

Entwicklung eines spanenden Fertigungsverfahrens für Hinterlegungen an Schaltgetrieberäder mittels CAD-Simulation

Schiedeck, N.

Hinterlegungen sind Taschen in den Zahnflanken von Schiebemuffen, die in Automobilschaltgetrieben eingesetzt werden. Während des Fahrbetriebs rasten in die Hinterlegungen die Zähne eines zugehörigen Zahnkranzes ein. Dadurch wird trotz kurzer Schaltwege ein Herausspringen der Fahrstufe während der Fahrt verhindert.

Zur Fertigung der Hinterlegungen werden zur Zeit Erodier- oder Umformverfahren eingesetzt.

Erstere Verfahren weisen ein nicht unerhebliches Gefährdungspotential für die Umwelt auf. Daher sind aufwendige Schutzmaßnahmen innerhalb des Produktionsbereiches erforderlich. Die verfahrensbedingt entstehenden, giftigen Erodierschlämme müssen als Sondermüll entsorgt werden. Zusätzlich zu den hohen Betriebskosten weisen Erodieranlagen auch hohe Investitionskosten auf.

Umformverfahren erzeugen Eigenspannungen im Werkstück. Da Schiebemuffen gehärtet werden müssen, entstehen durch Abbau der Eigenspannungen während der Temperaturbehandlung unzulässig hohe Verformungen.

Das mittelständische Werkzeugmaschinenunternehmen PRÄWEMA in Eschwege entwickelt mit Unterstützung der TU Clausthal ein neuartiges spanendes Fertigungsverfahren, für das ein Patent erteilt wurde. Die oben genannten technologischen und wirtschaftlichen Nachteile werden umgangen. Zur Realisierung wird eine geeignete Werkzeugmaschine gebaut.

Die Hauptschwierigkeit bei der Entwicklung dieses Verfahrens liegt neben der Entwicklung spielfreier Antriebe und einer hochgenauen Maschinensteuerung in der Berechnung der komplexen Bewegungsabläufe, die von der CNC-Steuerung umgesetzt werden müssen.

Graphisch anschaulich und mit hoher Genauigkeit läßt sich der Fertigungsprozeß mit Hilfe eines CAD-Systems abbilden und simulieren. Die auf diese Weise ermittelten Prozeßparameter und Werkzeugdaten dienen als Eingabedaten für die Maschinensteuerung bzw als Anforderungen an die Werkzeugkonstruktion.

1. Problemstellung

Bisher erfolgte die Fertigung von Hinterlegungen an Schiebemuffen (**Bild 1 a, b**) durch Erodieren oder Walzen.

Beide Verfahren sind mit erheblichen umwelttechnischen, technologischen und zum Teil auch wirtschaftlichen Mängeln behaftet.

Erodiervverfahren erzeugen einen Materialabtrag aufgrund elektrochemischer Reaktionen von Metallen in elektrolytischen Lösungen. Verfahrensbedingt bilden alle metallischen Legierungselemente des Werkstoffs Salze mit dem Elektrolyt. Da Schiebemuffen aufgrund der mechanischen Anforderungen aus chromhaltigen Einsatzstählen hergestellt werden, treten in den Metallschlämmen giftige Chromate auf. Diese sind wegen ihres erheblichen Gefährdungspotential für die Umwelt als Sondermüll zu behandeln und entsprechend aufwendig zu entsorgen. Die geforderte Geometrie der Hinterlegungen wird durch entsprechend geformte Elektroden erzielt. Da ein Abtrag jedoch nicht nur am Werkstück, sondern auch an der Elektrode stattfindet, verringert sich mit jedem gefertigten Teil die Genauigkeit. Die Reproduzierbarkeit dieses Verfahrens ist daher gering.

Neben hohen Betriebskosten (Elektrodenbau, Elektrolyte, Entsorgung, Energie) bedingen Erodieranlagen auch Investitionskosten, die um ein Mehrfaches über den Investitionskosten spanender Werkzeugmaschinen liegen. Beispielsweise müssen am Maschinenaufstellungsort beckenförmige Kunststofffundamente zum Schutz gegen Elektrolytaustritt errichtet werden.

Das ebenfalls eingesetzte Walzverfahren weist in erster Linie technologische Nachteile auf.

Während des Umformvorgangs bilden sich im Bauteil Eigenspannungen. Da Schiebemuffen anschließend zum Erzielen der erforderlichen Materialeigenschaften gehärtet werden, kommt es aufgrund der Temperatureinwirkung zum Eigenspannungsabbau durch plastisches Fließen. Die sich ergebenden Verformungen der Schiebemuffen führen zu hohem Ausschuß.

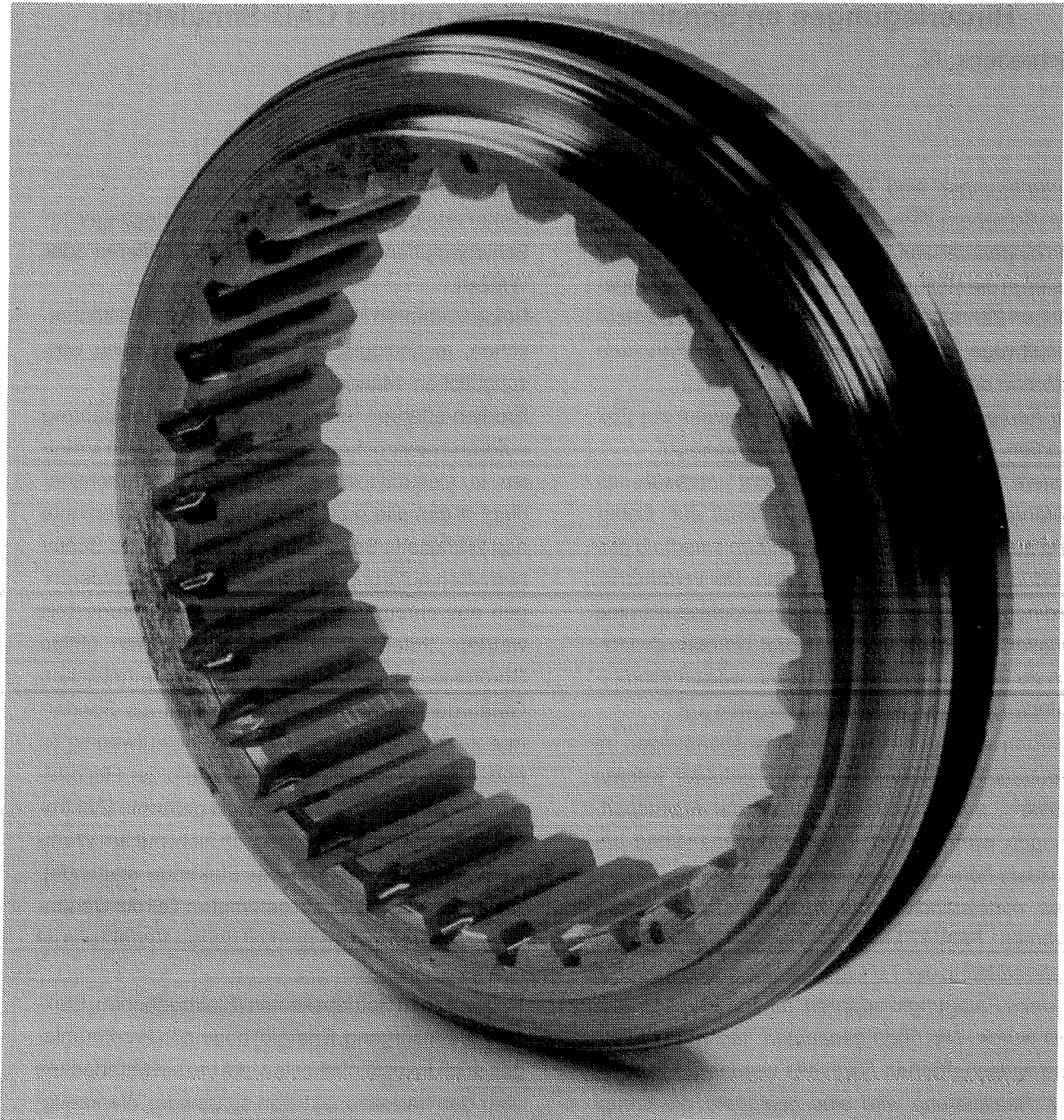


Bild 1a Schiebemuffe mit Hinterlegungen (Detaildarstellung der Hinterlegungen im Bild 1b)

Häufig müssen gewalzte Schiebemuffe und zugehöriger Zahnkranz, um die geforderten Spezifikationen, z. B. bezüglich des Kippspiels einzuhalten, einzeln gepaart und in dieser Form der Montage zugeführt werden.

Da die Werkzeugentwicklung durch langwierige Fertigungsversuche erfolgt, stehen nur für einige Schiebemuffen Werkzeuge zur Verfügung.

Bei der Entwicklung eines alternativen Verfahrens ist die Fertigungszeit pro Werkstück ein wichtiges

Kriterium. So scheiden Lösungsansätze wie Fräsen mit Hilfe eines entsprechend geformten Fingerfräasers aufgrund der viel zu hohen Stückzeit aus. Die Stückzeit beim Erodieren liegt je nach Werkstückgröße bei ca. 30 bis 40 Sekunden.

Das neu entwickelte, spanende Verfahren ist deutlich produktiver als die konventionellen Fertigungsverfahren bei gleichzeitig deutlich niedrigeren Kosten, wobei die technologischen und umwelttechnischen Nachteile umgangen werden.

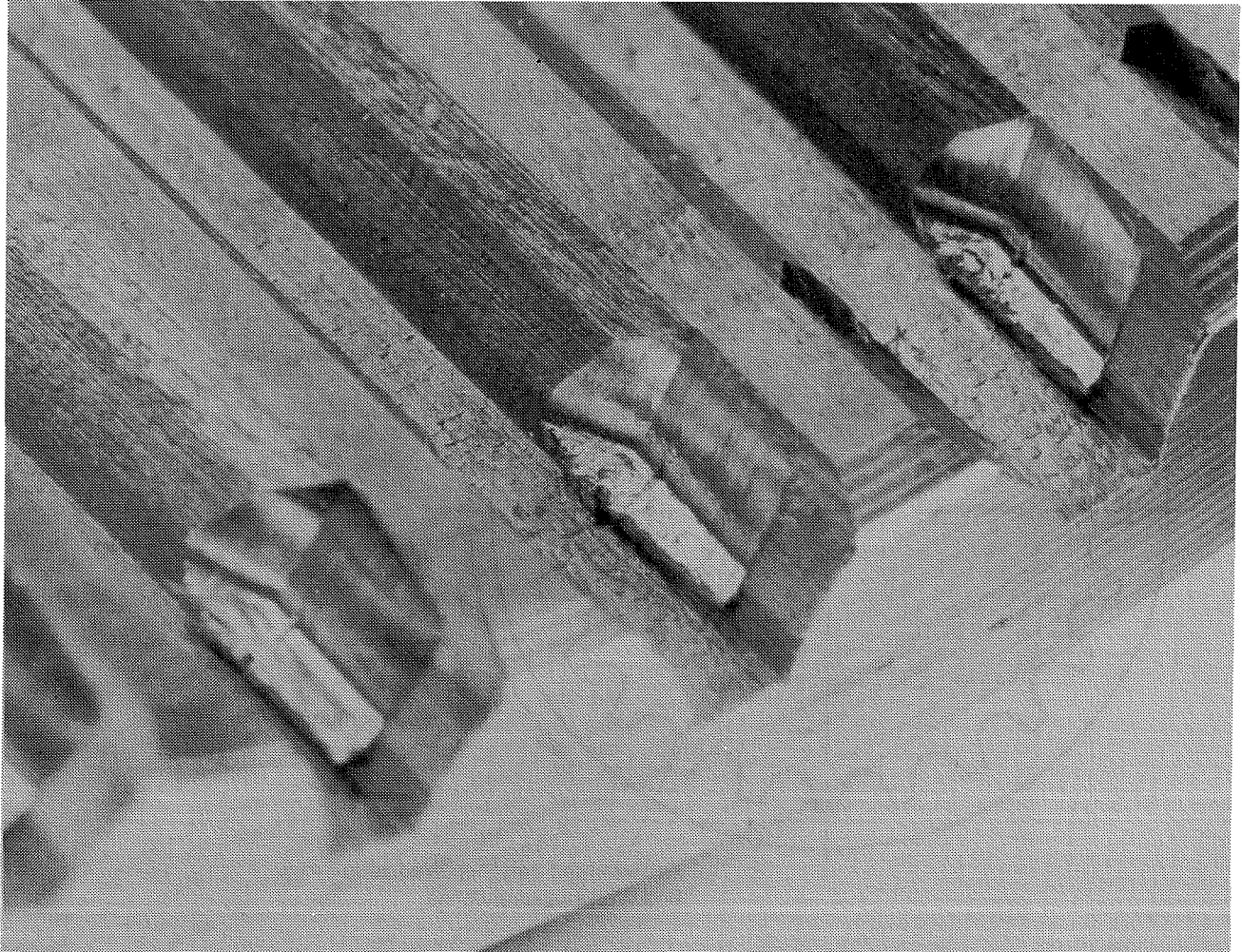


Bild 1b Detailaufnahme der Hinterlegungen

2. Verfahrensbeschreibung

Das neue, spanende Verfahren zur Fertigung von Hinterlegungen arbeitet mit zwei elektronisch wälzgekoppelten, in einem konstanten Verhältnis rotierenden NC-Achsen für Werkstück und Werkzeug, **Bild 2**. Die Werkzeughauptschneide durchläuft im Betrieb eine hypozykloidenförmige Bahnkurve. Der Schnittvorgang findet im Bereich des Umkehrpunktes der Hypozykloide statt. Das Werkzeug taucht in die Zahnücke ein und erzeugt stoßend eine Hinterlegung in der Zahnflanke.

An die Prozeßkinematik des Verfahrens stellen sich zwei grundsätzliche Forderungen:

- Erzeugung einer Hypozykloide, die im Bereich der Hinterlegungen möglichst parallel zur Evolventen der Zahnflanken verläuft, um die gewünschte Geometrie mit ausreichender Genauigkeit herzustellen,
- Wahl eines Drehzahlverhältnisses zwischen Werkstück- und Werkzeugachse, mit dem alle Zahnflanken nacheinander in einem kontinuier-

lichen Fertigungsprozeß durchlaufen werden, um geringe Hauptzeiten pro Werkstück zu realisieren,

- Wahl einer geometrischen Werkzeugstärke, die ein Eintauchen des Werkzeugs in die Zahnücke ohne Kollision mit der Gegenflanke erlaubt.

An eine zur Umsetzung des Fertigungsverfahrens geeignete Werkzeugmaschine stellen sich ebenfalls mehrere Anforderungen:

- Auswahl hochgenauer, spielfreier Antriebe,
- Verwendung einer Steuerung, die eine elektronische Wälzkopplung mit hoher Genauigkeit aufrechterhält
- Einsatz von ausreichend digitalisierten Schrittmotoren.

Das Werkzeug muß bei einer Stärke von nur 1 bis 2 Millimetern eine Standzeit von mindestens 100 Werkstücken leisten, damit das Verfahren eine wirtschaftliche Alternative darstellt. Bisher wurden mit unbeschichteten Wendeschneidplatten in Ferti-

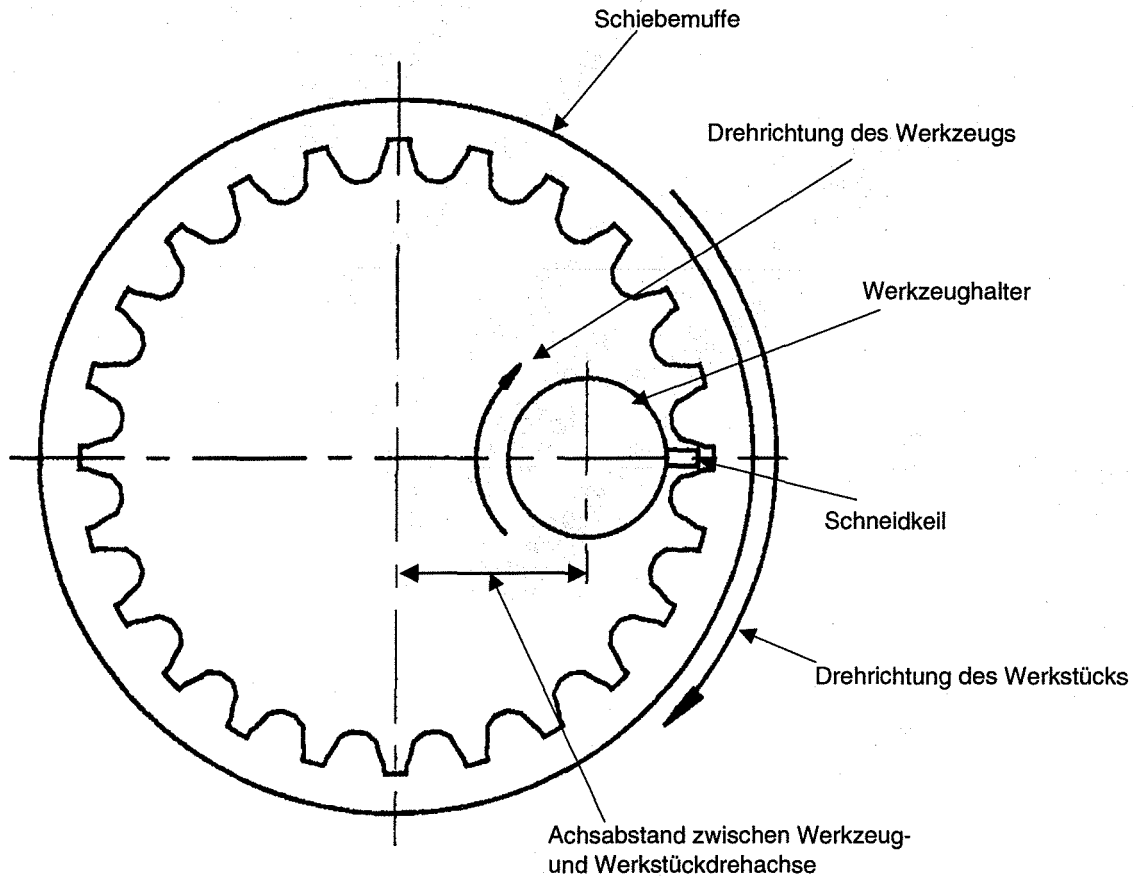


Bild 2 Prinzipdarstellung der Kinematik des hypozykloidalen Stoßens

gungsversuchen Werte von bis zu 350 Stück pro Werkzeug erzielt, die bei Einsatz beschichteter Werkzeuge noch steigerungsfähig sind.

Die Hauptschwierigkeit bei der Entwicklung dieses Verfahrens lag in der Gestaltung der Prozeßkinematik und der Schneidkeilgeometrie. Eine analytische Lösung dieses komplexen, kinematischen Problems ist nicht möglich, da Evolvente und Hypozykloide zwei unterschiedliche mathematische Funktionen darstellen und deshalb nie vollständig deckungsgleich sein können. Durch Wahl geeigneter Werte für die bestimmenden Kinematikparameter kann die Hypozykloidenform der Evolvente angenähert werden, **Bild 3**.

Daher wird der Prozeß mit Hilfe eines CAD-Systems graphisch simuliert. Diese Methode liefert sehr anschauliche Ergebnisse, die mit der im CAD-System ohnehin zur Verfügung stehenden Funktionalität detailliert ausgewertet werden kann.

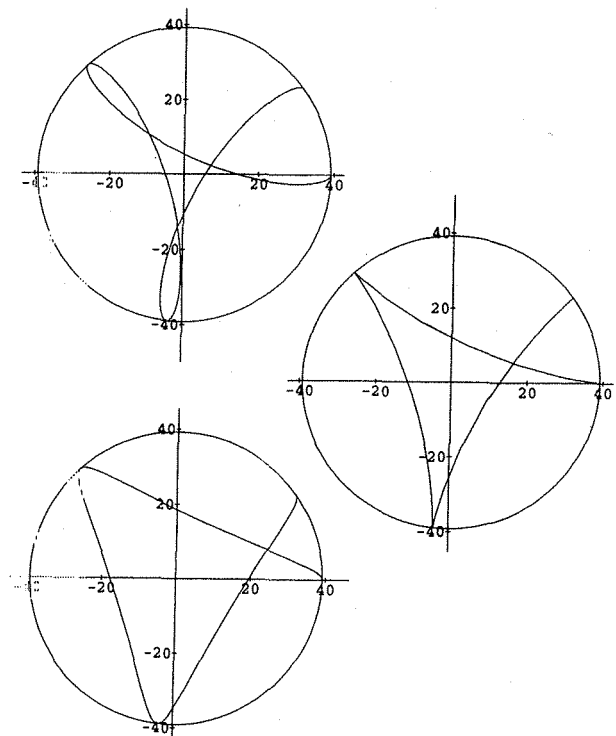


Bild 3 Unterschiedliche Hypozykloidenformen

3. Simulation der Prozeßkinematik

Die hypozykloidenförmige Bahnkurve der Hauptschneide läßt sich mathematisch mit den folgenden Parametergleichungen beschreiben:

$$x = a \cdot \cos(\omega_{Sch} \cdot t + \varphi_0) + l_{Wkz} \cdot \cos(\omega_{Wkz} \cdot t - \omega_{Sch} \cdot t)$$

$$y = a \cdot \sin(\omega_{Sch} \cdot t + \varphi_0) - l_{Wkz} \cdot \sin(\omega_{Wkz} \cdot t - \omega_{Sch} \cdot t)$$

Anhand dieser Funktionen sind die relevanten Kinematikparameter erkennbar:

- a , Abstand zwischen Werkstück- und Werkzeughachse,
- l_{Wkz} , Abstand der Hauptschneide von der Werkzeughachse,
- ω_{Wkz} , Werkzeugdrehzahl,
- ω_{Sch} , Werkstückdrehzahl.

Das Verhältnis \dot{u} von Werkzeug- und Werkstückdrehzahl ist entscheidend zur kontinuierlichen Bearbeitung aller Zahnflanken, wobei die Bearbeitung aller Linksflanken eine Umkehr der bei der Bearbeitung der Rechtsflanken gewählten Drehrichtungen erfordert.

Es ist sinnvoll das Drehzahlverhältnis mit Hilfe der Zähnezahlen zu definieren. Dabei verhält sich die Werkzeugdrehzahl zur Werkstückdrehzahl wie die Gesamtzähnezahl zu der Zähneanzahl, die zwischen zwei direkt nacheinander bearbeiteten Zahnflanken liegen.

Für eine Gesamtzähnezahl von beispielsweise 30 Zähnen eignen sich in Erfüllung der Forderung nach kontinuierlicher Bearbeitung aller Zähne die Drehzahlverhältnisse 30 : 9, 30 : 11, 30 : 13, 30 : 17 etc. Ungeeignet ist z. B. das Drehzahlverhältnis 30 : 15, mit dem nur die fünfzehnte und dreißigste Zahnflanke bearbeitet wird.

Die CAD-Simulation wird mit einer am Institut für Maschinenwesen erstellten Software gesteuert. Eingabedaten sind konkrete Werte für die einzelnen Kinematikparameter. Eine Auswertung der Simulationsergebnisse, **Bild 4**, erlaubt eine Beurteilung der Schneidkeilgeometrie, die abhängig ist von den gewählten Kinematikparametern.

Bei der Auswertung der CAD-Darstellung sind mehrere Punkte zu berücksichtigen.

Der Schneidkeil muß mit einer möglichst parallel zur

Schneidkeillängsachse verlaufenden Bewegungsrichtung in die Zahnflanke einfahren. Damit wird ein Drücken des Werkzeugs mit der Freifläche des Schneidkeils gegen den Zahnkopf vermieden. Besonders wegen der geringen Schneidkeilstärken von 1 bis 2 Millimetern führt Drücken zu Werkzeugbruch.

Am Bildschirm ist ebenfalls die Genauigkeit beurteilbar, mit der die hypozykloidenförmige Schnittbewegung die geforderte, evolventenförmige Flanke im Bereich der Hinterlegung erzeugt.

Aufmerksamkeit ist auch dem Bereich des Schneidkeilaustritts im Bereich des Zahnfusses zu widmen. Ist die Bewegungsrichtung an dieser Stelle quer zur Schneidkeillängsachse, ergibt sich kein sauberer Schnitt. Folge sind unvollständig getrennte Späne, die im Zahnfuß "kleben". Bei dem nachfolgenden Räumvorgang werden diese Späne wieder in die Hinterlegung hineingedrückt und bei der abschließenden Wärmebehandlung der Schiebemuffe gehärtet.

Da die Zahnlücken nur wenige Millimeter breit sind, kann auch überprüft werden, ob mit der gewählten Schneidkeilstärke eine Kollision mit der Gegenflanke auftritt.

Anhand der gemessenen Fertigungsergebnisse konnte die Qualität der CAD-Simulation verifiziert werden.

4. Zusammenfassung

Das neue Verfahren ist bereits jetzt nach ersten Untersuchungen von Ford/Köln deutlich wirtschaftlicher und gleichzeitig umweltschonender als Erodieren und bei vergleichbarer Produktivität dem Walzen technologisch überlegen.

Bei der Verfahrensentwicklung hat sich die CAD-Simulation als starkes Instrument erwiesen, mit der die Prozeßkinematik hochgenau und ohne langwierige und kostenintensive Fertigungsversuche untersucht werden kann.

Potential für eine weitere Erhöhung der Wirtschaftlichkeit dieses Verfahrens ist durch Verwendung von beschichteten Werkzeugen und durch Erhöhung des Drehzahlniveaus vorhanden. Um den industriellen Einsatz zu fördern und die Leistungsfähigkeit des Verfahrens voll auszuschöpfen, werden derzeit systematische Untersuchungen über fertigungsgerechte Konstruktion der Schiebemuffen durchgeführt.