

Auskammern durch Fräsen

Die Tendenz zum Leichtbau bei gleichzeitiger Erhöhung der Stabilität von in vielen Fällen hochbelasteten Bauteilen, vor allem in Anwendungsbereichen wie der Luft- und Raumfahrt, führten zu vielfältigen Methoden der Gewichtsreduzierung. Neben Waben- und Sandwichbauweise oder auch dem Einsatz von hochfesten Aluminium- oder Titanlegierungen sei hier das Einbringen von Gewichtsentlastungsbohrungen in zumeist rotationssymmetrische Bauteile genannt. Im Mittelpunkt dieses Artikels steht das neue Fertigungsverfahren „Auskammerfräsbohren“ zur Herstellung von rotationssymmetrischen, aufgeweiteten Innenkonturen in tiefen Bohrungen durch CNC-gesteuertes Innenrundfräsen, das zu einer zusätzlichen erheblichen Gewichtsreduzierung führt. Von Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel und Dipl.-Ing. Thomas Utz¹⁾.

1. Einleitung

Am Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart werden im Rahmen eines von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhabens neue Fertigungsverfahren und Werkzeuge zur numerisch gesteuerten Herstellung von rotationssymmetrisch aufgeweiteten Innenformen entwickelt, was auch kurz

als „Auskammern“ bezeichnet wird, da sich im Werkstückinneren eine Art Kammer ausbildet. Im englischen Sprachraum wird dieses Verfahren treffend als „Bottle-Boring“ bezeichnet, da der Längsschnitt durch Bauteile, die auf diese Weise bearbeitet wurden, dem einer Flasche gleicht. Einsatzgebiete von Verfahren zur spanenden Herstellung tiefer Bohrungen mit aufgeweiteten Innenkonturen sind hauptsächlich die Luft- und Raumfahrtindustrie, wo das Gewicht des Flugkörpers so gering wie möglich zu halten ist, damit der Anteil der verfügbaren Nutzlast erhöht werden kann. Bauteile, die

¹⁾ Professor U. Heisel ist Direktor des Instituts für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart. Dipl.-Ing. Th. Utz ist Wissenschaftlicher Assistent und Leiter der Arbeitsgruppe „Verfahrensentwicklung“ am selben Institut.

▼ Abb. 2: Innendrehwerkzeug mit gesteuertem Meißel

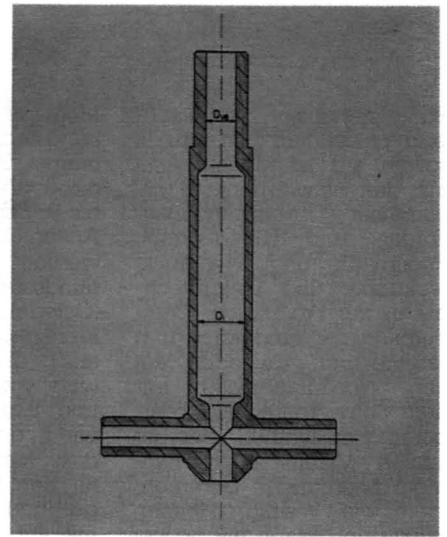
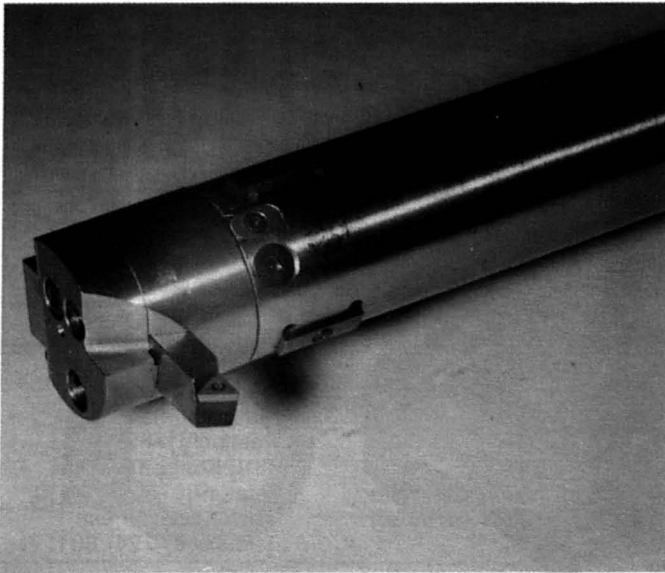
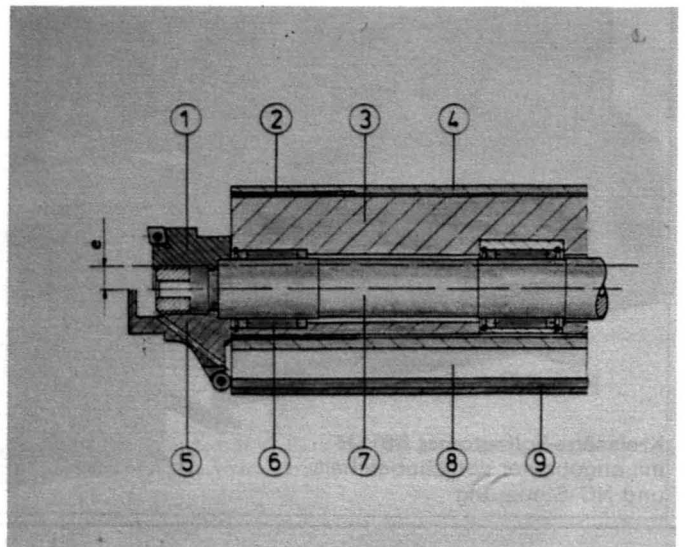


Abb. 1: Innenkontur eines Flugzeugbugfahrgestells

ausgekammert werden, sind u. a. Flugzeugfahrgerüste, Turbinenwellen und Rotorantriebsachsen von Hubschraubern. Aber auch in anderen Bereichen und zum Teil aus anderen Gründen wie dem der Gewichtsreduzierung werden Auskammerwerkzeuge eingesetzt bzw. ist deren Einsatz beabsichtigt. Dies ist bei Eisenbahnachsen für Hochgeschwindigkeitszüge, der Herstellung von Erdölbohrgestängen und Hydraulik-Arbeitszylindern von Baggern etc. der Fall. Abb. 1 zeigt eine solche Innenkontur anhand der schematischen Darstellung eines Flugzeugbugfahrgerüsts.

Die Knickstabilität oder auch das Widerstandsmoment gegen Torsion eines ausgekammerten Bauteils wird durch die mögliche Vergrößerung des Außendurchmessers bei gleichem Gewicht gegenüber einem nur gebohrten Werkstück erheblich gesteigert. Zwar besteht auch die Möglichkeit, solche

Abb. 3: Fräsbohr- und Auskammerfräs Werkzeug (Schnitt).
1 Vollbohrfräser, 2 Gleitlager, 3 Schwankwelle, 4 Bohrstange, 5 Auskammerfräser, 6 Nadeln, 7 Antriebswelle, 8 Späneabfuhrmutter und 9 Deckblech



Werkstücke durch Zusammensetzen zweier Bauteilhälften herzustellen, jedoch scheiden solche Verfahren oft dadurch aus, daß z. B. entweder die durch Zusammenschweißen entstehende Kerbwirkung (Gefügeveränderungen im Material, unbearbeitete Schweißnaht im Inneren der Bohrung) nicht erlaubt ist und ein einteiliges Werkstück eine größere Stabilität aufweist.

2. Stand der Technik

Bisher bekannte Werkzeuge arbeiten alle nach dem Prinzip des Innendrehens mit gesteuerten Meißeln und benötigen als Voraussetzung für die Bearbeitung eine genaue Vorbohrung, die in der Regel durch BTA-Tiefbohren hergestellt wird. Je nach Werkzeugdurchmesser und Art des Mechanismus zur Zustellung der Meißel kommen ein- oder mehrschneidige Werkzeuge zum Einsatz, die teils angetrieben werden, teils stillstehend arbeiten [1], [2].

Bei dreischneidigen Werkzeugen, deren Durchmesserbereich ab ca. 90 Millimeter beginnt, wird die gesamte Schnitttiefe auf zwei Schruppschneiden und eine Schlichtschneide aufgeteilt, so daß die Herstellung in einem Arbeitsgang durchgeführt werden kann. Die Vorschubbewegung dieser Werkzeuge ist ziehend, die Bearbeitung beginnt also an der tiefsten Stelle der Auskammerung und schreitet in Richtung der Werkzeugeintrittsöffnung fort. Die Abstützung der Bearbeitungskräfte erfolgt durch Hartmetallführungsleisten in der bestehenden Vorbohrung.

Werkzeuge mit kleineren Durchmessern besitzen wegen der eingeschränkten Platzverhältnisse in der Regel nur noch eine Schneide. Meist ist der Durchmesser und damit die erforderliche Schnitttiefe der Auskammerung für die Bearbeitung in einem Schnitt zu groß, so daß die Herstellung in mehreren Schnitten erfolgen muß. Die Abstützung der Bearbeitungskräfte gestaltet sich hier jedoch ausgesprochen schwierig, da sie sich bei kontur- bzw. achsparalleler Herstellung an den von Schnitt zu Schnitt wachsenden Innendurchmesser anpassen muß. Eine Möglichkeit hierzu geben hydraulisch angesteuerte Abstützmechanismen, die sich der Innenkontur innerhalb gewisser Grenzen anpassen können.

Abb. 2 zeigt ein einschneidiges, am IfW entwickeltes Werkzeug mit kleinem Durchmesser, mit dem bei größtmöglicher Gestaltungsfreiheit der Innenkontur ein großes Aufweitungsverhältnis $D_{1,max}/D_{VB}$ erzielt wurde. Es besitzt einen Bohrstangendurchmesser von 50 mm und ein relativ großes Aufweitungsverhältnis von etwa 1,8.

Prinzipbedingte Probleme und Schwierigkeiten beim Einsatz solcher Innendrehwerkzeuge, wie

- Gefahr der Langspanbildung und da-

Abb. 6: Fräserstellung beim Auskammerfräsbohren und Auffräsbohren

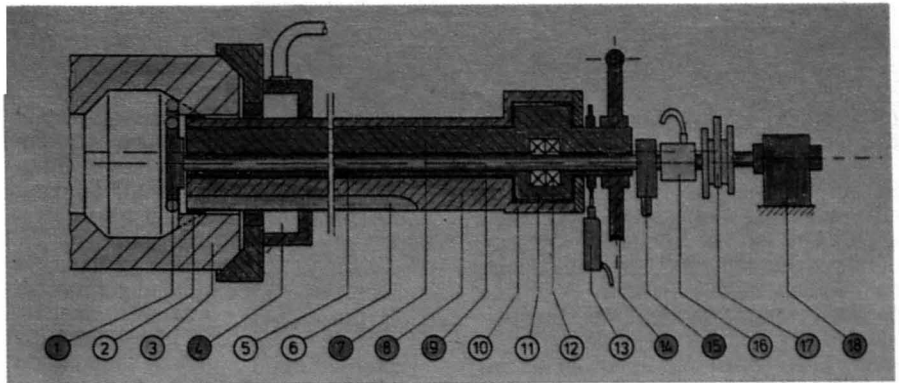
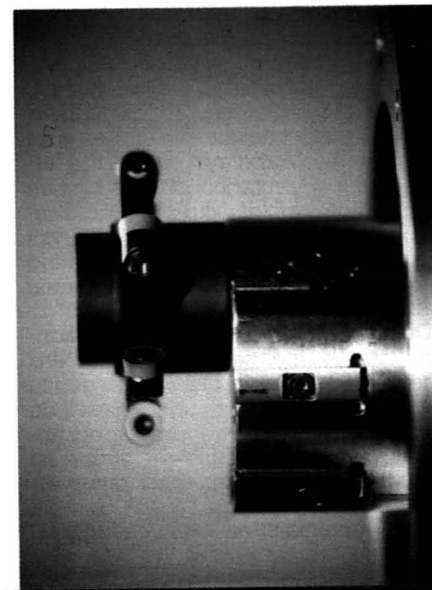
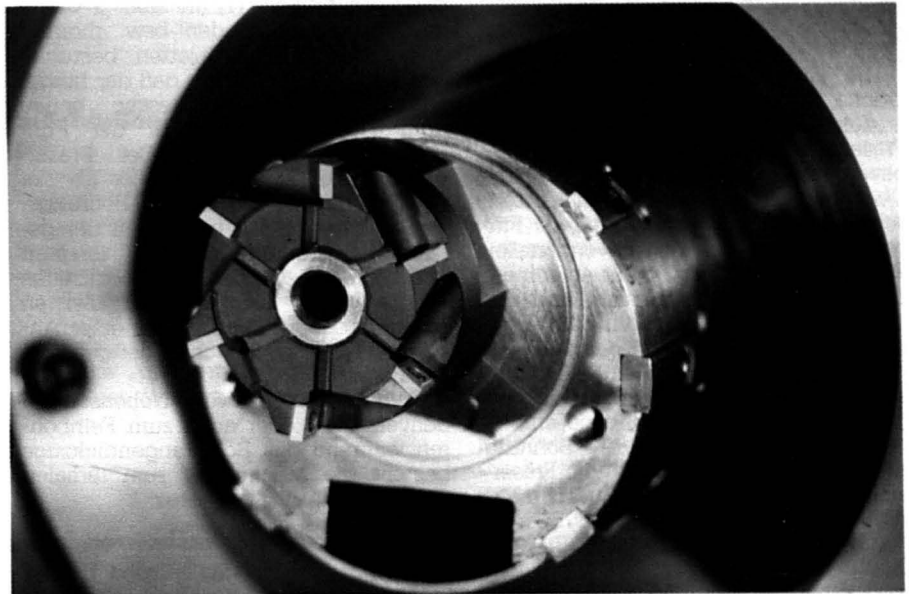


Abb. 4: Schematische Gesamtansicht des Auskammerfräsbohrwerkzeugs. 1 Auskammerfräser, 2 Führungsleisten, 3 Werkstück, 4 Bohrlözführapparat, 5 Nadellager, 6 Späneabfuhrkanal, 7 Schwenkwelle, 8 Bohrstange, 9 Fräserantriebswelle, 10 Lagereinheit, 11 Axiallagergehäuse, 12 Axiallager, 13 Wegmeßsystem, 14 Schneckengetriebe, 15 Radiale Ölzuführung, 16 Drehmomentsensor, 17 Kupplung, 18 Hauptspindel.

- durch Schwierigkeiten bei der Späneabfuhrung aus der Bohrung, somit
- Bearbeitung von Sacklochbohrungen vor allem bei kleinen Werkzeugdurchmessern kaum möglich,
- oft eingeschränkte Gestaltungsfreiheit der Innenkontur (z. B. durch Stützmechanismen, schräg zur Werkzeugachse ausfahrende Meißel usw.),
- Probleme beim Einsatz hydraulisch angesteuerter Abstützmechanismen und dadurch Schwierigkeiten bei der Schnittaufteilung mit einschneidigen

Abb. 5: Fräserstellung beim Fräsbohren ins Volle



- Werkzeugen,
- Deformationen bei Bauteilen mit geringen Wanddicken oder Riefenbildung bei Werkstücken aus Aluminiumlegierungen durch die hydraulisch an die Bohrungsoberfläche angebrachten Stützarme und
- bei stehenden Werkzeugen Probleme mit angetriebenen asymmetrischen Bauteilen wegen Unwucht führten zur Entwicklung eines neuen Werkzeugprinzips für das Auskammern.

3. Das Auskammerfräsbohrwerkzeug

3.1 Aufbau und Funktionsweise

Die Entwicklung dieses neuen Verfahrens wurde durch Grundlagenuntersuchungen über das Fräsbohren zylindrischer Bohrungen ins Volle angeregt.

die ebenfalls am IfW durchgeführt wurden [1].

Das Auskammerfräsbohrwerkzeug ist ein Sonderbohrwerkzeug, bei dem am Ende der Bohrstange ein Fräser angebracht ist, der in einer Verstellrichtung gelagert ist. Diese ermöglicht, daß dessen radiale Position bezüglich der Bohrstange während der Bearbeitung in der Bohrung verändert werden kann. Sie besteht aus einer in einem Gleitlager (2) in der Bohrstange (4) um die Exzentrizität e exzentrisch und drehbar gelagerten Schwenkwelle bzw. Exzenterwelle (3), in der die Fräserantriebswelle (7) ebenfalls um den selben Betrag exzentrisch gelagert ist. Dadurch kann die Fräserantriebswelle bzw. der Fräser (1 oder 5) durch Drehen der Exzenterwelle sowohl in die Bohrstangenmitte als auch in jede beliebige Zwischenstellung bis zu seiner maximalen radialen Zustellung (doppelte Exzentrizität) positioniert werden. Diese Konstruktion erwies sich sowohl hinsichtlich einer ausreichenden Dimensionierung des Fräserantriebsstranges, als auch für die Stabilität der radialen Zustellung als die beste Lösung (Abb 3).

Die langsame Rotation des Werkstücks um die den axialen Vorschub ausführende Bohrstange ergibt für den Fräser eine wendelförmige Vorschubbewegung im Werkstück. Durch die Überlagerung von axialer und rotatorischer Vorschubbewegung muß der Fräser im Gegensatz zu konventionellen Fräsverfahren aber nicht nur an seinem Umfang, sondern auch axial und mit den nach innen gerichteten Schneiden zerspanen. Durch den Übergang der Zerspanung von der Außen- zur Innenschneide ist ein unterbrochener Schnitt gegeben, wodurch kurze Späne entstehen, die daher leicht aus der Bohrung zu entfernen sind. Der durch die Fräserantriebswelle zugeführte Kühlschmierstoff wird zusammen mit den Spänen durch die Späneabfuhrnut (8), die durch ein Deckblech (9) abgedeckt wird, aus der Bohrung entfernt. Das gesamte Werkzeugkonzept mit allen Nebenaggregaten zeigt Abbildung 4.

Der am Ende der Fräserantriebswelle (9) angebrachte Auskammerfräser (1) wird über die Parallelschubkurbelkupplung (17), die einen sich ändernden radialen Versatz zweier angetriebener Wellen erlaubt, durch die Hauptspindel (18) angetrieben. Die Drehung der Exzenter- oder Schwenkwelle (7) und damit die radiale Zustellung des Fräsers erfolgt durch das mit ihr verbundene Schneckengetriebe (14). Die Schneiden des Fräsers werden über die radiale Ölzuführung (15) durch eine zentrale Bohrung in der Fräserantriebswelle mit Kühlschmierstoff versorgt. Damit zum einen genügend Kühlschmierstoff für die Abführung der Späne im Späneabfuhrkanal (6) bereitgestellt und zum anderen verhindert wird, daß die Späne zwischen Bohrstange (8) und Vorbo-

hrung des Werkstücks (3) hineingespült werden und sich hier verkleben können, wird zusätzlich über diesen Ringraum durch den Bohrzuführapparat (BOZA) (4) Kühlschmierstoff zugeführt. Die Hauptwerkzeugdaten sind:

- Bohrstangendurchmesser 84 mm,
- maximaler Bohrungsdurchmesser 124 mm
- Flugkreisdurchmesser der Führungsleisten 88 mm,
- maximaler Bohrungsdurchmesser 124 mm
- Gesamtlänge der Bohrstange 1700 mm und
- verfügbare Nutzlänge 1000 mm.

3.2 Mögliche Bearbeitungsverfahren

In Abhängigkeit des jeweils verwendeten Fräsers sind unterschiedliche Bearbeitungsverfahren möglich, die nachfolgend erläutert werden.

3.2.1 Fräsbohren ins Volle

Beim Fräsbohren ins Volle (Abb. 5) wird der Vollbohrfräser (1) (in Abb. 9 unten zum einen mit runden bzw. rhombischen Wendeschneidplatten bestückt) so weit ausgeschwenkt, daß der hergestellte Bohrungsdurchmesser genau dem Flugkreisdurchmesser der Führungsleisten entspricht. Der Fräserdurchmesser ist etwas größer als der Bohrungsradius, so daß die Bohrungsmitte überschritten und damit der gesamte Bohrungsquerschnitt zerspannt wird. Die Abstützung des Werkzeugs erfolgt durch seine Führungsleisten während der Anbohrphase in einer Anbohrbuchse und danach in der gefertigten Bohrung.

Zum Ausgleich von Nebenschneidenverschleiß oder auch zum Feinbohren während des Bohrstangenrückzugs besteht die Möglichkeit zum radialen Feinnachstellen des Fräsers.

3.2.2 Auskammerfräsbohren

Nachdem durch das Vollbohrfräsen (oder auch durch ein konventionelles Tiefbohrverfahren, z. B. BTA-Bohren) eine Vorbohrung in das Werkstück eingebracht worden ist, wird der Vollbohrfräser eingeschwenkt und außerhalb der Bohrung gegen einen Auskammerfräser (5) ausgetauscht, der maximal so groß wie die Vorbohrung ist. Die Herstellung der rotationssymmetrischen Innenkontur erfolgt durch 2-Achsenbahngesteuerte Zustellung des Fräsers ziehend in einem Schnitt, beginnend an der tiefsten Stelle der zu fertigenden Kontur.

Durch die ziehende Bearbeitung können die ziehende Bearbeitung und das Eigengewicht der Bohrstange genau wie beim Vollbohren über dieselben Führungsleisten in der Vorbohrung abgestützt werden. Aus diesem Grund ist kein variabler Abstützmechanismus erforderlich.

Ein vereinfachter Anwendungsfall

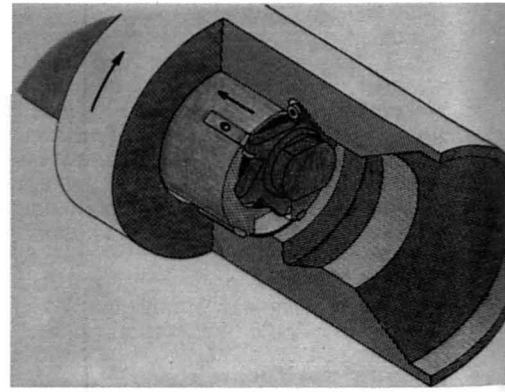


Abb. 7: Herstellung einer aufgeweiteten Innenkontur

des Werkzeugs ist das Vergrößern einer zylindrischen Vorbohrung bei konstanter Fräserstellung, das analog zum Aufbohren bei Bohrverfahren „Auffräsbohren“ genannt wird. Die Fräserstellung beim Auffräsbohren und beim Auskammerfräsen zeigt Abb. 6. Auf diese Weise kann jeder beliebige Bohrungsdurchmesser bis zum maximal möglichen Durchmesser $D_{1,max} = D_{Fr} + 2e$ (hier 124 mm) gefertigt werden. Somit ergibt sich das Aufweitungsverhältnis $D_{1,max}/D_{VB}$ zu 1,41 (124/88).

In Abb. 7 ist das Werkzeug mit den zugehörigen Vorschubbewegungen in einem aufgeschnittenen Werkstück bei der Herstellung eines kegeligen Abschnitts dargestellt.

Durch das Ausschwenken des Fräsers senkrecht zur Bohrung- bzw. Bohrstangenachse sind je nach konstruktiver Ausführung der Fräser komplexe Innenkonturen mit Absätzen bis zu 90° möglich. Im allgemeinen handelt es sich jedoch um einfache Konturläufe, z. B. längere zylindrische Abschnitte mit konstantem Durchmesser, die durch Radien und Kegel begrenzt werden.

Die Vorteile des neuen Verfahrens sind durch folgende Möglichkeiten bzw. Eigenschaften gegeben:

- Herstellung von Vorbohrung und Auskammerung mit ein und demselben Werkzeug,
- kurze Späne durch unterbrochenen Schnitt, wodurch die Bearbeitung in Sacklochbohrungen ermöglicht und erleichtert wird,
- je nach Ausführung des verwendeten Fräsers sind sämtliche Innenkonturen mit Absätzen bis zu 90° herstellbar,
- durch den Einsatz einer geeignet geformten Schleifscheibe (Abb. 9 oben, ganz rechts) kann die gefräste Bohrungsoberfläche bei Bedarf durch Innenrundschnit Schleifen verbessert werden.
- Im Gegensatz zu den beim „klassischen“ Auskammern immer rotationssymmetrischen Innenkonturen sind mit dem neuentwickelten Auskammerfräsbohrwerkzeug prinzipiell auch nicht rotationssymmetrische Konturen, wie z. B. Schmieröltaschen, herstellbar, wenn das Werkstück stillsteht oder durch eine dritte Achse angesteuert um die Bohrstange rotiert.

4. Erste Erfahrungen

Mit dem auf einer umgerüsteten CNC-Drehmaschine aufgebauten Werkzeug wurden erste Versuche mit Werkstückproben aus durchsichtigem Kunststoff durchgeführt, damit die Wirkstelle des Fräasers eingesehen werden konnte. Zur Demonstration der Gestaltungsfreiheit der möglichen Innenkonturen wurde die in Abb. 8 gezeigte Innenkontur durch Fräsbohren ins Volle und anschließendes Auskammerfräsen mit einem sechsschneidigen Scheibenfräser (Abb. 9 oben, erster von links), der mit runden Wendeschneidplatten bestückt ist, bei einer Schnittgeschwindigkeit von 150 m/min hergestellt. Die aufgetretenen Schnittmomente bei verschiedenen Vorschubgeschwindigkeiten ins Volle und einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit beim Auskammerfräsbohren sind ebenfalls in Abb. 8 dargestellt.

Es ergaben sich sowohl für das Fräsbohren ins Volle als auch beim Auskammerfräsbohren kurze Späne, die problemlos durch die Späneabfuhr aus der Bohrung herausgespült werden konnten. Erste Versuche mit metallischen Werkstoffen bestätigen die hier erzielten Ergebnisse.

Für ein optimales Bearbeitungsergebnis sind genau gefertigte Fräser von entscheidender Bedeutung. Dies gilt vor allem für die radiale Lage der Fräseschneiden, da durch den Zahneingriff an der Bohroberfläche unmittelbar deren Welligkeit beeinflusst wird. Bereits der radiale Überstand einer Schneide von wenigen Hundertstel Millimetern über die anderen Schneiden hat zur Folge, daß nur diese die Oberfläche der Bohrung herstellt und damit deren Durchmesser bestimmt. Dadurch ergibt sich eine deutlich größere Welligkeit und damit eine schlechtere Oberfläche, als wenn alle Schneiden auf einem Flugkreis liegen. Dies kann am besten durch Fräser mit einstellbaren Kassetten erreicht werden,

Abb. 8: Schnittmomente beim „Fräsbohren“ und „Auskammerfräsen“

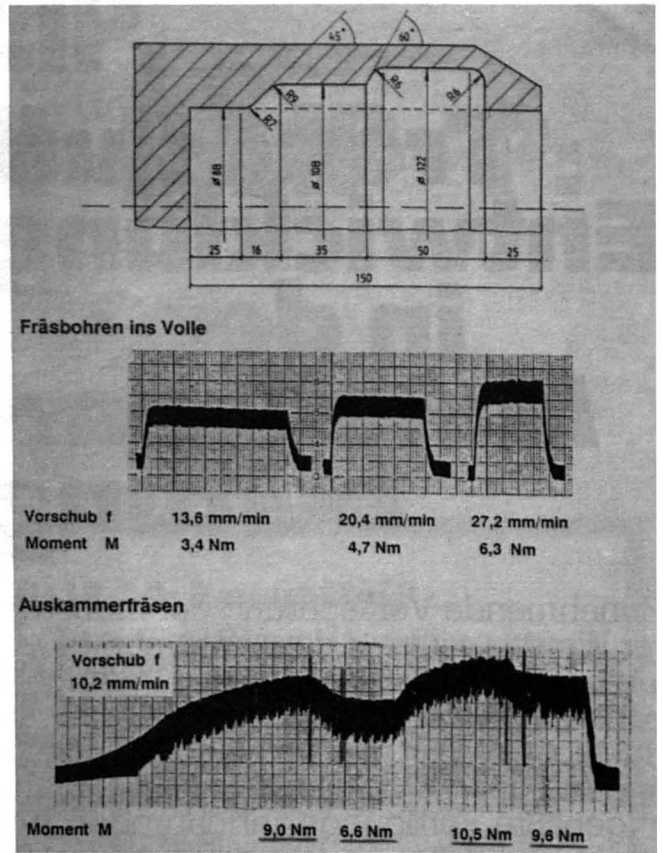
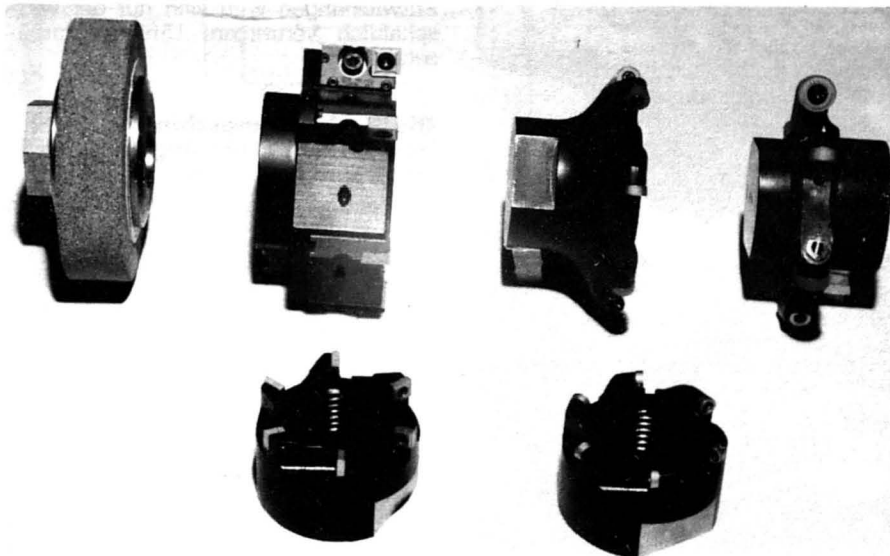
so daß deren Schneiden feinjustiert werden können (Abb. 9 oben, zweiter von rechts).

Ist dies bei kleineren Fräsern aus Platzgründen konstruktiv nicht zu realisieren, so kann das gleiche Ergebnis auch durch Überschleifen der Schneiden in eingebautem Zustand erreicht werden. Der Nachteil dabei ist, daß dies nach jedem Schneidewechsel durchgeführt werden muß.

5. Schlußbetrachtung

Mit dem neuen Werkzeugkonzept „Auskammerfräsbohren“ besteht die Möglichkeit, rotationssymmetrisch aufgeweitete Innenkonturen in tiefen Bohrungen durch 2-Achsen-CNC-gesteuertes Innenrundfräsen herzustellen. Hierzu kann durch Fräsbohren ins Volle und anschließendes Auskammerfräsbohren sowohl die Vorbohrung, als auch die Auskammerung mit ein und demselben Werkzeug gefertigt werden.

Abb. 9: Fräservarianten für das Auskammerfräsbohrwerkzeug (Bildnachweise: Verfasser)



Der Vorgang des Auskammerns erfolgt in einem Schnitt mit ziehender Vorschubbewegung, wodurch die Abstützung der Bearbeitungskräfte über Hartmetallstützleisten in der Vorbohrung erfolgen kann. Durch die Zustellung des Fräasers senkrecht zur Bohrstangenachse können sämtliche Konturformen bis hin zu 90°-Absätzen erzeugt werden. Der beschriebene Werkzeugprototyp hat einen Werkzeugdurchmesser von 88 Millimeter und der maximal erreichbare Bohrungsdurchmesser beträgt 124 Millimeter, wodurch sich ein Aufweitungverhältnis von 1,41 ergibt. Durch die Kurzspanbildung des Fräsprozesses ergeben sich vor allem für die Bearbeitung in Sacklochbohrungen erhebliche Vorteile hinsichtlich der Späneabfuhr aus der Bohrung. Eingehende Untersuchungen des Fertigungsprozesses und die Optimierung des Werkzeugkonzepts werden in nächster Zeit die Ermittlung der Leistungsfähigkeit und der erzielbaren Arbeitsergebnisse zum Ziel haben.

6. Literatur

- [1] Neufeld, A.: Innenbearbeitung von Hohlwellen. tz für Metallbearbeitung, 77. Jahrg. 1983, Heft 2/83.
- [2] Koster, A.: Fräsbohren und andere Bohrtechnologien. tz für Metallbearbeitung, 81. Jahrg. 1987, Heft 3/87.
- [3] Koster, A.: Technologische Grundlagen des Fräsbohrens, Dissertation Universität Stuttgart 1988.
- [4] Utz, Th.: Auskammerfräsen - Eine neue Möglichkeit zur Herstellung aufgeweiteter Innenkonturen. Vortrag anlässlich der Tagung „Tiefbohren“ am 16./17. März 1989, Universität Dortmund.