

Fräsbohren garantiert kurze Späne

Bei der konventionellen Bohrbearbeitung auftretende Probleme, vor allem die Langspanbildung duktiler Werkstoffe, führten am Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart zur Entwicklung des neuen Bearbeitungsverfahrens „Fräsbohren“, das von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert wird. Fräsbohren ist die Kombination der Fertigungsverfahren Fräsen und Bohren zur Herstellung von Bohrungen, wobei durch den Fräsprozess wegen des verfahrensbedingt unterbrochenen Schnitts auch bei zähen Werkstoffen Kurzspanbildung garantiert werden kann – ein wichtiges Kriterium für die automatisierte Bohrbearbeitung. Von Prof. Dr.-Ing. Uwe Heisel, Dipl.-Ing. Thomas Utz und Dipl.-Ing. Gunter Ruziczka¹⁾.

1. Einleitung

Neben der bereits erwähnten Langspanbildung bei zähen Werkstoffen ist die ungünstige Schnittgeschwindigkeitsverteilung über dem Bohrungsdurchmesser ein weiterer Verfahrensnachteil aller bisher in der Praxis eingeführten Bohrverfahren [1]. Aufgrund der auf Null sinkenden Schnittgeschwindigkeit findet im Bereich des Bohrungszentrums anstelle eines Zerspanungsprozesses ein Umformvorgang statt, der zu einer beträchtlichen Kaltverfestigung des Werkstückstoffs führen kann, woraus eine hohe Vorschubkraft resultiert. Das Verfahren Fräsbohren weist dagegen eine Schnittgeschwindigkeitsverteilung auf, die über dem gesamten Bohrungsquerschnitt nahezu konstant ist und sich dadurch von allen anderen Bohrverfahren unterscheidet [2].

2. Fräsbohrverfahren und Versuchseinrichtung

Zur Untersuchung des Verfahrens Fräsbohren ist am IfW ein Versuchswerkzeug entwickelt und gebaut worden, das auf einer Versuchsmaschine, die zur Messung der Prozesskenngrößen mit

umfangreichen Meßeinrichtungen ausgestattet ist, erprobt wird.

2.1. Funktionsweise des Fräsbohrwerkzeugs

Beim Fräsbohrwerkzeug [3, 4] ist der Fräser (1) am Ende einer Bohrstange (4) angebracht und in einer Verstelleinrichtung exzentrisch gelagert, die es ermöglicht, die radiale Position des Fräasers bezüglich der Bohrstange zu verändern (Abb. 1). Die Verstelleinrichtung besteht aus einer in einem Gleitla-

ger (2) in der Bohrstange um die Exzentrizität e exzentrisch und drehbar gelagerten Exzenterwelle (6), in der die Fräserantriebswelle (3) ebenfalls um denselben Betrag exzentrisch gelagert ist. Dadurch kann die Fräserantriebswelle bzw. der Fräser durch Drehen der Exzenterwelle sowohl in die Bohrstangenmitte, als auch in jede beliebige Zwischenstellung bis zur maximalen Zustellung (doppelte Exzentrizität $2e$) positioniert werden [5, 6].

Der durch die Fräserantriebswelle und einen Bohrölzuführapparat (BOZA) zugeführte Kühlschmierstoff wird zusammen mit den Spänen durch den Späneabfuhrkanal (7), der durch ein Deckblech (8) abgedeckt wird, aus der Bohrung entfernt.

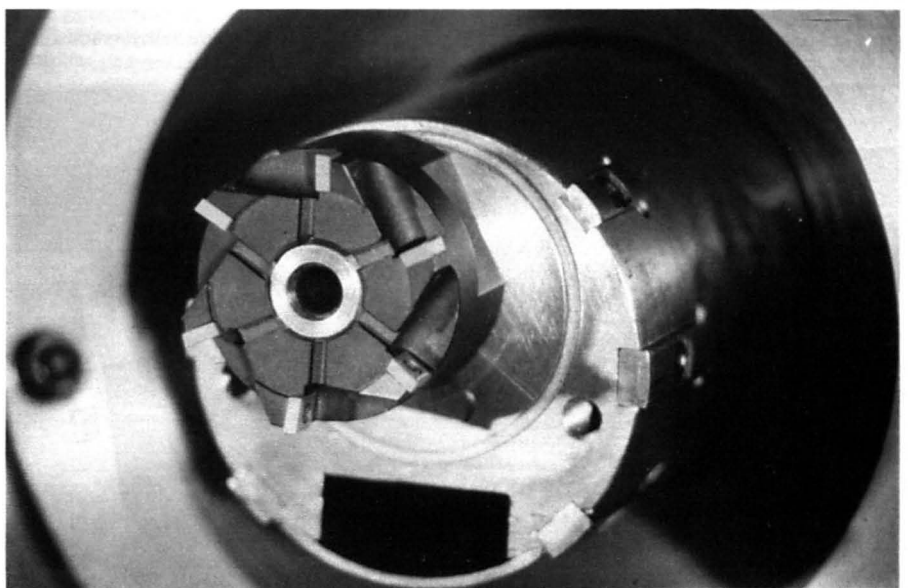
Zur Zerspanung des gesamten Bohrungsquerschnitts ist eine wendelförmige Vorschubbewegung des Fräasers erforderlich, die sich aus der Rotation des Werkstücks und dem axialen Vorschub der Bohrstange bzw. des exzentrisch gelagerten Fräasers zusammensetzt [6]. Durch diese Kinematik zerspannt der Fräser im Gegensatz zu konventionellen Fräsverfahren nicht nur an seinem Umfang, sondern auch axial und mit den nach innen gerichteten Schneiden (Abb. 2). Der unterbrochene Schnitt durch den Übergang der Zerspannung von der Außen- zur Innenschneide und umgekehrt sorgt für kurze Späne, die leicht aus der Bohrung zu entfernen sind.

2.2. Versuchseinrichtung

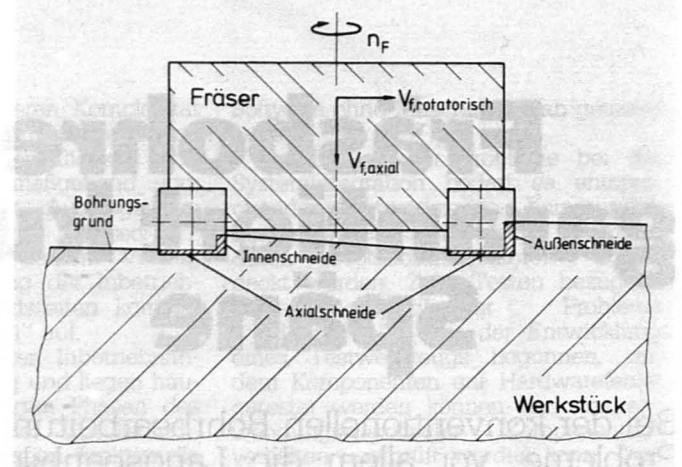
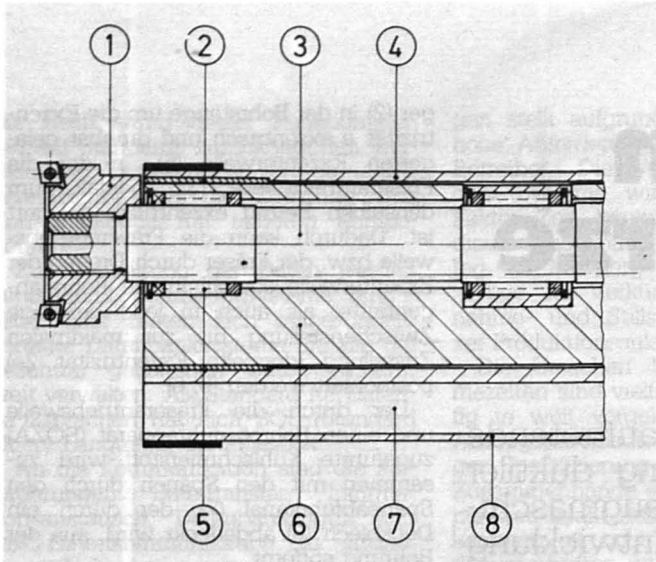
Für die Werkzeugprüfung steht eine CNC-gesteuerte Versuchsmaschine zur Verfügung, die durch Erweiterung und Umbau einer Universal Drehmaschine aufgebaut wurde (Abb. 3).

Auf dem Support ist ein Bohrstangenhalter angebracht, der das Werk-

Abb. 1: Fräsbohrwerkzeug (Stirnansicht); konstruktiver Aufbau siehe Abb. 1 b



¹⁾ Professor U. Heisel ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart. Dipl.-Ing. Th. Utz ist wissenschaftlicher Assistent und Leiter der Abteilung „Verfahrensentwicklung“, Dipl.-Ing. G. Ruziczka wiss. Mitarbeiter am selben Institut.



◀ Abb. 1 b

▲ Abb. 2: Eingriffsverhältnisse am Fräser beim Fräsbohren

zeug aufnimmt. Das Werkstück wird zwischen dem Zentrierkegel des BOZA und dem Backenfutter der Drehmaschine gespannt. Zur Maschinensteuerung dient eine 2-Achsen-CNC-Steuerung 810 T der Firma Siemens mit integrierter speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS) für sämtliche peripheren Funktionen wie Kühlschmierstoffpumpe, Fräser- und Werkstückantrieb sowie die Überwachung von Vorschubschaltern, Kühlschmierstoffdruck und Werkzeugbruch.

3. Mögliche Bearbeitungsverfahren

Wie bei konventionellen Bohrverfahren wird auch beim Fräsbohren die Herstellung einer Bohrung ins Volle und das Aufbohren einer Vorbohrung unterschieden.

3.1. Vollfräsbohren

Beim Vollfräsbohren wird der Vollbohrfräser so weit ausgeschwenkt, daß der hergestellte Bohrungsdurchmesser genau dem Werkzeugdurchmesser an den Führungsleisten entspricht (Abb. 4). Der Fräserdurchmesser ist etwas größer als der Bohrungsradius, so daß die Bohrungsmitte überschritten und dadurch der gesamte Bohrungsquerschnitt zerspannt wird. Die Abstützung

des Werkzeugs erfolgt durch seine Führungsleisten während der Anbohrphase in der Anbohrbuchse des BOZA und danach in der gefertigten Bohrung.

3.2. Auffräsbohren

Beim Auffräsbohren unterscheidet man zwei Varianten (Abb. 5). Enthält ein Werkstück bereits eine Vorbohrung, deren Durchmesser kleiner als der Führungsleistendurchmesser ist, wird der zu fertigende Bohrungsdurchmesser mit drückender Vorschubbewegung hergestellt (links).

Wurde durch Vollfräsbohren eine Bohrung hergestellt, können mit einem größeren Fräser durch ziehende Bearbeitung in Abhängigkeit der radialen Zustellung e_f des Fräses unterschiedliche Bohrungsdurchmesser hergestellt werden. Die Bearbeitungskräfte und das Eigengewicht der Bohrstange können somit wie beim Vollfräsbohren über die Stützleisten in der Vorbohrung abgestützt werden.

Der Bohrungsdurchmesser d_B ergibt sich mit dem Fräserdurchmesser d_f und der Exzentrizität e_f nach der Beziehung $d_B = d_f + 2e_f$.

Ein durch Auffräsbohren hergestell-

tes Versuchswerkstück mit verschiedenen Bohrungsdurchmessern zwischen 88 mm und 118 mm zeigt Abb. 6.

4. Experimentelle Untersuchungen

Als Versuchswerkstoffe wurden mit der Aluminiumlegierung AlCuMgPb F34 und dem unlegierten Vergütungsstahl

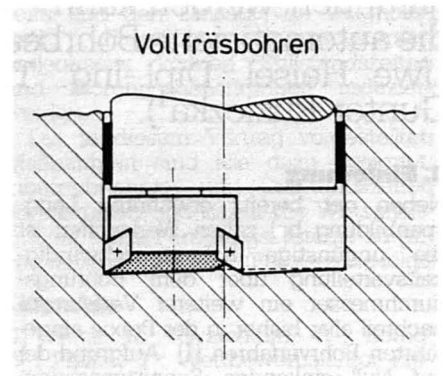


Abb. 4: Vollfräsbohren

Ck 45, einem zäharten Werkstoff mit relativ hoher Festigkeit, zwei langspannende Materialien ausgewählt.

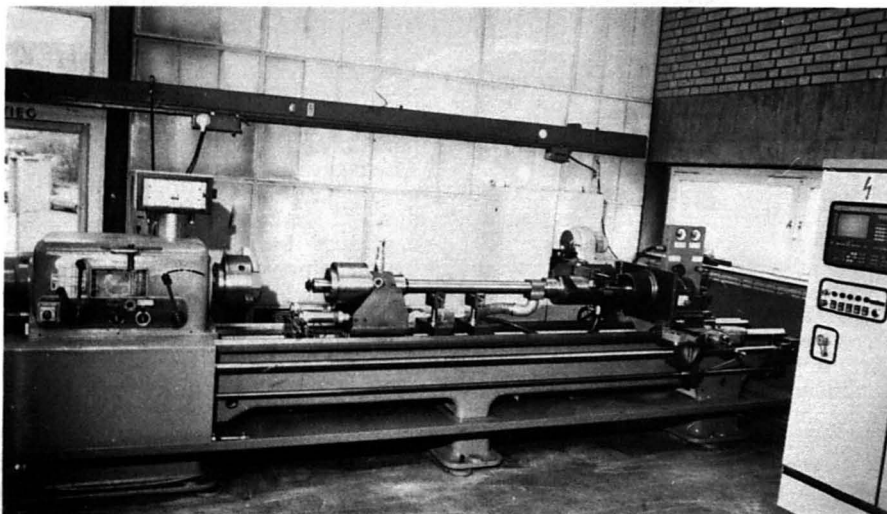
4.1. Schnittmoment

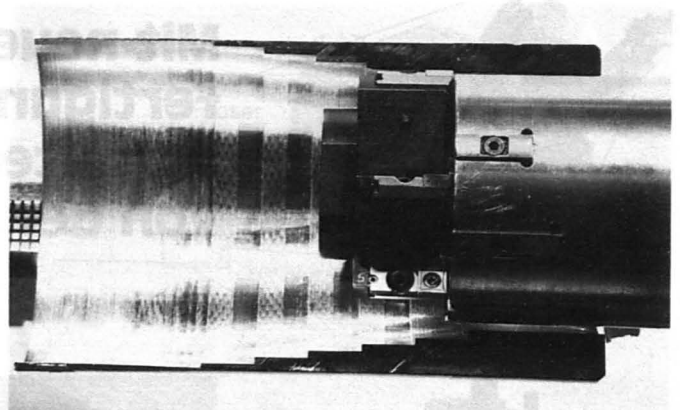
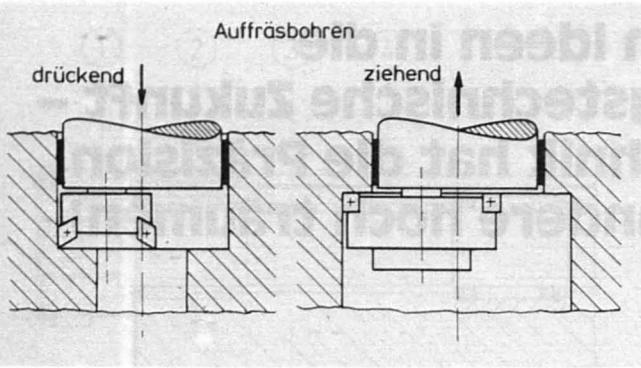
Das Schnittmoment am Fräser wird direkt mit einem kontaktlos arbeitenden Wirbelstrom-Drehmoment-Sensor in Hohlwellenausführung der Robert Bosch GmbH gemessen, der auf der Fräserantriebswelle des Fräsbohrwerkzeugs befestigt ist. Die indirekte Schnittmomentenmessung wird über die aufgenommene Motorleistung mittels eines digitalen Leistungsmeßgeräts durchgeführt.

Mit der Messung des Schnittmoments bzw. der Schnittleistung werden Aussagen über die Belastung des Werkzeugs in Abhängigkeit der Bearbeitungsparameter Vorschubgeschwindigkeit, Schnittgeschwindigkeit, Schneidplattenform und -größe sowie Bohrungsdurchmesser ermöglicht.

Bei steigender Vorschubgeschwindigkeit v_f ergibt sich für den Schnittmomentenverlauf am Fräser bei beiden

Abb. 3: Fräsbohrversuchsmaschine





untersuchten Werkstoffen ein leicht degressiver Verlauf (Abb. 7).

Auch beim Fräsbohren kann bei bekanntem Schnittmoment $M_{c,A}$ für einen Werkstoff „A“, für einen anderen Werkstoff „B“ bei identischen Bearbeitungsparametern anhand deren spezifischer Schnittkräfte das Schnittmoment $M_{c,B}$ nach folgender Beziehung überschlägig berechnet werden:

$$M_{c,B} \approx M_{c,A} \cdot \frac{k_{c,B}}{k_{c,A}}$$

Diese Beziehung ist vor allem für den praktischen Einsatz beim Übergang zu Werkstoffen höherer Festigkeit von Bedeutung, um eine Überlastung des Werkzeugs zu vermeiden. Für Stahl (Ck45) und Aluminium beträgt das Verhältnis $k_{c,St}/k_{c,Al}$ ungefähr 3, was recht gut mit dem Verhältnis der Schnittmomente in Abb. 7 übereinstimmt.

Für das Auffräsbohren wurde das Schnittmoment in Abhängigkeit des Bohrungsdurchmessers d_B für den Durchmesserbereich von 95 mm bis 118 mm gemessen. Aus Abb. 8 ergibt sich für verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten ein degressiver Verlauf des Schnittmoments M_c mit steigendem Bohrungsdurchmesser d_B . Dies ist ein charakteristisches Verfahrensmerkmal beim Fräsbohren und stellt einen Vorteil gegenüber konventionellen Bohrverfahren dar, bei denen sogar ein progressiver Zusammenhang besteht.

4.2. Bohrungsqualität

Aus umfangreichen experimentellen Untersuchungen können durch die

Messung von Rundheitsabweichung A_R , Bohrungsmantellinie sowie -oberfläche einiger Aluminium- und Stahl-Versuchsproben erste Aussagen über die mit dem Fräsbohrwerkzeug erzielbaren Bohrungsqualitäten gemacht werden.

Die durch den intermittierenden Schneideneingriff verfahrensbedingte Welligkeit der Bohrung in axialer und in Umfangsrichtung hängt dabei wesentlich von der Schneidenform, von Fräser- und Bohrungsdurchmesser sowie von den Bearbeitungsparametern Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Werkstückdrehzahl ab. Die besten Bohrungsoberflächen sind mit einem Fräser zu erzielen, der eine hohe Rundlaufgenauigkeit besitzt und dessen Außenschneiden parallel zur Bohrungsoberfläche bzw. -achse stehen. Eine hohe Rundlaufgenauigkeit ist entweder durch radiales Feinjastieren oder Außenrundscheifen der Schneiden auf gleichen Fräserdurchmesser möglich.

Abb. 9 zeigt den Rundheitsmeßschieb für eine Bohrung in Ck45, die durch Vollfräsbohren mit rhombischen Wendschneidplatten hergestellt wurde. In einer Bohrtiefe von 140 mm ist eine leicht „dreieckige“ Bohrung mit einer Rundheitsabweichung von nur 17 μm zu erkennen.

Beim ziehenden Auffräsbohren liegt

die Rundheitsabweichung A_R zwischen 30 und 40 μm und ist nahezu unabhängig vom Bohrungsdurchmesser. Die Rundheit der Bohrung wird also mit steigendem Bohrungsdurchmesser besser.

Die vier, jeweils um 90° zueinander versetzt gemessenen Mantellinien einer Stahl-Versuchsprobe in Abb. 10 zeigen, daß die erzeugte Bohrung nach einem kleinen Anbohrtrichter eine sehr gute Geradheit aufweist.

Damit wird beim Voll- und Auffräsbohren eine makrogeometrische Oberflächenqualität erreicht, die mit der beim BTA-Vollbohren bzw. BTA-Aufbohren vergleichbar ist [7, 8].

Hinsichtlich der Oberflächenqualität konnten beim Voll- und Auffräsbohren unter günstigen Bedingungen unabhängig vom Werkstoff Mittenrauhwerte R_a von unter 1 μm erzielt werden. Abb. 11 zeigt die Bohrungsoberfläche einer auffräsgebohrten Aluminiumversuchsprobe (oben) mit dem dazugehörigen Rauheitsmeßschieb (links) und den einer durch Vollfräsbohren hergestellten Bohrung in Stahl (rechts).

4.3. Spanbildung und Spanformen

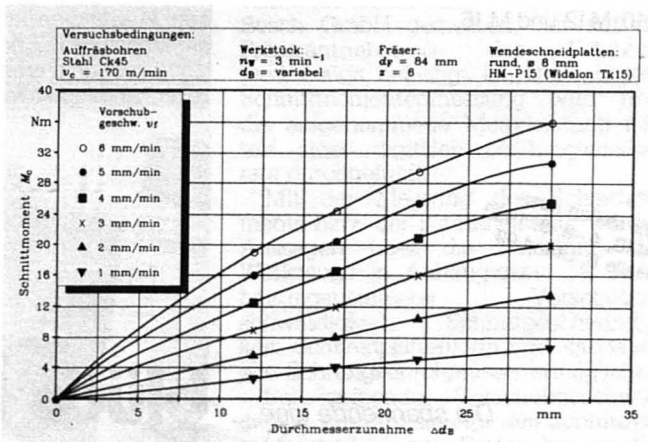
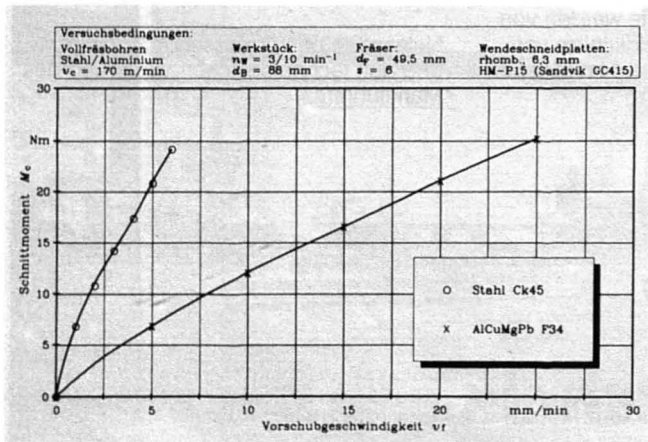
Die beim Fräsbohren erzeugten Späne waren, unabhängig von Schneidenform und -größe, kurz und kompakt und konnten problemlos aus der Bohrung

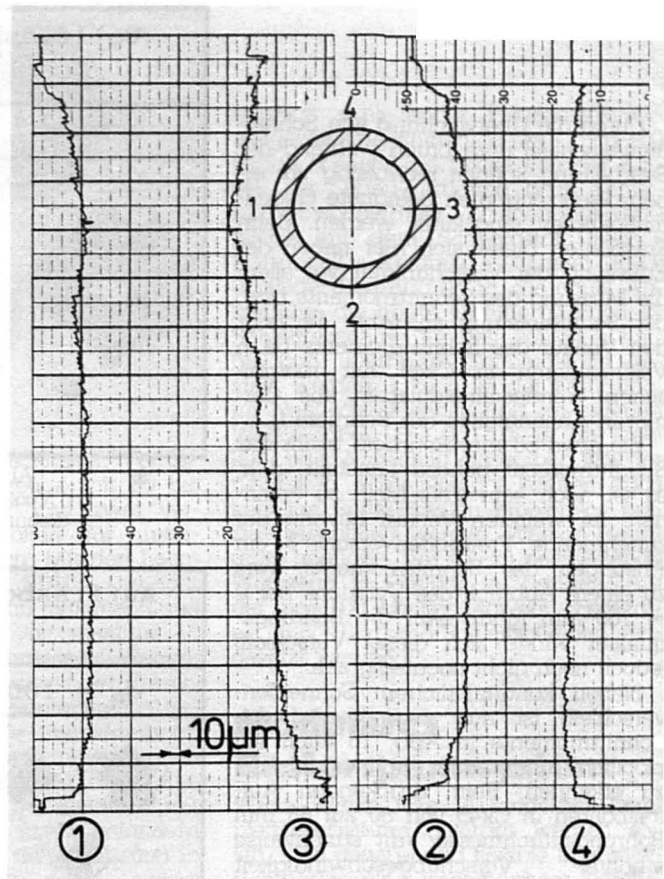
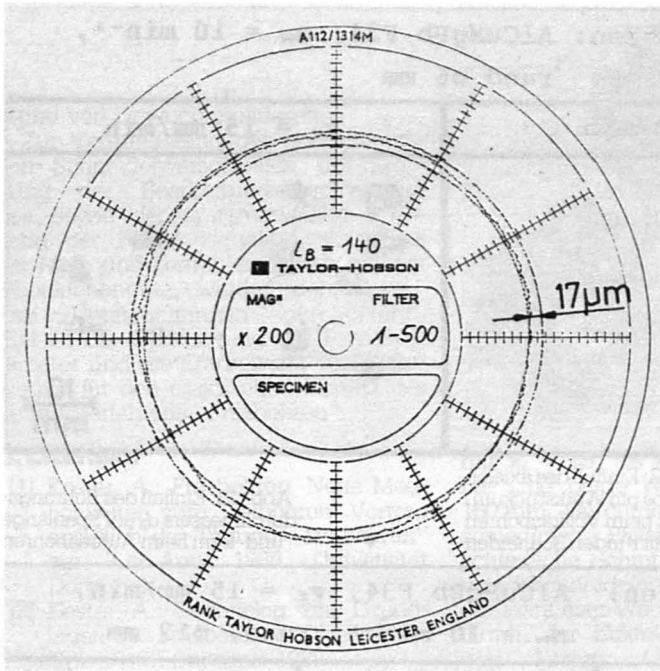
▲ Abb. 5: Verfahrensvarianten beim Auffräsbohren

▲ Abb. 6: Durch Auffräsbohren hergestelltes Versuchsstück

▼ Abb. 7: Schnittmoment für Aluminium und Stahl in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit v_f

▼ Abb. 8: Schnittmoment beim Auffräsbohren von Stahl in Abhängigkeit des aufgebohrten Querschnitts Δd_B und der Vorschubgeschwindigkeit v_f





herausgespült werden. Die in Abb. 12 dargestellten Aluminiumspäne zeigen den Einfluß des axialen Vorschubs pro Werkstückumdrehung f_{ax} (Vorschubgeschwindigkeit variabel, Werkstückdrehzahl konstant) auf die Spanbildung beim Vollfräsbohren mit runden Wendeschneidplatten.

Für zwei verschiedene Vorschubgeschwindigkeiten sind die beim Fräsbohren an der Außen- (jeweils links in Abb. 12) bzw. Innenschneide entstandenen Späne dargestellt. An der Außenschneide entstehen kleine, gebrochene Spiralwendelspäne. Bei kleinen Vorschüben f_{ax} brechen die Späne an der Innenschneide noch nicht und haben die Form zylindrischer Wendelspäne. Mit steigendem Vorschub werden die Späne an Außen- und Innenschneide breiter sowie dicker und brechen auch an der Innenschneide.

Die entstandenen Spanformen sind bei Aluminium und Stahl nahezu gleich, so daß werkstoffunabhängig eine günstige Spanbildung gewährleistet ist.

Beim Auffräsbohren führt ein zunehmender Bohrungsdurchmesser d_B zu einer Vergrößerung der Eingriffslänge der Schneiden. Obwohl dadurch ebenfalls die Spanlänge steigt, verändert sich die Spanform kaum (Abb. 13). Dies stellt einen entscheidenden Vorteil des Fräsbohrens gegenüber dem konventionellen Aufbohren dar, da hier ein größerer Bohrungsdurchmesser in die Breite der Späne eingeht, wodurch die Spanabfuhr erschwert wird.

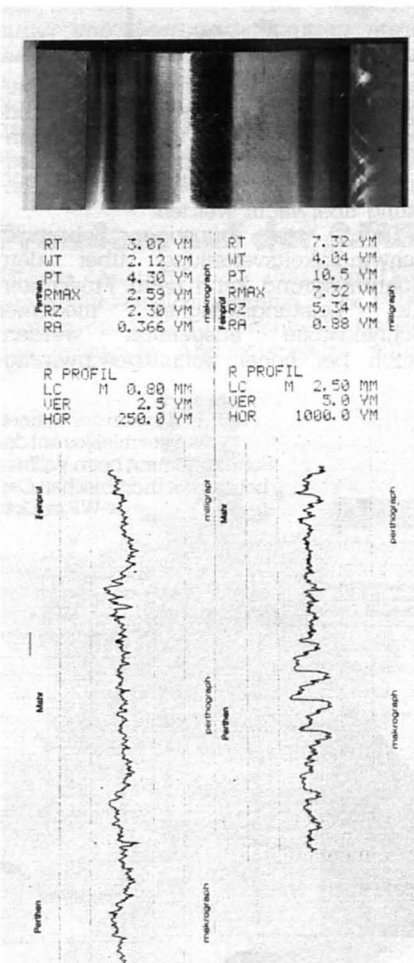
4.4. Schneidenverschleiß und Prozeßüberwachung

Die Kenntnis des Schneidenverschleißes und die Möglichkeit, diese Größe im Prozeß zu messen, sind grundlegende Voraussetzungen für eine sichere und reproduzierbare Bohrbearbeitung.

Beim Versuchswerkstoff AlCuMgPb F34 führten weder Art der Verfahrensvariante, noch Schneidstoff, Schnei-

Abb. 9: Rundheitsabweichung A_R eines vollfräsgebohrten Versuchswerkstückes aus Ck 45 in 140 mm Bohrtiefe

Abb. 10: Mantellinienmessung einer vollfräsgebohrten Stahlprobe



denform und -größe bzw. Wahl der Bearbeitungsparameter zu meßbarem Verschleiß oder gar Schneidenbruch. Ein wesentlich größerer Schneidenverschleiß war bei der Zerspaltung des Werkstoffes Ck45 bei ungünstigen Zerspaltungsbedingungen zu beobachten. Der Schneidenverschleiß begann mit Freiflächenverschleiß und führte insbesondere beim Auffräsbohren mit rhombischen Platten durch den unterbrochenen Schnitt zum Ausbrechen der Schneidenecke. Bei Verwendung derselben Schneidstoffe wurde an runden Wendeschneidplatten ein geringerer Verschleiß als an rhombischen Wendeschneidplatten festgestellt.

Je härter und damit verschleißfester der gewählte Schneidstoff war, desto größer war die Standlänge des Fräasers. Beim Übergang von beschichtetem Hartmetall zu dem relativ harten und verschleißbeständigen Schneidstoff Cermet konnte die Standlänge auf mindestens das Fünffache bei gleichzeitig geringerem Freiflächenverschleiß gesteigert werden.

Die beim Fräsbohren festgestellten sehr guten Zerspaltungseigenschaften von Cermet sind für das Schlichtdrehen bereits seit längerem bekannt [9], aber auch bei größeren Schnitttiefen kann Cermet als Schneidstoff mit Erfolg eingesetzt werden [10].

Abb. 11: Rauheitsmeßschiebe: Vollfräsbohren in Stahl (rechts), Auffräsbohren in Aluminium (links) mit aufgeschnittenem Aluminiumprobe-körper (oben)

Durch die Überwachung von Schneidverschleiß und -bruch während der Bearbeitung können rechtzeitig vor einem Werkzeugbruch geeignete Gegenmaßnahmen eingeleitet werden. Beim Fräsbohren bietet sich hier neben der Erfassung der Vorschubkraft vor allem die Messung des Schnittmoments bzw. der Schnittleistung an. Abb. 14 zeigt den Verlauf des Schnittmoments beim Vollfräsbohren in Ck45 mit rhombischen Wendeschneidplatten aus Cermet in Abhängigkeit der Bohrtiefe l_B .

Bis etwa 50 mm Bohrtiefe bleibt das Schnittmoment nahezu konstant, d. h. es ist noch kein Verschleiß zu erkennen. Im weiteren Verlauf bewirkt der zunehmende Freiflächenverschleiß ein Ansteigen des Schnittmoments, was zu einem Abbruch des Versuchs bei $l_B = 160$ mm führte. Auf die Bohrungsqualität wirkte sich dieser Verschleiß jedoch noch nicht nachteilig aus.

Neben kontinuierlichem Schneidverschleiß ist aus dem Verlauf des Schnittmoments in Abb. 15 auch ein plötzlich auftretender Schneidenbruch zu erkennen. Beim drückenden Auffräsbohren in Ck45 von 80 auf 88 mm Bohrungsdurchmesser mit stufenweise erhöhter Vorschubgeschwindigkeit verursachte ein Schneidenbruch das Absinken des Schnittmoments um 10% von 11,8 auf 10,6 Nm. Ebenso wie im Schnittmoment wird dieser Schneidenbruch aus der Aufzeichnung der Wirkleistung des Antriebsmotors $P_{el,W}$ bzw. der Schnittleistung P_c ersichtlich.

Dieses Verhalten wurde auch bei der Untersuchung des Einflusses der Schneidzahl beim Voll- und Auffräsbohren festgestellt, als sich bei Entfernung einer Fräterschneide, d. h. der Simulation eines Schneidenbruches, eine deutliche Reduzierung des Schnittmoments ergab.

5. Zusammenfassung

Bisher durchgeführte Versuche haben die prinzipielle Eignung und Funktionsfähigkeit des Fräsbohrwerkzeuges zur Bohrungsherstellung bestätigt. Die günstige Spanform beim Fräsbohren ermöglicht eine sichere Beherrschung des Zerspanprozesses, so daß beson-

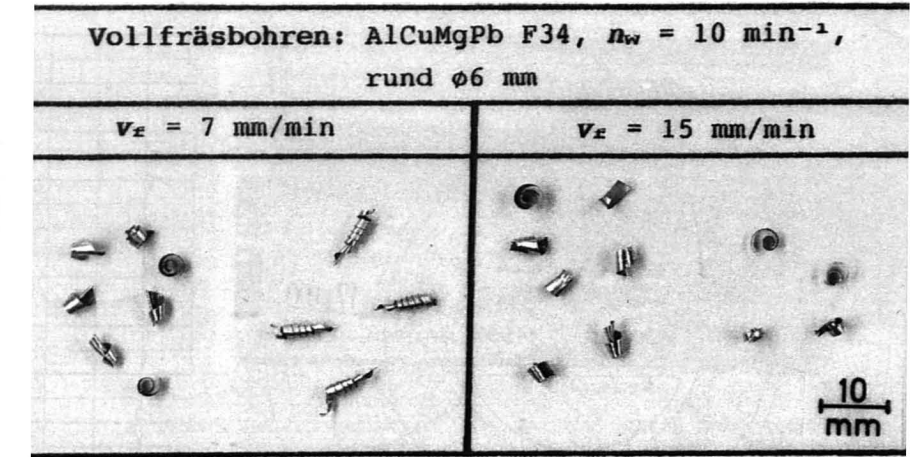
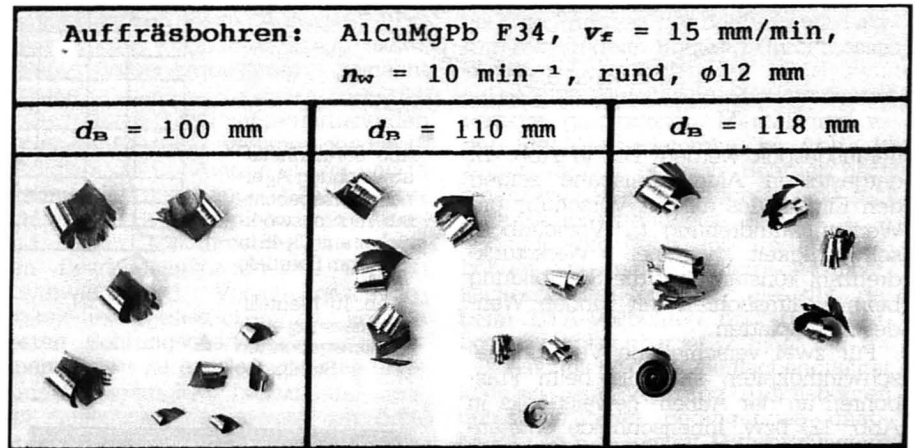


Abb. 12: Einfluss des axialen Vorschubs pro Werkstückumdrehung f_{ax} beim Vollfräsbohren mit runden Schneiden

Abb. 13: Einfluss des Bohrungsdurchmessers d_B auf Spanlänge und -form beim Auffräsbohren



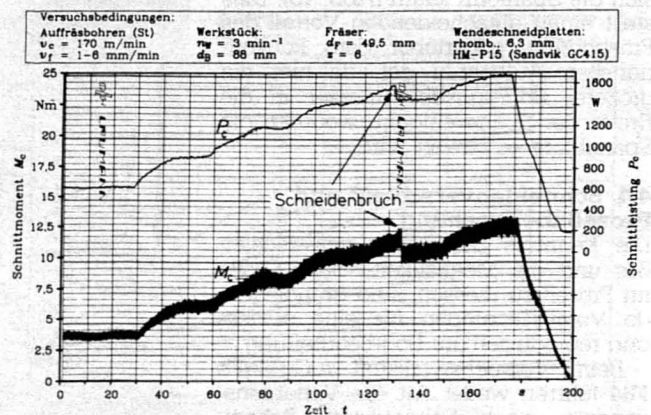
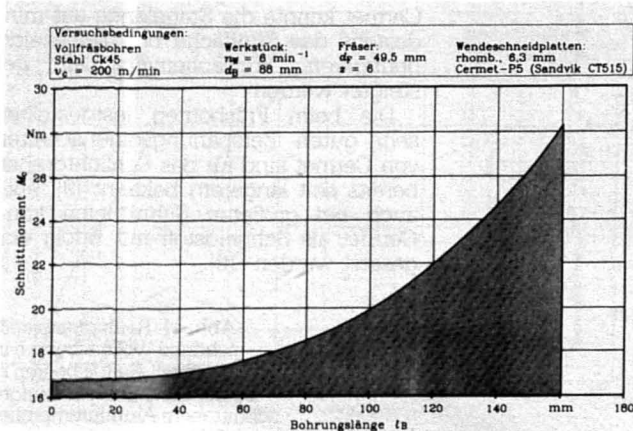
ders für eine automatisierte Bearbeitung Vorteile zu verzeichnen sind. Schneidverschleiß und Schneidenbruch können problemlos durch Messung von Schnittmoment bzw. -leistung überwacht werden.

Durch die günstige Schnittgeschwindigkeitsverteilung über dem Bohrungsgrund kann beim Fräsbohren die Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe ausgenutzt werden. Auch bei hoher Schnittgeschwindig-

keit ist die Gleitgeschwindigkeit der Führungsleisten gegenüber herkömmlichen Tiefbohrverfahren so niedrig, daß thermisch bedingte Schäden an den Führungsleisten, wie sie z. B. beim BTA-Bohren vorkommen [8], nicht auftreten. Dadurch verbessern sich auch die Voraussetzungen für den Einsatz von Kühlschmieremulsion, die bekanntlich geringere Schmiereigenschaften aufweist als Tiefbohröl. Durch die erforderliche niedrige Drehzahl des Werkstücks gibt es auch bei asymmetrischen Bauteilen keine Probleme auf-

Abb. 14: Einfluss des Schneidverschleißes auf das Schnittmoment beim Vollfräsbohren mit rhombischen Cermet-WP in Ck45

Abb. 15: Absinken des Schnittmoments nach einem Schneidenbruch (Bildnachweis: IfW)



grund von Unwuchteinflüssen.

Zur Verminderung des noch zu großen Schneidenschleißes, der Erhöhung der Bearbeitungsgeschwindigkeit sowie der systematischen Erfassung der Bohrungsqualität, vor allem der Maß- und Formtoleranzen sowie der Oberflächengüte, werden derzeit weitere Untersuchungen durchgeführt. Ziel ist die Optimierung der Prozessparameter und die Erarbeitung von Richtwerten für den praktischen Einsatz des neuen Verfahrens „Fräsbohren“.

6. Literatur

- [1] Koster, A.: Fräsbohren. Neue Möglichkeiten zum Tiefbohren. Vortrag anlässlich der Tagung „Tiefbohren“ am 7./8. April 1986, Universität Dortmund.
- [2] Koster, A.: Technologische Grundlagen des Fräsbohrens. Dissertation Universität Stuttgart 1988.
- [3] Koster, A.: Fräsbohren und andere Bohrtechnologien. tz für Metallbearbeitung, 81. Jahrg. 1987, Heft 3/87.
- [4] Tuffentsammer, K., Koster, A., Koch, J.: Konzipierung und Optimierung des Werkzeugantriebs für das Verfahren Fräsbohren und seine Lagerung im Bohrstangenschaft. CIRP-Annalen, Vol 36/1/1987.
- [5] Utz, Th.: Auskammerfräsen – Eine neue Möglichkeit zur Herstellung aufgeweiteter Innenkonturen. Vortrag anlässlich der Tagung „Tiefbohren“ am 16./17. März 1989, Universität Dortmund.
- [6] Utz, Th.: Auskammern durch Fräsen. dima 6/89, S. 16–23.
- [7] Stockert, R.: Beitrag zur optimalen Auslegung von Tiefbohrwerkzeugen. Dissertation Universität Dortmund 1978.
- [8] Fuß, H.: Aspekte zur Beeinflussung der Qualität von BTA-Tiefbohrungen. Dissertation Universität Dortmund 1986.
- [9] Abel, R.: Cermets – bestens geeignet für das Schlichten. Werkzeuge für die spanende Fertigung (1989)9.
- [10] N.N.: Industrieanzeiger – Expertengespräche „Wunderschneidstoff Cermet“. Industrie-Anzeiger 112(1990)41.