

Schnellere Maschinen mit wenig Aufwand

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

Unser Service für Sie:

Wie die Aufbereitung bestehender Kurven alten Maschinen zu neuer Geschwindigkeit verhilft.

Hersteller von Verbrauchsgütern oder von Zulieferteilen wollen eine kurvengesteuerte Maschine möglichst überholen und dann weiter betreiben, wenn die verschleißenden Teile ihre Lebensdauer erreicht haben.

Diese Maschinen sind oft so solide, daß sie eigentlich noch nicht gegen eine neue Maschine ausgewechselt werden müßten.

Gerade bei älteren oder auch zugekauften Maschinen fehlen aber vielfach die notwendigen Unterlagen wie z.B. NC-Daten oder Berechnungsgrundlagen, um die verschlissenen Kurven nachzufertigen.

Um solche Kurven mit einfachen Mitteln aufzunehmen, dann ohne Eingriff in den Funktionszusammenhang der Maschine zu optimieren und schließlich Fertigungsunterlagen für die neuen Kurven bereitzustellen, hat Nolte NC-Kurventechnik im Laufe der letzten Jahrzehnte viel Know How und eigene Berechnungswerkzeuge entwickelt.

In der Regel laufen die nachoptimierten Kurven deutlich ruhiger und schneller als die Originalkurven, obwohl am Bewegungsablauf „*eigentlich*“ gar nichts verändert wurde.

An einem Beispiel wollen wir zeigen, wie eine solche Optimierung abläuft:

Bild 1 zeigt eine Kurvenscheibe, wie sie aus einer Maschine ausgebaut wurde und nun aufbereitet werden soll.

Es wird angenommen, daß keine Konturdaten für die Kurvenbahn verfügbar sind.

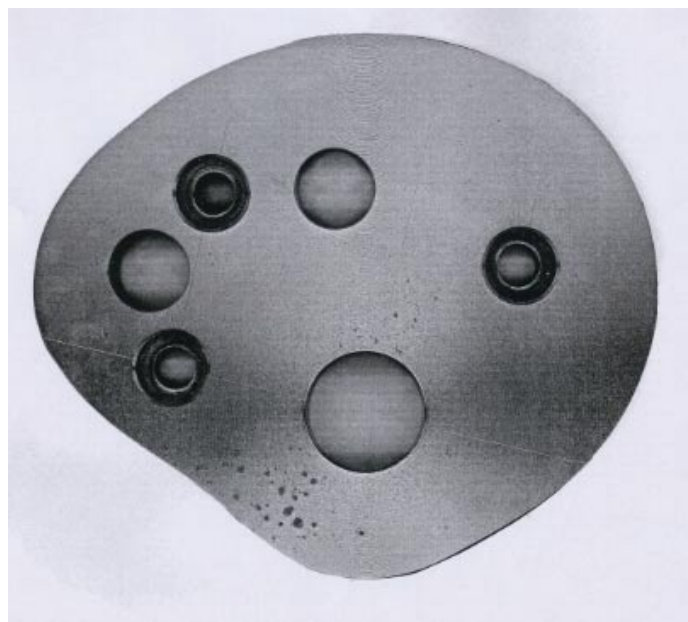


Bild 1

Schritt 1: Kurvenbahn vermessen

Um eine neue Kurvenbahn optimieren und berechnen zu können, muß der tatsächliche Bewegungsverlauf auf der Kurve erst einmal ausgemessen werden.

Die neue Kurve soll dann den Originalverlauf mit vorgegebenen maximalen Abweichungen und harmonischem Bewegungsablauf nachbilden.

Dazu müssen gleichzeitig die Kurvenbahn, die Mittenbohrung und ggf. ein Referenzelement für die Winkellage der Kurve – z.B. eine Paßfedernut oder eine Indexbohrung – vermessen werden.

Für das Vermessen der Kurve kommen verschiedene Verfahren in Frage, deren Eignung von den allgemeinen Anforderungen an die Positionsgenauigkeiten beim Durchlaufen von Funktionsbereichen oder beim Erreichen von Endlagen abhängen.

Für die bewegungstechnische Qualität der aufbereiteten Kurve, d.h. die erreichbare Laufruhe und Taktzahl, ist die Qualität des Meßverfahrens jedoch nicht entscheidend. Die hohe Bewegungsqualität wird durch die von Nolte praktizierte Art der anschließenden Datenaufbereitung erreicht.

a) Kurve vermessen mit einer Koordinatenmeßmaschine

Dies ist sicher das genaueste, aber auch das aufwändigste Meßverfahren für die Aufnahme der Kurvenkontur, der Mittenbohrung und der Winkellage-Referenz. Ergebnis der Messung ist eine Tabelle der kartesischen oder der polaren Koordinaten der Kurvenbahn, aus der auch eine Geometriedatei für die Kurvenbahn im DXF-Format erzeugt werden kann.

b) Kurvenbahn mit einer speziellen Meßapparatur vermessen

Firmen, die häufiger Kurven ausmessen, bauen sich mitunter selbst Meßapparaturen für die Kurvenmessung. Solch eine Meßapparatur könnte z.B. eine Achse für die Aufnahme der Kurvenscheibe und eine zweite Achse für die Aufnahme eines Tasthebels enthalten. Die Kinematik der Apparatur mit Hebellänge, Achsabstand und Tastrollendurchmesser liegt fest, und an beiden Achsen – für die Kurvendrehung und die Hebeldrehung – nehmen Drehgeber synchron die Lage-Istwerte auf. Dreht man die Kurve langsam, während die Kurve die Tastrolle führt, erhält man über die Drehgebersignale den Verlauf des Hebelschwingwinkels über dem Kurvendrehwinkel in Form einer Wertetabelle. Über die festliegende Meßkinematik kann man aus dem Schwingwinkelverlauf die kartesischen oder die polaren Koordinaten der Kurvenbahn errechnen und auch eine Geometriedatei im DXF-Format erzeugen.

Für Kurven mit exakt einzuhaltenden Funktionsbereichen (z.B. Synchronlauf mit einer anderen Kurve) oder sehr hohen Ansprüchen an die Genauigkeit der Kurvennachbildung sind diese Verfahren notwendig, um die Kurve zu vermessen.

In der Praxis sollen die Kurven aber oft nur bestimmte Hübe in bestimmten Zeiten durchlaufen und manchmal auch bestimmte kollisionskritische Zwischenpunkte einhalten, oder es sind Bahnkurven mit einer bestimmten Charakteristik abzufahren. Normalerweise sind bei solchen Kurven Zwischenpunkt-Lageabweichungen in der Größenordnung von einigen Zehnteln nicht bedenklich.

Dann können die Kurven ohne nennenswerten Qualitätsverlust auch mit sehr einfachen und kostengünstigeren Verfahren vermessen werden:

c) Hubverlauf manuell an der Maschine ermitteln

Solange die Kurve noch in der Maschine eingebaut ist, kann die Kurvenwelle in definierten Winkelschritten – beispielsweise 2 Grad – gedreht und parallel dazu die Lage des Abtriebsgliedes in bezug auf eine Referenzkante gemessen und protokolliert werden. Dieses mobile Messen an der Maschine ist jedoch meist ungenau, da weder der Kurvendrehwinkel exakt vorgegeben noch die Bewegung des Abtriebsgliedes exakt erfaßt werden können.

Über die Kinematik der Maschine kann rechnerisch die Ist-Kurvenbahn ermittelt und in Form einer DXF-Datei bereitgestellt werden.

d) Auf Papier durchpausen und vermessen

Dieses Verfahren funktioniert nur für Außenkurven wie in diesem Beispiel. Man legt die Kurve auf einen Bogen Papier und umreißt die Kurvenbahn, die Mittenbohrung und das Referenzelement mit einem Stift. Man ermittelt daraus zunächst zeichnerisch den Mittelpunkt der Mittenbohrung und fügt der Zeichnung ein Meßraster mit einem Winkelschritt von z.B. 5 Grad hinzu. In diesem Meßraster mißt man die Kurvenbahnradien für jeden der Meßstrahlen aus, also die Abstände des Mittelpunkts der Mittenbohrung zum Schnittpunkt der Innenkante der aufgezeichneten Kurvenbahn mit dem jeweiligen Meßstrahl.

Beim Durchpausen ist darauf zu achten, daß sich die Kurve während der gesamten Aufzeichnung auf dem Bogen Papier nicht verdreht und nicht verschiebt.

Überträgt man die gemessenen Werte für Winkel und Radius in eine Zeichnung, kann eine DXF-Datei für die Kurvenbahn ausgegeben werden.

Die Lage des Winkelreferenzelements muß ebenfalls zeichnerisch vermessen werden. Damit wird die DXF-Geometrie in eine definierte Lage gedreht.

Man kann die Vermessung vereinfachen, wenn man den Bogen mit der durchgepausten Kurve scannt und dann mit einem Grafikprogramm verarbeitet (siehe auch e).

e) Kurve scannen

Diese Variante ist bequemer als das Durchpausen von Hand. Die Kurve wird direkt oder mit Hilfe einer Fotokopie gescannt und mit einem Grafikprogramm so vektorisiert, daß eine DXF-Datei für die Kurvenbahn entsteht.

Bild 2

In der Software OPTIMUS MOTUS® verfügt Nolte über Funktionen, um aus der DXF-Datei zunächst recht genau den Mittelpunkt der Mittenbohrung zu ermitteln und dann den Verlauf der Kurvenbahn nachzubilden.

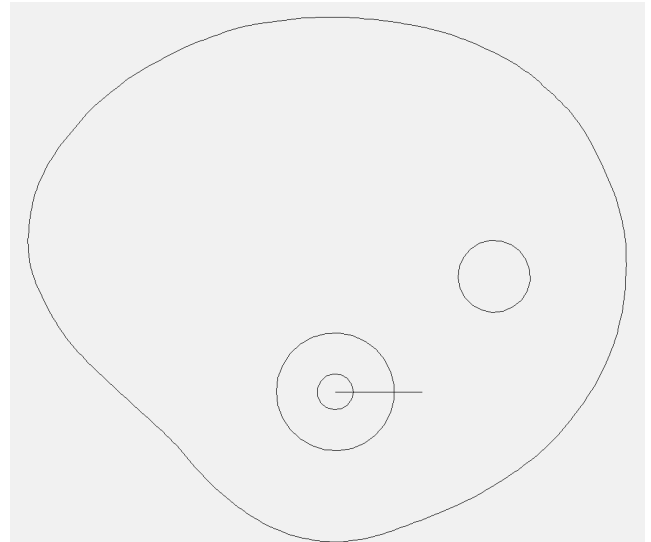
Da der Scanner in beiden

Koordinatenrichtungen leicht unterschiedliche Skalierungsfaktoren verwenden kann, mißt man zusätzlich mit einem Meßschieber den größten und den kleinsten Kurvenbahnradius und ggf. die maximale Ausdehnung der Kurve in Querrichtung dazu direkt an der Kurve aus.

Dann skaliert man die DXF-Geometrie in

Horizontal- und in Vertikalrichtung so, daß die an der Kurve gemessenen Radien und das Querausdehnungsmaß eingehalten werden.

Schließlich wird die DXF-Geometrie so gedreht, daß das Winkellage-Referenzelement in einer definierten Lage liegt. Bild 2 zeigt eine solche DXF-Kurvengeometrie.



Bei allen Verfahren sollten zum Abgleich und zur Kontrolle mit einem Meßschieber der minimale und der maximale Kurvenradius direkt von der Kurve abgenommen werden. Die Aufbereitung des Ist-Bewegungsdiagramms orientiert sich an diesen recht genau ermittelbaren Maßen. So ist gewährleistet, daß bei der nachgebildeten Kurve Außendurchmesser und Hub den Werten der Originalkurve entsprechen.

Bei der Beispielkurve beträgt der kleinste Kurvenradius 41.5 mm. Der größte Kurvenradius beträgt 104 mm. Der Rollendurchmesser beträgt 35 mm.

Schritt 2: Ist-Bewegungsverlauf der Kurve ermitteln

Nach der Vermessung der Kurve liegt entweder eine DXF-Datei der gemessenen Kurvenbahn mit bekanntem Kurvendrehpunkt und definierter Winkellage vor, oder es steht eine Tabelle für den Kurvenbahnradius über dem Kurvendrehwinkel zur Verfügung.

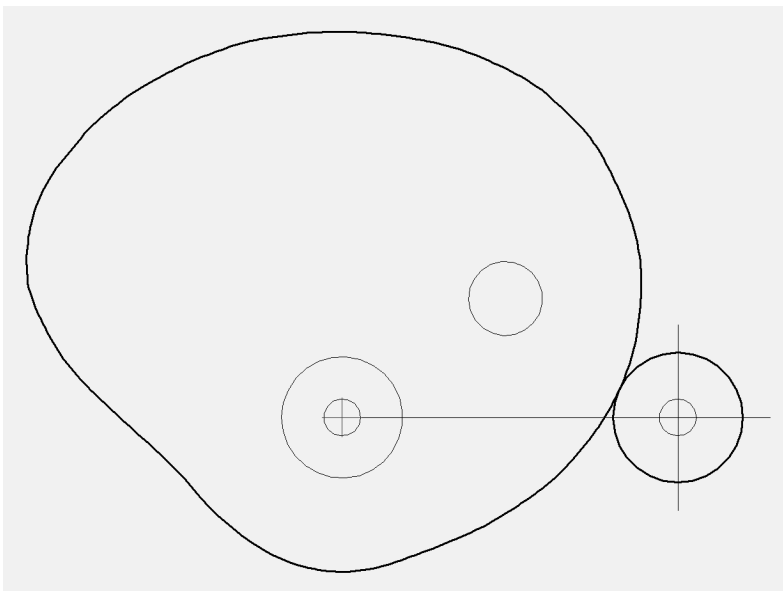
Falls eine Tabelle Radius(Winkel) für das Kurvenprofil vorliegt, sollte sie möglichst auf die Rollenmittelpunktsbahn der Kurve umgerechnet werden, weil sich das Bewegungsdiagramm im Kurvengetriebe immer auf die Rollenmitte bezieht. Optimiert man im nachfolgenden Schritt das Bewegungsdiagramm in Bezug auf das Kurvenprofil, d.h. mit dem angenommenen Rollendurchmesser 0 , so erhält man beim Betrieb der Kurve mit dem echten Rollendurchmesser einen verzerrten, teilweise extrem verzerrten Beschleunigungsverlauf mit sehr stark überhöhten Beschleunigungswerten oder sogar heftigen Stößen. Je nach den Krümmungsverhältnissen des Kurvenprofils kann der Einfluß des berücksichtigten Rollendurchmessers auf den Beschleunigungsverlauf zu groß werden. Aus diesem Grunde sollten sich der ermittelte Ist-Bewegungsablauf und die nachfolgende Optimierung auf die Rollenmittelpunktsbahn der Kurve beziehen.

Mit OPTIMUS MOTUS ® kann Nolte die Radientabelle der Kurve als Konturverlauf einlesen und über eine Äquidistantenberechnung unmittelbar in eine DXF-Kontur und weiter in eine Tabelle Radius(Winkel) für die Rollenmittelpunktsbahn umrechnen.

Liegt das Kurvenprofil als DXF-Datei vor, so wird der Verlauf des Rollenmittelpunktsbahnradius über dem Kurvendrehwinkel durch eine einfache Simulation ermittelt, eine kinematische Analyse des Kurvengetriebes.

Die so ermittelte Tabelle Rollenmittelpunktsbahnradius(Kurvendrehwinkel) beschreibt das Ist-Bewegungsdiagramm für den Hub der Kurvenrolle, als ob die Rolle auf einem zentrisch geführten Abtriebsschieber liegen würde (siehe Bild 3).

Bild 3



In Wirklichkeit ist das Kurvenabtriebsglied aber nicht immer ein zentrischer Stößel, sondern kann auch ein exzentrischer Stößel, ein Hebel oder eine komplexere Kinematik sein. Auch die in dieser Simulation berücksichtigte Kinematik hat natürlich Einfluß auf den Beschleunigungsverlauf, aber dieser Einfluß ist nicht entscheidend für die Bewegungsqualität der später optimierten Kurve. Entspricht die Kinematik der Simulation nicht der des echten Kurvengetriebes,

so erhält man zwar auch einen (moderat) verzerrten Beschleunigungsverlauf. Da sich aber die Optimierung des Bewegungsdiagramms auf die gleiche Kinematik beziehen wird, wie sie in der Simulation verwendet wurde, und da der optimierte Bewegungsverlauf den in der Simulation gefundenen mit möglichst geringen Abweichungen nachbilden soll, werden diese kinematischen Verzerrungen quasi automatisch wieder ausgeglichen. Als Verzerrungsfehler bleibt nur der Unterschied zwischen den zwei verschiedenen kinematischen Transformationen der Differenzen zwischen Ist-Bewegungsdiagramm und optimiertem Bewegungsdiagramm übrig, und da die Bewegungsdiagramm-Differenzen klein sind (in der Regel einige Zehntel mm), werden auch die Differenzen durch die unterschiedlichen kinematischen Transformationen klein sein.

Schritt 3: Glätten des Ist-Bewegungsdiagramms

Bild 4 zeigt das in der Simulation gefundene Ist-Bewegungsdiagramm für die Beispielkurve.

Am Beschleunigungsverlauf ist zu erkennen, das die aufgenommene Bewegung sehr wellig ist, entweder weil die Kurvenbahn schon diese Wellen enthält, oder weil sie durch Messung, Simulation und Interpolation erst eingebracht wurden.

Wenn die Originalkurve ursprünglich in einem manuellen Verfahren gefertigt wurde (Zeichnung durchkürnen, Kurve ausschneiden und feilen), wird schon die Kurve merkliche Wellen enthalten.

Die Messung wird – je nach Verfahren – weitere Welligkeiten hinzufügen.

Simulation und Interpolation werden nur sehr kleine Abweichungen beitragen.

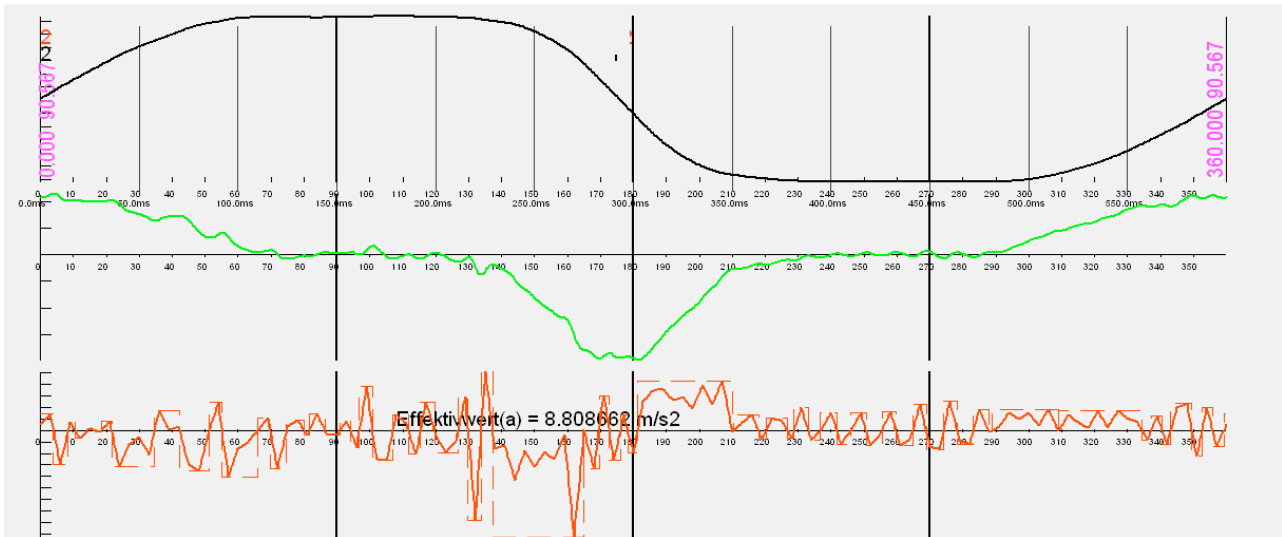


Bild 4

Obwohl das Rauschen im Beschleunigungsverlauf sehr heftig aussieht, sind die entsprechenden Fehleramplituden im Wegverlauf vergleichsweise klein.

Bei kurzweiligen Fehlern mit sehr kleinen Beträgen (< 0.01 mm), wie sie bevorzugt bei genauen Meßverfahren wie dem Messen auf einer Koordinatenmeßmaschine auftreten, reicht es vielleicht, das Bewegungsdiagramm mit einem speziellen numerischen Verfahren zu Glätten, um einen Bewegungsverlauf zu erhalten, der für die abschließende Kurvenberechnung mit Fertigungsdatenausgabe geeignet ist. Der so geglättete Verlauf spiegelt die dynamische Qualität der Originalkurve wider, d.h. die neu berechnete und gefertigte Kurve wird ähnlich gut laufen wie die Originalkurve.

Ältere Kurven, wie sie meist zur Aufbereitung anstehen, wurden in aller Regel

- von Hand gezeichnet und gefertigt,
- mit wenigen Kreisbögen und Geraden zeichnerisch festgelegt und dann NC-gefertigt oder
- mit Bewegungsgesetzen der VDI-Richtlinie 2143 ruckfrei berechnet und NC-gefertigt

Keines dieser verbreiteten Verfahren entspricht mehr dem heutigen Stand der Bewegungstechnik.

Um die dynamische Qualität der Originalkurve durch die neu berechnete Kurve zu übertreffen, empfiehlt und praktiziert Nolte folgendes Verfahren:

Schritt 4: Neugestaltung der Bewegung mit hoher dynamischer Qualität

Der wellige Ist-Bewegungsverlauf wird in einen grafischen Editor geladen und als Hintergrundbild für die Optimierung eines von Grund auf neu aufgebauten Bewegungsverlaufs verwendet.

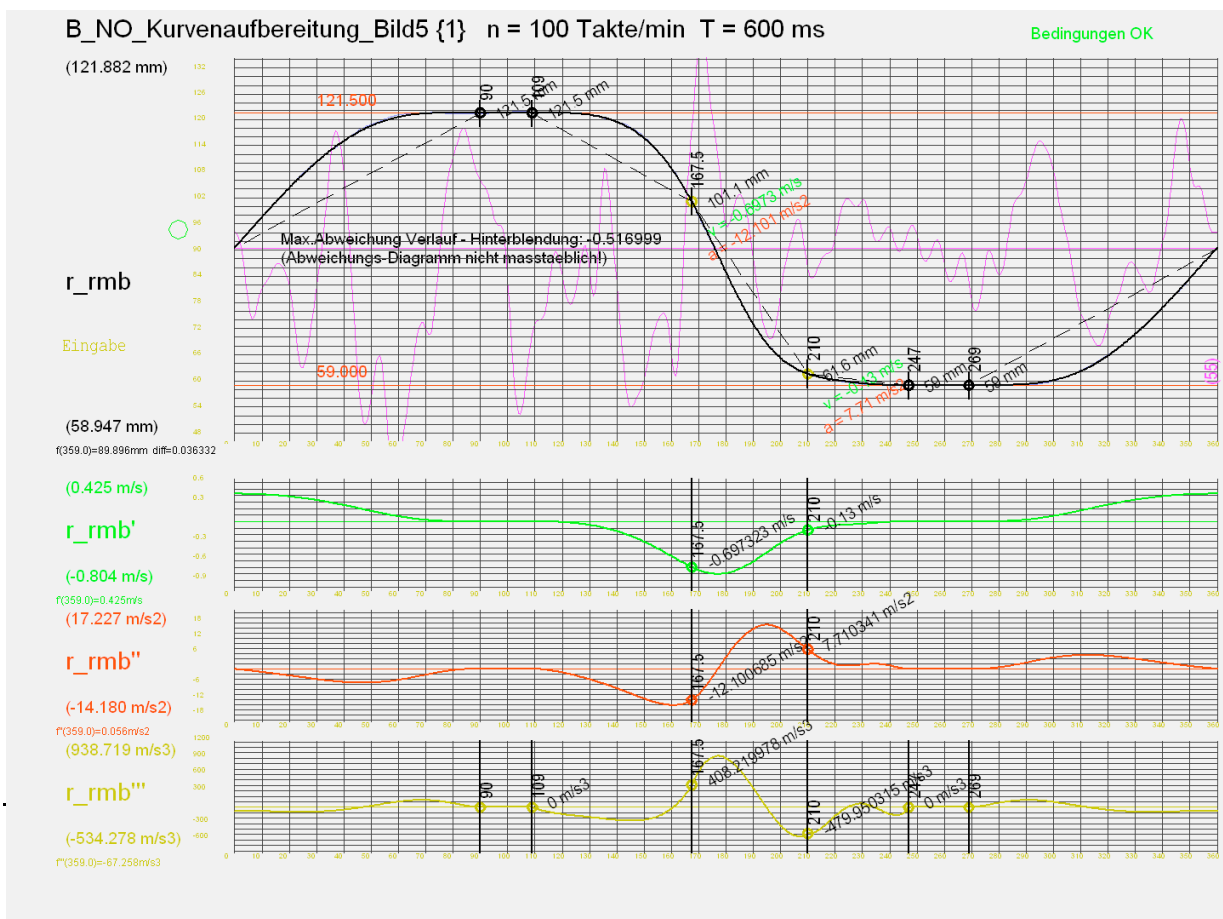
Über diesen Verlauf hinweg wird ein neues Bewegungsdiagramm definiert, das den Originalverlauf annähert, dabei aber neben Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung auch den Ruckverlauf und evtl. sogar den Ping-Verlauf stetig hält. Mit höheren Polynomen können gleichzeitig die Maximalwerte von Geschwindigkeit, Beschleunigung und Ruck niedrig gehalten werden.

Die Abweichung zwischen Ist-Bewegungsverlauf und optimiertem Verlauf wird stark überhöht als Verlauf dargestellt und ständig aktualisiert, so daß immer sofort zu sehen ist, wo die nachgebildete Kurve in welchem Maß von der Originalkurve abweicht.

Durch dynamisches Ziehen an den Bewegungsstützpunkten, den Geschwindigkeiten, Beschleunigungen, Ruck- und Pingwerten kann innerhalb weniger Minuten ein dynamisch hochwertiger Bewegungsverlauf gestaltet werden, der den Originalverlauf mit hoher Genauigkeit nachbildet.

Bild 5 zeigt einen Zwischenschritt einer solchen Bewegungsoptimierung.

Bild 5: Bewegungsdiagramm, Abweichung zum Original pinkfarben und stark vergrößert



Man erkennt, daß wenige Stützpunkte ausreichen, um die Originalbewegung mit höheren Polynomen nachzubilden. Die Abweichung zwischen Originalkurve und nachgebildeter Kurve beträgt bei dem Beispiel nirgendwo mehr als 0.52 mm. Die Endlagen des Hubes (Radien 121.5 mm und 59 mm an der Rollenmittelpunktsbahn) werden exakt eingehalten. Die optimierte Bewegung ist nicht nur ruckfrei, d.h. stetig in Weg (schwarz), Geschwindigkeit (grün) und Beschleunigung (rot), wie es den Bewegungsgesetzen der 1980 erschienenen VDI-Richtlinie 2143 entspricht, sondern auch stetig in der Ruckfunktion (dritte Ableitung, gelb) und der Ping-Funktion (vierte Ableitung, cyanfarben in Bild 7 dargestellt).

Die Stetigkeit auch in den höheren Ableitungen sorgt für die besondere Laufruhe der optimierten Kurven.

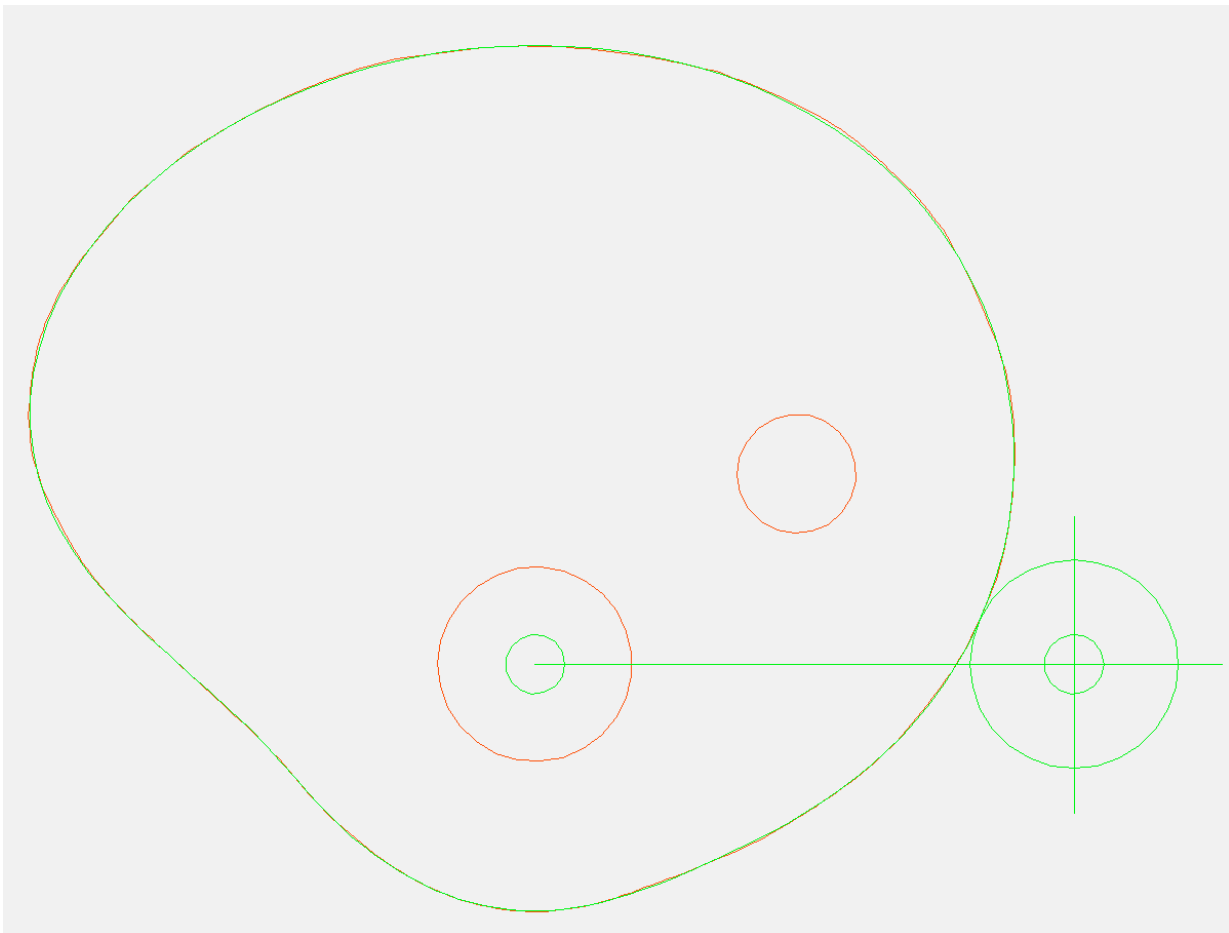


Bild 6: Originalkurve (rot) und optimierte Kurve (grün) erscheinen fast identisch

Eine weitere Steigerung der Bewegungsqualität ist möglich, wenn der nachgebildete Bewegungsverlauf in ein HS-Profil überführt wird, das in der Maschine besonders resonanzfrei arbeitet.

In einer wissenschaftlichen Untersuchung /1/ wurde vor einigen Jahren bestätigt, daß diese Feinheiten in der Bewegungsgestaltung tatsächlich auf der realen Kurve abgebildet werden. Kurvenbahnen mögen in der Praxis zwar mit einem absoluten Fehler von einigen Hundertstel mm gefertigt werden, für die dynamischen Eigenschaften der Kurve ist aber die Auflösung des Wegmeßsystems der Werkzeugmaschine maßgeblich. Diese Auflösung liegt in der Regel bei maximal 0.001 mm.

Die Praxis lehrt auch, daß die dynamisch hochwertige Gestaltung der Bewegungen wie hier beschrieben tatsächlich Kräfte und Schwingungen in der Maschine reduziert und so zu höherer Laufruhe und höheren Taktzahlen führt. Obwohl die optimierte Kurve bei ausschließlicher Betrachtung des Wegverlaufs bzw. der Kurvenbahn fast identisch zur Originalkurve zu sein scheint (siehe Bild 6), läuft sie meist mindestens 10 % schneller, als die Originalkurve jemals gelaufen ist.

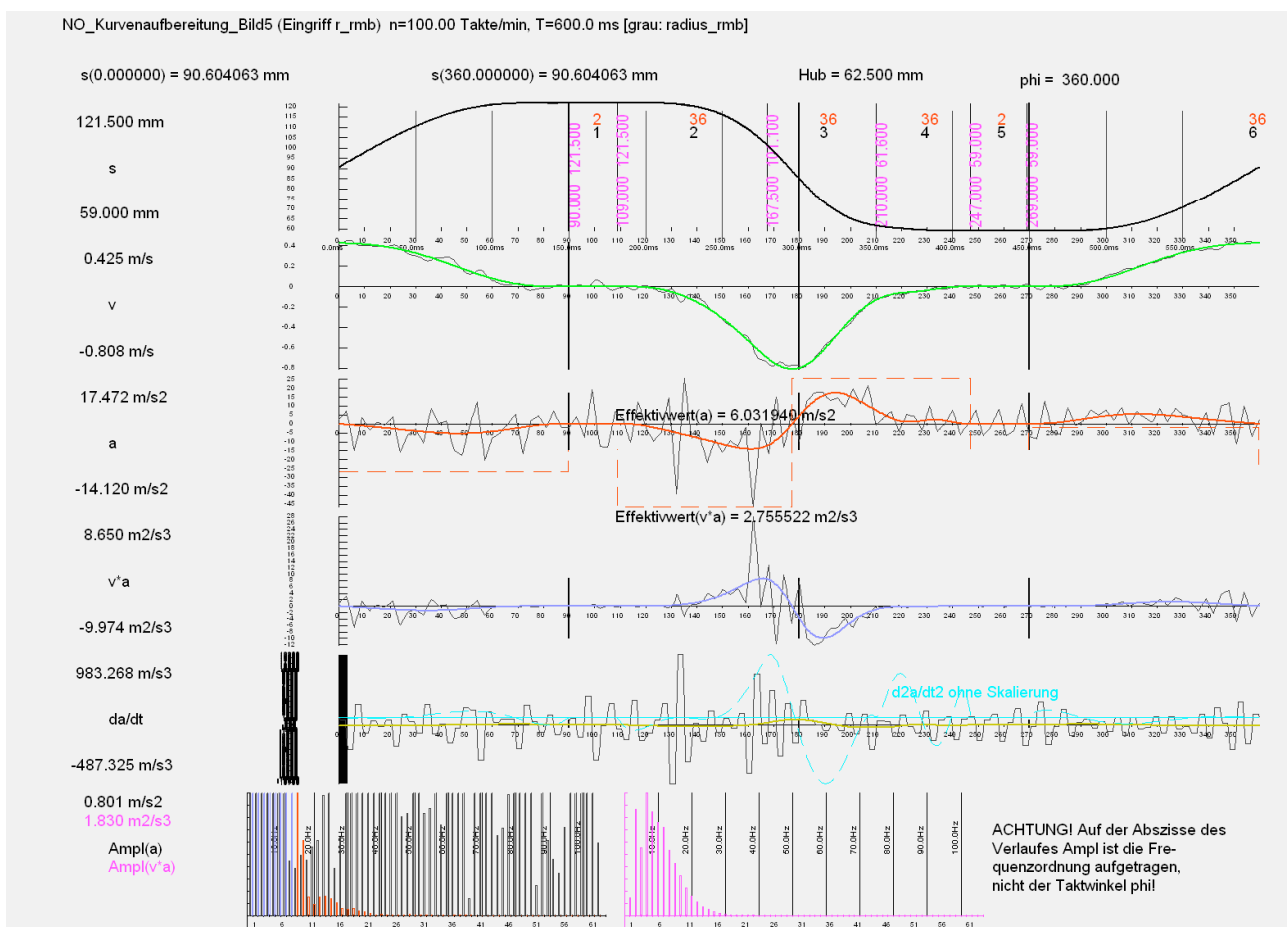


Bild 7: Vergleich zwischen Original-Bewegung (jeweils grau) und optimierter Bewegung mit Weg (schwarz), Geschwindigkeit (grün), Beschleunigung (rot), Leistung (blau), Ruckfunktion (gelb), Ping-Funktion (cyan) und Schwingungsanregung (rotes Balkendiagramm)

Schritt 5: Berechnung der optimierten Kurvenbahn

Im letzten Schritt berechnet Nolte die optimierte Kurve und erzeugt DXF-Daten, NC-Daten im ISO- und im Heidenhain-Format und zusätzlich PDF-Dokumentation mit Tabellen, Diagrammen und Schaubildern. Sind die bewegten Massen bekannt, können auch die Kräfte, Momente, Hertzschen Pressungen und die erwartete Lebensdauer von Rolle und Kurve ermittelt werden.

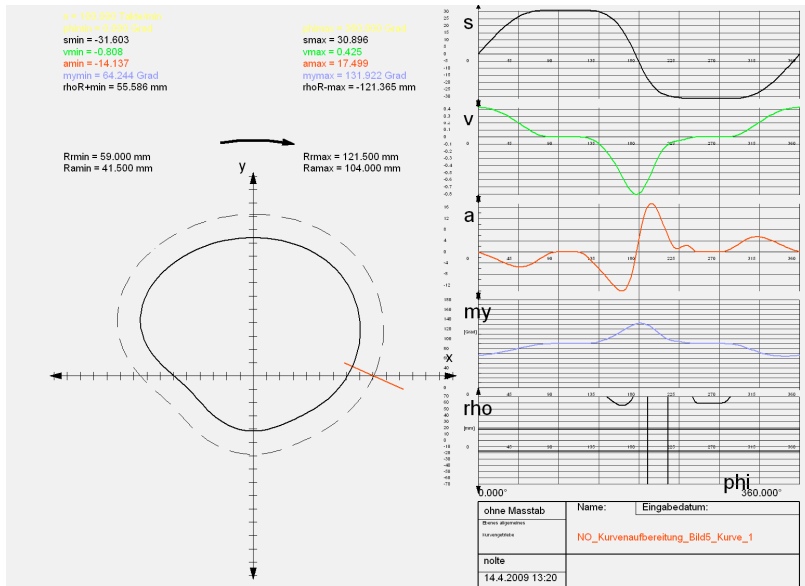


Bild 8: Kurvenbild aus der Dokumentation zur Kurvenberechnung

Doppel- oder Stegkurven

Die Aufbereitung eines Kurvengetriebes mit einer Doppelkurve (= Komplementärkurve bzw. Haupt- und Gegenkurve bzw. Arbeits- und Rückholkurve bzw. konjugierte Kurven) oder einer Stegkurve (= Wulstkurve) ist mit der gleichen Methode machbar.

Dann vermisst man entweder nur die Hauptkurve oder nur die Gegenkurve und optimiert auch nur für diese Kurve das Bewegungsdiagramm.

Bei der abschließenden Kurvenberechnung berücksichtigt man dann die korrekte Kinematik des Kurvengetriebes mit Achsabstand, Hebellängen, Hebelöffnungswinkel und Rollendurchmessern.

So erhält man ein in sich korrekt laufendes Kurvengetriebe mit optimiertem Bewegungsdiagramm.

Fazit

Mit sachgerechter Datenaufbereitung durch einen erfahrenen Spezialisten können Kurven sehr oft auch mit sehr einfachen Mitteln vermessen und dann so optimiert und neu berechnet werden, daß sie schneller und ruhiger laufen als die Originale.

Schrifttum

/1/ Koop, F.: "Beurteilung und Optimierung von Fertigungseinflüssen auf das Betriebsverhalten von Kurvengetrieben", VDI-Fortschrittsbericht Nr. 222, Reihe 1