

Auskammerfräsbohren - Maßgenauigkeit und Rauheit der Bohrungen

Zum Aufbohren von kurzen Bohrungen wird das Verfahren Innenrundfräsen schon seit etwa 20 Jahren auf numerisch gesteuerten Fräsmaschinen durchgeführt. Die Verfahrenskombination Fräsbohren zum Fertigen von Bohrungen ins volle findet dagegen erst seit etwa fünf Jahren auch in der Industrie Anwendung. Die am Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart durchgeführten Forschungsarbeiten zur Untersuchung des zum Auskammerfräsbohren weiterentwickelten Bearbeitungsverfahrens werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. – Von Prof. Dr.-Ing. Dr. h. c. U. Heisel und Dipl.-Ing. G. Ruziczka¹⁾.

Einleitung

Für die Bohrbearbeitung stellen die Verfahren Innenrundfräsen und Fräsbohren eine wirtschaftliche Alternative zu konventionellen Bohrverfahren dar. Vorteile beider Verfahren sind hohe Zeitspannvolumina und Kurzspannbildung. Hinsichtlich der Technologie und der Anwendungsmöglichkeiten unterscheiden sie sich aber wesentlich voneinander. Beim Innenrundfräsen werden Walzenstirn- oder Schaftfräser auf einer Kreisbahn am Innenrand der Bohrung entlanggeführt. Dabei ist der Fräser über die gesamte Bohrtiefe im Eingriff, und die Bohrung wird während eines Zirkularumlaufs gefertigt [1, 2]. Im Gegensatz dazu führt der Fräser beim Fräsbohren eine wendelförmige Vorschubbewegung aus und ermöglicht auch das Fertigen von Bohrungen ins volle [3]. Während eines Zirkularumlaufs wird beim Fräsbohren eine vergleichsweise geringe Bohrtiefe erzeugt, so daß entsprechend

der Bohrtiefe mehrere Zirkularumläufe erforderlich sind.

Die unterschiedlichen Vorgehensweisen beider Verfahren zur Bohrbearbeitung sowie deren unterschiedlichen Zerspanungsbedingungen haben auch Einfluß auf die Rundheit und Rauheit der erzeugten Bohrung. Mittels Innenrundfräsen ist unter Produktionsbedingungen die Qualität IT7 nach DIN 7184 durchaus realisierbar. Der typische Kreisformfehler liegt bei 10 bis 20 µm [4]. Nachteilig ist die Beschränkung des Innenrundfräsens auf das Herstellen kurzer Bohrungen. Untersuchungen des Bearbeitungsverfahrens Fräsbohren ergaben hinsichtlich der erzielbaren Maßgenauigkeit und Rundheitstoleranz Ergebnisse, die mit denen des Rundfräsens vergleichbar sind.

Erzeugen von Kreisbewegungen mit numerisch gesteuerten Werkzeugmaschinen

Die beim Innenrundfräsen und Fräsboh-

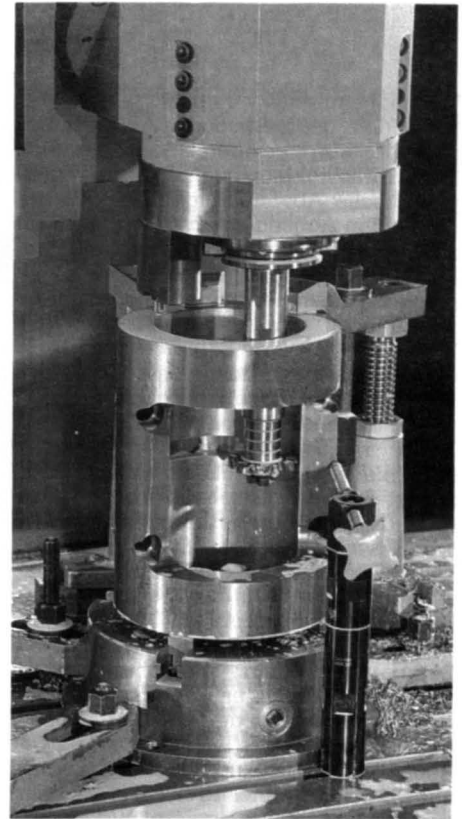


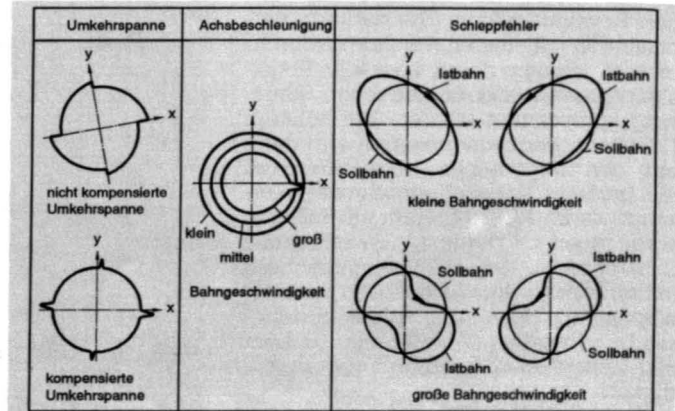
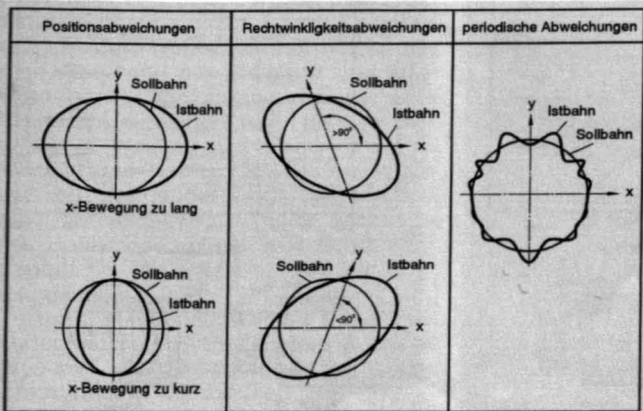
Abb. 1: Bohrbearbeitung auf NC-gesteuerter Bohr- und Fräsmaschine

ren auf numerisch gesteuerten Bohr- und Fräsmaschinen erforderliche kreisförmige Vorschubbewegung kann sowohl mit zwei Linearachsen als auch mit einem Rundtisch erzeugt werden (Abb. 1). Die meisten dieser in der Industrie vorhandenen Werkzeugmaschinen verfügen über zwei Linearachsen. Auf die Maßgenauigkeit der fertigen Bohrung hat die Form der von den Vorschubachsen erzeugten Kreisbahn des Fräsers daher einen wesentlichen Einfluß. Die Kreisbahnform ist abhängig von den Geometrieabweichungen dieser zwei Vorschubachsen und wird auch von Abweichungen beeinflusst, die von der numerischen Steuerung und den

Abb. 2: Geometrische Abweichungen von Kreisbewegungen numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen

Abb. 3: Einfluß der numerischen Steuerung und der Vorschubantriebe auf die Kreisbewegung numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen

¹⁾ Professor Dr.-Ing. Dr. h. c. U. Heisel ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart. Dipl.-Ing. G. Ruziczka war wissenschaftlicher Mitarbeiter am selben Institut und ist heute als Gewerbelehrer tätig.

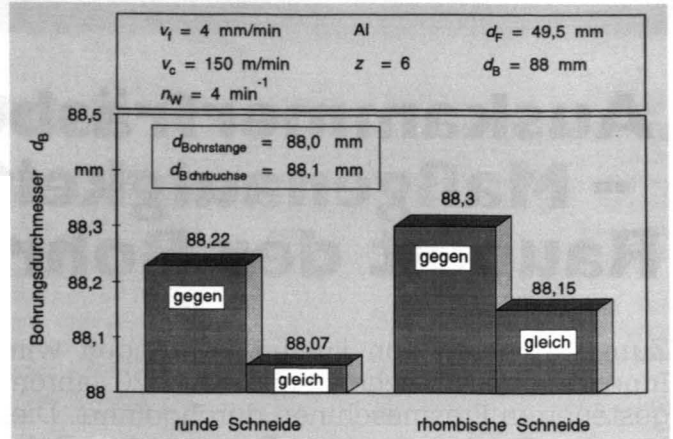


Vorschubantrieben verursacht werden [5].

Zu den geometrischen Abweichungen gehören Positionsabweichungen, Rechtwinkligkeitsabweichungen und periodische Abweichungen. Wenn eine der beiden Achsen einen zu langen oder zu kurzen Weg zurücklegt, entstehen Positionsabweichungen (Abb. 2). Eine mögliche Ursache ist eine Abweichung im Maßstab. Dadurch ändert sich die Kreisbahn zu einer Ellipse, die im Fall eines zu lang zurückgelegten Verfahrwegs einer Vorschubachse ihren größten Durchmesser parallel zu dieser Achse hat. Stehen beide Vorschubachsen nicht rechtwinklig zueinander, ändert sich die Kreisbahn ebenfalls zu einer Ellipse. Auch periodische Positionsabweichungen einer Vorschubachse beeinflussen die Kreisbahn. Die Abweichungen von der Kreisbahn sind dabei aber nichtelliptisch.

Einflußparameter der numerischen Steuerungen und Vorschubantriebe sind Umkehrspannen, unterschiedliche Beschleunigungen der Vorschubachsen und Schleppfehler (Abb. 3). Die Bewegung jeder einzelnen Vorschubachse zum Erzeugen einer Kreisbahn ist sehr komplex. Eine konstante Vorschubgeschwindigkeit auf einer Kreisbahn erfordert eine sinusartige bzw. cosinusartige Änderung von Weg, Geschwindigkeit und Beschleunigung jeder einzelnen Vorschubachse. Bei vorhandener Umkehrspanne in den Vorschubantrieben ändert sich die Sollkreisbahn zu vier Viertelkreisen, wobei die vier Viertelkreise verschiedene Mittelpunkte besitzen. Verfügt die Maschine über Maßstäbe, können diese Umkehrspannen erkannt und mit Hilfe der numerischen Steuerung kompensiert werden. Da diese Korrektur eine gewisse Zeit benötigt, können an den Umkehrpunkten große Spitzen auftreten, die mit größer werdender Umkehrspanne und abnehmender Kreisverstärkung der numerischen Steuerung zunehmen. Mit dem Erhöhen der Kreisbahngeschwindigkeit erhöhen sich entsprechend die Beschleunigungen der Vorschubachsen. Wenn sich der Vorschubantrieb einer Achse wie ein Feder-Masse-System verhält, resultiert aus einer steigenden Kreisbahngeschwindigkeit eine Verringerung der Amplitude der sinusförmigen Bewegungsform. Die dadurch verursachten kleineren Bohrungsdurchmesser können durch spezielle Regelalgorithmen in der numerischen Steuerung kompensiert werden. Bei höheren Kreisbahngeschwindigkeiten wird dann mit den errechneten Korrekturwerten ein größerer Kreisbahndurchmesser erzeugt als im NC-Programm als Sollbahn vorgegeben wurde. Verschiedene Schleppfehler beider Vorschubachsen ändern ebenfalls die Kreisbahn zu einer elliptischen Bahn. Die daraus resultierende Kreisbahnabweichung erhöht sich entsprechend der Bahngeschwindigkeit.

Abb. 4: Einfluß der Schneidenform auf den Bohrungsdurchmesser



Maßgenauigkeit und Rauheit der Bohrungen beim Auskammerfräsborehen

Beim Herstellen von Bohrungen mit der im IfW vorhandenen Versuchsmaschine und dem Auskammerfräsborewerkzeug wird die Kreisvorschubbewegung des Fräasers durch die Rotation des Werkstücks erzeugt. Die beim Fräsborehen auf Bearbeitungszentren vorhandenen Probleme der Rundheitsabweichung durch die Erzeugung der Kreisbahnbewegung mit Linearachsen werden dabei vermieden.

Aufgrund der wendelförmigen Vorschubbewegung des Fräasers und der Abstützung des Werkzeugs in der Bohrung direkt hinter dem Fräser lassen sich wesentlich größere Bohrtiefen als beim Innenrundfräsen erzielen. Mit der vorhandenen Versuchseinrichtung sind Bohrtiefen bis 1000 mm bei einem kleinsten Bohrungsdurchmesser von 88 mm möglich.

Umfangreiche Untersuchungen von Maßgenauigkeit und Rauheit [6, 7] der mittels Fräsborehen gefertigten Bohrungen ergaben eine wesentliche Abhängigkeit von der Schneidenform, dem Werkstückmaterial sowie den Bearbeitungsparametern Werkstückdrehrichtung und -drehzahl sowie Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit.

Einfluß der Werkstückdrehrichtung
Beim Umschalten der Werkstückdreh-

richtung ist zu beachten, daß die Zerspankraft beim Gleich- und Gegenlauf in gegensätzliche Richtungen zeigt. Das Werkzeug wird im Gegenlauf zur Bohrungswand hin und im Gleichlauf von der Bohrungswand weggedrückt. Daraus ergibt sich beim Fräsborehen im Gegenlauf ein größerer Bohrungsdurchmesser als im Gleichlauf.

Bei einer Umkehrung der Werkstückdrehrichtung ist die radiale Fräserzu-stellung entsprechend zu korrigieren. Im Gleichlauf wird die Bohrungsoberfläche während des Außenschneideneingriffs kurz vor dem Übergang von Außen- zu Innenschneideneingriff erzeugt. Dagegen wird im Gegenlauf die Bohrungsoberfläche kurz nach dem Übergang von Innen- zu Außenschneideneingriff hergestellt.

Einfluß der Schneidenform

Für die Zerspanungsuntersuchungen wurden Fräser mit rhombischen und runden Wendeschneidplatten verwendet. Aufgrund der wendelförmigen Vorschubbewegung entsteht beim Fräsborehen im Gegensatz zum Innenrundfräsen nicht nur in Umfangsrichtung eine zahneingriffsbedingte Rauheit, sondern auch eine Rauheit in axialer Richtung aufgrund des Bohrvorschubs parallel zur Bohrungsachse. Wesentlichen Einfluß auf den Bohrungsdurchmesser und die Rauheit hat daher die Schneidenform (Abb. 4). Zum Erzielen

Abb. 5: Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit auf den Bohrungsdurchmesser

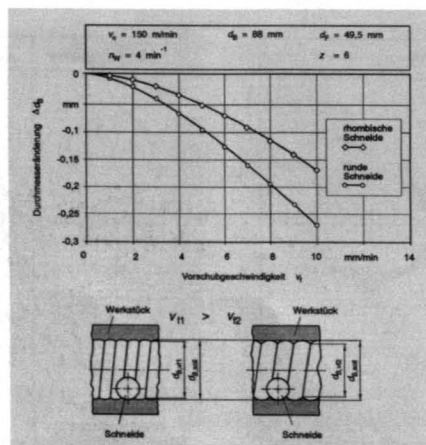
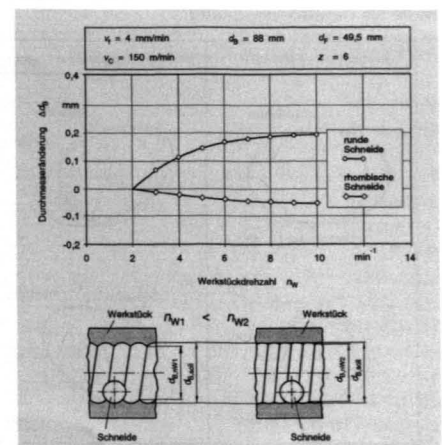


Abb. 6: Einfluß der Werkstückdrehzahl auf den Bohrungsdurchmesser



guter Bohrungsflächen sind die rhombischen Wendeschneidplatten derart am Fräser befestigt, daß ein gerader Schneidenteil parallel zur Bohrungswand verläuft. Runde Schneiden erzeugen zwangsläufig ein Rundgewinde. Folge ist eine vergleichsweise große Rauheit in axialer Richtung und ein entsprechend kleinerer Bohrungsdurchmesser.

Einfluß der Vorschubgeschwindigkeit

Eine steigende Vorschubgeschwindigkeit ergibt eine größere Steigung der wendelförmigen Vorschubbewegung, die einem größeren axialen Vorschub je Werkstückumdrehung entspricht. Daraus resultiert eine Durchmesserabnahme bei zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Insbesondere beim Fräsbohren mit runden Schneiden ist diese Durchmesserabnahme aufgrund der Zunahme der axialen Welligkeit des Rundgewindes vergleichsweise groß (Abb. 5). Bei einer Änderung der Vorschubgeschwindigkeit während der Bohrbearbeitung ist die Durchmesseränderung durch entsprechende Korrektur der radialen Fräserzustellung zu berücksichtigen. Eine wesentliche Erhöhung der Vorschubgeschwindigkeit kann insbesondere bei runden Schneiden dazu führen, daß der gefräste Bohrungsdurchmesser kleiner als der Hüllkreisdurchmesser der Führungsleisten wird. Die daraus resultierenden Umformungen des Werkstückmaterials können bei den verfahrensspezifisch geringen Gleitgeschwindigkeiten der Führungsleisten zum Verschlechtern der Bohrungsfläche und eventuell zu Führungsleistenschäden führen. Andererseits wird durch Verringern der Vorschubgeschwindigkeit der Bohrungsdurchmesser und damit auch die Durchmesser-toleranz zwischen dem Hüllkreis der Führungsleisten und der Bohrung größer. Dies beeinträchtigt die Genauigkeit der Werkzeugführung in der Bohrung.

Einfluß der Werkstückdrehzahl

Ebenso wie die Vorschubgeschwindigkeit hat auch die Werkstückdrehzahl einen wesentlichen Einfluß auf den Bohrungsdurchmesser (Abb. 6). Eine Änderung der Werkstückdrehzahl hat gegenläufige Einflüsse auf den Bohrungsdurchmesser zur Folge. Eine Zunahme der Werkstückdrehzahl ergibt eine Abnahme der Steigung der wendelförmigen Vorschubbewegung. Dies entspricht einem kleineren axialen Vorschub je Werkstückumdrehung. Insbesondere bei runden Schneiden ergibt sich mit steigender Werkstückdrehzahl eine vergleichsweise große Zunahme des Bohrungsdurchmessers durch Verringern der Welligkeit parallel zur Bohrungsschse.

Eine steigende Werkstückdrehzahl ergibt auch einen größeren Abstand zwischen zwei Zahneingriffen am Bohrungsumfang. Daraus folgt bei rhombischen Schneiden mit einem geraden

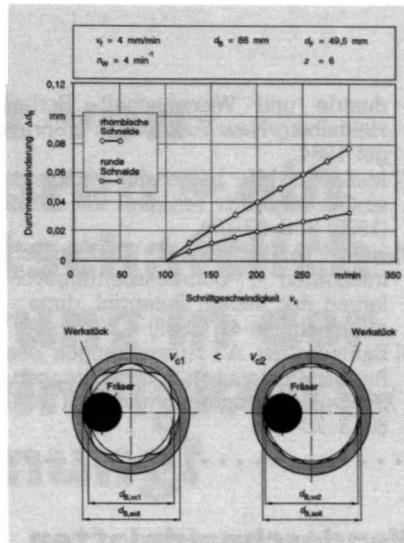


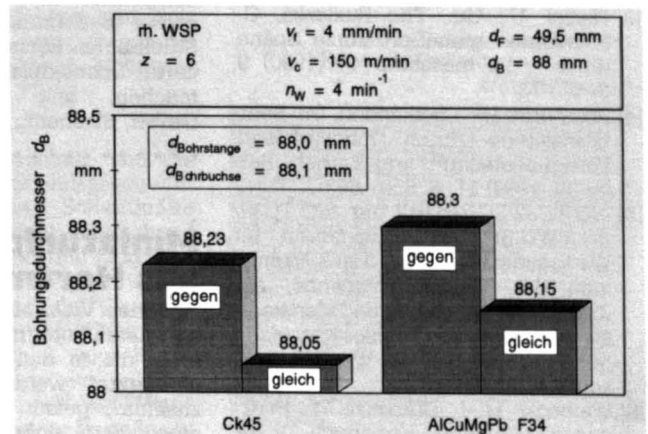
Abb. 7: Einfluß der Schnittgeschwindigkeit auf den Bohrungsdurchmesser

Schneidteil parallel zur Bohrungswand eine Zunahme der Rauheit und damit ein kleinerer Bohrungsdurchmesser. Dieser Effekt des abnehmenden Bohrungsdurchmessers bei steigender Werkstückdrehzahl wird aber durch häufigeres Überschneiden der bereits gefertigten Bohrungsfläche und somit nachträglichem Einebnen der Rauheitsspitzen aufgrund des kleineren axialen Fräservorschubs je Werkstückumdrehung teilweise wieder kompensiert. Diese Einflüsse haben bei rhombischen Schneiden mit den gewählten Bearbeitungsparametern einen abnehmenden Bohrungsdurchmesser bei steigender Werkstückdrehzahl zur Folge.

Einfluß der Schnittgeschwindigkeit

Mit steigender Schnittgeschwindigkeit steigt die Zahneingriffsfrequenz an der Bohrungswand, d.h. der Abstand zwischen zwei Zahneingriffen und damit auch die Rauheit wird kleiner. Diese Abnahme der Rauheit führt zu einer Zunahme des Bohrungsdurchmessers. Infolge der verfahrensbedingt geringen Rauheit der Bohrungsfläche in Umfangsrichtung wirkt sich der Einfluß einer Schnittgeschwindigkeitsänderung nur gering aus (Abb. 7). Bei den gewählten Versuchsparametern ist der Fall gegeben, daß die gerade Schneidenlän-

Abb. 8: Einfluß des Werkstückmaterials auf den Bohrungsdurchmesser (Bildnachweis: SHW, Aalen-Wasseralfingen, IfW)



ge der rhombischen Wendeschneidplatten parallel zur Bohrungswand größer als der axiale Vorschub je Werkstückumdrehung ist. Dadurch wird die bereits gefertigte Bohrungsfläche nach einer Werkstückumdrehung nochmals überschritten und die Rauheit am Bohrungsumfang weiter verringert.

Einfluß des Werkstückmaterials

Auch das Werkstückmaterial hat Einfluß auf den Bohrungsdurchmesser. Bei gleicher radialer Fräserzustellung und gleicher Toleranz zwischen Hüllkreisdurchmesser der Führungsleisten und dem Durchmesser der Anbohrbuchse werden verschiedene Bohrungsdurchmesser erzeugt (Abb. 8). Ursache dafür sind die verschiedenen Beträge der Schnitt-, Vorschub- und Passivkräfte aufgrund der unterschiedlichen spezifischen Schnittkräfte. Die Zerspankraft ist dann in Betrag und Richtung verschieden.

Berechnung des Bohrungsdurchmessers

Eine Vorausberechnung des beim Fräsbohren zu erwartenden Bohrungsdurchmessers ist komplexer als beim Innenrundfräsen. In der Praxis findet der Schneideneingriff am Bohrungsumfang nach jeweils einer Werkstückumdrehung nicht genau an der gleichen Stelle statt, sondern erfolgt versetzt. Einen Einfluß auf die Geometrie der erzeugten Bohrungsfläche hat auch der Rundlauffehler des Fräasers [9]. Die Werkstückoberfläche wird dann nicht selten von einem einzelnen, etwas weiter radial nach außen stehenden Fräserzahn gefertigt. Neben dem Fräserundlauf hat auch der Rundlauf der Fräserantriebswelle und die Genauigkeit der Fräseraufnahme einen wesentlichen Einfluß auf die erzielbare Durchmesser-genauigkeit der fertigen Bohrung. Die bei einem Rundlauffehler unterschiedlichen Beträge der Schnitt-, Passiv- und Vorschubkräfte an den einzelnen Fräserzähnen ergeben eine Zerspankraft, die in Betrag und Richtung von der bei rundlauffehlerfreien Fräsern verschieden ist. Damit ändert sich auch die Auslenkung der Bohrstange und der Bohrungsdurchmesser.

Die erzielbare Kreisform der gefertigten Bohrung ist weiterhin auch abhängig von der Spindellagerung, dem Antriebssystem, der Gesamtsteifigkeit des Systems aus Spindel und Werkzeug und vor allem von der Steifigkeit des Werkstücks und dessen Aufspannung.

Zusammenfassung

Das Verfahren Auskammerfräsbohren bietet eine Vielzahl verfahrensspezifischer Vorteile. Wesentlicher Unterschied zum Innenrundfräsen ist die Möglichkeit zum Fertigen von Bohrungen ins volle. Durch die Abstützung des Auskammerfräsbohrwerkzeugs in der Bohrung direkt hinter dem Fräser ist das Herstellen auch tiefer Bohrungen möglich.

Die Vorteile hoher Zeitspanvolumina und Kurzspanbildung werden mit einer Genauigkeit des Innenrundfräsens verbunden. Geringe Rauheiten werden mit Schneidplatten erzielt, die einen geraden Schneidteil parallel zur Bohrungswand besitzen. Dies können rhombische oder auch runde Schneidplatten sein, die am Fräseraußendurchmesser entsprechend angeschliffen sind. Zum Erzielen sehr guter Bohroberflächen bietet es sich an, die Bohrbearbeitung in eine Schruppbearbeitung ins volle und eine Schlichtbearbeitung während des Werkzeugrückzugs aufzuteilen. Durch Erhöhen der Fräserdrehzahl bei gleichzeitigem Reduzieren der Werkstückdrehzahl sowie Vorschubgeschwindigkeit ist bei der Schlichtbearbeitung eine weitere Verringerung der Rauheit möglich.

Aufgrund der am IfW durchgeführten Zerspanungsuntersuchungen stehen umfangreiche Grundlagen zur Verfügung. Ziel des Forschungsvorhabens ist der zuverlässige Einsatz des Bearbeitungsverfahrens Auskammerfräsbohren in der Industrie.

Literatur

- [1] Brammertz, P.; Graf, K.: Werkzeuge zum Zirkularfräsen. Werkstatt und Betrieb 121 (1988) 1, S. 70–72.
- [2] Boetz, V.: Zirkularfräsen auf CNC-Bearbeitungszentren. Maschine und Werkzeug 90 (1989) 21, S. 130–134.
- [3] Heisel, U.; Utz, Th.; Ruziczka, G.: Fräsbohren garantiert kurze Späne. *dima – die maschine* 44 (1990) 9, S. 67–73.
- [4] Reinhardt, H.; Lützkendorf, D.: Bohrbearbeitung durch Zirkularfräsen. Fertigungstechnik und Betrieb, Berlin 39 (1989) 11, S. 650–653.
- [5] ISO TC39/SC 2/N 917 ug ISO TC39/SC 2/WG S/N 16: Prüfverfahren für Werkzeugmaschinen – Teil 3: Ermittlung der Kreisumkehrspanne, der Kreisformabweichung und der Radialabweichung von Kreisbewegungen numerisch gesteuerter Werkzeugmaschinen.
- [6] Warnecke, H.-J.; Dutschke, W.: Fertigungsmeßtechnik, Handbuch für In-

dustrie und Wissenschaft. Berlin/Heidelberg/New York/Tokyo: Springer 1984.

- [7] Malle, K.: Mit passenden Schneidstoffen innovativ fertigen. VDI-Z 132 (1990) 3, S. 87–94.
- [8] Heisel, U.; Ruziczka, G.: Auskammerfräsbohren – Bohrbearbeitungsverfahren mit neuem Potential. *dima – die maschine* 47 (1993) 4, S. 28–30.
- [9] Baumgartner, A.: Auswirkungen des Rundlauffehlers von Fräswerkzeugen. Schweizer Maschinenmarkt 84 (1984) 30, S. 26–27.