

Zerspanungsvorgänge beim Auskammerfräsbohren

Die Weiterentwicklung des Verfahrens Fräsbohren zum Herstellen tiefer Bohrungen führte am Institut für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart zu dem neuen Fertigungsverfahren Auskammerfräsbohren. Mit einem einzigen Auskammerfräsbohrwerkzeug können sowohl tiefe zylindrische Bohrungen als auch Innenkonturen mit weitgehend freier Gestaltung gefertigt werden. Bisher durchgeführte Arbeiten des von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Forschungsvorhabens bestätigten die prinzipielle Eignung des Auskammerfräsbohrwerkzeugs für den industriellen Einsatz. – Von Prof. Dr.-Ing. U. Heisel und Dipl.-Ing. G. Ruziczka¹⁾.

I Einleitung

Industriell eingesetzt wird das Verfahren Fräsbohren bereits als wirtschaftliche Alternative zum Bohren auf Bearbeitungszentren zur Schruppbearbeitung von Bohrungen in Großschmiedeteilen. Mit handelsüblichen Fräswerkzeugen werden Bohrungen ins Volle im Durchmesserbereich von 100 bis 500 mm und Bohrtiefen von 400 bis 500 mm gefertigt [1]. Der verfahrensbedingt unterbrochene Schnitt liefert kurze Späne, die leicht aus der Bohrung entfernt werden können. Diese Kurzspannbildung ist eine wichtige Voraussetzung für eine automatisierte Bohrbearbeitung. Gegenüber konventionellen Bohrverfahren ermöglicht die günstige Schnittgeschwindigkeitsverteilung über dem Bohrungsdurchmesser auch eine gute Ausnutzung der Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe [2].

durchmesser auch eine gute Ausnutzung der Leistungsfähigkeit moderner Schneidstoffe [2].

Im Gegensatz zum Fräsbohren auf Bearbeitungszentren mit konventionellen Fräswerkzeugen wird das Auskammerfräsbohrwerkzeug in der Bohrung mittels Führungsleisten direkt hinter dem Fräser abgestützt. Dies ermöglicht das Fertigen auch tiefer Bohrungen bis zu einem Verhältnis von 10 zu 1 von Bohrungslänge zu Bohrungsdurchmesser. Mit den Untersuchungen der Zerspanungsvorgänge beim Auskammerfräsbohren sollen Möglichkeiten zum Optimieren der Bearbeitungsparameter

Schnittgeschwindigkeit, Vorschubgeschwindigkeit und Werkstückdrehzahl sowie für eine optimierte konstruktive Auslegung solcher Bohrbearbeitungseinrichtungen erarbeitet werden.

2 Verfahrensvarianten des Auskammerfräsbohrens

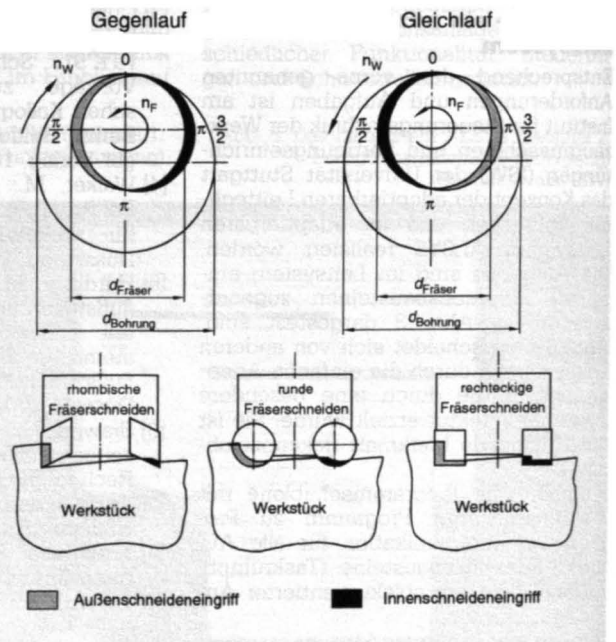
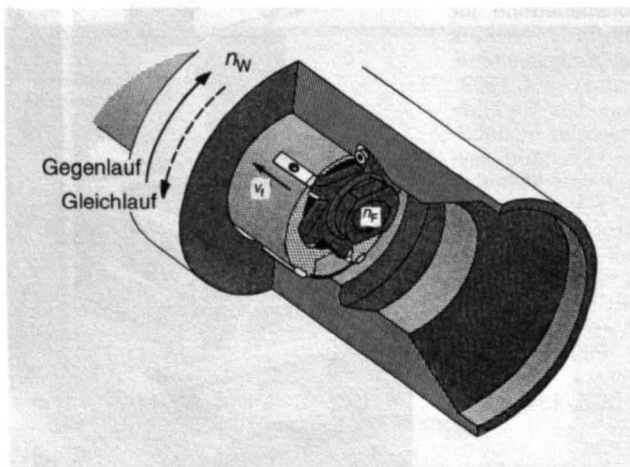
Auskammerfräsbohren ist vergleichbar mit einer Überlagerung der beiden Verfahren Innenrundfräsen und Bohren [3]. Zur Zerspanung des gesamten Bohrungsquerschnitts ist eine wendelförmige Vorschubbewegung des Fräasers notwendig, die sich beim Auskammerfräsbohrwerkzeug aus dem Rundvorschub durch die Rotation des Werkstücks mit der Drehzahl n_w und aus dem axialen Vorschub v_f des Werkzeugs parallel zur Bohrungsachse zusammensetzt (Abb. 1).

Aufgrund der verfahrensspezifischen Kinematik zerspannt der Fräser im Gegensatz zu konventionellen Fräsverfahren nicht nur an seinem Umfang, sondern auch mit den axialen und den nach innen gerichteten Schneiden (Abb. 2). Der unterbrochene Schnitt durch den Übergang der Zerspanung von Außen- zu Innenschneideneingriff und umgekehrt ergibt kurze Späne [4, 5].

Die Fertigung einer tiefen Bohrung mit rotationssymmetrischer Innenkontur erfolgt in zwei Arbeitsschritten. Zuerst wird mit dem Auskammerfräsbohrwerkzeug eine Vorbohrung hergestellt, deren Durchmesser dem Flugkreisdurchmesser der Führungsleisten entspricht. Danach wird mit einem Scheibenfräser die Innenkontur mit ziehender Vorschubbewegung, beginnend an der tiefsten Stelle der Bohrung, in einem Arbeitsgang gefertigt. Dabei wird der wendelförmigen Vorschubbewegung des Fräasers eine gesteuerte radiale Fräserzustellbewegung überlagert.

Abb. 2: Spannungsquerschnitte beim Fräsbohren ▶

Abb. 1: Kinematik beim Auskammerfräsbohren ▼



¹⁾ Professor Dr.-Ing. U. Heisel ist Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen (IfW) der Universität Stuttgart. Dipl.-Ing. G. Ruziczka ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am selben Institut.

3 Versuchseinrichtung

Für die Messung der Fräserantriebsmomente steht am IfW eine Versuchsmaschine und ein speziell entwickeltes Auskammerfräsbohrwerkzeug mit einer umfangreichen Meßeinrichtung zur Verfügung (Abb. 3).

3.1 Versuchsmaschine und Auskammerfräsbohrwerkzeug

Für die Werkzeugprüfung wird eine CNC-gesteuerte Versuchsmaschine verwendet, die aus einer Universaldrehmaschine aufgebaut wurde. Auf dem Maschinensupport ist ein Bohrstangenhalter angebracht, der das Werkzeug aufnimmt. Das Werkstück wird antriebsseitig im Backenfutter der Drehmaschine gespannt und auf der Werkzeugeintrittsseite im Zentrierkegel des Bohrlözführapparats (Boza) aufgenommen, der sich pneumatisch an das Werkstück anlegt. Damit wird sowohl eine einfache Zentrierung und Spannung des Werkstücks als auch gegebenenfalls der automatische Ausgleich des thermischen Längenwachstums des Werkstücks erreicht. Während der Anbohrphase wird das Auskammerfräsbohrwerkzeug solange in einer Bohrbuchse des Boza abgestützt, bis es sich in der Bohrung selbst führt. Zur Steuerung und Überwachung der Bohrbearbeitung dient eine CNC-Steuerung mit integrierter speicherprogrammierbarer Steuerung (SPS).

Beim Auskammerfräsbohrwerkzeug ist ein Fräser am Ende der Fräserantriebswelle angebracht, die in einer Verstellvorrichtung gelagert ist. Die radiale Position des Fräasers, also senkrecht zur Bohrungsachse, kann damit auch während der Bohrbearbeitung verändert und ein vorgegebener Bohrungsdurchmesser im Bereich von 88 bis 124 mm eingestellt werden. Mit der am IfW vorhandenen Versuchseinrichtung sind Bohrtiefen bis etwa 1000 mm möglich. Der durch die Fräserwelle und den Bohrlözführapparat zugeführte Kühlschmierstoff spült die Späne durch den Späneabfuhrkanal des Werkzeugs aus der Bohrung heraus.

3.2 Meßeinrichtung

Für die Messungen der Fräserantriebsmomente wurden Dehnmeßstreifen (DMS) auf der Fräserantriebswelle appliziert. Diese Meßgrößenumformer eignen sich sehr gut zur Messung der dynamischen Fräserantriebsmomente. Störeinflüsse wie Temperatur und Biegespannungen wurden mit der Verschaltung von vier DMS zu einer Vollbrücke kompensiert. Ein auf der Fräserantriebswelle befestigter Schleifringübertrager diente zur Signalübertragung zwischen der Meßbrücke und dem Trägerfrequenzmeßverstärker. Die Abtastung einer Strichmarkierung am Ende der Fräserantriebswelle mit einer berührungsfreien photoelektrischen Reflektionssonde ermöglichte die genaue Zu-

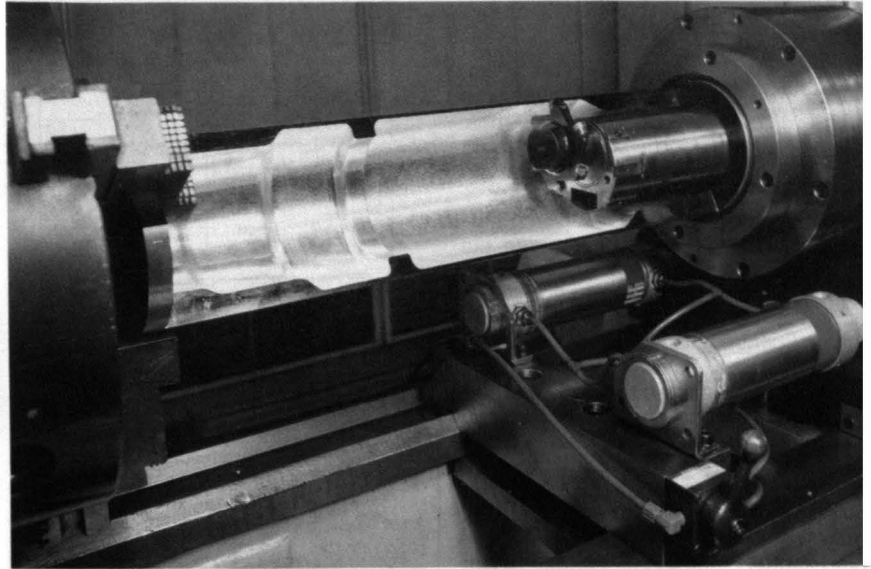


Abb. 3: Versuchsmaschine mit Auskammerfräsbohrwerkzeug

ordnung des Fräserantriebsmoments zu einer definierten Schneidenposition.

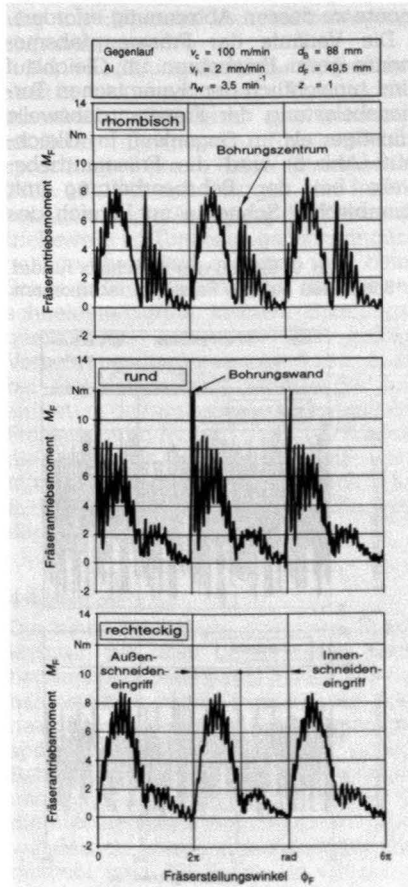
4 Experimentelle Untersuchungen

Die experimentellen Untersuchungen wurden mit langspannenden Versuchswerkstoffen durchgeführt. Typische Vertreter dieser Werkstoffgruppe sind die

Aluminiumlegierung AlCuMgPb F34 und der unlegierte Vergütungsstahl Ck45, einem zähartigen Werkstoff mit relativ hoher Festigkeit. Für die Zerspanungsuntersuchungen standen unterschiedliche Fräser mit Aufnahmen für rhombische, runde und rechteckige Wendeschneidplatten zur Verfügung. Um Störeinflüsse durch Rund- und Planlauffehler zu vermeiden, wurden auch Messungen mit einzahnigen Fräsern durchgeführt [6].

Die Ausarbeitung der Ergebnisse aus umfangreichen Versuchsreihen ergaben einen wesentlichen Einfluß der Schneidenform auf das Zerspanungsverhalten beim Auskammerfräsbohren.

Abb. 4: Fräserantriebsmomente beim Fräsbohren im Gegenlauf



4.1 Fertigen zylindrischer Bohrungen ins Volle

Beim Fertigen einer zylindrischen Bohrung ins Volle wird der Fräser so weit ausgeschwenkt, daß der hergestellte Bohrungsdurchmesser genau dem Flugkreisdurchmesser der Führungsleisten entspricht. Der Fräserdurchmesser ist dabei etwas größer als der Bohrungsradius, so daß die Bohrungsmitte überschritten und der gesamte Bohrungsquerschnitt zerspannt wird. Zum Erzielen guter Bohrungsoberflächen wurden rhombische und rechteckige Wendeschneidplatten derart am Fräser befestigt, daß eine Schneide jeder Wendeschneidplatte parallel zur Bohrungswand verläuft.

In Abb. 4 ist der zeitliche Verlauf des Fräserantriebsmoments bei der Bohrbearbeitung mit einzahnigen Fräsern mit rhombischer, runder und rechteckiger Schneide dargestellt. Gut erkennbar ist das höhere Fräserantriebsmoment während des Außenschneideneingriffs ($0-\pi$, $2\pi-3\pi$ und $4\pi-5\pi$) im Vergleich zum Innenschneideneingriff ($\pi-2\pi$, $3\pi-4\pi$ und $5\pi-6\pi$).

Wesentlicher Einfluß auf das Zerspanungsverhalten bei rhombischen Schneiden hat der Fräseraußendurchmesser. Ist er größer als der Bohrungsradius, entsteht im Bereich des Bohrungszentrums ein Kegel (Abb. 5). Die beim Einschneiden in den Kegel sich sprunghaft ändernde Größe des Spa-

nungsquerschnitts regt die Fräserantriebswelle im Bereich des Bohrungszentrums zu Torsionseigenschwingungen an, die im Meßaufschrieb (π , 3π und 5π in Abb. 4) gut erkennbar sind.

Bei gleichem Fräseraußendurchmesser entsteht bei runden Schneiden ein kleinerer Kegel im Bohrungszentrum. Auf das Fräserantriebsmoment wirkt sich dies wegen der kleinen zusätzlichen Spanungsfläche kaum aus. Problematisch ist beim Auskammerfräsböhen mit runden Schneiden dagegen der Bereich der Bohrungswand (0 , 2π und 4π in Abb. 4). Der mit runden Schneiden dort erzeugte Radius ist Ursache für die sprunghafte Änderung des Spanungsquerschnitts und damit auch des Fräserantriebsmoments. Daraus resultiert eine starke Anregung der Fräserantriebswelle zu Torsionseigenschwingungen

Rechteckige Schneiden eignen sich sehr gut für das Fertigen einer Bohrung ins Volle. Nachteile, wie sie bei der Bohrbearbeitung mit rhombischen und runden Schneiden auftreten, werden vermieden. Vereinfachend gesehen setzt sich der Verlauf des Fräserantriebsmoments bei rechteckiger Schneide aus dem Verlauf des Fräserantriebsmoments bei rhombischer Schneide während des Außenschneideneingriffs ($0-\pi$, $2\pi-3\pi$ und $4\pi-5\pi$ in Abb. 4) und dem Verlauf bei runder Schneide während des Innenschneideneingriffs ($\pi-2\pi$, $3\pi-4\pi$ und $5\pi-6\pi$ in Abb. 4) zusammen.

Im Vergleich zu rhombischen Schneiden können rechteckige Schneiden in Abhängigkeit von der stirnseitigen Schneidenlänge für einen Bohrungsdurchmesserbereich zum Fräsböhen ins Volle eingesetzt werden, ohne daß sich die Anregung der Fräserantriebswelle zu Torsionseigenschwingungen wesentlich ändert. Die Schneidenlänge

Abb. 8: Optimiertes Fräserantriebsmoment beim Fräsböhen mit rhombischer Schneide

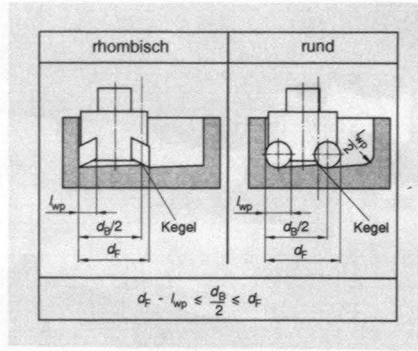
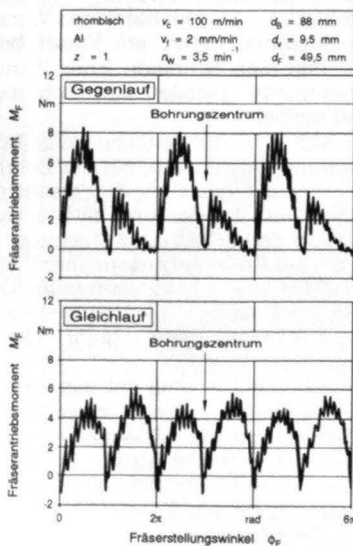
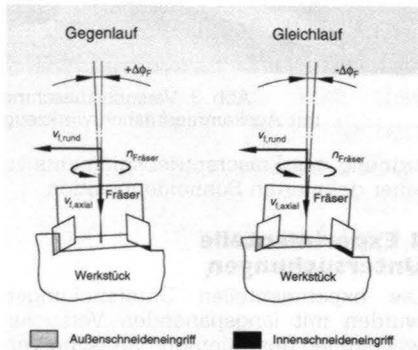


Abb. 5: Geometrie des Bohrungsbodens

Abb. 7: Anstellung des Fräfers in Rundvorschubrichtung



darf an diesem Schneidenteil aber nicht zu groß sein, damit der entstehende dünne Span keine zu hohen Schnittmomente zu dessen Abtrennung erfordert.

Die Verläufe der Fräserantriebsmomente beim Fräsböhen im Gleichlauf sind hinsichtlich der dynamischen Torsionsbelastung der Fräserantriebswelle günstiger als im Gegenlauf. Im Gleichlauf (Abb. 6) wird die Fräserantriebswelle bei der Bohrbearbeitung mit rhombischer Schneide im Bereich des

Abb. 9: Einfluß des Anschliffs runder Schneiden auf das Fräserantriebsmoment

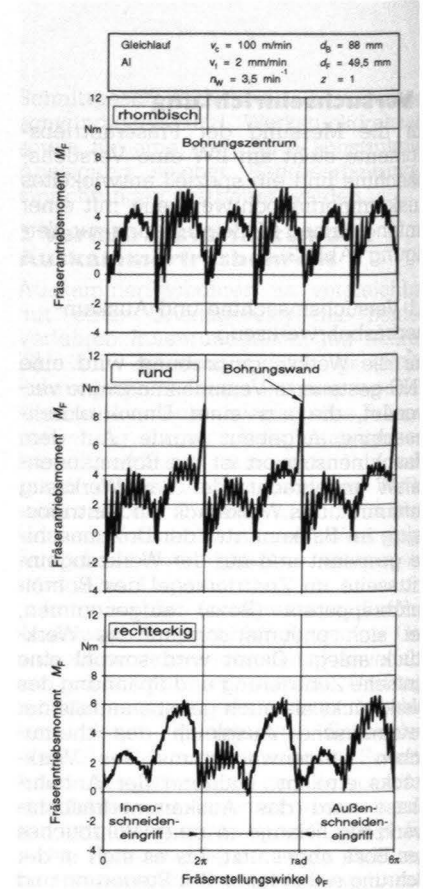
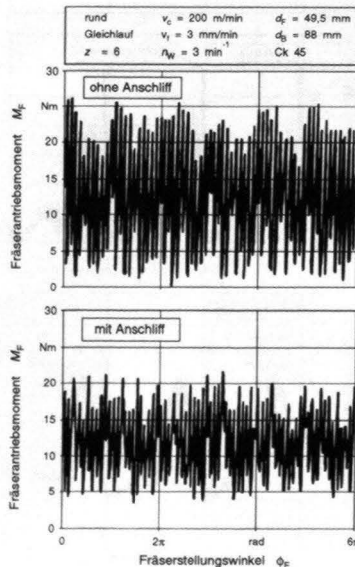
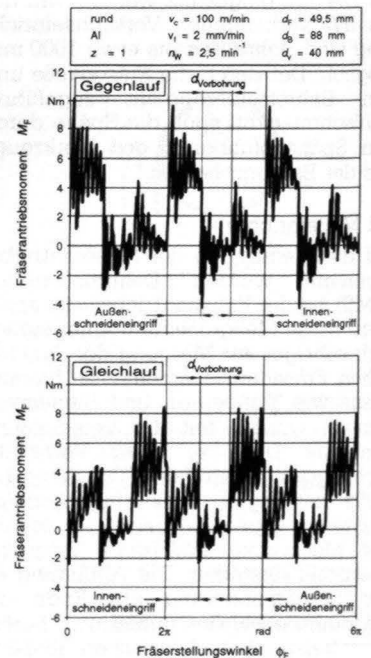


Abb. 6: Fräserantriebsmomente beim Fräsböhen im Gleichlauf

Bohrungszentrums (π , 3π und 5π) und mit runden Schneiden im Bereich der Bohrungswand (0 , 2π und 4π) wesentlich geringer zu Torsionseigenschwingungen angeregt.

In den Verläufen der Fräserantriebsmomente im Gegen- und Gleichlauf ist

Abb. 10: Fräserantriebsmomente bei vorhandener Vorböhrung



auch die Anstellung des Fräasers in Rundvorschubrichtung (Abb. 7) durch den nicht koaxialen Einbau der Fräserwelle in das Auskammerfräsbohrwerkzeug erkennbar. Gegenüber einer koaxialen Einbaulage der Fräserantriebswelle wird dadurch bewirkt, daß im Gleichlauf die Spannungsquerschnitte und damit auch die Fräserantriebsmomente während des Außenschneideneingriffs ($\pi-2\pi$, $3\pi-4\pi$ und $5\pi-6\pi$ in Abb. 6) etwas kleiner und während des Innenschneideneingriffs ($0-\pi$, $2\pi-3\pi$ und $4\pi-5\pi$ in Abb. 6) etwas größer sind. Umgekehrte Verhältnisse für die Spannungsquerschnitte ergeben sich im Gegenlauf. Bei der vorhandenen Fräseranstellung sind deshalb die Verläufe der Fräserantriebsmomente im Gleichlauf gleichmäßiger.

4.2 Möglichkeiten zum Erhöhen des Zeitspannungsvolumens

Das Erhöhen des Zeitspannungsvolumens ist ein Ziel der Forschungsarbeiten. Erreicht werden kann dies durch Verringern der Torsionsschwingungsamplituden, weil sich dann auch das zulässige mittlere Fräserantriebsmoment erhöht. Damit sollen gute Voraussetzungen für einen wirtschaftlichen Einsatz in der industriellen Produktionstechnik geschaffen werden.

Mit dem vorhandenen Fräser für rhombische Schneiden konnten die Amplituden der Torsionseigenschwingungen wesentlich reduziert werden (Abb. 8), indem im Bohrungszentrum mit einem konventionellen Bohrwerkzeug eine Vorbohrung eingebracht wurde. Beim anschließenden Fräsbohren wurde dadurch die Entstehung eines Kegels vermieden. Das Fertigen einer Bohrung ins Volle mit rhombischen Schneiden sollte daher mit einem Fräserdurchmesser erfolgen, der nur geringfügig größer als der Bohrungsradius ist. Mit dieser Anordnung bleibt die dynamische Torsionsbelastung der Fräserantriebswelle gering, und Fertigungstoleranzen von Fräser und Schneiden können weiterhin ausgeglichen werden. Auch bei runden Schneiden konnte die Höhe der Torsionsschwingungsamplituden im Bereich der Bohrungswand verringert werden. Möglich wurde dies durch Verkürzen der Schneidlänge mittels Anschleifen der Schneide am Fräseraußendurchmesser parallel zur Bohrungswand. Zerspanungsuntersuchungen mit mehrzahnigen Fräsern haben die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit einzahnigen Fräsern bestätigt. Der dynamische Anteil des Fräserantriebsmoments konnte durch diese einfache Maßnahme wesentlich verringert und das zulässige mittlere Fräserantriebsmoment erhöht werden (Abb. 9).

4.3 Fertigen von Innenkonturen

Innenkonturen können sich aus zylindrischen Abschnitten, Kegeln und Radien

Vollfräsbohren $v_c = 100 \text{ m/min}$ $v_f = 1 \text{ mm/min}$	Werkstück : $n_w = 2 \text{ min}^{-1}$ $d_B = 88 \text{ mm}$	Fräser : $d_f = 49,5 \text{ mm}$ $z = 1$	Wendeschneidplatten : rhombisch, 6,3 mm
AlCuMgPb F 34 , Gegenlauf		AlCuMgPb F 34 , Gleichlauf	
Stahl Ck 45 , Gegenlauf		Stahl Ck 45 , Gleichlauf	

Abb. 11: Spannbildung beim Fräsbohren (Bildnachweis: IfW)

zusammensetzen. Beim Fertigen zylindrischer Konturabschnitte unterscheidet man zwei Vorgehensweisen. Enthält ein Werkstück bereits eine Vorbohrung, deren Durchmesser kleiner als der Flugkreisdurchmesser der Führungsleisten ist, wird der zu fertigende Bohrungsdurchmesser mit drückender Vorschubbewegung gefertigt. Wurde die Vorbohrung mit dem Auskammerfräsbohrwerkzeug hergestellt, können Bohrungen mit einem größeren Fräser in Abhängigkeit der radialen Fräserzustellung mit ziehender Vorschubbewegung aufgebohrt werden.

Der vorbohrungsbedingte Schneidenaustritt und -eintritt beim Fertigen der Innenkontur verursacht eine hohe zusätzliche dynamische Torsionsbeanspruchung der Fräserantriebswelle (Abb. 10). Für das Fertigen von Innenkonturen ist die Anregung der Fräserantriebswelle zu Torsionseigenschwingungen im Gegenlauf geringer, weil beim Schneideneintritt während des Innenschneideneingriffs kleinere Spannungsquerschnitte entstehen. Bei großen Vorbohrungsdurchmessern kann auch bei mehrschneidigen Fräsern der Fall auftreten, daß immer nur höchstens ein Fräserzahn im Eingriff ist. Dann können die Ergebnisse aus den Untersuchungen mit einzahnigen Fräsern direkt für mehrzahnige Fräser übernommen werden.

4.4 Spannbildung

Die beim Fräsbohren erzeugten Späne konnten bei allen untersuchten Bearbeitungsparametern problemlos aus der hergestellten Bohrung durch die Späneabfuhr des Werkzeugs herausgespült werden. Damit ist eine sichere Beherrschung des Zerspanprozesses und auch eine gute Voraussetzung für die automatisierte Bohrbearbeitung gewährleistet. Analog zum Fräserantriebsmoment sind die Späne im Gegenlauf während des Außenschneideneingriffs

(Abb. 11, jeweils links dargestellt) im Vergleich zum Gleichlauf größer und während des Innenschneideneingriffs (Abb. 11, jeweils rechts dargestellt) etwas kleiner.

5 Zusammenfassung

Zur Ermittlung der Verfahrensgrundlagen bei der Bohrbearbeitung mit Auskammerfräsbohrwerkzeugen wurden umfangreiche Zerspanungsuntersuchungen durchgeführt. Durch die Anstellung des Fräasers in Rundvorschubrichtung durch die entsprechende Lagerung der Fräserwelle wird beim Fräsbohren im Gleichlauf die Fräserantriebswelle wesentlich geringer zu Torsionseigenschwingungen angeregt. Für die Herstellung der zur Innenbearbeitung erforderlichen Vorbohrung eignen sich rechteckige Schneiden besonders gut. Die Nachteile hoher Torsionsbelastungen der Fräserantriebswelle bei der Zerspanung mit rhombischen Schneiden aufgrund des Kegels im Bereich des Bohrungszentrums und mit runden Schneiden aufgrund des Radius im Bereich der Bohrungswand können damit vermieden werden.

Runde Schneiden eignen sich für die Bearbeitung der Innenkontur aufgrund der guten Gestaltungsfreiheit der Bohrung am besten. Eine Reduzierung der Torsionsbelastung der Fräserantriebswelle kann mit verkürzter Schneidlänge durch Anschleifen der runden

Schneiden am Fräseraußendurchmesser parallel zur Bohrungsachse erreicht werden

Die Ergebnisse aus den Zerspanungsuntersuchungen beim Auskammerfräsbohren mit ein- und mehrzahnigen Fräsern sind Grundlage für weitere Untersuchungen zur Optimierung von Zeitspannungsvolumen, Standzeit und Bohrungsqualität. Ziel ist die Erhöhung des Zeitspannungsvolumens bei gleichzeitig guter Bohrungsqualität und ausreichender Standzeit, um ein vorzeitiges Unterbrechen des Bearbeitungsvorgangs wegen Schneidenwechsels zu vermeiden.

6 Literatur

- [1] N.N.: Ein Werkzeug geht fremd – Tieflochbohrungen mit dem Fräser. Werkzeuge, Mai 1991. S. 22–26.
- [2] Utz, Th.: Herstellen aufgeweiteter Innenkonturen durch Auskammerfräsbohren. Dissertation Universität Stuttgart 1990.
- [3] Koster, A.: Technologische Grundlagen des Fräsbohrens. Dissertation Universität Stuttgart 1988.
- [4] Heisel, U., Utz, Th. u. Ruziczka, G.: Fräsbohren garantiert kurze Späne. *dima – die maschine*, Ludwigsburg 9 (1990), S. 67–73.
- [5] Heisel, U., Utz, Th. u. Ruziczka, G.: Fräsen statt Bohren – Kombinationswerkzeuge machen Produktion leistungsfähig und verkürzen Nebenzeiten. *Maschinenmarkt*, Würzburg 97 (1991) 46, S. 34–38.
- [6] Baumgartner, A.: Auswirkungen des Rundlauffehlers von Fräswerkzeugen. *Schweizer Maschinenmarkt* 84 (1984) 30, S. 26–27.