

Numerisch optimierte NC-Programme für räumliche Kurven

Dipl.-Ing. Dipl.-Inform. **Rainer Nolte**, Nolte NC-Kurventechnik GmbH

Kurzfassung

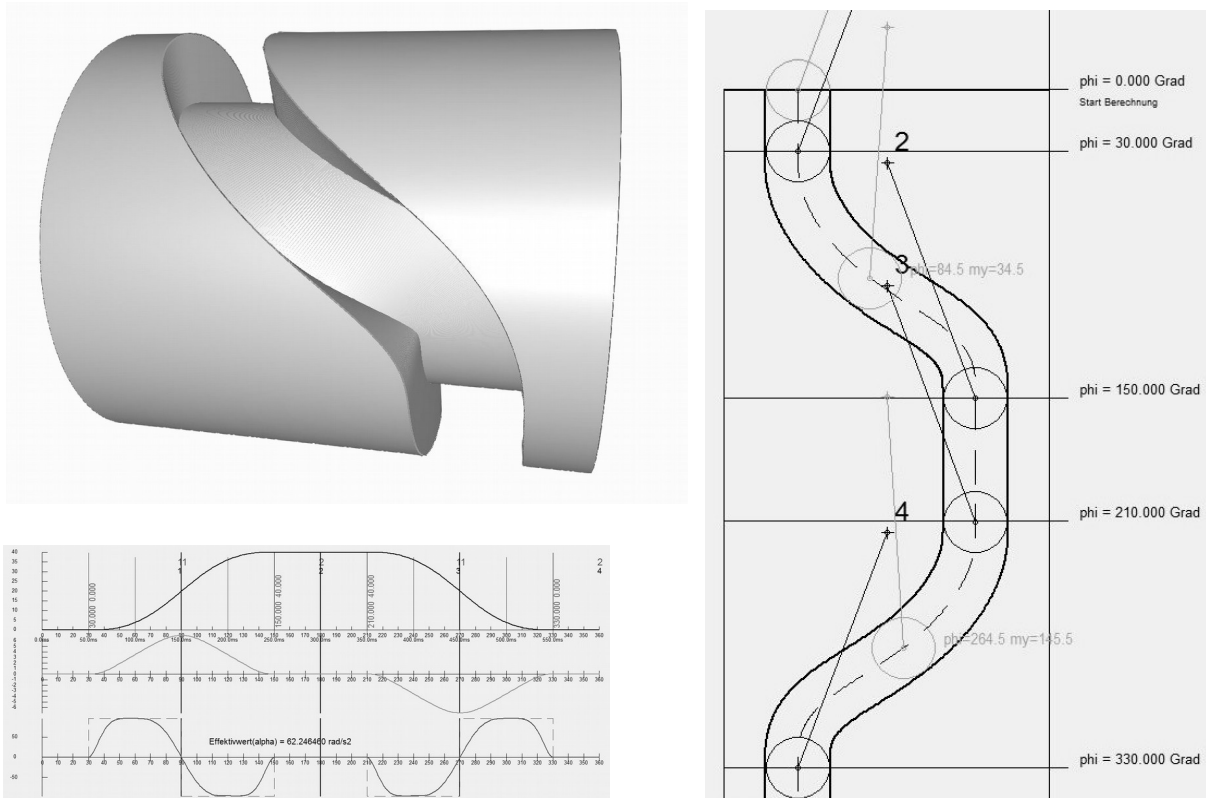
Bei der Herstellung von Zylinder- und Globoidkurven entstehen Abweichungen vom theoretischen Kurvenprofil, wenn der Schlichtwerkzeughdurchmesser nicht dem Rollendurchmesser entspricht, oder wenn die Koordinaten der NC-Sätze näherungsweise über Abwicklungsdarstellungen ermittelt werden. Die Abweichungen verändern das Tragbild zwischen Rolle und Kurve und können im Extremfall dazu führen, dass das Getriebe sich verklemmt. Bei der NC-gesteuerten Herstellung von Fasen an den Kurvenflanken führen die Abweichungen zu stark schwankenden Fassenbreiten über einen Kurvenumlauf. Die Anforderungen an die Qualität mechanischer Kurven wachsen nach wie vor. Mit dem Beitrag soll ein Verfahren zur Ermittlung von NC-Daten vorgestellt werden, wie sich die Abweichungen zwischen einer theoretisch benötigten Kurvenflanke und der sich aus den dazu ermittelten NC-Daten ergebenden Kurvenflanke bei sonst üblicher Fertigungstechnik minimieren lassen. Bei der Herstellung von Fasen führt das Verfahren zu konstanten Fassenbreiten entlang der Kurvenflanke.

Abstract

When cylindrical and globoidal cams are manufactured with tool diameters that are smaller than the roller diameters, there will be deviations between the theoretical cam flanks and the cam flanks actually produced when equidistants are calculated based on developed views referring to the pitch diameter. The deviations change the pressure distribution between cam and roller and let the cam gear block in extreme cases. When chamfers are produced with this simple method, their width very often varies too much. The article presents a method how to generate NC files that minimize the residual errors on produced cam flanks and chamfers.

1. NC-Daten für eine Beispiel-Zylinderkurve

Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf eine Zylindernutkurve mit oszillierendem Schwinghebelantrieb.



Der Rollendurchmesser in diesem Kurvengetriebe beträgt 40 mm, die Nuttiefe 30 mm.

Angenommen, die Werkzeugmaschine verfährt das Werkzeug in den Koordinatenrichtungen X (Richtung der Kurvendrehachse) und Y (in der Bewegungsebene der Rolle und senkrecht zu X) und dreht die Kurve auf dem Rundtisch über die Koordinate A, und man verwendet ein Werkzeug mit dem Durchmesser der Rolle. Dann lassen sich die Fräskoordinaten A, X und Y für das NC-Programm sehr einfach ausrechnen:

A = Kurvendrehwinkel

$X = X_{\text{Hebeldrehpunkt}} + \text{Schwinghebellänge} \cdot \cos(\text{Hebellagewinkel})$

$Y = Y_{\text{Hebeldrehpunkt}} + \text{Schwinghebellänge} \cdot \sin(\text{Hebellagewinkel})$

Theoretisch kann die Kurve damit exakt hergestellt werden.

Aus Kostengründen und zur Optimierung des Fräsprozesses möchte die Fertigung aber ein Standardwerkzeug mit kleinerem Durchmesser verwenden, z.B. 20 mm.

Für die Herstellung der Kurve sind also Koordinaten für eine Äquidistante zu berechnen.

Die Möglichkeiten der NC-Steuerungen im Feld in Bezug auf die Koordinatentransformation bei räumlichen Kurven sind sehr unterschiedlich. Während es bei ebenen Kurven üblich ist, in NC-Programmen das Kurvenprofil abzubilden und dann die Werkzeugradiuskorrektur der Steuerung für die Berechnung der Werkzeugmittelpunktkoordinaten zu verwenden, steht diese Funktion für räumliche Kurven nur bei wenigen NC-Steuerungen zur Verfügung. NC-Programme für räumliche Kurven beziehen sich deshalb üblicherweise auf einen vorher festgelegten Werkzeugdurchmesser. Beim Wechsel des Werkzeugs ist ein neues NC-Programm zu erstellen.

Hier als Beispiel ein Ausschnitt aus einem solchen NC-Programm in ISO-Code:

```
N360X-54.950Y-7.887A58.176
N362X-54.620Y-8.037A58.535
N364X-54.285Y-8.186A58.892
N366X-53.947Y-8.335A59.248
N368X-53.605Y-8.484A59.601
```

Bei modernen NC-Steuerungen kann die Werkzeugbahnkorrektur auch dadurch implementiert werden, dass Terme statt fester Zahlen als Koordinatenwerte angegeben werden.

Beispiel:

```
N473 G1 X=-10.7136248+R41*(0.14284833) Y=74.5816636+R41*(-0.98974459) A=98.2127006
N474 G1 X=-11.3391279+R41*(0.15118837) Y=74.4886921+R41*(-0.98850497) A=98.6958007
N475 G1 X=-11.9638246+R41*(0.15951766) Y=74.3904499+R41*(-0.98719507) A=99.1789007
N476 G1 X=-12.5876710+R41*(0.16783561) Y=74.2869440+R41*(-0.98581500) A=99.6620008
```

Der Parameter R41 dient dabei zur Verrechnung der Differenz zwischen tatsächlichem Werkzeugradius und dem Bezugs-Werkzeugradius, für den die konstanten Anteile in den einzelnen Termen berechnet wurden. Die Zahlen in Klammern, die mit R41 multipliziert werden, legen die Korrektur-Richtung fest, entsprechen also dem Normalenvektor auf die Kurvenbahn.

2. Berechnung der Äquidistante mit Hilfe von Abwicklungsdarstellungen

Für die zeichnerische Darstellung von Zylinderkurven wird die Abwicklungsdarstellung verwendet, die in die Ebene entwickelte Ansicht der räumlichen Kurve von außen. Die Abwicklungsdarstellung bezieht sich immer auf einen Zylinderdurchmesser. Es ist verbreitet, die Abwicklung auf den Außendurchmesser der Kurve zu beziehen, besser ist es aber, den Wirkdurchmesser zu verwenden, d.h. den Abstand der Kurvendrehachse von der Ebene, in der der Kontaktpunkt der (balligen) Rolle verfährt. Wenn zylindrische Kurvenrollen verwendet werden, die über ihre gesamte Länge Kontakt haben sollen, sollten die Kurvenflanken ohne Profilabweichung hergestellt werden, d.h. letztlich mit Schlichtwerkzeughdurchmesser = Rollendurchmesser. Die durch kleinere Werkzeuge verursachten Profilabweichungen führen dazu, dass die Rollen effektiv nur auf einer Kante laufen, wechselweise die obere oder die untere.

Die Abwicklungsdarstellung transformiert die räumliche Kurvenbahn in eine Ebene, so dass Äquidistanten wie bei ebenen Kurven ermittelt werden können.

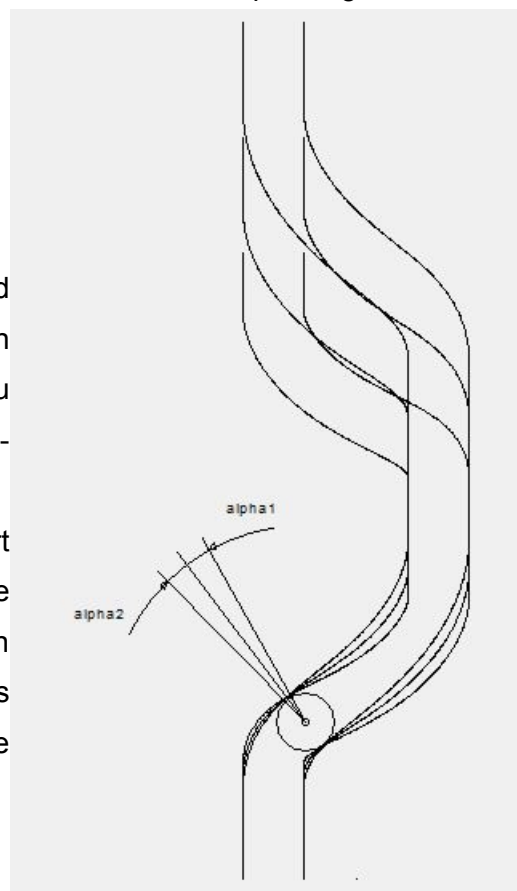
Die Koordinaten der Abwicklungsdarstellung der Rollenmittelpunktbahn lassen sich aus den Koordinaten X und Y der Rollenmitte und dem Kurvendrehwinkel ϕ folgendermaßen berechnen:

$$X_{\text{Abwicklung}} = X$$

$$Y_{\text{Abwicklung}} = Y - \text{Kurvendurchmesser}/2 \cdot \phi$$

Damit sind auch Tangenten- und Normalenrichtungen für die Kurvenbahnen berechenbar, und über die Normalenrichtung zu einem Rollenmittelpunkt die entsprechenden Profil- und Werkzeugmittelpunkte.

Mit dem angenommenen Kurvendurchmesser variiert die Länge der Abwicklung und damit die Normalenrichtungen, also auch die zu errechnenden Werkzeugmittelpunkt- und Profilpunkte. Das nebenstehende Bild zeigt für die Musterkurve die



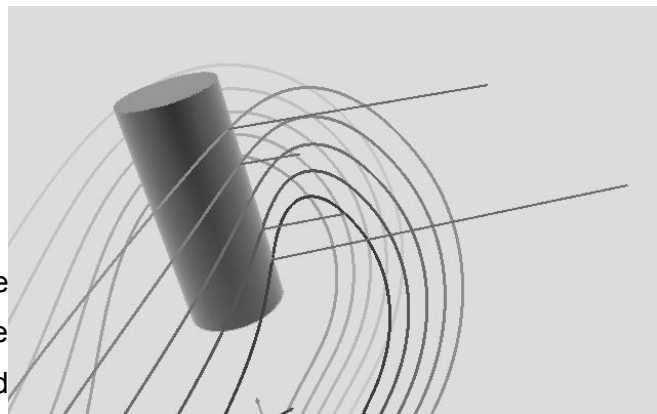
Abwicklungen für den äußeren, den kinematisch wirksamen und den inneren Kurvenflankendurchmesser.

Mit den NC-Daten soll die Kurvenflanke in der Regel in voller Höhe in einem Schnitt geschichtet werden, so dass in einem NC-Satz nur eine Normalenrichtung bzw. ein Kurvendurchmesser berücksichtigt werden kann, am ehesten der Wirkdurchmesser. Da diese Normalenrichtung für die anderen Kurvendurchmesser nicht stimmt und mit der „falschen“ Richtung das theoretische Kurvenprofil nicht erreicht wird, entstehen dort Profilabweichungen in Form von Aufmaßen, d.h. es bleibt immer zuviel Material stehen. Die entstehenden Profilüberhöhungen hängen ab von

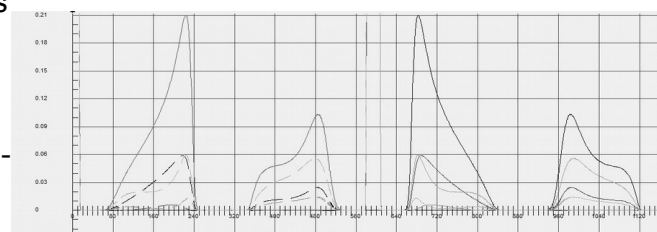
- der Differenz zum Kurven-Wirkdurchmesser
- der Steigung der Rollenmittelpunktbahn in der Abwicklungsdarstellung
- dem Äquidistantenabstand (Rollenradius-Werkzeugradius)

Bei balligen Kurvenrollen sind diese Profilabweichungen unkritisch, für die Schmiegun g zwischen Kurve und Rolle sogar förderlich, solange der Kurvenprofilfehler sich entlang der Rollenachse (d.h. über den Kurvendurchmesser) weniger stark entwickelt, als sich der Radius der balligen Rolle entlang der Achse verkleinert.

Bei großer Kurvensteigung oder großem Äquidistantenabstand wächst der Profilfehler aber so stark, dass die Rolle in der Zylinderkurvennut festklemmt bzw. bei einer offenen Kurve entweder auf dem äußeren oder dem inneren Flankenrand auf der Kante läuft.



Im nebenstehenden Diagramm für die Beispielkurve beträgt die maximale Profilüberhöhung am Kurvenflankenrand 0.21 mm. Auf dieser Höhe ist der Radius der balligen Rolle (R500) um $500 - \sqrt{(500^2 - 15^2)}$ mm = 0.225 mm kleiner als auf Höhe des Nenn-durchmessers von 40 mm.



Profilabweichung auf verschiedenen Kurvendurchmessern in der Steigung

3. Fasen-NC-Programme mit Kompensation der Kontaktpunkt-Mittenauswanderung

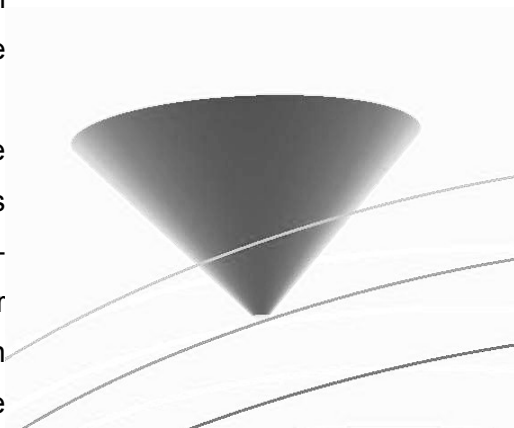
Nicht nur die Kurvenflanken selbst, sondern Fasen an den äußeren Rändern der Kurvenflanken können CNC-gefertigt werden, um den Aufwand für das manuelle Entgraten zu vermeiden und ein hochwertiges Finish zu erzeugen. Da Fasen mit konischen Werkzeugen gefertigt werden, hängt die Fassenbreite von der Eindringtiefe ab. Schon relativ kleine Schwankungen in der Eindringtiefe bewirken unregelmäßig aussehende Fasen, also ein schlechtes Ergebnis. Bei der Kurvenflanke hingegen können Schwankungen in der Eindringtiefe eher toleriert werden, da die Nuttiefe mit gewisser Reserve festgelegt wird.

Schwankungen in der Eindringtiefe des Werkzeugs ergeben sich, wenn das Werkzeug bei einem Schwinghebelabtrieb oder durch die Werkzeugbahnkorrektur in einer Ebene quer zur Kurvendrehachse verfährt, also bei den oben verwendeten Koordinaten in Y-Richtung. Insbesondere der Kontaktpunkt zwischen Rolle und Kurvenflanke bzw. Fase schwankt in dieser Außermittigkeit. Der Kurvenradius für den Kontaktpunkt ergibt sich aus

$$\text{Kontaktpunkt-Radius} = \sqrt{(\text{Kurvenaußenradius}^2 + \text{Kontaktpunkt-Y-Koordinate}^2)}.$$

Für eine konstante Fassenbreite muss deshalb das konische Werkzeug entlang seiner Achse nachgeführt werden, oder es muß entsprechend dem Konuswinkel eine Korrektur in der XY-Ebene erfolgen.

Ein weiteres Problem aber ist, dass das konische Werkzeug „schief“ auf der Fase steht, wenn es außermittig schneidet (siehe Bild). Um den Fassen-Richtungsvektor im Kontaktpunkt in der Bewegungsebene des Werkzeugs zu halten, kann



der Kontaktpunkt durch Drehung der Kurve über die Rundtischachse über die Kurvendrehachse gebracht werden, so dass die Y-Koordinate des Kontaktpunkts auf 0 gesetzt werden kann. Die Mittelpunktkoordinaten für das Werkzeug ergeben sich dann aus einer Äquidistantenberechnung wie in Abschnitt 2, ausgehend vom Kontaktpunkt mit $Y=0$.

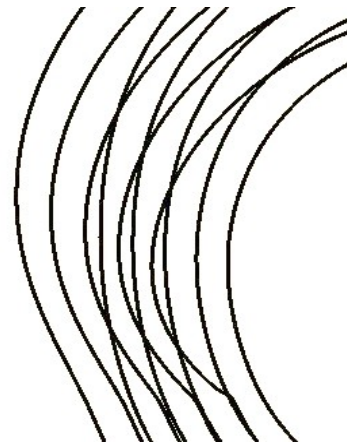
4. Berechnung genauer Kurvenflanken-Raumkurven

In den bisherigen Ausführungen wurden die Kurvenflanken und die Werkzeugmittelpunktbahnen über die Abwicklungsdarstellung und bezogen auf einen Kurvenwirkdurchmesser berechnet. In der Höhe der Kurvenflanke treten so Profilüberhöhungen auf, wenn die Kurve hergestellt wird. Um zu genaueren Kurvenflanken bei Verwendung von Werkzeugen zu kommen, deren Durchmesser stark vom Rollendurchmesser abweicht, sollten zunächst die Kurvenflanken in ihrer vollen Höhe genau berechnet werden. Dazu wird die Kurvenflanke in Höhenrichtung in mehrere Segmente zerlegt, und die Kanten dieser Segmente werden als Raumkurven berechnet. In der Regel reicht es aus, zwei Segmente bzw. drei Raumkurven zu verwenden: die Ränder und die Mitte der Kurvenflanke.

Als Maß für die Höhe der zu berechnenden Profilpunkte sind zwei Ansätze denkbar:

a) Der Abstand des Kontaktpunkts zwischen Kurve und Rolle zu einer Stirnfläche der Rolle

Dieser Ansatz führt zu Raumkurven mit teilweise stark schwankendem Radius, die die sich kinematisch ergebenden Schwankungen in der Eindringtiefe der Rolle und des Kontaktpunkts im Kurvenkörper nachbilden. In der Seitenansicht sind diese Radius-Schwankungen als Ausbeulungen zu sehen. Solche Ausbeulungen erschweren im CAD das Austragen von Kurvennuten über die Raumkurven. Auch Unterschnitt ist an solchen Raumkurven schwer erkennbar.



b) Der Abstand des Kontaktpunkts zur Kurvendrehachse

Hier sehen die Raumkurven in der Seitenansicht kreisförmig aus. Wenn die Kurvenrolle in Y-Richtung sehr stark auswandert, wie es z.B. bei manchen Schrittgetrieben der Fall ist, läßt sich aber nicht mehr für alle vorgegebenen Bezugsdurchmesser ein Kontaktpunkt berechnen. Die Raumkurve müßte an dieser Stelle nach einem anderen Kriterium stetig und knickfrei fortgesetzt werden, was schwierig ist.

Eines dieser beiden Kriterien wird nun für die Festlegung der Höhe eines Kontaktpunkts (= Raumkurvenpunkt) verwendet.

Zur numerischen Berechnung eines Raumkurvenpunktes mit 3 Koordinaten sind zwei weitere Bedingungen notwendig:

- der Abstand des Raumkurvenpunktes von der Rollachse muss dem Rollradius entsprechen
- der Vektor vom Raumkurvenpunkt zu seiner Projektion auf die Rollachse muss senkrecht zur Bewegungsrichtung des Kontaktpunkts bzw. seiner Projektion auf die Rollachse liegen

Aus diesen drei Bedingungen können für jede Lage der Rolle im Kurvenkörper zwei Profilpunkte bzw. Raumkurvenpunkte berechnet werden: für jede Flanke einer Nutkurve einer.

5. Numerische Optimierung der NC-Daten für die Werkzeugmittelpunktbahn

Ausgehend von den Raumkurven, die die Kurvenflanken in verschiedenen Höhen beschreiben, kann für jede Position längs der Kurvenflanke die Lage eines Werkzeugs mit gegebenem Durchmesser iterativ so optimiert werden, dass der Abstand der Raumkurven vom Werkzeugmantel längs der Werkzeugachse möglichst wenig schwankt. Als Startvorgabe für die Iteration kann die Werkzeuglage verwendet werden, die sich aus der klassischen Berechnung über die Abwicklungsdarstellung ergeben würde.

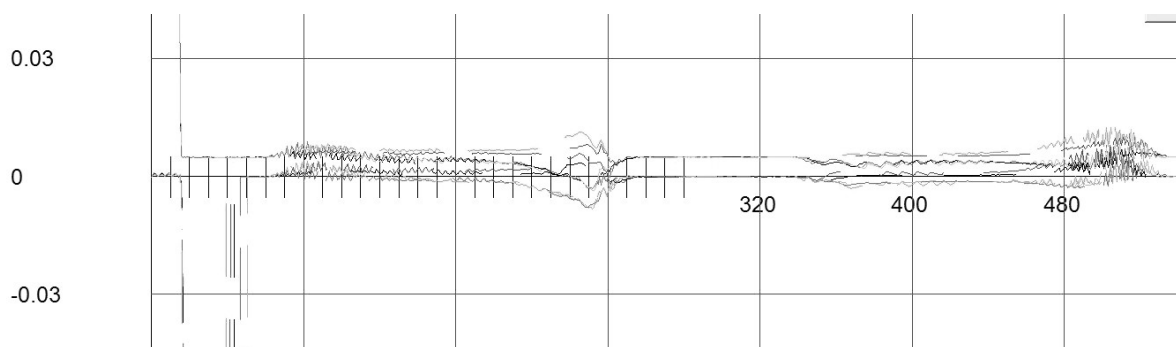
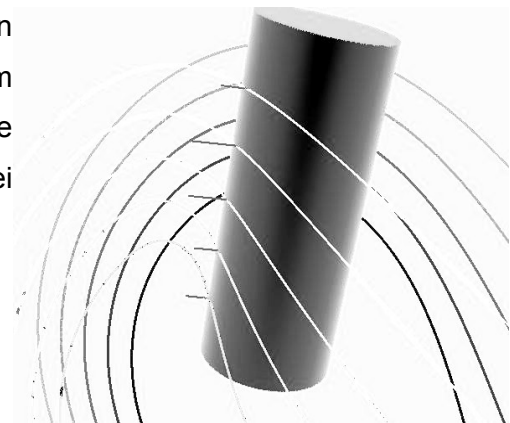
Wenn die Kurve mit einer 4-Achsen-Werkzeugmaschine (XYZ und Rundtisch) hergestellt werden soll, wird die Position des Werkzeugs auf einer Geraden variiert, die durch den Profilpunkt auf einer der Raumkurven läuft und in der XY-Ebene im Raumkurvenpunkt senkrecht auf der Raumkurve steht. Außerdem kann das Werkzeug für die Optimierung um eine Gerade gedreht werden, die parallel zur Kurvendrehachse liegt und sowohl die eben genannte Gerade als auch die Werkzeugachse schneidet.

Wird eine 5-Achsen-Werkzeugmaschine verwendet wie bei der Herstellung von Globoidkurven, so kann das Werkzeug für die Optimierung um zwei verschiedene Achsen gedreht werden, die zueinander und zur Werkzeugachse senkrecht stehen.

Das Drehen der Werkzeuge führt zu Änderungen der Rundtischkoordinate (hier A) und bei der 5-Achsen-Variante zu Änderungen in einer zusätzlichen Schwenkachse (z.B. B).

Bei der Optimierung von Fasen-NC-Programmen wird nur die äußere Raumkurve genutzt. Der Kontaktpunkt wird zunächst auf $Y = 0$ gelegt mit entsprechender Kompensation durch Drehen der Rundtischachse, dann wird der Abstand der Werkzeugachse zur Raumkurve optimiert. Für diese Berechnung ist nicht unbedingt eine Iteration erforderlich.

Mit der 5-achsigen Optimierung der NC-Koordinaten ergibt sich für die Musterkurve bei dem Werkzeugdurchmesser 20 mm eine maximale Profilabweichung von ca. 0.01 mm (statt 0.21 mm bei der klassischen Methode), siehe Bilder.



6. Literaturangaben

[1] Matthes, J.; Heine, A.; Berger, M.: „Methode zur Fertigung von Zylinderkurvenkörpern räumlicher Kurvengetriebe mit Fräserradienkorrektur.“, VDI-Berichte 2116, VDI-Verlag Düsseldorf, ISBN 978-3-18-092116-7

[2] Berger, M. (Hrsg.): 3. Saxon Simulation Meeting and Mathcad Workshop (SAXSIM). Tagungsband (CD), Chemnitz, 18.+19.4.2011, ISBN 978-3-941003-31-6; Beitrag von Matthes, J.: „Hüllkurven-Berechnung der Fräserradienkorrektur von Zylinderkurvenkörpern mit Mathcad“