

# Werkzeugverhalten und -optimierung beim Einlippenbohren

U. Heisel und R. Eichler<sup>1)</sup>

## Einleitung

Aufgrund der erreichbaren hohen Produktivität und Bohrungsqualität gewinnt das Einlippenbohrverfahren insbesondere auch bei kurzen Bohrungen und kleinsten Durchmessern immer mehr an Bedeutung [1, 2, 3, 4]. Während bei Einlippenwerkzeugen mit Durchmessern größer als 2 mm der Schaft üblicherweise aus zähem Vergütungsstahl (25CrMo4 V) mit eingewalzter Sicke besteht und der Hartmetallkopf aufgelötet wird, werden bei kleineren Einlippenbohrern Kopf und Schaft aus fertigungstechnischen Gründen aus Hartmetall hergestellt.

Die Verwendung von Hartmetall, das im Vergleich zu Vergütungsstahl einen etwa dreifach höheren E-Modul aufweist und damit die Werkzeugfestigkeitskennwerte erhöht, verspricht eine Steigerung der Vorschubgeschwindigkeiten, so daß die Forderung nach einer größeren Produktivität durch die Reduzierung der Hauptzeit erfüllt werden kann. Deshalb werden nach der Entwicklung von kleinsten Einlippenbohrern neuerdings auch größere Durchmesser ebenfalls aus Hartmetall gefertigt (Bild 1).

<sup>1)</sup> Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. Uwe Heisel und Dipl.-Ing. Ralf Eichler, Institut für Werkzeugmaschinen, Universität Stuttgart

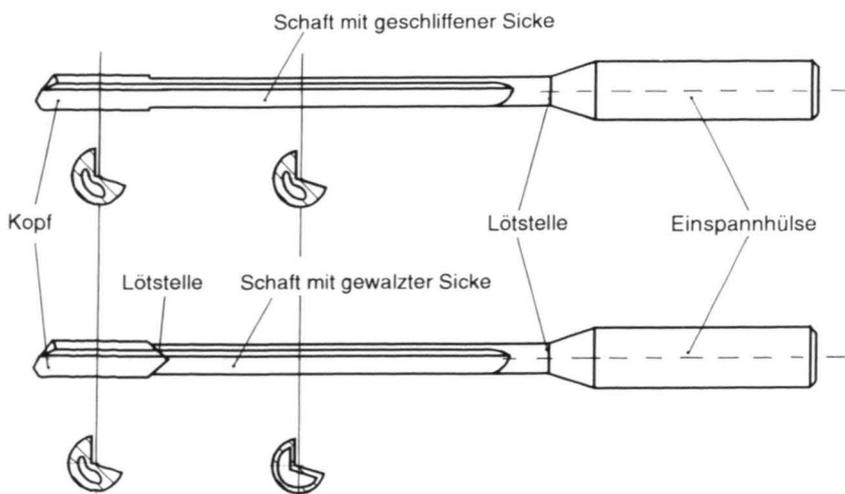


Bild 1: Unterschiede zwischen Vollhartmetallbohrern und konventionellen Einlippenwerkzeugen

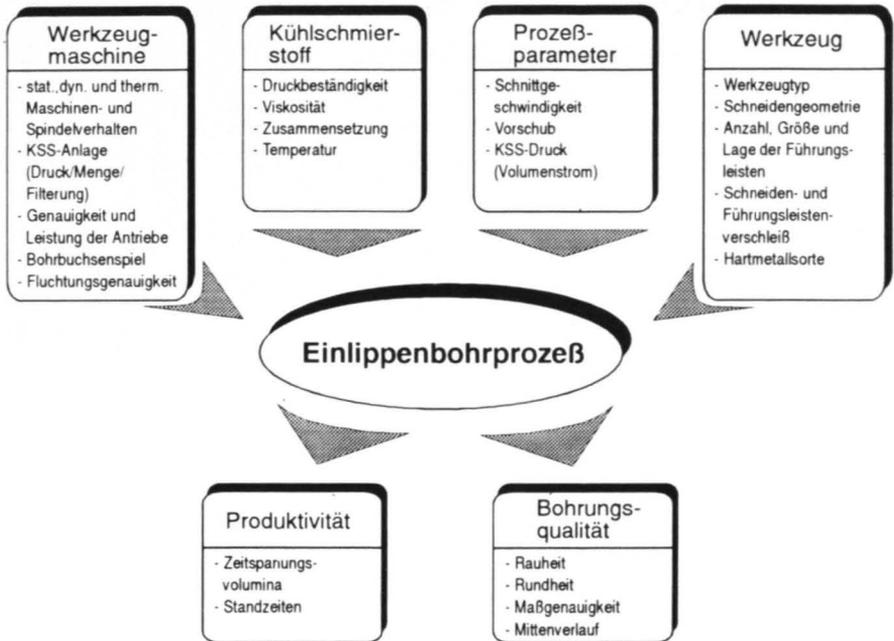


Bild 2: Einflußfaktoren beim Einlippenbohrprozeß

Die Produktivität und die Qualität beim Einlippenbohren ist von einer Vielzahl von Einflußfaktoren abhängig (Bild 2). Die Einflußfaktoren umfassen dabei die verfahrens-spezifischen Maschinenvoraussetzungen, die Verwendung geeigneter Kühlschmierstoffe, die Wahl angepaßter Prozeßparameter, das Werkstückmaterial sowie das statische und dynamische Werkzeugverhalten. Die Stabilität des Zerspanungsprozesses als Voraussetzung einer hohen Prozeßsicherheit ist beim Einlippenbohren aufgrund der hohen Werkzeugnachgiebigkeiten in radialer als auch in axialer Richtung im wesentlichen vom Werkzeugverhalten abhängig [5, 6].

Mit dem folgenden Beitrag sollen erste Untersuchungsergebnisse zur Beeinflussung der Zerspanbarkeit [7] durch das Werkzeugverhalten sowie die Vorgehensweise bei der Ermittlung von statischen und dynamischen Kenngrößen für Einlippenwerkzeuge dargestellt werden.

### Einfluß des Werkzeugverhaltens auf die Zerspanbarkeit

Im Vergleich zu konventionellen Einlippenwerkzeugen liegen beim Bohren mit Vollhartmetallwerkzeugen noch keine Erkenntnisse über das statische und dynamische Verhalten des Werkzeugs und die Auswirkungen auf Zerspankräfte, Spannbildung, Standzeit sowie Bohrungsqualität vor.



Bild 3: Einfluß des statischen und dynamischen Werkzeugverhaltens auf die Zerspanbarkeit

Zur Beurteilung des Einflusses der Werkzeugwahl und der Prozeßparametereinstellungen auf das Arbeitsergebnis ist es notwendig die signifikanten Einflußgrößen und die technologischen Wirkzusammenhänge zu ermitteln [8, 9]. Auf diese Weise können Informationen über die geeignete Prozeßauslegung zur Realisierung der gewählten Zielgrößen (Spanform, Bohrungsqualität usw.) gewonnen werden (Bild 3).

Beim Zerspanen der Werkstoffe 42CrMo4V, Ck45 sowie 100Cr6 ließ sich mit 5 mm-Vollhartmetallwerkzeugen eine Vorschubgeschwindigkeitserhöhung von etwa 30 Prozent gegenüber konventionellen Werkzeugen realisieren. Beurteilungskriterium hierbei waren Zerspanungsgeräusche, anhand derer die stabilen Vorschubbereiche festgelegt wurden. Zu berücksichtigen sind dabei die entstehenden Spanformen, die hinsichtlich einer sicheren Spanabführung und damit für die automatisierte Prozeßführung eine entscheidende Bedeutung besitzen [10]. Die mittlere Spanlänge wurde als charakteristisches Merkmal der Spanform gewählt, um ihre Eignung im Hinblick auf eine sichere Spanabführung beurteilen zu können. Im Unterschied zum Drehen, bei dem man den Vorschub erhöht um kurzbrüchige Späne zu erhalten, konnte bei den Versuchen mit den oben genannten Werkstückstoffen eine Zunahme der mittleren Spanlänge  $\bar{l}_2$  bei einer Erhöhung des Vorschubs festgestellt werden. Die Spanlängenzunahme für die bei diesen Versuchen gewählten Vorschubbereiche kann mit dem überproportionalen Anstieg der Biegefestigkeit und -steifigkeit der Späne durch Erhöhung der Spannungsdicke und Spanstauchung erklärt werden. Ein Vergleich der entstehenden Spanformen beim Zerspanen der langspanenden Werkstoffe Ck45 und 42CrMo4 V zeigt, daß mit gleichen Prozeßparametern bei Verwendung von Vollhartmetallwerkzeugen die längeren Späne entstehen (Bild 4). Beim Bohren des kurzspanenden Werkstoff 100Cr6 ergaben sich nur für einen Vorschub von  $f = 30 \mu\text{m}$  längere Späne für das Vollhartmetallwerkzeug.

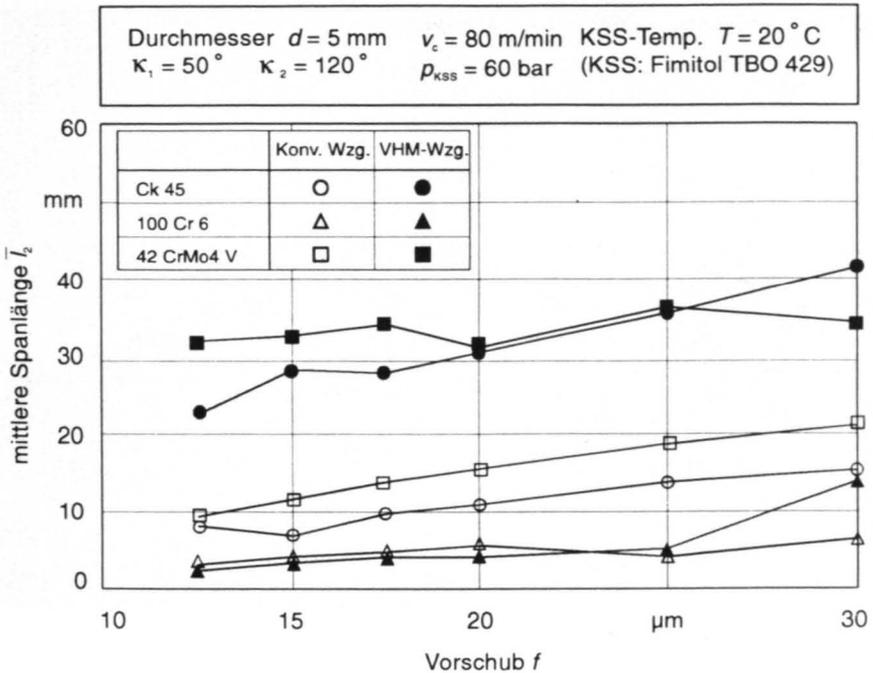


Bild 4: Einfluß des Vorschubs und des Werkzeugtyps auf die mittlere Spanlänge

Um das Torsionsschwingungsverhalten und dessen Einfluß auf die mittlere Spanlänge zu untersuchen, wurden Dehnmeßstreifen (DMS) auf die kreisförmigen Schaftbereiche der Einlippenwerkzeuge beider Typen appliziert. Für die berührungslose Signalübertragung wurde ein Telemetriesystem verwendet. Die Stromversorgung für den Sensorsignalverstärker, der über einen Adapter an der Einspannhülse montiert wurde, erfolgt über eine induktive Kopplung zwischen den rotierenden Komponenten und der stationären Empfangsantenne. Mit einer Systembandbreite bis zu 10 kHz ist es möglich die Torsionsschwingungen von Einlippenwerkzeugen mit Frequenzen kleiner als 5 kHz zu messen.

Die Zerspanversuche zur Messung des Bohrmoments wurden mit drei verschiedenen Werkstückstoffen für beide Werkzeugtypen unter Variation des Vorschubs durchgeführt. In Abbildung 6 sind die gemessenen Bohrmomente für ein Vollhartmetallwerkzeug und ein konventionelles Werkzeug bei einem Vorschub von  $f = 20 \mu\text{m}$  dargestellt. Mit der Transformation (Fast Fourier Transformation - FFT) in den Frequenzbereich konnte für das Vollhartmetallwerkzeug eine Torsionsschwingungsfrequenz von 4,22 kHz und für das konventionelle Werkzeug von 2,87 kHz ermittelt werden. Zur Beurteilung des dynamischen Verhaltens von Einlippenwerkzeugen im Bohrprozeß soll in den folgenden Kapiteln auf die Vorgehensweise bei der Ermittlung der statischen und dynamischen Werkzeugkenngrößen eingegangen werden.

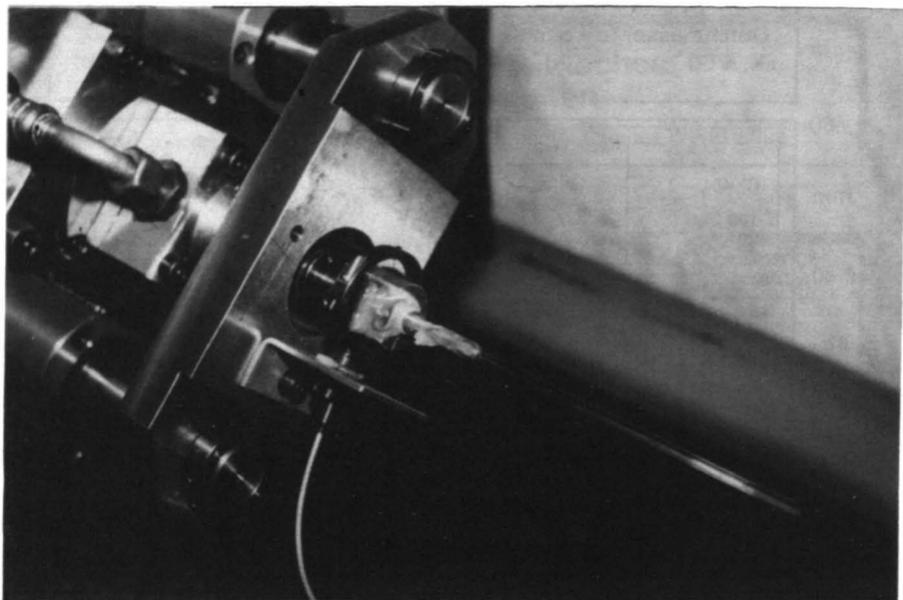


Bild 5: Mit DMS applizierter Bohrer und Telemetriesystemantenne

### **Bestimmung statischer und dynamischer Kenngrößen bei Einlippenwerkzeugen**

Um die Einlippenwerkzeuge hinsichtlich ihres statischen und dynamischen Verhaltens beurteilen zu können, ist es notwendig, Kenngrößen einzuführen und zu bestimmen. Diese Kenngrößen, die auch zum Vergleich verschiedener Werkzeugvarianten herangezogen werden können, lassen sich in statische und dynamische Größen unterteilen. Zu unterscheiden sind:

- Statische Kenngrößen: Hierzu werden die Steifigkeiten  $c_B$ ,  $c_T$  und  $c_{Tf}$  gezählt, welche den Widerstand gegen Biegung, Torsion und Zug-/Druckbelastung beschreiben. Die Biege- und die Torsionssteifigkeit sind linear vom Flächenträgheitsmoment  $I_x$  und  $I_y$  bzw. vom Torsionsflächenmoment  $I_t$  abhängig, so daß diese Querschnittskenngrößen ebenfalls miteinbezogen werden. Weiterhin von Bedeutung ist die Querschnittsfläche  $A$  und die umschlossene Fläche  $A'$ .
- Dynamische Kenngrößen: Damit sind in diesem Zusammenhang in erster Linie die Eigenfrequenzen und Moden gemeint. Von hauptsächlichem Interesse sind dabei die Torsions- und Translationseigenfrequenzen  $f_T$  und  $f_{Tf}$ .

Für die Bestimmung dieser Größen bestehen im wesentlichen drei Möglichkeiten, die aber nicht alle mit derselben Effizienz zur Lösung führen. Denkbar sind in den meisten Fällen experimentelle Untersuchungen, wobei aber im Fall des kleinsten untersuchten Durchmesserbereichs die Grenzen aufgrund meßtechnischer Probleme rasch erreicht

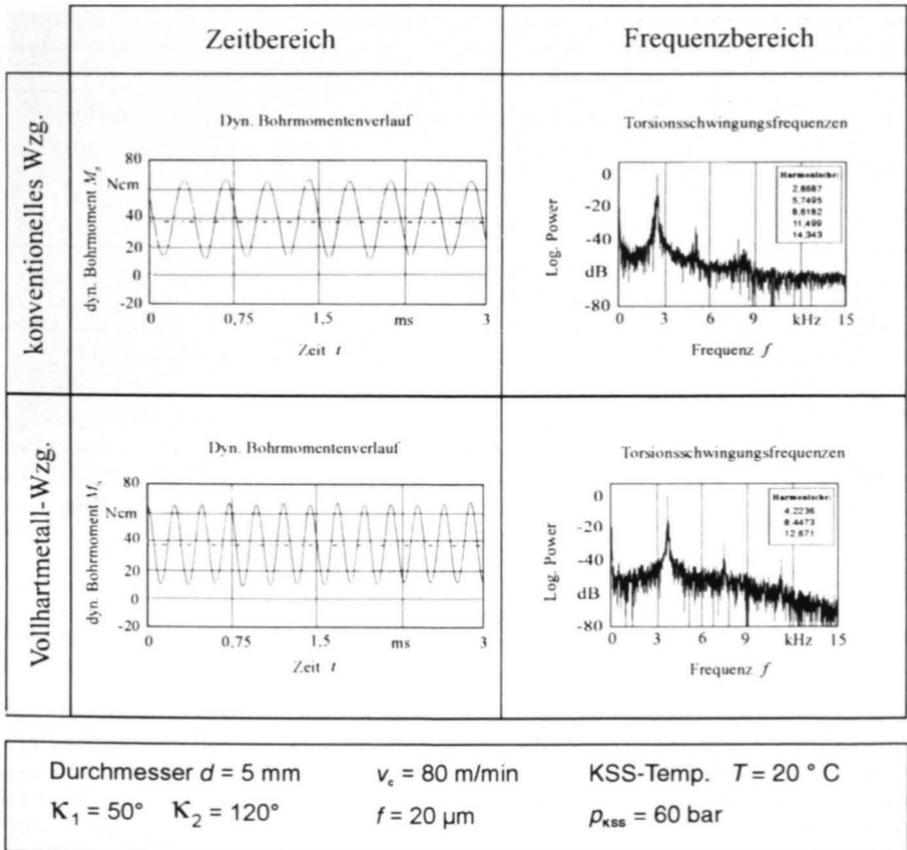


Bild 6: Dynamische Bohrmomente beim Einlippenbohren mit verschiedenen Werkzeugtypen

werden. Für analytische oder numerische Methoden ergeben sich in dieser Hinsicht keine Restriktionen, jedoch können diese Verfahren nicht in jedem Fall mit vertretbarem Aufwand angewendet werden. Die Tafel 1 gibt einen Überblick über die Methoden bei der Ermittlung der Werkzeugkenngrößen.

### Experimentelle Bestimmung

#### Mechanische Aufziehvorrichtung

Für die Bestimmung der Torsionssteifigkeit, d. h. des Widerstandsmomentes gegen Verdrehung homogener, langgestreckter Körper gilt die Definitionsgleichung

$$\varphi = \frac{M_t}{c_T} = \frac{M_t \cdot l}{G \cdot I_t}, \quad (1)$$

Tafel 1: Methoden zur Ermittlung der Werkzeugkenngrößen

| Lösungsansatz        | Werkzeugkenngrößen  |  |
|----------------------|---|--|
|                      | statische Kenngrößen:<br>Flächenmomente $I_x/I_y$ , $I_t$<br>Steifigkeiten $c_B$ , $c_T$ , $c_{Tr}$<br>Querschnittsflächen $A$ , $A'$ | dynamische Kenngrößen:<br>Eigenfrequenzen $f_T$ , $f_{Tr}$ |
| <u>experimentell</u> | – Aufziehversuche<br>( $I_t$ , $c_T$ )  | – DMS-Applikation<br>– Körperschallmessung                 |
| <u>analytisch</u>    | – Wölbtheorie nach<br>Sant-Venant ( $I_t$ )<br>– Bredtsche Formel ( $I_t$ )   | – Feder-Masse-Modelle<br>– Modellierung als<br>Kontinuum   |
| <u>numerisch</u>     | – Diskretisierung der Quer-<br>schnittsfläche<br>( $I_x/I_y$ , $A$ , $A'$ )<br>– einschichtiges FEM-<br>Torsionsmodell ( $I_t$ )      | – FEM-Modellierung<br>durch Balkenelemente                 |

womit der Zusammenhang zwischen angreifendem Moment  $M_t$  und resultierendem Verdrehwinkel  $\varphi$  über die Torsionssteifigkeit verknüpft wird. Mit einer geeigneten Aufziehvorrichtung können die zu untersuchenden Werkzeuge eingespannt und mit einem bestimmbar Verdrehwinkel  $\varphi$  beaufschlagt werden. Das Übersetzungsverhältnis der für die Versuche gebauten Vorrichtung zwischen Bohrer und Kurbel beträgt = 1/62. Das resultierende Moment  $M_t$  wurde über eine am Ende der Vorrichtung angebrachten Kraft- und Momentenmeßnabe gemessen. Unter der Voraussetzung, daß die Materialkenngröße  $G$  und die Länge  $l$  mit hinreichender Genauigkeit bekannt sind, kann mit Hilfe der oben angegebenen Beziehung die Torsionssteifigkeit  $c_T$  bzw. das Torsionsflächenmoment  $I_t$  errechnet werden. Bild 7 zeigt die verwendete Meßvorrichtung.

Obwohl das Verfahren einfach in der Anwendung ist, sind jedoch einige Einschränkungen hinsichtlich der Genauigkeit zu beachten. Durch die begrenzte Auflösung der mechanischen Verspannvorrichtung und dem Auftreten von Spiel- und Reibungseffekten kann das Ergebnis besonders im Bereich kleiner Winkel und Momente verfälscht sein. Die Anwendbarkeit für die bruchempfindlichen Vollhartmetallwerkzeuge mit 1 bis 2 mm Durchmesser ist aufgrund fehlender geeigneter Einspannmöglichkeiten und den genannten Meßunsicherheiten nicht möglich. Nachteilig ist zudem, daß aufgrund einer bestimmten Mindesteinspannlänge nicht der gesamte Werkzeugbereich tordiert wird. Die Ermittlung von Steifigkeiten einzelner Abschnitte ist mit dieser Methode ebenfalls nicht möglich, das Ergebnis ist immer eine Gesamtsteifigkeit bzw. ein Gesamtflächenmoment.

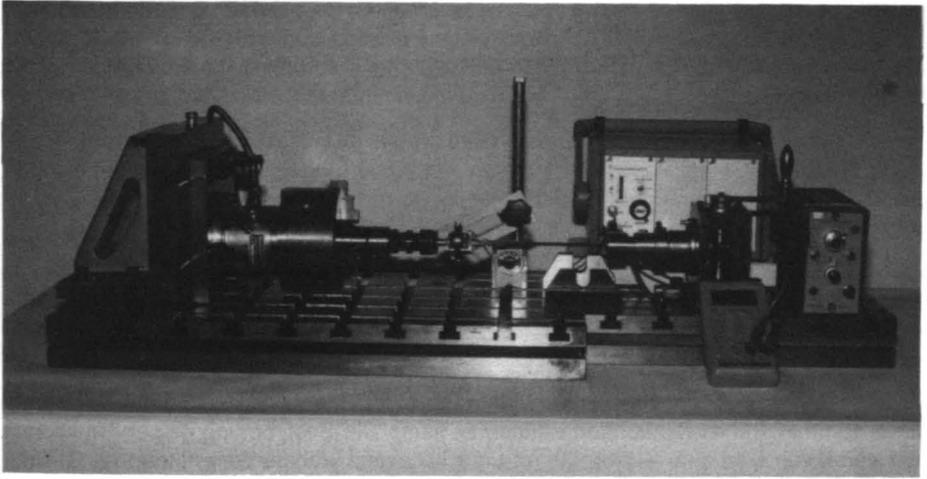


Bild 7: Meßvorrichtung zur Bestimmung der Torsionssteifigkeit

### Körperschallmessung durch Variation der Massenträgheitsmomente

Bei der experimentellen Torsionseigenfrequenzbestimmung stößt man im wesentlichen auf zwei Probleme. Zum einen darf durch den Masseneinfluß eines Sensors oder Erregers das dynamische Verhalten nur unwesentlich verändert werden, zum anderen ist die Anregung des Werkzeugs zu reinen Torsionsschwingungen relativ schwierig, da hierbei ebenfalls Biegeschwingungen mit angeregt werden. Insbesondere bei Bohrern mit kleinsten Durchmessern können keine Sensoren im Schaftbereich angebracht werden.

Bei den durchgeführten Versuchen wurde ein piezoelektrischer Beschleunigungsaufnehmer an den Einspannhülsen vor den Bohrerstäben der eingespannten Bohrer angebracht. Für vergleichende Messungen der Torsionseigenfrequenz von Werkzeugen mit einem Durchmesser von 5 mm sind außerdem die für die Zerspanversuche mit DMS applizierten Werkzeuge verwendet worden. Die impulsförmige Anregung erfolgte in Umfangsrichtung an der Hauptschneide. Zur Bestimmung der Eigenfrequenzen können die Körperschallsignale ausgewertet werden. Hierzu sind die Massenträgheitsmomente der Bohrer durch kleine Zusatzmassen verändert worden. So kann über eine Verschiebung der Zusatzmasse senkrecht zur Bohrerachse bei gleichbleibender Biegeeigenfrequenz die Torsionseigenfrequenz geändert werden. Umgekehrt ändern sich beim axialen Verschieben der Masse nur die Biegeträgheitsmomente und somit die Biegeeigenfrequenzen. Mit der Auswertung der sich abhängig von der Zusatzmasse oder mit deren Befestigungsposition ändernden Frequenzspektren kann mit dieser Methode die Torsionseigenfrequenz für Werkzeuge bis 2 mm zielsicher bestimmt werden.

## Analytische Berechnung

### Berechnung des Torsionsflächenmoments $I_t$ mit der Bredtschen Formel

Bei der Verdrehung beliebiger Querschnitte treten grundsätzlich Verwölbungen auf. Wölbfrei sind nur einige spezielle Formen wie Kreis(-ringe), Kreistangentenpolygone und sternförmige Geometrien. Ist die Verwölbung nicht behindert, wovon in vielen Fällen ausgegangen werden kann, gilt die Theorie nach Saint-Venant [11]. Sie gestattet es, das Torsionsflächenmoment  $I_t$  über die Beziehung

$$I_t = \int \left( y^2 + z^2 + y \frac{\partial \psi}{\partial z} - z \frac{\partial \psi}{\partial y} \right) dA = -4 \int \Psi(y, z) dA \quad (2)$$

zu bestimmen, wobei  $\psi$  und  $\Psi$  Verwölbungs- bzw. Spannungsfunktionen darstellen, die bestimmte Randbedingungen erfüllen müssen. Die Bestimmung dieser Funktionen und damit von  $I_t$  ist sehr aufwendig und nur für einige wenige Geometrien (z. B. Dreieck, Ellipse, Rechteck) liegen exakte Lösungen vor, so daß für die analytische Berechnung des Torsionsflächenmoments der Werkzeugschäfte auf die Bredtsche Formel zurückgegriffen werden muß. Hierbei gilt es die Frage zu klären, ob die mit dieser Näherungsformel berechneten Torsionsflächenmomente ausreichend genau sind.

Für Hohlquerschnitte kann unter der Voraussetzung dünner Wandstärken ( $d \gg s$ ) und der unbehinderten Verwölbung die 2. Bredtsche Formel angewandt werden:

$$I_t = \frac{4A_m^2}{\oint \frac{ds}{t(s)}} \quad (3)$$

$A_m$  ist hierbei die von der Mittellinie eingeschlossene Fläche des Hohlquerschnitts und  $t$  die jeweilige Wandstärke. Die Voraussetzung kleiner Wandstärken beschränkt die Anwendung der Bredtschen Formel für die vorliegenden Querschnittsgeometrien auf den Schaftbereich beim konventionellen Werkzeug. Bereiche mit dickeren Wandstärken, und dies gilt insbesondere für die Vollhartmetallwerkzeuge oder mehrfach durchbrochene Profile, können damit nicht mit hinreichender Genauigkeit bestimmt werden.

## Feder-Masse-Modelle und Modellierung als Kontinuum

Die Eigenfrequenzen komplizierter Querschnittsformen, wie sie bei Einlippenwerkzeugen vorliegen, sind analytisch nur näherungsweise zu ermitteln. Für die näherungsweise Berechnung der Torsionseigenfrequenzen können die Werkzeuge als ungedämpfte, einseitig fest eingespannte Mehrmassentorsionsschwinger angenommen werden. Somit läßt sich das dynamische Verhalten durch ein Differenzialgleichungssystem beschreiben. Untersuchungen von Streicher [12] zeigten eine gute Übereinstimmung zwischen Ersatz- und Realsystem im Fall für die erste Eigenfrequenz ab einer Einzelmassenzahl von  $n \geq 5$ . Voraussetzung für diese Berechnungen ist wiederum die Kenntnis des Torsionsflächenmoments und der Massenträgheitsmomente.

Die Berechnung der Schwingungseigenschaften von Körpern unter der Voraussetzung linearer, homogener Kontinua bereitet keine Probleme. In [13] wird die Voraussetzung der Linearität weitestgehend bestätigt. Die dort gemessenen Abweichungen von der linearen Abhängigkeit der Torsionssteifigkeit vom Verdrehwinkel an konventionellen Einlippenwerkzeugen liegen unter einem Prozent, so daß sie vernachlässigt werden können. Die Voraussetzung der Homogenität ist dagegen bei konventionellen Werkzeugen durch die Bereiche Einspannhülse, Schaft und Hartmetallkopf nur abschnittsweise haltbar. Um die Behandlung von komplexen Koppelbewegungen zu vermeiden, wurden von Hauger [13] für die durchgeführten analytischen Berechnungen Vereinfachungen getroffen, die er experimentell für die von ihm verwendeten konventionellen Einlippenbohrer bestätigte. Für die Berechnungen verwendete er Gesamtmassen und -steifigkeiten über die gesamte Werkzeuglänge. Zur Bestimmung der Schwingungsei-

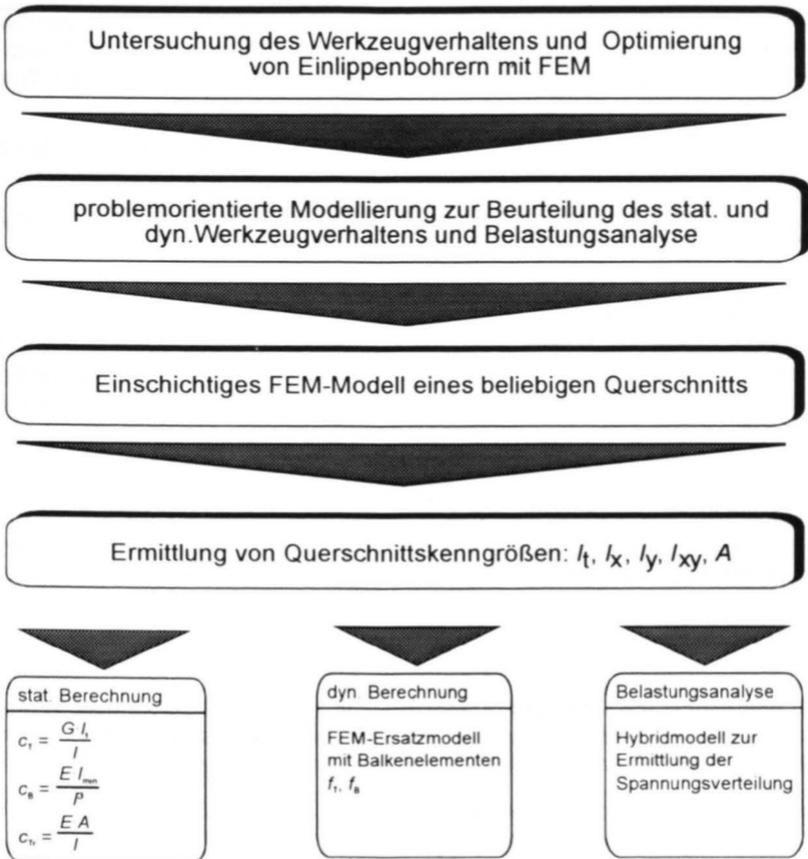


Bild 8: Ziel der FEM-Analyse bei der Untersuchung des Werkzeugverhaltens

genschaften von Vollhartmetallwerkzeugen wurden hier darüber hinaus die Bewegungen der einzelnen Abschnitte gesondert betrachtet, um Hinweise über das Frequenzverhalten dominanter Abschnitte zu erhalten.

### **Beurteilung des Werkzeugverhaltens und Geometrieoptimierung mit FEM**

Mit Hilfe der Finite Elemente Methode (FEM) lassen sich neben der statischen und dynamischen Berechnung Belastungsanalysen durchführen [14] (Bild 8). Die Vorgehensweise besteht in der Modellierung von scheibenförmigen Volumenelementen mit nur einer Elementschicht, die die Querschnittsgeometrie der Bohrer repräsentieren. Aus diesen Modellen lassen sich alle wesentlichen Querschnittskenngößen wie Torsionsflächenmoment, Flächenträgheitsmomente usw. ermitteln, so daß sich mit diesen Kennwerten bereits ein quantitativer Vergleich durchführen läßt. Zur Ermittlung der Spannungsverläufe an der Werkzeugschneide und den Kerbstellen können mit den zuvor ermittelten Größen gemischte FEM-Modelle (Hybridmodelle) erzeugt werden, die aus Rechnerkapazitätsgründen nur an den wesentlichen Stellen ein feingeteiltes Netz aus Volumenelementen besitzen, und deren Rest aus Balkenelementen besteht. Mit einem weiteren Modell aus Balkenelementen können die Torsions- und Translationsfrequenzen der Werkzeuge bestimmt werden.

Im Vergleich zu den experimentellen Methoden können mit der FE-Methode ebenso die Kenngrößen von Einlippenbohrern mit Durchmesser  $d < 2$  mm ermittelt werden. Darüber hinaus bietet die FE-Berechnung die Möglichkeit der Simulationsrechnung, bei der beliebige Werkzeuggeometrien analysiert werden können.

#### *Einschichtiges Torsionsmodell*

Einen neuen Ansatz zur Bestimmung des Torsionsflächenmoments  $I_t$  bzw. der Torsionssteifigkeit  $c_T$  läßt sich mit Methode der finiten Elemente realisieren. Grundgedanke ist es, ähnlich wie bei der mechanischen Aufziehvorrichtung, einen Werkzeugabschnitt mit einem bestimmten Verdrehmoment  $M$  zu beaufschlagen. Über die Ergebnisgröße der resultierenden Verdrehung  $\varphi$  kann das Torsionsflächenmoment berechnet werden. Hierzu ist es erforderlich einen Bohrerabschnitt beliebiger Länge zu modellieren und mit Volumenelementen zu vernetzen. Neben der Elementart und -anzahl muß hierbei auch der zwangungsfreien Lagerung Beachtung geschenkt werden. Dies bedeutet, daß die bei der Torsion auftretende Verwölbung in axialer Richtung keinesfalls behindert werden darf.

#### **Konvergenzbetrachtung**

Für die Beurteilung der Konvergenz hinsichtlich der Wahl von Elementtyp, Vernetzung und Lagervariante wurden für Voruntersuchungen ein gleichschenkeliger, dreieckiger Drehstab, für den eine analytische Lösung existiert, berechnet.

Im Rahmen der Konvergenzbetrachtung wurden ein Grundnetz von 27 Elementen (6 Elemente pro Drehstabskante) und ein feineres Netz mit 109 Elementen (12 Elemente pro Kante) modelliert, wobei drei verschiedene Volumenelemente zum Einsatz kamen. Als Volumenelemente kamen HEXE8-Elemente (kubisches Volumenelement),

Tafel 2: Kenngrößen des dreieckigen Drehstabmodells

| Querschnitt | $W_t$                                   | $I_t$                                      |
|-------------|---|--|
|             | $\frac{b^3}{20} \approx \frac{h^3}{13}$ | $\frac{b^4}{46,19} \approx \frac{h^4}{26}$ |

HEXC20-Elemente (kubisches Volumenelement mit einem zusätzlichen Seitenmittenknoten) und HEXE27-Elemente (kubisches Volumenelement mit zusätzlichem Flächen- und Seitenmittenknoten) zur Anwendung. Für die Modellberechnung mit den Vernetzungs- und Volumenelementversionen wurden zudem folgende drei Varianten der Lagerung vorgesehen:

- Die Modelle nach Variante 1 sollen eine Lagerung mit minimaler Zwängung erhalten, ihre Vernetzung mit nur einer Elementschicht ist ausreichend.
- Die Variante 2 erhält an einem Schnittufer eine feste Anbindung in allen Freiheitsgraden. Die Eliminierung des dadurch entstehenden Störbereiches soll durch Vernetzung in mindestens 10 Elementebenen erfolgen.
- Bei der Variante 3 soll zusätzlich noch das andere Schnittufer an der Verwölbung gehindert werden, wobei ebenfalls 10 Ebenen vernetzt werden. Dabei entsteht ein noch größerer Störbereich.

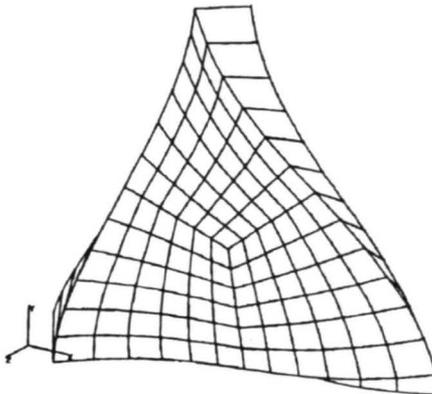


Bild 9: Freie Verwölbung bei Variante 1 (HEXC20 / feines Netz)

Neben den auftretenden Abweichungen der Rechenergebnisse ist weiterhin ein Vergleich der entsprechenden Rechenzeiten von Interesse. Diese sind proportional zur Anzahl der Freiheitsgrade und hängen damit auch von der Art der Elemente ab.

Als Ergebnisse können an den Verschiebungsfeldern die Auswirkungen der Randbedingungen am deutlichsten abgelesen werden. Während sich bei der ersten Variante eine beliebige Verwölbung ausbilden kann (Bild 9), sind bei den beiden anderen Varianten die Voraussetzungen der Torsionstheorie nicht voll erfüllt, da hier eine nicht zu vernachlässigende Störung im Bereich der Anbindung auftritt, die damit auch eine Kompensation durch mehrschichtige Modellierung erzwingt.

Beim Vergleich der errechneten Werte für das Torsionsflächenmoment mit denen der analytischen Lösung (siehe Tafel 3) lassen sich teilweise erhebliche Abweichungen feststellen, bei denen der Einfluß der Randbedingungen offensichtlich erkennbar ist. Die fettgedruckten Prozentangaben geben die Differenz bezogen auf den analytischen Wert an.

Im Hinblick auf die erreichbare Genauigkeit spricht am meisten für die erste Variante mit nur einer Elementschicht. Bei dieser Variante lassen sich auch die Auswirkungen des Übergangs auf Elemente mit höherwertigen Ansatzfunktionen, zunächst HEXC20, deutlich erkennen. Die Abweichung vom analytisch bestimmten Wert verringert sich um zwei Zehnerpotenzen, wogegen die Rechenzeit nur wenig ansteigt. Die Einführung zusätzlicher Seiten- oder Volumenmittelknoten bei den HEXE27-Elementen ergibt dagegen keine Verbesserung mehr, lediglich die CPU-Zeiten steigen an.

Tafel 3: Errechnete Torsionsflächenmomente und Abweichungen

|                          | Torsionsflächenmoment [mm <sup>4</sup> ] |                           |                         |                           |                          |                          |
|--------------------------|--|---------------------------|-------------------------|---------------------------|--------------------------|--------------------------|
|                          | Grundnetz                                |                           |                         | feines Netz               |                          |                          |
|                          | HEXE8                                    | HEXC20                    | HEXE27                  | HEXE8                     | HEXC20                   | HEXE27                   |
| Variante 1               | 3,33637<br><b>7,1 %</b>                  | 3,11824<br><b>0,09 %</b>  | 3,1181<br><b>0,09 %</b> | 3,15706<br><b>1,34 %</b>  | 3,11758<br><b>0,07 %</b> | 3,11758<br><b>0,07 %</b> |
| Variante 2 <sup>1)</sup> | 3,11406<br><b>-0,04 %</b>                | 3,11341<br><b>-0,06 %</b> | „2)                     | 3,10559<br><b>-0,31 %</b> | „2)                      | „2)                      |
| Variante 3 <sup>1)</sup> | 3,27973<br><b>5,28 %</b>                 | 3,27756<br><b>5,21 %</b>  | „2)                     | 3,01975<br><b>-3,07 %</b> | „2)                      | „2)                      |
| analytisch               | 3,11538 (100 %)                          |                           |                         | 3,11538 (100 %)           |                          |                          |

1) Die resultierende Verdrehung  $f_z$  wurde hier nicht am führenden Knoten ermittelt; stattdessen ist aus der tangentialen Verlagerung zweier in der Mitte liegender Schichten ein Wert bestimmt worden.

2) Diese Modelle konnten wegen zu geringer Plattenkapazität nicht berechnet werden.

## Torsionsflächenmomente $I_t$ der untersuchten Bohrer

Neben der Berechnung der für Vollhartmetallwerkzeuge verwendeten Querschnittsgeometrie mit nierenförmigem Querschnitt des Kühlschmierstoffkanals (KSS-) wurden außerdem ein Zweilochquerschnitt und eine hinsichtlich der Querschnittsfläche des Kühlschmierstoffkanals optimierte Form berücksichtigt.

Da im vorherigen Abschnitt nachgewiesen wurde, daß bei korrekter Lagerung eine Elementschicht ausreichend ist, sind diese Modelle ebenfalls entsprechend ausgebildet worden. Zum Einsatz kamen die schon angesprochenen HEXC20-Quader-elemente mit jeweils einem Zwischenknoten auf jeder Kante, mit denen dann entsprechend fein modelliert werden kann. Die Lagerung wurde so durchgeführt, daß keines der beiden Schnitrufer in seiner Verwölbung behindert war und als Belastung wurde ein beliebig ausgewähltes Moment von 1 Nm am führenden Knoten aufgebracht. Bild 10 zeigt die vernetzten Bohrerquerschnittsgeometrien. Der Lastvektor steht dabei senkrecht zur Zeichenebene.

Da beim Einlippenbohren die Kühlschmierstoffversorgung sowie die Spanabfuhr im wesentlichen durch die Geometrie des Bohrerquerschnitts bestimmt werden, gilt es einen Kompromiß zu finden, der einerseits die Forderung nach hoher Torsions- und Biegesteifigkeit erfüllt, andererseits einen großen Bereich des Querschnitts zur Kühl- und Schmierstoffversorgung freiläßt. Somit stellt die Fläche der KSS-Kanalquerschnitte ebenfalls eine wichtige Größe zur Beurteilung der Querschnittsgeometrien dar [15, 16].

Der Vergleich (Bild 11) der berechneten Torsionsflächenmomente (Nierenquerschnitt entspricht 100 Prozent) zeigt für den fiktiven Querschnitt eine Abnahme des Torsionsflächenmoments um weniger als 6 Prozent bei einer gleichzeitigen Verbesserung der Kanalquerschnittsfläche um 81 Prozent. Für den Zweilochquerschnitt kann eine weniger gute Ausnutzung der Fläche im Hinblick auf das Torsionsflächenmoment festgestellt werden, da sich im Steg zwischen den beiden Bohrungen die Schubspannungsflüsse gegenseitig aufheben, so daß dieser Bereich lediglich ein Beitrag zur Erhöhung der Biegesteifigkeit liefern kann.

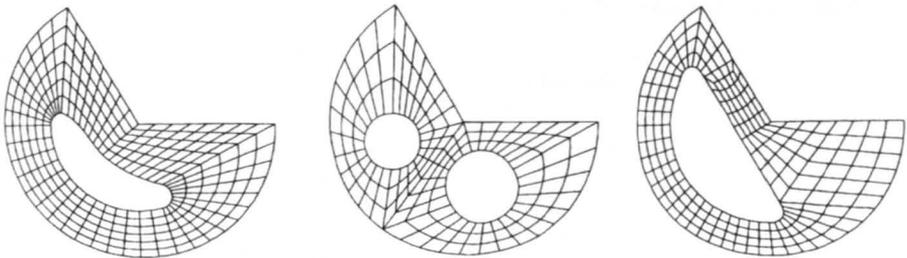


Bild 10: Vernetzte Bohrerquerschnittsgeometrien

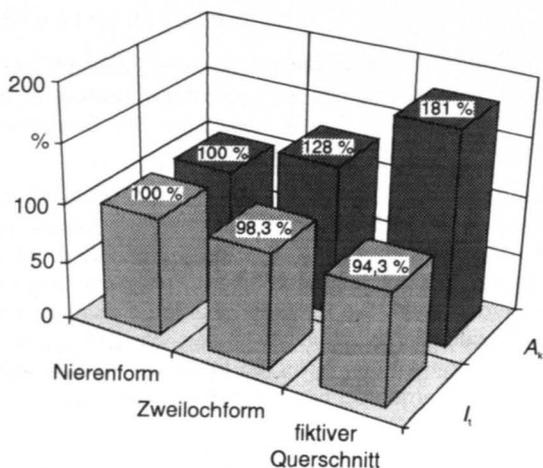


Bild 11: Prozentuale Änderung von Flächentorsionsmoment und Kanalquerschnittsfläche (Bohrerdurchmesser  $d = 2$  mm, Nierenform = 100 %)

### FEM-Balkenmodell

Mit den aus den eindimensionalen Modellen ermittelten Querschnittskenngößen kann jetzt in Analogie zum mechanischen Ersatzmodell ein FEM-Ersatzmodell mit Balkenelementen erstellt werden. Es wird dabei so vorgegangen, daß Bohrerbereiche mit einer gewissen Anzahl linear hintereinander liegender Balkenelemente vernetzt werden, denen dann die jeweiligen Geometrie- und Materialkenngrößen zugeordnet werden. Mit diesen FEM-Modellen wurden die Torsionseigenfrequenzen für alle drei Querschnittsformen am Beispiel eines 2 mm-Einlippenbohrers berechnet (Bild 12). Beim Vergleich der Torsionseigenfrequenzen lassen sich nur geringfügige Unterschiede feststellen. Dies ist ein Zeichen dafür, daß sich bei einer Querschnittsveränderung im inneren Bereich die stabilitätserhöhenden (Massenreduktion) und die stabilitätsvermindernden Maßnahmen (Steifigkeitsabnahme) etwa ausgleichen.

### Ergebnisse und Zusammenfassung

Der Vergleich der für die 5 mm-Werkzeuge über die Aufziehvorrichtung experimentell ermittelten Torsionsflächenmomente mit denen der FEM-Berechnung zeigt eine Ab-

|                 | Niere  | Zweiloch | fiktiver Querschnitt |
|-----------------|--------|----------|----------------------|
| 1. Torsion [Hz] | 6 297  | 6 419    | 6 356                |
| 2. Torsion [Hz] | 19 010 | 19 290   | 19 100               |

Bild 12: Torsionseigenfrequenzen aus der dynamischen FEM-Analyse

weichung der Werte von etwa 5 Prozent. Mit der Annahme, daß eine Abweichung von bis zu 5 Prozent aus der Meßunsicherheit resultieren kann und daß die FE-Berechnung den exakteren Wert wiedergibt (100 Prozent), lassen sich für die unter Verwendung der Bredtschen Formel bestimmten  $I_T$ -Werte Fehler bis zu 20 Prozent feststellen.

Die Torsionseigenfrequenzen konnten bis zu einem kleinsten Durchmesser von 2 mm experimentell bestimmt werden. Für die analytisch mit den aus der FEM-Berechnung gewonnenen  $I_T$ -Werten ermittelten Frequenzen ergab sich im Vergleich zu den im Experiment festgestellten Werten eine Abweichung von etwa 10 Prozent. Dies gilt jedoch nur unter der Voraussetzung, daß lediglich der Schaftbereich für die Berechnung berücksichtigt wird. Berechnungen, bei denen der Bohrerkopf und das sich nicht in der Einspannung befindliche Einspannhülselement ebenfalls in die Rechnung eingehen, sind mit sehr großen Fehlern von mehr als 100 Prozent behaftet. Für die mit Hilfe der FEM ermittelten Werte liegen die Abweichungen bei ca. 5 Prozent.

Neben den Zerspanversuchen zur Beurteilung des Einflusses des Werkzeugverhaltens auf die Zerspanbarkeit wurden verschiedene Vorgehensweisen zur Ermittlung von statischen und dynamischen Kenngrößen für Einlippenwerkzeuge miteinander verglichen.

Ein Vergleich der Ergebnisse der Berechnungen mit den Meßergebnissen aus den Zerspanversuchen zeigt, daß die Annahme einer einseitigen Einspannung die Prozeßverhältnisse am ehesten beschreibt. Die auftretenden Fehler bei der Anwendung der Bredtschen Formel, insbesondere bei Vollhartmetallwerkzeugen, ist auf die nicht mehr uneingeschränkt gültige Voraussetzung kleiner Wandstärken zurückzuführen.

Für die aus analytischen Berechnungen ermittelten Eigenfrequenzen erhält man die beste Übereinstimmung mit den gemessenen Werten, wenn die Annahme zugrunde liegt, daß nur der Schaftbereich schwingt. Mit Hilfe der FE-Methode können die Torsionseigenfrequenzen bis auf 5 Prozent genau bestimmt werden. Insbesondere in Anbetracht der relativ großen Fehler bei der  $I_T$ -Bestimmung nach der Bredtschen Formel bietet die FE-Methode eine gute Möglichkeit die statischen und dynamischen Werkzeugkenngrößen zu bestimmen. Weiterhin können beliebige Werkzeuggeometrien analysiert werden.

#### Schrifttum

- [1] Heisel, U.: Stand der Technik beim Tiefbohren. Tiefbohrtagung, VDI-Gesellschaft Produktionstechnik (VDI-ADB), am 31.01.1991 in Stuttgart. Manuskriptdruck, Düsseldorf: VDI-Gesellschaft Produktionstechnik, 1991, S. 1..10.
- [2] Borntäger, H.: Tiefbohren auf Bearbeitungszentren. In: VDI-Fachtagung Tiefbohren in Stuttgart, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991, S. 57..73.
- [3] Engler, H.: Tiefbohren auf konventionellen Werkzeugmaschinen. In: VDI-Fachtagung Tiefbohren in Stuttgart, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991, S. 27..55.
- [4] Heisel, U.: Spanende Bearbeitungsverfahren mit neuem Potential. FTK '91. In: Fertigungstechnisches Kolloquium 1991 in Stuttgart. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1991, S. 87..92.

- [5] Heisel, U.; Hauger, R.: Höhe Stabilität – Torsionsschwingungen vermindern beim Tiefbohren mit Einlippenwerkzeugen. In: Maschinenmarkt 98 (1992), Nr. 18, S. 196..203.
- [6] Hauger, R.: Einflußgrößen auf das Stabilitätsverhalten von Einlippentiefbohrwerkzeugen. In: VDI-Fachtagung Tiefbohren in Stuttgart, Düsseldorf: VDI-Verlag, 1991, S. 17..26.
- [7] Tönshoff, H. K.; Warnecke, G.: über die Zerspanbarkeit von Stahl und Gußeisen. In: VDI-Z 120 (1978) Nr.7, S. 311..318.
- [8] Enderle, K.; Eichler, R.: Prozeßsicherheit beim Tiefbohren mit kleinsten Bohrdurchmessern. FTK '91. In: Fertigungstechnisches Kolloquium 1991 in Stuttgart. Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1991, S. 87..92.
- [9] Eichler, R.: Werkzeugoptimierung, Prozeßanalyse und Werkzeugbruchüberwachung beim Einlippenbohren mit kleinsten Durchmessern. In: wt Produktion und Management 83 (1993) 4, S. 73.
- [10] Heisel, U.; Eichler, R.: High Precision Drilling for Small Diameters. Begleitband zur Tagung "AMTECH 93", 17.-19. Mai 1993 in Rousse, Bulgarien.
- [11] Szabo, I.: Höhere technische Mechanik. 5. Auflage, Berlin, Heidelberg, New York: Springer Verlag, 1972.
- [12] Streicher, P.: Tiefbohren der Metalle. Fachbuchreihe "Werkzeugmaschine international" Band 2, Vogel-Verlag Würzburg, 1975.
- [13] Hauger, R.: Untersuchung des Stabilitätsverhaltens von Einlippenwerkzeugen. Dissertation Universität Stuttgart, 1992.
- [14] Heisel, U.; Eichler, R.: Technologie beim Bohren kleinster Durchmesser. Begleitband zur Tagung "20 Jahre Zerspannungsforschung", Dortmund, 9.-12.06.1992, S. 4-64..4-71.
- [15] Heisel, U.; Eichler, R.: Process-Integrity of Deep-Hole Drilling for Small Diameters. In: Annals of the German Academic Society for Produktion Engineering, Vol. 1/1, (1993), S. 13..16.
- [16] Osman, M.O.M., Chall, G.S.: Die Auswirkungen der Form des Öldurchgangsquerschnitts beim Tiefbohren. In: tz für Metallverarbeitung (1982), S. 36..39.