,m}(v) \quad 0 \leq u, v \leq 1 \quad (1)$$

Die Bernsteinpolynome aus Gleichung 1 sind nach der Formel 2 definiert.

$$B_i^n(u) = \binom{n}{i} u^i (1-u)^{n-i} \quad (2)$$

Eine weitere Möglichkeit die komplizierten Freiformkurven und –flächen zu beschreiben bieten die NURBS (Non Uniform Rational B-Splines). Die rationale Spezialisierung besteht in der Anwendung der entsprechenden Gleichungen für die Bézier-Kurven und B-Splines im Raum der homogenen Koordinaten. Die Anwendung der rationalen Spezialisierung ermöglicht die Beschreibung der Kegelschnitte, die affine Invarianz ist auf die projektive Invarianz zu erweitern. Dazu können zur Beeinflussung der Form, der Kurve und der Fläche auch die Punkte des Kontrollpolygons verwendet werden. Der Einfluss der Gewichte auf die Form der NURBS Kurve ist im Bild 2 dargestellt. Durch diese Eigenschaften sind die NURBS die meist verwendeten Objekte bei der mathematischen Modellierung in den Kernen der CAD/CAM Systeme [8, 9].

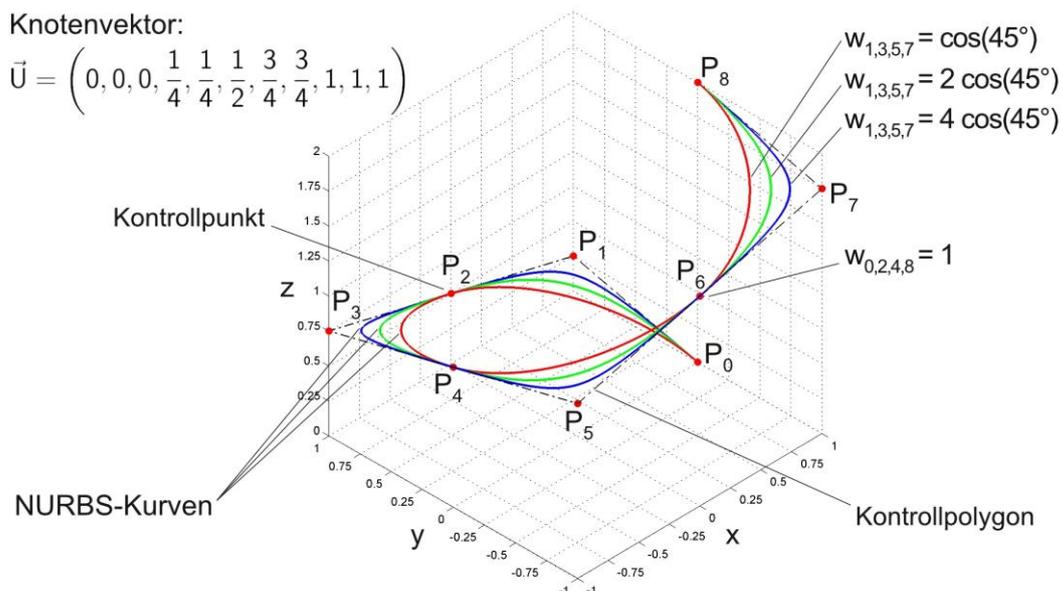


Bild 2 – Darstellung der NURBS Kurven mit unterschiedlichen Gewichten

Eine NURBS Kurve der p-ten Ordnung ist nach der Formel 3 definiert.  $P_i$  sind die Punkte, die den Kontrollpolygon bilden,  $w_i$  sind die entsprechende Gewichte der Kontrollpunkte und  $N_{i,p}(u)$  sind die B-Spline Basisfunktionen des p-ten Grades, die auf dem nichtperiodischen nichtuniformen Knotenvektor definiert sind [10].

$$C(u) = \frac{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u)w_i P_i}{\sum_{i=1}^n N_{i,p}(u)w_i} \quad a \leq u \leq b \quad (3)$$

Die B-Spline Basis-Funktionen können unterschiedlich definiert werden. Für die Algorithmisierung ist eine rekursive Formel 4 sehr praktisch. Die i-te Basisfunktion der p-ten Ordnung ist folglich definiert.

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & u_i \leq u < u_{i+1} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases} \quad (4)$$

$$N_{i,p}(u) = \frac{u - u_i}{u_{i+p} - u_i} N_{i,p-1}(u) + \frac{u_{i+p+1} - u}{u_{i+p+1} - u_{i+1}} N_{i+1,p-1}(u)$$

Der Knotenvektor U ist nach Formel 5 definiert. Mithilfe dieses Vektors ist bestimmt, wie und wo die Kontrollpunkte die NURBS Kurve beeinflussen.

$$U = \left( \underbrace{a, \dots, a}_{p+1}, u_{p+1}, \dots, u_{m-p-1}, \underbrace{b, \dots, b}_{p+1} \right) \quad (5)$$

### *Eigenschaften der CAM Systeme*

Die Aufgabe der CAM Systeme ist die Vorbereitung der technologischen Daten, die zur Steuerung der CNC-Maschinen verwendet werden können. Zur Beschleunigung des ganzen Vorgangs werden meistens die gleichen Modelle, die im CAD System vorbereitet wurden, verwendet. Durch die Anwendung schon vorbereiteter Geometrien können die potentialen Fehler vermieden werden. Durch die Benutzung der schon fertigen Modelle wird auch die Zeit für die technologische Vorbereitung gespart. Die Modelle werden in die üblichen CAM Systeme in den neutralen Datei-Formaten, wie z. B. IGES oder STEP, übertragen. Diese Formate dienen zur Übergabe der Geometrie, jedoch gehen die Parametrisierung und Assoziativität während der Konvertierung verloren. Bei den großen CA-x Lösungen, wie z. B. CATIA V5, SIEMENS NX oder kombinierten Lösungen wie z. B. CIMATRON, verläuft die Arbeit über ursprünglichen Datenmodell. Das bedeutet, dass die Modelle ihre Parametrisierung und Assoziativität beibehalten, und nur um die technologischen Daten ergänzt werden. Das hat einen Vorteil und zwar, dass die Geometrie des Modells geändert werden kann und die Bahnen des Werkzeugs in den bestimmten Fällen automatisch aktualisiert werden können.

Die CAM Systeme unterstützen eine breite Menge der Fertigungsverfahren. Es wird z. B. Drehen, Fräsen, Bohren, Drahtrodieren,

Wasserstrahlschneiden u. a. unterstützt. Für das beantragte Projekt ist nur das Fräsen von hoher Bedeutung. Das Fräsen wird in den CAM Systemen von 2 bis 5-Achs-Bearbeitung unterstützt. Für die Bearbeitung der komplizierten Freiformflächen werden die Frässtrategien, die mindestens drei simultan gesteuerte Achsen programmieren können, verwendet. Weil die Eingriffsbedingungen oft sehr anspruchsvoll sind, werden die drei translatorische Achsen um den Vorhalte- und Neigungswinkel der Werkzeugachse ergänzt. Für die Bewegung des Werkzeugs entlang einer Fläche gibt es mehrere Möglichkeiten. Die Wahl der richtigen Strategie für eine Oberfläche ist eine Kombination der Möglichkeiten des CAM Systems und der Erfahrungen des Anwenders. In Bild 3 ist eine mehrachsige Bearbeitung, bei der die Kontaktlinie zwischen dem Werkzeug und der Oberfläche tangential verläuft, dargestellt.

Bei der Berechnung der Werkzeugwege können auch die Spannmittel und der Werkzeughalter mitberücksichtigt werden. Vor allem bei der mehrachsigen Bearbeitung müssen aufgrund der veränderlichen Orientierung der Werkzeugachse die möglichen Kollisionen in Betracht gezogen werden.

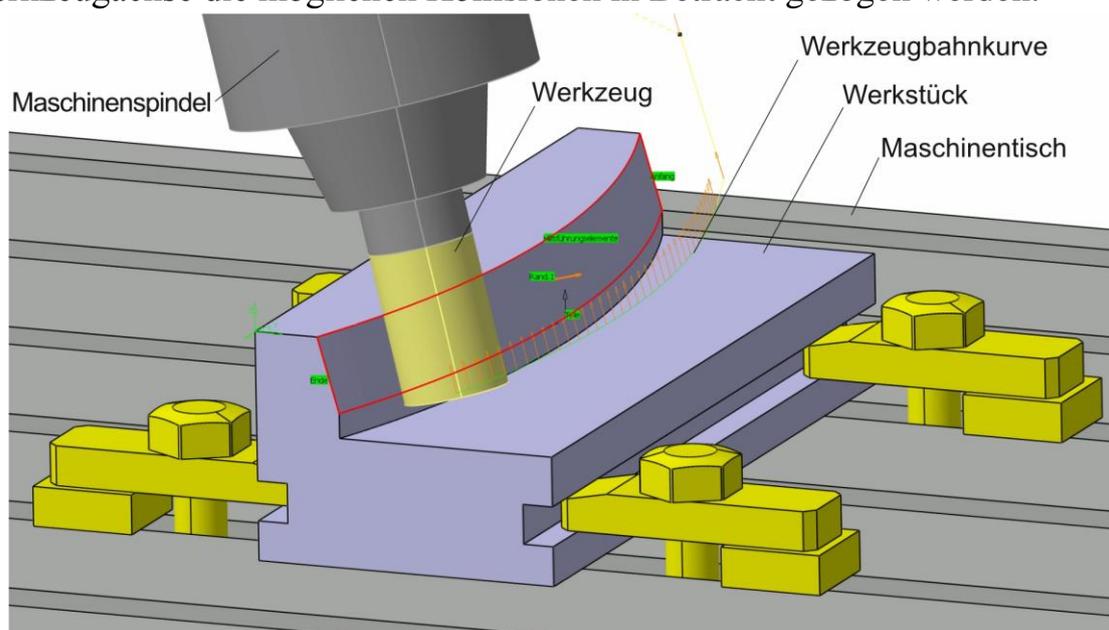


Bild 3 – Simultane-5-Achs-Bearbeitung

Die im CAM System implementierten Bearbeitungsstrategien bestimmen, wie die Bewegung des Werkzeugs in Bezug auf das Koordinatensystem des Werkstücks realisiert wird. Auf dem Markt sind allgemeine CAM Systeme sowie auch spezielle Lösungen, wie z. B. für die Turbinenschaufelbearbeitung, verfügbar [11].

Für das Schleifen der Freiformflächen sind die CAM Systeme nicht allgemein anwendbar, aber durch richtige Wahl der Bearbeitungsstrategien können die Frässtrategien auch für das Schleifen verwendet werden.

#### *CNC-Postprozessoren*

Die Information über die Lage und Orientierung des Werkzeugs wird im CAM System oft in eine maschinenneutrale Datei, z. B. die CL-Daten im APT Format, gespeichert. Diese Daten sind dann im Postprozessor ins NC-Programm für die konkrete Werkzeugmaschine konvertiert (s. Bild 4). Ein Vorteil der getrennten Verarbeitung der NC-Programme besteht darin, dass nur eine allgemeine Datei im CAM System vorbereitet werden muss. Diese Datei kann dann ins NC-Programm für unterschiedliche Maschinen mit diversen Steuerungssystemen umgewandelt werden [12].

Nach dem Einlesen der CL-Daten müssen diese ins NC-Programm umgewandelt werden. Bei der mehrachsigen Bearbeitung ist die Orientierung der Werkzeugachse durch die Komponenten des Achsenvektors bestimmt. Um diese Komponenten in die Koordinaten der Maschinendrehachsen zu konvertieren, muss eine Aufgabe der inversen Kinematik für die kinematische Kette der Maschine durchgeführt werden. Im Postprozessor können auch verschiedene Kontrollen der NC-Programme implementiert werden. Es können z. B. die Verfahrswege oder Vorschübe in den einzelnen Achsen kontrolliert werden [13, 14, 15].

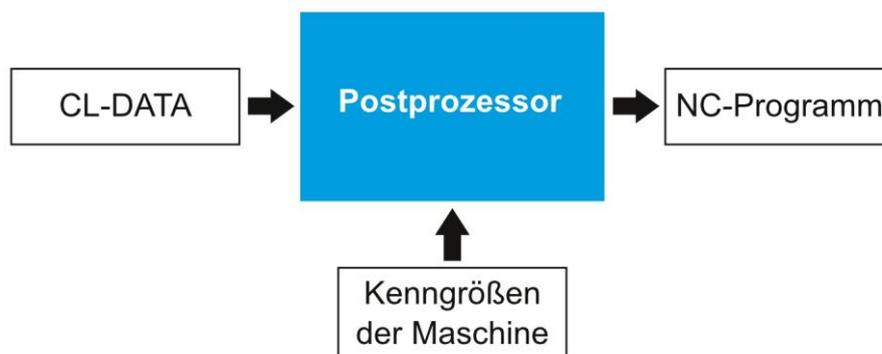


Bild 4 – Schema eines CNC-Postprozessors

Aus der Sicht der Implementierung können die CNC-Postprozessoren in zwei Gruppen geteilt werden. Die erste Gruppe bilden die CNC-Postprozessoren, die in einem automatischen Postprozessorgenerator erzeugt werden. Die Generatoren der CNC-Postprozessoren sind Bestandteil mancher CAM Systeme. Es handelt sich um die einfachste Lösung, wie ein CNC-Postprozessor erzeugt werden kann. Der Anwender wählt in jedem Schritt eine

vordefinierte Lösung. Am Ende des Vorgehens gibt es eine Kombination der Maschinenkinematik, des Steuerungssystems und anderer Parameter. In diesem Fall werden aber nur allgemeine Maschinenkonzeptionen mit klassischen kinematischen Ketten unterstützt. Um eine beliebige Maschinenkonzeption zu modellieren, gibt es die zweite Gruppe der CNC-Postprozessoren und zwar die separaten Anwendungen. Diese Anwendungen können in jeder Programmiersprache entworfen werden. In solchen Postprozessoren können verschiedene Algorithmen implementiert werden, deshalb ist die Funktionalität nicht begrenzt.

Die CNC-Werkzeugschleifmaschinen haben relativ spezifische Eigenschaften, weshalb der Postprozessor in einer Programmiersprache als eine selbstständige Anwendung geschrieben werden muss.

### *Werkzeugschleifmaschinen*

Werkzeugschleifmaschinen wurden vor allem zur Herstellung und zum Nachschärfen der verschiedenen Zerspanwerkzeuge entwickelt. Weil die Geometrie der Zerspanwerkzeuge oft kompliziert ist, sind die Werkzeugschleifmaschinen für die simultane mehrachsige Bearbeitung konzipiert.

Die CNC-Werkzeugschleifmaschinen entwickelten sich historisch aus konventionellen Maschinen. Die Bahnsteuerung in einzelnen Achsen wird mithilfe von Steuerungssystem realisiert. Die Maschinenkonstruktion wurde im Laufe der Zeit den Anforderungen der neuen Steuerungssysteme angepasst. Das Maschinenbett ist oft aus modernen Werkstoffen, wie z. B. Mineralguss oder Polymerbeton, hergestellt. Linearachsen können mit einem direkten Wegmesssystem mit Glasmaßstäben ausgerüstet werden. Dieses System bietet eine sehr gute Messgenauigkeit und auch die Abweichungen, die ihre Ursache in der Wärmeausdehnung haben, lassen sich minimieren. Alle Achsen können mit Direktantrieben mit integrierter Kühlung ausgestattet werden. Die Direktantriebe zeichnen sich durch sehr kurze Reaktionszeiten aus. Die kurzen Reaktionszeiten zusammen mit dem direkten Wegmesssystem haben einen großen Einfluss auf die Qualität der Produktion. Eine Diagnose der Maschine kann auch über das Internet durchgeführt werden. Zur Verbesserung der Produktivität können manche CNC-Werkzeugschleifmaschinen auch mit einem Schleifscheibenwechsler ausgestattet sein. So kann der Zeitverlust beim Schleifscheibenwechsel reduziert werden, da die Schleifsätze mit Düsen für die Kühlschmierstoffzufuhr im Voraus vorbereitet werden können. Für eine Automatisierung der Maschinen, z. B. für den Mehrschichtbetrieb, können diese je nach Maschinentyp auch mit einem Palettenlader ausgerüstet werden. Das

Steuerungssystem der Maschine ist dann in der Lage automatisch die Werkstücke zu wechseln [16, 17].

Die CNC-Werkzeugschleifmaschinen sind auch mit einem Messsystem ausgestattet. Mess- und Steuerungssystem sind miteinander verknüpft und ermöglichen das Vermessen von Rohlingen und Zerspanwerkzeugen. Dieses Messsystem ist oft mithilfe eines Tasters realisiert, einige Maschinenhersteller [17] bieten auch optische Messsysteme mit CCD-Kameras an. Bei der Serienfertigung ermöglicht ein Messsystem auch eine statistische Prozessüberwachung. Damit sind einfache Korrekturen der einzelnen Prozessstellgrößen möglich. Die modernsten Schleifmaschinen sind z. Z. auch mit verschiedenen Systemen zur Überwachung des Schleifprozesses ausgerüstet [18, 19].

### *Kinematische Ketten der Werkzeugschleifmaschinen*

Die kinematische Kette besteht aus einzelnen beweglichen Teilen der Werkzeugmaschine. Zwischen den einzelnen Teilen können kinematische Verbindungen eingefügt werden. Zu diesen Verbindungen gehören vor allem Fixierungen und translatorische oder rotatorische Bewegungselemente. Bei einer Fixierung ist der Freiheitsgrad gleich Null. Translatorische und rotatorische Bewegungselemente besitzen einen Freiheitsgrad von Eins. Es handelt sich dabei um eine gesteuerte Achse.

In der Regel ist die kinematische Kette einer CNC-Werkzeugschleifmaschine in zwei Komponenten geteilt. Der eine Teil dieser Kette trägt das Werkstück und der andere die Schleifscheibe. Aus der Sicht der Bahnprogrammierung ist es möglich zwei Arten von Steuerungssystemen zu unterscheiden. Die Steuerungssysteme können entweder eine offene, flexible programmierbare, oder eine geschlossene Architektur, für bestimmte Schleifaufgaben, haben.

Geschlossene Steuerungssysteme werden für konkrete Geometrien bzw. konkrete Typen von Zerspanwerkzeugen entwickelt. Diese sind in den Maschinen implementiert. Der Vorteil dieser Systeme liegt in ihrer relativ guten Übersichtlichkeit. Die einzelnen Kenngrößen werden oft in Tabellensystemen eingegeben. Diese Systeme sind mit Schleifprogrammen für die Fertigung und für das Nachschleifen des vorgegebenen Zerspanwerkzeugsortiments ausgestattet.

Der größte Nachteil der Systeme mit geschlossener Architektur ist, dass das System keine direkten Änderungen von Datensätzen im NC-Programm zulässt. Es können nur die vom Maschinenhersteller vorgeschlagenen Strategien der Schleifscheibenbewegung und Eingriffsbedingungen genutzt werden. Diese Vorgehensweise hat aber den Vorteil, dass der Maschinenhersteller eine

kollisionsfreie Fertigung gewährleistet. Der Programmierer füllt die vorbereiteten Formulare oder Bildschirmmasken mit Kenngrößen zur gewünschten Geometrie, zur Schleifoperation mit gegebenen Eingriffsbedingungen und mit geometrischen Kenngrößen der Schleifscheiben aus. Die Bahn der Schleifscheibenbewegung selbst kann er nur sehr wenig über die Korrekturwerte des Schleifprozesses beeinflussen.

Bei den Systemen mit offener Architektur hat der Bediener die Möglichkeit des Zugriffs auf die NC-Programme, die oft im ISO/DIN Format vorliegen. Das heißt, Programme können erstellt, editiert, verifiziert usw. werden. Der Bediener hat die Möglichkeit direkt den Fertigungsprozess, z. B. über die Eingriffsbedingungen oder die Zerspanungsstrategie, zu beeinflussen und so eigene Erfahrungen in den Prozess einzubringen. Diese Flexibilität und Unabhängigkeit vom Maschinenhersteller sind ein großer Vorteil. Sie ermöglicht eigene Entwicklungen in bestimmten Bereichen, wie z. B. der Fertigungsstrategie des genauen Nutzenprofils in der Wendel eines Werkzeuges mit Hilfe standardisierter Schleifscheiben, oder der Programmierung der Schleifscheibenbewegung entlang gewünschten Kurven. Ein Nachteil ist in diesem Fall das geforderte höhere Niveau des Bedieners, der die NC-Programme vorbereitet und die Maschine bedient.

Fünf und mehr gesteuerte Achsen können auf unterschiedliche Art und Weise angeordnet werden. Die kinematische Kette kann daher vom Maschinenhersteller relativ beliebig gewählt werden. Es ist nur zu beachten, dass der Aufbau der kinematischen Kette die Eigenschaften der Maschine beeinflusst. Es handelt sich vor allem um Steifigkeit, Genauigkeit, Wärmestabilität und Arbeitsbereiche in den einzelnen Achsen. In Bild 5 ist ein Beispiel einer kinematischen Konzeption einer CNC-Werkzeug-schleifmaschine Walter Helitronic dargestellt. Die Anlage hat fünf numerisch gesteuerte Achsen, die eine beliebige Ausrichtung der Schleifscheibe erreichen können. Die translatorische Achse X ist mit dem Tisch und dem Werkstückspansystem verknüpft. Die Y- und Z-Achse sind mit dem Spindelstock verbunden. Die primäre Rotationsachse C dreht den kompletten Tisch, die sekundäre Rotationsachse A dreht das Werkstück in der Spannvorrichtung wie in Bild 5 beschrieben.

Im Arbeitsraum der Schleifmaschine sind mehrere Koordinatensysteme abgebildet. Das feste System  $O_F$  ist mit der Maschine verbunden und wird als Nullpunkt für die NC-Programmierung verwendet. Ein weiterer wichtiger Punkt  $O_T$  ist der Flansch der Spindel, welcher den programmierten Punkt der Schleifscheibe referenziert. An der Vorderseite des Werkstücks befindet sich der Nullpunkt  $O_W$  des zu bearbeitenden Teils. Alle Koordinaten in der Datei mit CL Daten sind zu

diesem Koordinatensystem referenziert. Für die Ableitung der Form-Shaping-Funktion können mehrere Methoden angewendet werden, jedoch ist die Multiplikation der Transformationsmatrizen eines der effizientesten Verfahren.

Die kinematische Kette besteht aus zwei Teilen, ein Teil ist mit dem Drehtisch, der zweite ist mit dem Spindelstock verbunden. Das Koordinatensystem  $O_C$  beschreibt die Verschiebung entlang der X-Achse am Drehtisch. Die Drehung des Tisches über den Winkel  $\gamma$  um die X-Achse ist durch das Koordinatensystem  $O'_C$  beschrieben. Auf dem Nullpunkt des Werkstücks, der auf der Spannvorrichtung ist, liegt das System  $O_A$ . Die Drehung des Werkstücks in der Spannvorrichtung wird über den Winkel  $\alpha$  um die X-Achse im System  $O'_A$  beschrieben. Das Koordinatensystem  $O_S$  befindet sich im Nullpunkt der Spindel.

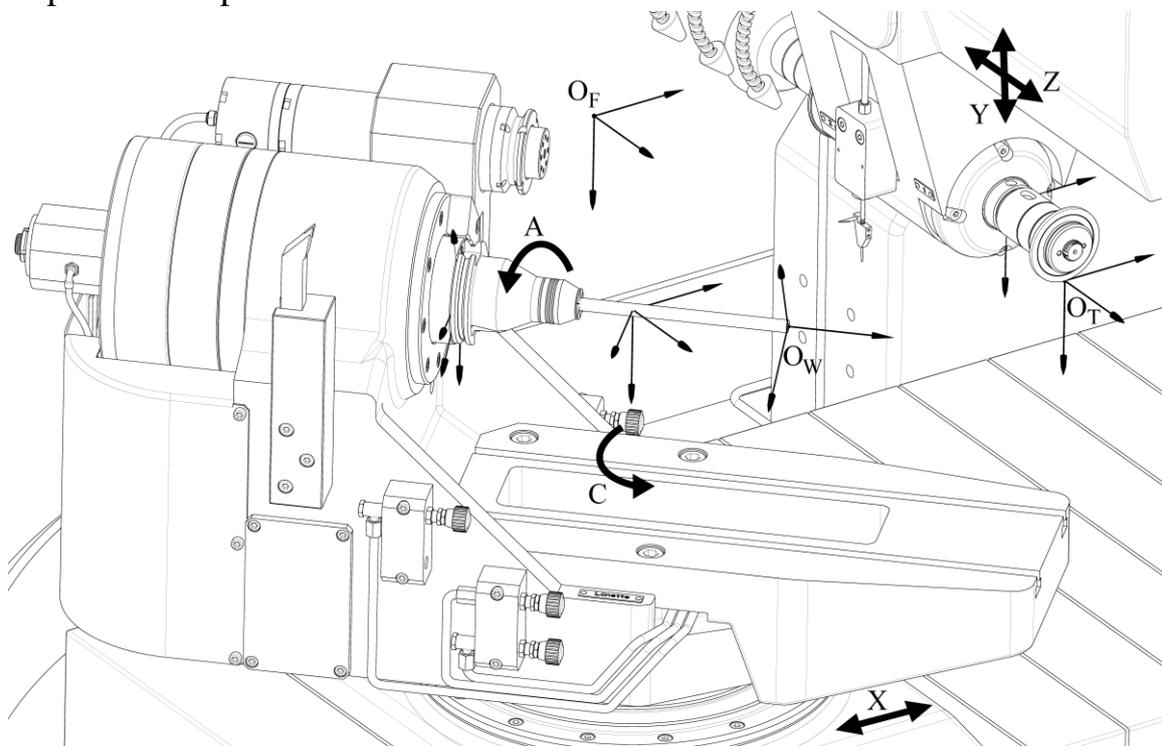


Bild 5 – Nullpunkte und gesteuerte Achsen im Arbeitsbereich der Schleifmaschine

Die Bemaßung der Maschine kann mithilfe von Vektoren, die zwischen festgelegten Koordinatensystemen definiert sind, vorgenommen werden. Diese Vektoren bestehen aus drei Typen von Komponenten, der erste Typ sind die fixen Parameter, z. B.  $v_{FSx}$ ,  $v_{FCy}$ ,  $v_{FCz}$ ,  $v_{CAx}$ , welche durch die Dimensionen der Maschine gegeben sind. Den zweiten Typen stellen die Parameter des Werkstücks  $v_{AWx}$  und des Adapters für die Schleifscheibe  $v_{STz}$  dar. Die dritte Gruppe ist definiert durch die Parameter der gesteuerten Achsen  $v_{FCx}$ ,  $v_{FSy}$  und  $v_{FSz}$ , wie in Bild 6 gezeigt wird.

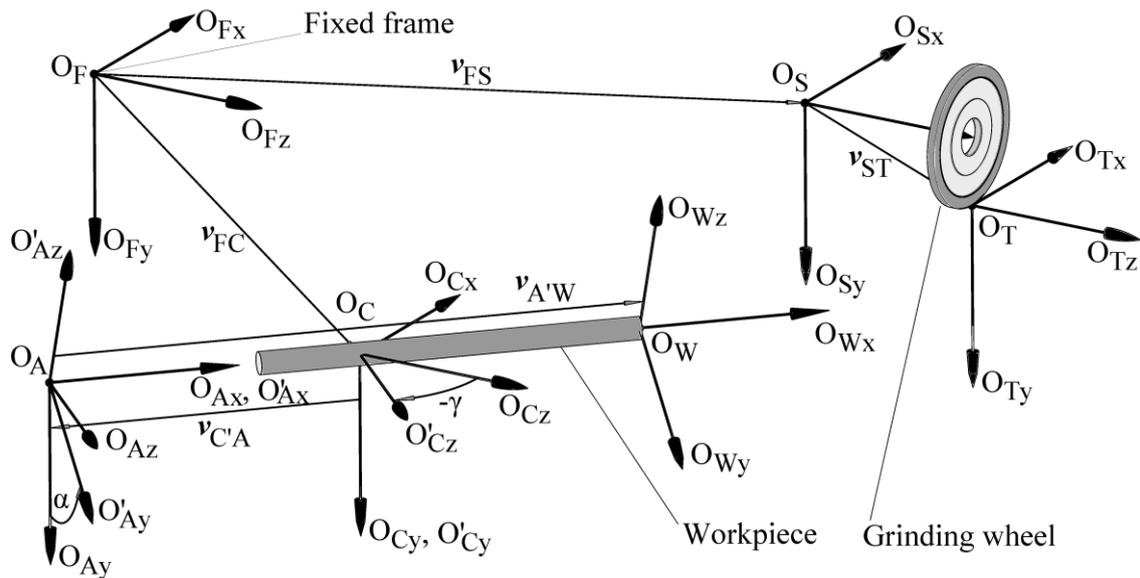


Bild 6 – Koordinatensysteme und Parameter

Für die Koordinatentransformation des Achsenvektors  $a_w$  der Schleifscheibe und des Programmierpunktes  $r_w$  des Werkstück-Koordinatensystems  $O_w$  zum Koordinatensystem  $O_T$  der Schleifscheibe kann die Gleichung (6) verwendet werden:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_T & \mathbf{r}_T \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = {}^{W \rightarrow T} \mathbf{M} \cdot \begin{pmatrix} \mathbf{a}_W & \mathbf{r}_W \\ 0 & 1 \end{pmatrix} = \mathbf{T}_{A'W} \cdot \mathbf{R}_{A'A} \cdot \mathbf{T}_{C'A} \cdot \mathbf{R}_{C'C} \cdot \mathbf{T}_{FC} \cdot \mathbf{T}_{FS} \quad (6)$$

Die Matrix für die Koordinatentransformation aus dem Werkzeug-Koordinatensystem zum Werkstück-Koordinatensystem erhält man aus der inversen Matrix, wie in der Gleichung (7) dargestellt wird:

$${}^{T \rightarrow W} M = {}^{W \rightarrow T} M^{-1} \quad (7)$$

### *Inverse Kinematik*

Die Werkzeugbahnen für den Herstellprozess sind in den üblichen CAD/CAM-Systemen gestaltet. Die Bahnen der Schleifscheibe sind in der CL-Daten-Datei gespeichert, in der alle Koordinaten zum Bezugssystem des Werkstücks  $O_w$  beschrieben sind. Die CL-Daten stellen die Koordinaten des programmierten Punktes und die Richtungskosinus des Achsenvektors dar. Die CL-Daten sind eine neutrale Beschreibung für die Speicherung von Informationen über die Werkzeugbahnen, welche in NC-Programme für verschiedene Maschinen mithilfe eines Postprozessors umgewandelt werden können. In der Praxis wird die Umwandlung in zwei Schritten durchgeführt. Im ersten Schritt werden die Koordinaten der Drehachsen von den

Richtungskosinus aus berechnet. Im zweiten Schritt werden die verbleibenden translatorischen Achsen im Bezug auf die vorher berechneten Winkel bestimmt.

Die Drehwinkel werden wie folgt berechnet. Zuerst wird der Winkel  $\alpha$  bestimmt, dann wird das Werkstück um diesen Winkel  $\alpha$  um die X-Achse gedreht und daraus wird zuletzt der Winkel  $\gamma$  berechnet. Die Gleichungen zur Bestimmung der Winkel  $\alpha$  und  $\gamma$  sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Nach der Berechnung des Winkels  $\alpha$  ist es notwendig, den Achsenvektor des Werkzeuges  $a_w$  wie folgt zu transformieren:

$$\begin{pmatrix} \mathbf{a}_{w \rightarrow \alpha} \\ 0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \mathbf{a}_w \\ 0 \end{pmatrix} \cdot \mathbf{R}_{x,\alpha} \quad (8),$$

wo  $\mathbf{R}_{x,\alpha}$  - eine Rotationsmatrix um die X-Achse um den Winkel  $\alpha$  darstellt.

Während der Verarbeitung von Werkzeugbahnen kann eine besondere Situation, die unter dem Begriff Singularität bekannt ist, auftreten (dritte Zeile in Tabelle 1). Diese Situation passiert, wenn der Achsenvektor der Schleifscheibe parallel zur Spindelachse positioniert ist. In dieser Situation kann der Wert des Winkels  $\alpha$  nicht bestimmt werden. Alle Werte von Winkel  $\alpha$  erfüllen die Bedingung der Parallelität mit der Spindelachse. Für diese Situation kann keine exakte Lösung gefunden werden, eine der in [15] beschriebenen Methoden verformt leicht die Werkzeugbahnen in der Nähe von singulärer Konfiguration.

Tabelle 1 – Lösungen für die Winkel  $\alpha$  und  $\gamma$

| Richtungskosinus |                        | Gleichung                                                   | Richtungskosinus |                         | Gleichung                                                                      |
|------------------|------------------------|-------------------------------------------------------------|------------------|-------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| $j$              | $k$                    |                                                             | $i$              | $k_{\rightarrow\alpha}$ |                                                                                |
| 0                | <0                     | $\alpha = 0$                                                | 0                | <0                      | $\gamma = 0$                                                                   |
| 0                | >0                     | $\alpha = \pi$                                              | 0                | >0                      | $\gamma = \pi$                                                                 |
| 0                | 0                      | <i>Existiert nicht</i>                                      | 0                | 0                       | <i>Ausgeschlossen, <math>j=0</math></i>                                        |
| <0               | $\langle -1,1 \rangle$ | $\alpha = \arctan\left(\frac{k}{j}\right) + \frac{3\pi}{2}$ | <0               | $\langle -1,1 \rangle$  | $\gamma = \arctan\left(\frac{k_{\rightarrow\alpha}}{j}\right) - \frac{\pi}{2}$ |
| >0               | $\langle -1,1 \rangle$ | $\alpha = \arctan\left(\frac{k}{j}\right) + \frac{\pi}{2}$  | >0               | $\langle -1,1 \rangle$  | $\gamma = \arctan\left(\frac{k_{\rightarrow\alpha}}{j}\right) + \frac{\pi}{2}$ |

Für die Berechnung der Bewegungen in den translatorischen Achsen muss der Tisch unter Berücksichtigung von den berechneten Winkeln  $\alpha$  und  $\gamma$  gedreht werden. Dann können zwei Vektoren definiert werden: der Erste aus dem Ursprung des festen Bezugssystems  $O_F$  zum kontrollierten Punkt an der Schleifscheibe  $O_T$ . Der Zweite aus dem Ursprung des festen Bezugssystems  $O_F$  zum programmierten Punkt an der Schleifscheibe. Das Ziel ist eine Koinzidenz zwischen dem Punkt auf der Werkzeugbahn und dem programmierten Punkt an

der Schleifscheibe. Die gewünschten Bewegungen in den translatorischen Achsen können aus der Differenz zwischen den beiden Vektoren berechnet werden.

### *Prüfung des Algorithmus*

Die entwickelten Algorithmen wurden in eine JAVA Anwendung implementiert, die eine einfache grafische Schnittstelle für die vom Benutzer eingegebenen Parametern der Maschine und der Werkstückparameter bietet. Die entwickelte Anwendung liest die Textdatei mit CL-Daten. Aus den gelesenen Werkzeugbahnen können die Koordinaten der kontrollierten Achsen Zeile für Zeile berechnet werden. Schließlich werden die berechneten Koordinaten formatiert und in eine Textdatei mit NC-Programm gespeichert. Die Darstellung der Benutzeroberfläche des Postprozessors ist im Bild 7 zu sehen.

Für die experimentelle Überprüfung wurden die CL-Daten für die Herstellung von zwei Werkzeugen ausgearbeitet. Als erstes Werkzeug wurde ein Wendelbohrer mit drei Nuten und einem Durchmesser von 12 mm ausgesucht. Das Schleifen wurde in den drei folgenden Operationen durchgeführt: Nutenschleifen, Schleifen der Fasen und Stirngeometrieschleifen. Nutenschleifen und Schleifen von Fasen sind die Operationen mit der simultanen Bewegung von drei Achsen (X, A, Z), die vierte und fünfte Achse (C, Y) sind dabei indiziert. Das Schleifen der Bohrspitze, vor allem das Schleifen der großen Flanken, die als Teil der konischen Fläche definiert sind, verlangt die simultane Fünf-Achs-Bearbeitung. Als Werkstückmaterial wurde Vollhartmetall vom Typ K20-F ausgewählt, der ein typisches Material für die Herstellung von Schneidwerkzeugen für eine allgemeine Anwendung darstellt.

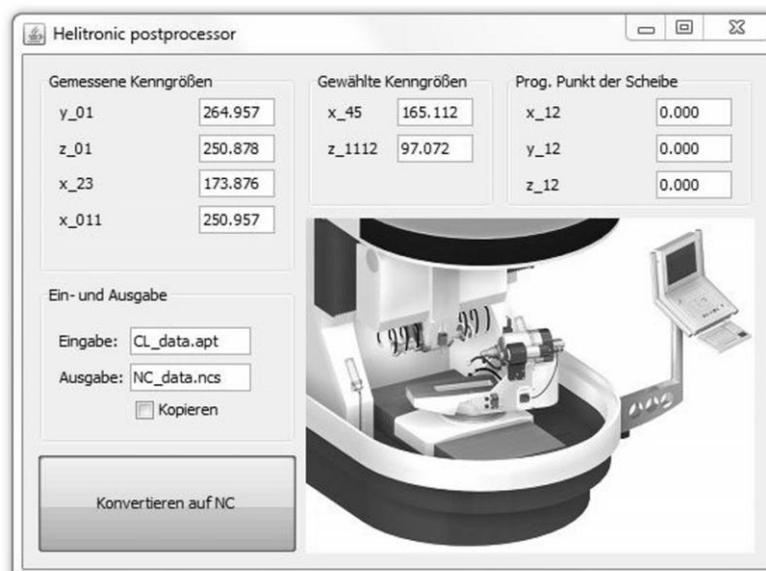


Bild 7 – Speicherauszug der Benutzeroberfläche des Postprozessors

Das zweite Werkzeug war ein zylindrischer Fräser mit einem Durchmesser von 2 mm. Das Schleifen dieses Schaftfräser wurde in vier Operationen realisiert: Nuten, Fasen, Stirnlücken und Freiflächen auf der Stirnseite. Das Schleifen von Nuten und Fasen kann wie beim Bohrer durch Drei-Achs-Bearbeitung (X, A, Z) realisiert werden. Das Schleifen von Stirnlücken und Freiflächen auf der Stirnseite des zylindrischen Fräasers kann ebenfalls mit Drei-Achs-Bearbeitung erfolgen. Für den Schaftfräser wurde Vollhartmetall vom Typ K40-UF ausgewählt. Diese Qualität ist wegen der sehr feinen Körnung für die Herstellung von kleinen Werkzeugen geeignet. Das Schleifen wurde auf der Walter Helitronic Diamond Werkzeugschleifmaschine unter Anwendung des Ölheld Ionogrind-Kühlmittels realisiert. Die hergestellten Schneidwerkzeuge sind in Bild 8 dargestellt.

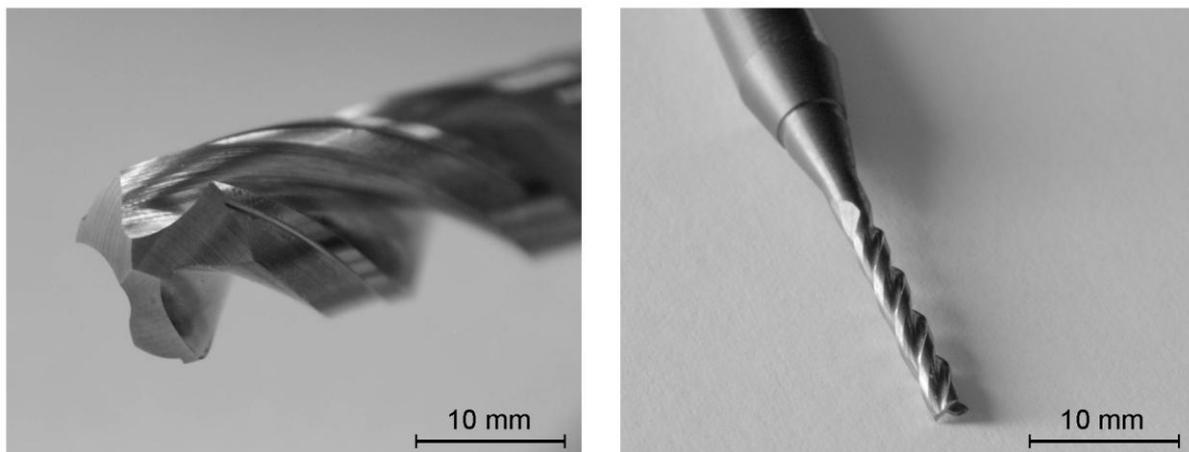


Bild 8 – Herstellung von Schneidwerkzeugen;  
Wendelbohrer mit drei Schneiden (links), Schaftfräser (rechts)

### *Zusammenfassung*

In diesem Artikel wurde ein Postprozessor dargestellt, der für eine 5-Achs-Werkzeugschleifmaschine Walter Helitronic entwickelt wurde. Für die Ableitung der Form-Shaping-Funktion wurde die Multiplikation der transformierten Matrizen verwendet. Für das entwickelte kinematische Modell der Schleifmaschine wurde die inverse Kinematik für Rotations- und Translationsachsen als Lösung gefunden. Die Algorithmen wurden in Java implementiert und für experimentelle Verifikationen während der Herstellung von zwei verschiedenen Arten von Schneidwerkzeugen verwendet.

**Literatur:** 1. Spur, G., Krause, F.-L., Sidaraus, L.: Development of APT and EXAPT, in Rembold, U. und Dillmann, R. (Hrsg.) Methods and Tools for Computer Integrated Manufacturing, Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York Tokyo, 1984, ISBN 3-540-12926-X 2. Lossack, R.-S.: Wissenschaftstheoretische Grundlagen für die rechnerunterstützte Konstruktion, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006, ISBN 978-3-540-29947-9 3. Brill, M.: Parametrische Konstruktion mit CATIA V5, Hanser Verlag, 2006, ISBN 978-3-446-40705-3 4. Krieg, U.: Konstruieren mit Unigraphics NX 6, Hanser Verlag, 2006, ISBN 978-3-446-41562-1 5. Vajna, S., Weber, Ch., Bley, H., Zeman, K., Hehenberger, P.: CA-x-Systeme – warum und wozu?, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009 6. Wyvill, G., Kunii, T. L.: A functional model for constructive solid geometry, The Visual Computer, Vol. 1, No. 1, 1985, S. 3-14 7. Lum, S. K., Tan, S. T., Sze, W. S.: Trimming of free-form objects for a B-Rep solid modeller, Engineering with Computers, Vol. 11, No. 4, 1995, S. 185-198 8. Farin, G.: From Conics to NURBS: A Tutorial and Survey, IEEE Computer Graphics and Applications, Vol. 12, No. 5, 1992, S. 78-86 9. Ma, W., Kruth, J.-P.: NURBS curve and surface fitting for reverse engineering, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 14, No. 12, 1998, S. 918-927 10. Piegl, L., Tiller, W.: The NURBS Book, Springer Berlin, 1997 11. CAM Software PSI+, StarragHeckert Technology AG, Rorschacherberg, Schweiz, 2005 12. Kief, H. B., Roschiwal, H. A.: NC/CNC Handbuch 2007/2008, Hanser Verlag, 2007, ISBN 978-3-446-40943-9 13. Lee, R.-S., She, C.-H.: Developing a postprocessor for three types of five-axis machine tools, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 13, No. 9, 1997, S. 658-665 14. She, C.-H., Huang, Z.-T.: Postprocessor development of a five-axis machine tool with nutating head and table configuration, The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 38, No. 7, 2008, S. 728-740 15. Sørb, K.: Inverse kinematics of five-axis machines near singular configurations, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 47, 2007, S. 299-307 16. Helitronic Programm: CNC-Schleif- und Erodiermaschinen, WALTER Maschinenbau GmbH, Tübingen, 09/2005 17. ANCA Total Precision: The ANCA technology difference, ANCA Pty. Ltd., Bayswater Nord, Victoria, Australia, 2006 18. Karpuschewski, B., Wehmeier, M., Inasaki, I.: Grinding monitoring system based on power and acoustic emission sensors, Annals of the CIRP 49, Vol. 1, 2000, S. 235-240 19. Karpuschewski, B., Inasaki, I.: Monitoring systems for grinding processes, Condition Monitoring and Control for Intelligent Manufacturing, Edited by L. Wang & R. X. Gao, Springer-Verlag London, 2006, S. 83 – 107.