

# Prozessoptimierung für das spitzenlose Innenrund-Einsteichschleifen

*Prof. Klaus Künanz, Dipl.-Ing. Holger Pätzold<sup>1</sup>*

## 1 Einleitung

Die ständige Weiterentwicklung und Vervollkommnung der Schleiftechnik mit dem Ziel der Erhöhung der Qualität und Produktivität wird deutlich sichtbar in Verbesserungen an der Werkzeugmaschine und in der Bereitstellung hochleistungsfähiger Werkzeuge.

Die Maschinenkonstruktionen und die Steuerungstechnik, aber auch die Erarbeitung neuer Technologien, wie des Hochgeschwindigkeits- und Tiefschleifens, und die Verwendung hochharter Schleifmittel, wie z.B. CBN und Diamant prägten die Entwicklung der Schleiftechnologie in den letzten Jahren.

Um technologische Prozesse zu erforschen sind teure experimentelle Untersuchungen notwendig. Auch bei einem positiven Versuchsergebnis können jedoch die Ursachen und damit das weitere technologische Potential nicht vollständig erforscht sein. Weiteres Potential bringt der Einsatz theoretischer Simulationen von Fertigungsprozessen. Welche aufgrund der rasanten Entwicklung der Rechentechnik zunehmend an Bedeutung gewinnt. Konventionelle Berechnungsverfahren bringen oft Ungenauigkeiten mit sich, sind aufwendig und für die Beschreibung komplizierter Vorgänge ungeeignet. Ein Teil dieser Versuche kann durch den Einsatz von numerischen Simulationsverfahren, wie zum Beispiel der Mehrkörpersimulation (MKS) und der Methode der finiten Elemente (FEM), ersetzt werden.

Es gilt zu klären, ob der Fertigungsprozess des spitzenlosen Innenrundeinsteichschleifens anhand eines MKS-Modells abgebildet werden kann. Momentan werden die Grundeinstellungen der Werkzeugmaschine aus Erfahrung gewählt und bei Beginn der Fertigung durch Versuch abgestimmt. Durch das MKS-Modell soll es möglich sein den Fertigungsprozess und im Besonderen den Schleifdorn gezielt zu optimieren.

## 2 Problemstellung

Beim spitzenlosen Innenrundeinsteichschleifen begünstigt die geringe Steifigkeit der Fertigungsmaschine das Auftreten intensiver Schwingungen während des Zerspanens. Sowohl die Qualität des Arbeitsergebnisses als auch die Durchlaufzeit wird in erheblichem Maß durch die Kombination geeigneter Werkzeugmaterialien und den gewählten Einstellungen der Werkzeugmaschine, wie z.B. Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  etc., beeinflusst. Momentan werden die Grundeinstellungen der Werkzeugmaschine aus Erfahrungen gewählt und bei Beginn der Fertigung durch Versuche optimiert.

Beim spitzenlosen Innenrundeinsteichschleifen kommt dem Werkzeughalter neben der Schleifscheibe eine Schlüsselfunktion zu. Die Optimierung des so genannte „Schleifdorns“ als Schnittstelle zwischen Werkstück und Schleifmaschine trägt

---

<sup>1</sup> Promovend Schaeffler KG

entscheidend zur Verbesserung von Qualität und Produktivität bei. Er stellt zudem eine der technologischen Grenzen dar! Die während des Zerspanprozesses auftretenden Kräfte bewirken eine Abbiegung des Schleifdorns. Daraus entstehende Maßabweichung drücken sich in einer Konizität der Bohrung aus. Ein wesentlich größeres Problem stellen Unrundheiten in der zu bearbeitenden Bohrung dar, welche die Funktionsfähigkeit zahlreicher Konstruktionsteile erheblich beeinträchtigen können [1].

Unterschiedlich große Zerspankräfte führen zu einer Schwingungserregung des Schleifdorns. Diese wirken sich negativ auf Maßhaltigkeit, Oberflächenqualität und Produktivität aus. Mit Hilfe empirischer Untersuchungen und den Erfahrungswerten aus der Schleiftechnologie konnte nachgewiesen werden, dass die Verwendung geteilten Schleifdorne (Abbildung 1) den Fertigungsprozess positiv beeinflussen. Geeignete Materialien zu paaren deren Stoffkennwerte sich einerseits durch eine günstige Systemdämpfung auszeichnen und andererseits eine geringe Abbiegung zulassen, stellt hierbei die Herausforderung dar. Des Weiteren hat die Ausbildung der Fügefuge und die darin stattfindenden physikalischen Vorgänge Einfluss auf das Systemverhalten.

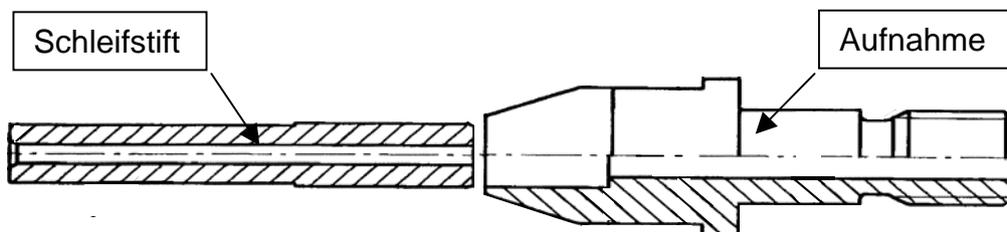


Abbildung 1: Geteilter Schleifdorn (Explosionszeichnung)

Momentan wird eine Kombination aus Wolframkarbid (Hartmetall) und Denal Dx (Wolfram-Sinterwerkstoff) favorisiert. Die Materialien des Werkzeughalters vereinigen laut Hersteller [ sehr gute Schwingungsabsorbition mit hoher Steifigkeit. Der Grund dafür, dass jedes Werkstück für sich optimiert werden muss und man keine allgemeingültigen Schleifparameter festlegen kann, liegt vorrangig an:

- den werkstückspezifischen Längen-Durchmesserverhältnis,
- den verschiedenen Zeitspanvolumina  $Q_w$  und den daraus resultierenden
- dynamischen Belastungen des Werkzeugs.

Ziel dieser Optimierungsmaßnahmen ist die Reduzierung der Hauptzeiten  $t_h$  und damit eine Senkung der Fertigungskosten. Für das Gehäuse eines hydraulische Abstützelementes konnte ein erhebliches Einsparpotential realisiert werden, siehe Abbildung 2.

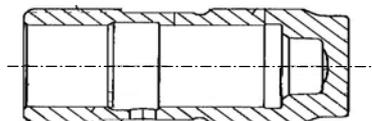


Abbildung 2: Gehäuse eines hydraulisches Abstützelementes

Wie in Abbildung 3 dargestellt, ergibt sich durch den Einsatz geteilter Schleifdorne aus Hartmetall und Denal DX gegenüber den monolithischen Schleifdornen aus Denal Dx eine Kostensenkung von 17 %. Des weiteren ist eine größere Prozessstabilität zu erwarten (Abbildung 4).

**Kostenreduzierung beim Bohrungsschleifen von hydraulischen Abstützelementen**

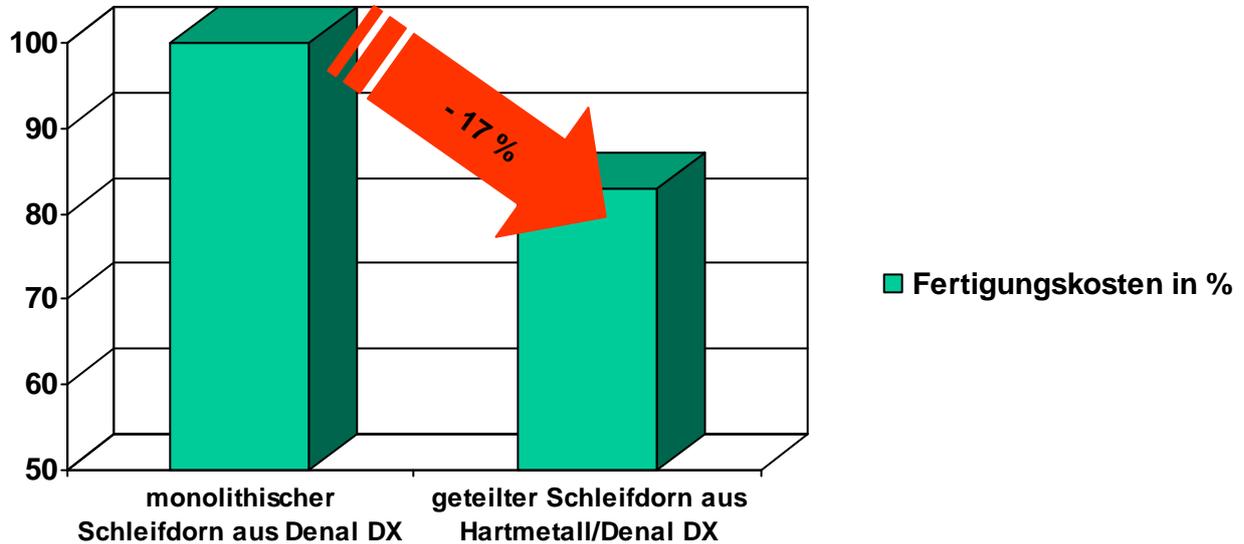


Abbildung 3: Kostenreduzierung beim Bohrungsschleifen

**Prozessfähigkeit Abstützelement**

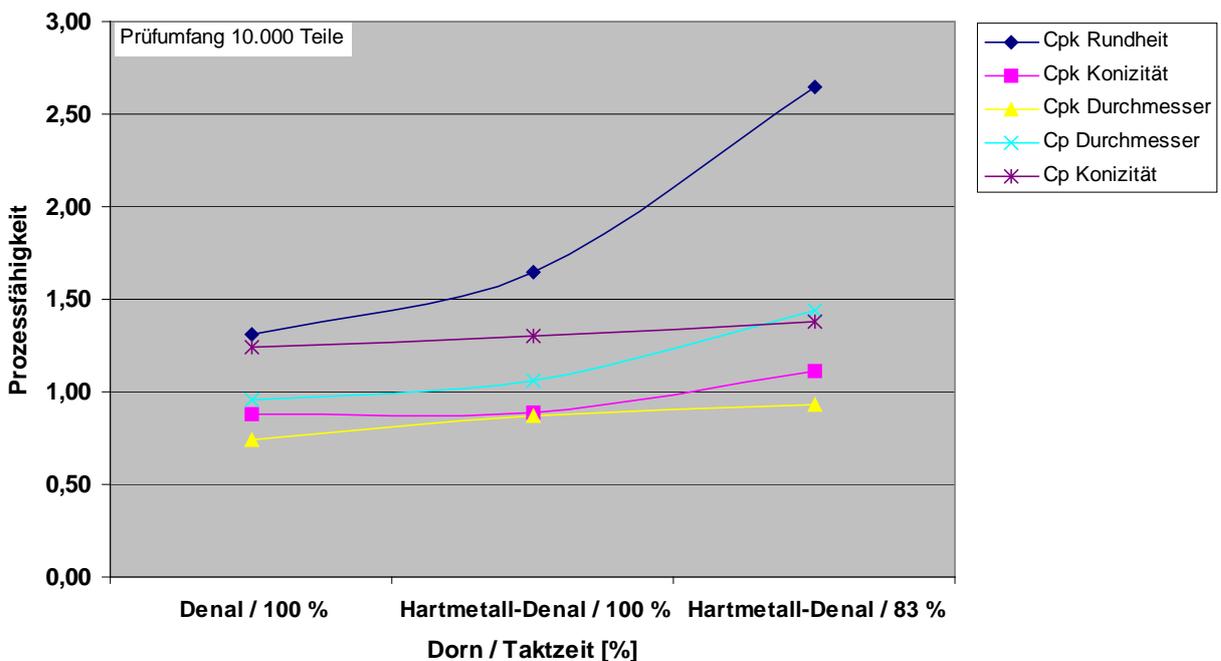


Abbildung 4: Prozessfähigkeitsverlauf beim Bohrungsschleifen

Die bereits erreichte Reduktion der Fertigungskosten ist durch Versuch realisiert worden. Hieraus lassen sich kaum die physikalischen Prinzipien ableiten, so dass das technologische Potential nicht vollständig genutzt werden kann. Eine Übertragbarkeit der für einen Anwendungsfall gefundenen Parameter auf andere Anwendungen ist nicht möglich.

### 3 Lösungsweg

Als Basis für eine modellbasierte Prozessoptimierung ist es notwendig die Zerspankraft zu untersuchen, welche die Biegung des Schleifdornes im Prozess hervorruft. Um die Nachgiebigkeit des Werkzeugs möglichst praxisnah nachzubilden, soll der Verlauf der Schnittnormalkraft  $F_{CN}$  während des Fertigungsprozesses ermittelt werden. Für die Messung der Schnittnormalkraft  $F_{CN}$  wird in den Stützschuh eine eindimensional Kraftmessdose der Firma Kistler montiert. Ein Ladungsverstärker und A/D-Wandler bereitet die Daten für den Mess-PC auf, siehe Abbildung 5.

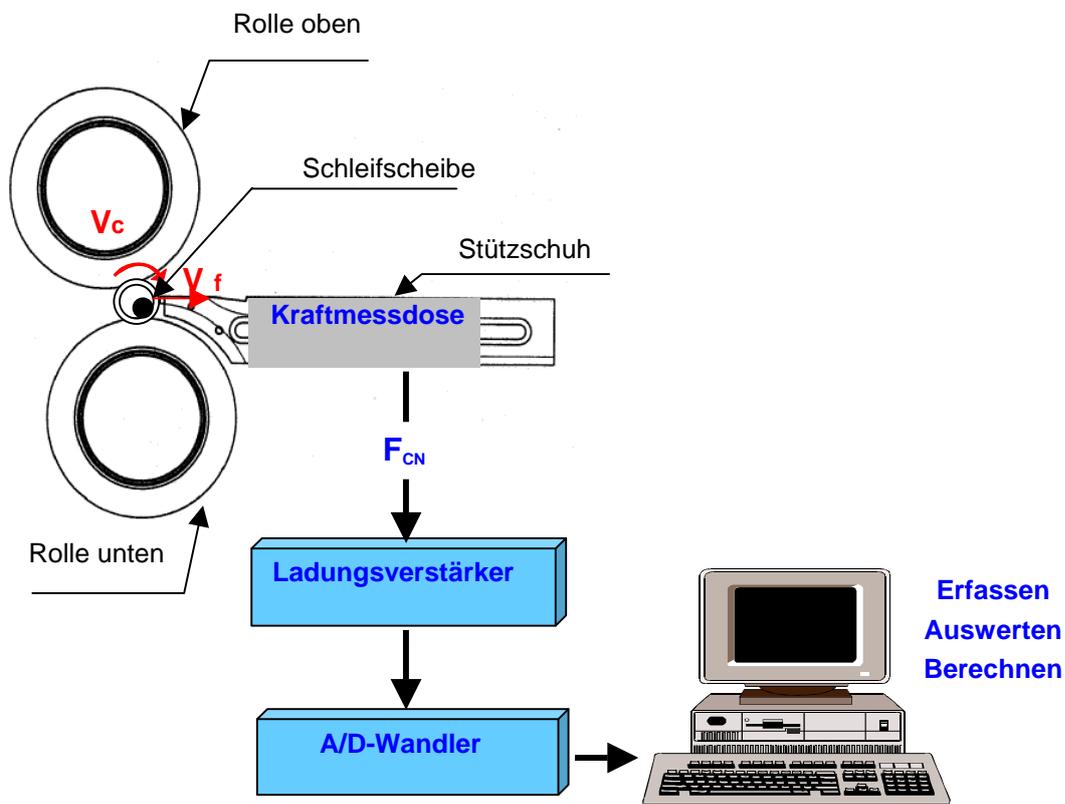
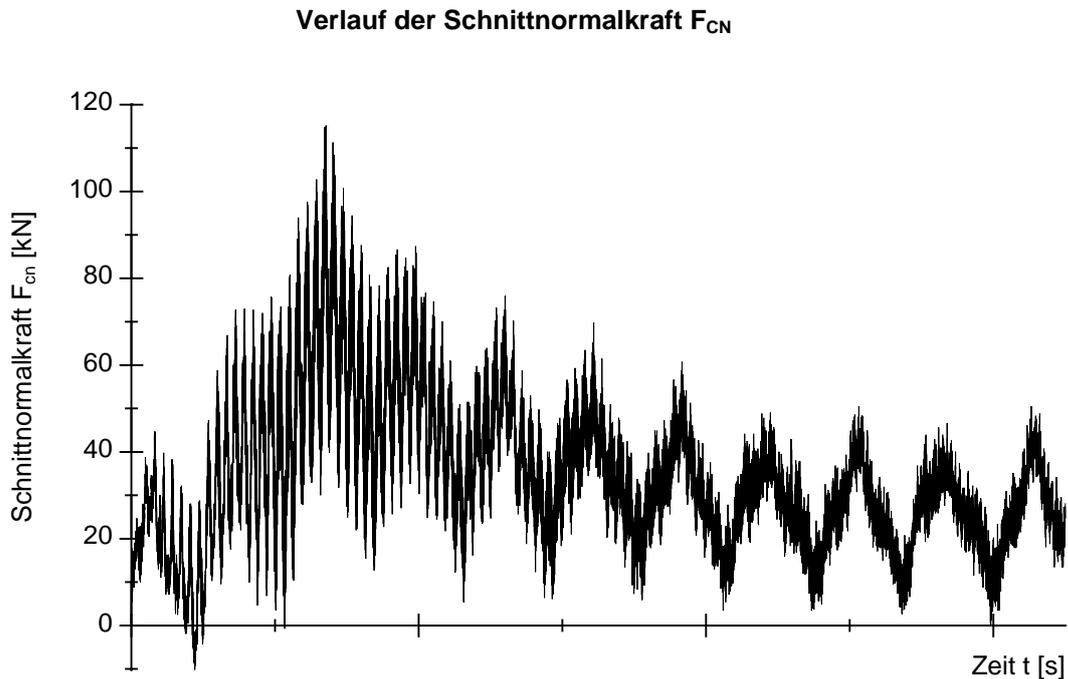


Abbildung 5: Messaufbau zur Bestimmung der Schleifnormalkräfte  $F_{CN}$

Abbildung 6 zeigt den typischen Verlauf der Schnittnormalkraft  $F_{CN}$ . Die Charakteristik resultiert hauptsächlich aus dem Profil der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  sowie aus niederfrequenten Schwingungen des Werkstückspannsystems.

Abbildung 6: Verlauf der Schnittnormalkraft  $F_{CN}$ 

Die aufgenommenen Schnittnormalkräfte dienen neben der massebehafteten Geometrie der zu modellierenden Baugruppen als Eingabedaten für das MKS – Modell. Um das MKS – Modell zu verifizieren ist es notwendig die zu modellierenden Baugruppen auf ihre Schwingungseigenschaften und Steifigkeit zu untersuchen.

Das Gesamtmodell untergliedert sich in die zwei Submodelle Spindel und Schleifdorn. Diese Aufteilung entspricht der jeweiligen Baugruppe und erleichtert die Reduktion der relevanten Größen zu einem physikalischen Ersatzmodell. Alle relevanten Faktoren, die die Kinematik beeinflussen, sind im Modell zu berücksichtigen.

Nach der Verifikation kann unter Einleitung der Vorschubbewegung  $f$  und Schnittnormalkraft  $F_{CN}$  die elastische Biegung der einzelnen Schleifdorne im globalen Koordinatensystem des Mehrkörpersystems (MKS) über der Zeit betrachtet werden. Im Sinne einer klareren Darstellung zeigt Abbildung den geglätteten Kurvenverlauf. Der graue Graph stellt die programmierte Vorschubbewegung  $f$  des Schleifwerkzeuges dar. Die Steigung entspricht dabei der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$ . Entgegen der programmierten Vorschubbewegung  $f$  wirkt die Schnittnormalkraft  $F_{CN}$  und verursacht dadurch die Biegung der Schleifdorne. Es ist zu erkennen, dass der geteilte Schleifdorn etwas größere dynamische Biegung als der monolithische Hartmetall-Schleifdorn aufweist. Im Fertigungsprozess äußert sich die Biegung des Schleifdorns in der Konizität der geschliffenen Bohrung. Je geringer die Schleifdornabiegung desto kleiner auch die Konizität. Folglich sollte der geteilte Schleifdorn ähnlich gut wie der Monolithische aus Hartmetall funktionieren. Experimentelle Untersuchungen ergeben ein anderes Bild. Trotz nahezu identischer Steifigkeit erzeugt die Hartmetall-Denal-DX-Variante eine wesentlich geringere Bohrungskonizität, siehe Abbildung . Der Grund dafür ist eine Parallelverschiebung

des Schleifstiftes in der Aufnahme, welche demnach keinen Einfluss auf das Schleifergebnis hat.

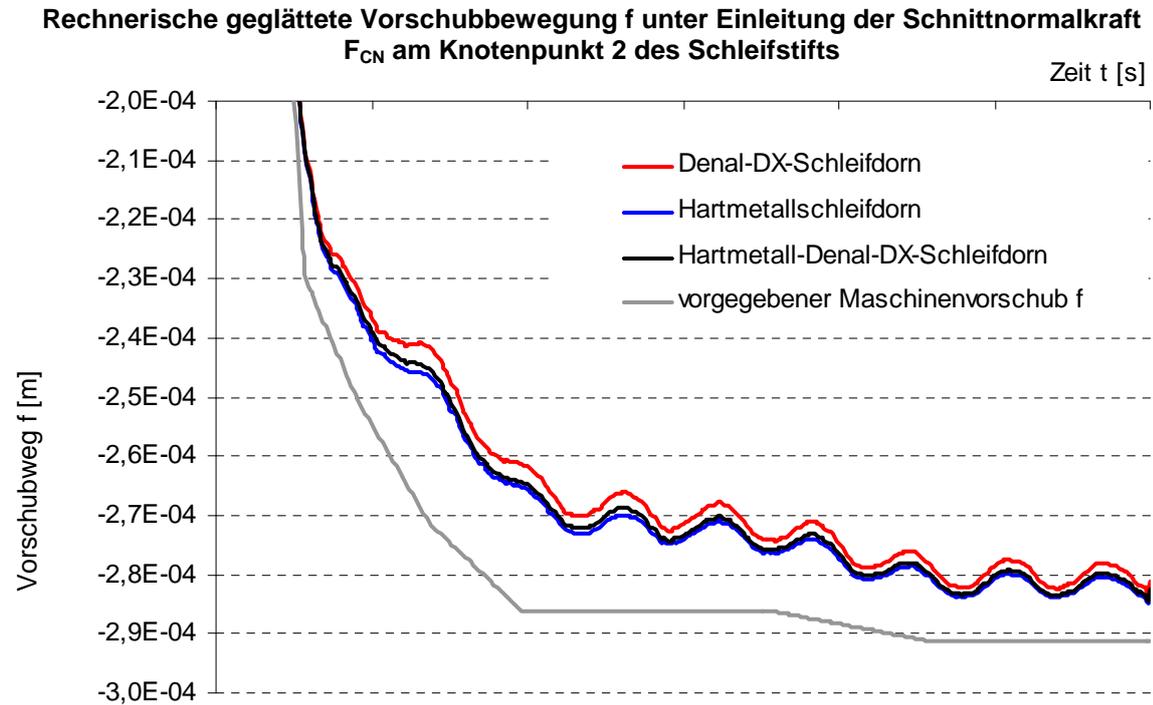


Abbildung 7: Rechnerische geglättete Vorschubbewegung  $f$  unter Einleitung der Schnittnormalkraft  $F_{CN}$  am Knotenpunkt 2 des Schleifstifts

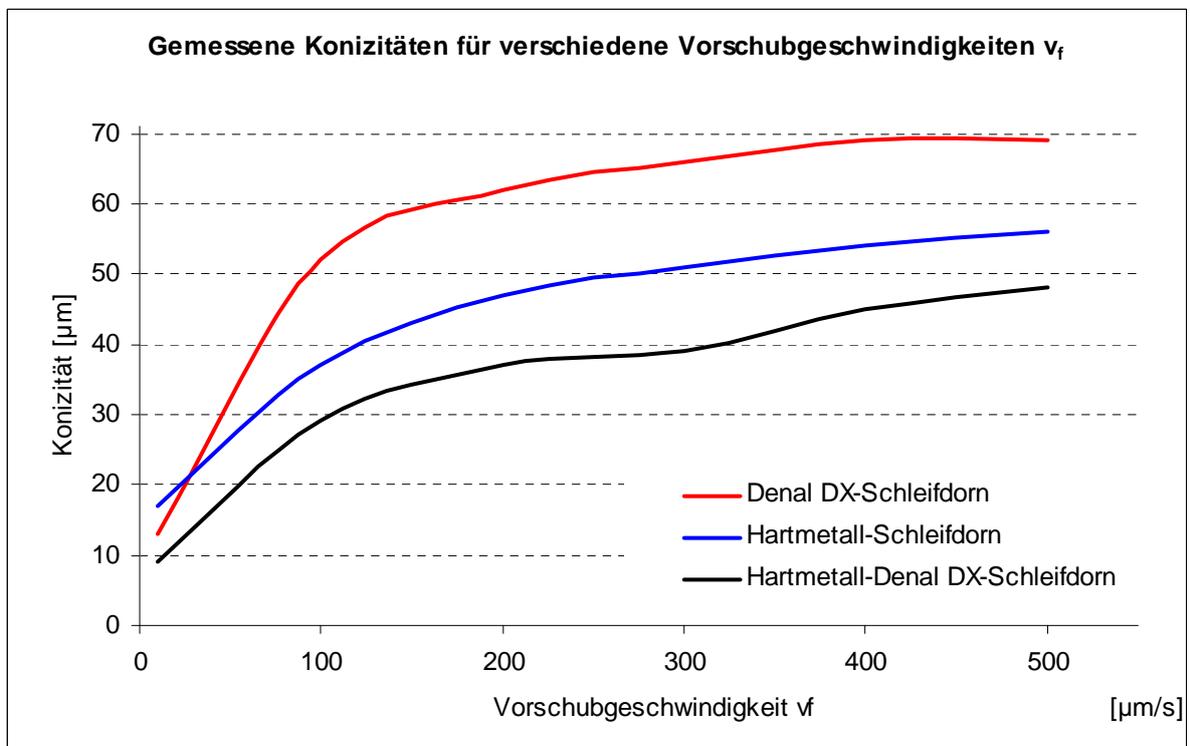


Abbildung 8: Gemessene Konizität für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten  $v_f$

## 4 Zusammenfassung

Durch den Einsatz geteilter Werkzeuge aus Hartmetall und Denal DX können die Fertigungskosten erheblich gesenkt werden. Die Gründe für die verbesserte Funktionsweise der geteilten Schleifdorne sind bisher noch nicht ausreichend geklärt. Neben der Simulation des Schleifprozesses mit Hilfe der MKS Software soll daher auch begründet werden, warum sich der geteilte Schleifdorn positiv auf das Fertigungsergebnis auswirkt.

Nach einer erfolgreichen Modellverifikation kann der Fertigungsprozess simuliert werden, wodurch für den jeweiligen Anwendungsfall geeignete Prozessparameter gefunden werden könnten. Dies spart einige zeit- und kostenintensive Versuchsreihen ein. Aufgrund der im MKS-Modell getroffenen Vereinfachungen ist allerdings davon auszugehen, dass die endgültige Abstimmung an der Werkzeugmaschine vorzunehmen ist.

Als Beurteilungskriterium für die Schleifdordynamik können dem MKS - Postprozessor die entsprechenden Diagramme entnommen werden. Beurteilungskriterium ist zum einen die elastische Verformung des Schleifstifts in der zu schleifenden Bohrung und zum anderen die absolute Abbiegung des Gesamtsystems durch die Schnittnormalkraft  $F_{CN}$ .

### Literatur

- [1] H. K. TÖNSHOFF /B. JÜRGENHAKE, Ursachen und Wirkungen von Schwingungen beim Innenschleifen, Präzision im Spiegel, November 1978, Seite 23 – 28
- [2] KENNAMETALL, *Schwermetalllegierungen*, Unterlagen über Schwermetalllegierungen