

# ENTGRATEN SICH KREUZENDER BOHRUNGEN MITTELS AUTOMATISIERTER MECHANISCHER BEARBEITUNG

Avila, M. C., Choi, J., Dornfeld, D. A.

Labor für Fertigungsautomation  
Universität von Kalifornien in Berkeley  
Berkeley, Kalifornien, Vereinigte Staaten von Amerika  
mcavila, dornfeld@me.berkeley.edu  
jihong@lma.berkeley.edu

Kapgan, M., Kosarchuk, R.

JWDone Company  
Hayward, Kalifornien, Vereinigte Staaten von Amerika  
mkapgan, kosarchuk@jwdone.com

## ZUSAMMENFASSUNG

Die Gratbeseitigung bei sich kreuzenden Bohrungen ist aufgrund der begrenzten Zugänglichkeit oft langwierig und teuer. Die voll automatisierte Kantennachbearbeitung sich kreuzender Bohrungen wurde bis anhin mit roboterunterstützten, flexiblen abrasiven Bürsten und mit unüblichen Gleitschleifmethoden wie beispielsweise dem elektrochemischen Entgraten (ECE), dem abrasiven Schleifschlamm und dem thermischem Entgraten erfolgreich eingesetzt. Diese Verfahren sind zwar sehr effizient, setzen jedoch spezialisierte Ausrüstungen und zweckbestimmte Reinigungsverfahren zur Entfernung von Chemikalien oder festsitzenden Bürstendrähten voraus. Orbitool ist eine von JWDone Company kürzlich entwickelte, in den Bearbeitungsprozess integrierte Entgratalternative zu Bürsten. Orbitool ist ein mechanisches Bearbeitungswerkzeug für das Entgraten sich kreuzender Bohrungen mit speziell dafür entwickelten Hartmetallfräsern. Im Vergleich zu Bürsten bzw. zu Gleitschleifmethoden gewährt die automatisierte mechanische Bearbeitung eine bessere Trennung und Kontrolle über die spezifizierten Dimensionen. Außerdem kann Orbitool in herkömmlichen Werkzeugmaschinen und CNC-Anlagen eingesetzt werden. Wie bei jedem Entgratwerkzeug gewährleistet Orbitool in erster Linie das Entfernen von Graten in möglichst kurzer Zeit unter Berücksichtigung von dimensionaler Güte und Oberflächenqualität. Zu diesem Zweck wurden in dieser Studie Prozessdaten von Anfasungsquerschnitt und Rauheit entgrateter Kanten entwickelt und aufgezeichnet. Die Werkstücke bestanden aus Al 6061 T6 Profilstangen mit rechtwinklig angeordneten sich

kreuzenden Bohrungen mit einem Durchmesser von 7.94 mm (5/16"). Die Tests wurden mit Orbitool mit einem Durchmesser von 6.35 mm (1/4") und 36 Schneiden durchgeführt. Der Einfluss der Verfahrensvorgaben und ihre beidseitige Wechselwirkung wurden mit der Taguchi-Methode beurteilt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine sorgfältige Auswahl der Prozesskenngrößen zu einer gleichmäßigen und nachhaltigen Gratentfernung an sich kreuzenden Bohrungen führt, wobei sich die Größe der Anfasung zwischen 15 – 65 µm bewegt.

**Schlüsselwörter:** Aluminium, Bohrung, Grat, Anfasen, Entgraten, Bohren, Kantennachbearbeitung, sich kreuzende Bohrungen, Orbitool.

## EINLEITUNG

Grate werden definiert als unerwünschte Materialprojektionen, die aufgrund einer Formänderung über die theoretischen Kanten einer maschinell bearbeiteten Komponente hinaus ragen. Grate an sich kreuzenden Bohrungen finden sich häufig bei der Produktion von Kraftfahrzeugmotoren sowie Getriebekomponenten. Grate können Maßtoleranzen beeinflussen, Fluchtungsfehler verursachen sowie Effizienz und Lebensdauer einer Komponente reduzieren. In vielen Anwendungen dienen sich kreuzende Bohrungen als Schmier- und Kühlmittelkanal. Grate können dabei zu Verstopfungen von kritischen Durchgängen führen und Turbulenzen im Fließvermögen von Flüssigkeiten oder Gasen verursachen, was ernsthafte Betriebsprobleme hervorrufen kann. Aus diesen Gründen stößt die Entwicklung nachhaltiger Entgratverfahren für

den Einsatz bei sich kreuzenden Bohrungen auf großes Interesse in der Industrie.

Gillespie (1975) hat angedeutet, dass mindestens 30 % der Produktionskosten von Präzisionskomponenten auf die Kantennachbearbeitung zurückzuführen sind. Trotz des großen Anteils an automatisierten Verfahren bei den normalen maschinellen Prozessen, ist die Kantennachbearbeitung sich kreuzender Bohrungen noch immer sehr mühsam und kann Handentgratverfahren mit zahntechnischen Werkzeugen beinhalten. Die begrenzte Zugänglichkeit und relativ komplexe Geometrie von Bohrungskreuzungen behindern die Automatisierung der Entgratphasen und führen häufig zu Engpässen in den modernen Fertigungssystemen.

Herkömmliche Entgratmethoden können unterteilt werden in Global- oder Massenmethoden und Lokalmethoden (Dornfeld und Lisiewicz, 1992). Typische Globalmethoden beinhalten: Vibrationsentgraten, Ultraschallentgraten, Taumeln, elektrochemisches Entgraten, Sandstrahlen, Druckfließschläppen und Bürsten (Gillespie, 1975, 1990; Fistere, 1985; Koelsch, 1990). Globalmethoden sind sehr effizient, die Beeinflussung der Kanten-geometrie und Oberflächengüte ist jedoch eher schwierig. Außerdem können chemische oder Schleifrückstände die Werkstücke verunreinigen. Bei der Anwendung von Rohrbürsten kommt es häufig vor, dass geknickte Borsten in den kleinen Bohrungen hängen bleiben. Solche Unzulänglichkeiten haben diffizile Reinigungsabläufe zur Folge und verursachen zusätzliche Kosten. Außerdem machen Globalmethoden, mit der Ausnahme des Bürstens, welches flexibel und eher einfach zu automatisieren ist, spezialisierte Ausrüstung, große finanzielle Investitionen und bearbeitungsprozessexterne Bedienung nötig. Im Gegensatz dazu handelt es sich bei den Lokalentgratmethoden um punktuell einsetzbare Mittel der Gratentfernung weil der Angriffspunkt der Werkzeuge kontrolliert werden kann. Der meist verbreitete Lokalprozess beinhaltet manuelles Entgraten und mechanische Bearbeitung. Trotz etlichen Bemühungen, Lokalentgratvorgänge mit der Hilfe von Regelung und mechanischer Bearbeitung zu automatisieren (vgl. z.B. Gillespie, 1990; Dornfeld und Lisiewicz, 1992), wird noch immer auf das Handentgraten zurückgegriffen, wenn gute Stetigkeit und enge Toleranzen auf Oberflächen mit komplexer Geometrie und begrenzter Zugänglichkeit wie beispielsweise bei Bohrungskreuzungen erforderlich sind. Erstaunlicherweise, befassen sich nur sehr wenige

Arbeiten mit dem Entgraten sich kreuzender Bohrungen (Ohshima et al., 1993, *using ball burnishing techniques*<sup>1</sup>). Nach bestem Wissen des Autors befassen sich keine bestimmten Arbeiten mit dem Studium lokaler, mechanischer Entgratmethoden, die für sich kreuzende Bohrungen vorgesehen sind.

Kürzlich hat JWDone Company das "Orbitool", ein Lokalentgratwerkzeug, speziell ausgerichtet auf sich kreuzende Bohrungen, entwickelt. Es ist für den bearbeitungsprozessinternen Einsatz in Werkzeugmaschinen bestimmt. In der vorliegenden Studie wurde eine vollständig faktorisierte Versuchsplanung von Experimenten angewandt, um die Auswirkung der Prozessparameter auf die Anfasungsgröße und Rauheit der entgrateten Kanten zu bestimmen. Mit Hilfe der Taguchi-Methoden wurde eine Empfindlichkeitsanalyse durchgeführt, um die Auswirkung der Eingangsparameter auf die Anfasungsgröße und deren Wechselwirkung zu bewerten.

### ORBITOOL

Orbitool ist ein automatisiertes mechanisches Entgratwerkzeug, vorgesehen für die selektive Erzeugung einer Anfasung an den Kanten von Bohrungskreuzungen und um dort entstandene Grate zu entfernen ohne die Bohrungsoberflächen zu beschädigen. Es setzt sich aus folgenden Einzelteilen zusammen: (1) halbkugelförmiger Hartmetallfräser, (2) Schutzscheibe aus geschliffenem Stahl, (3) Werkzeugstahlwelle, (4) elastische Kupplung aus Elastomer und (5) Antriebswelle (Abbildung 1).

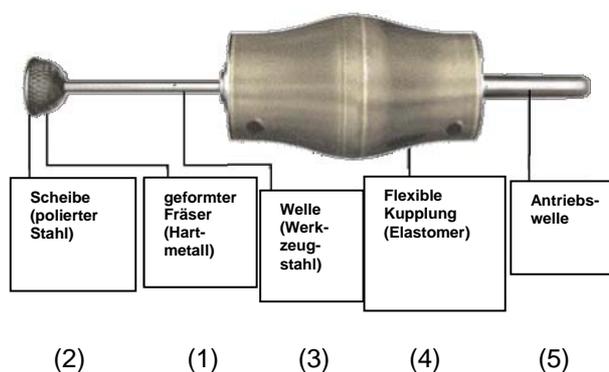


ABBILDUNG 1. ORBITOOL UND KOMPONENTEN.

<sup>1</sup> Anmerkung der Übersetzerin: „Der Einsatz von Kugelpoliervorgängen“.

Abbildung 2 veranschaulicht den standardmäßigen Werkzeugweg von Orbitool. Um den Entgratvorgang durchzuführen wird das Werkzeug als erstes entlang der Bohrungsschse in die kleinste an der Bohrungskreuzung beteiligte Bohrung eingeführt und so positioniert, dass die Werkzeugspitze so nah als möglich an der Kreuzung zu liegen kommt (a). Dann wird das Werkzeug an die Bohrungsoberfläche bewegt bis

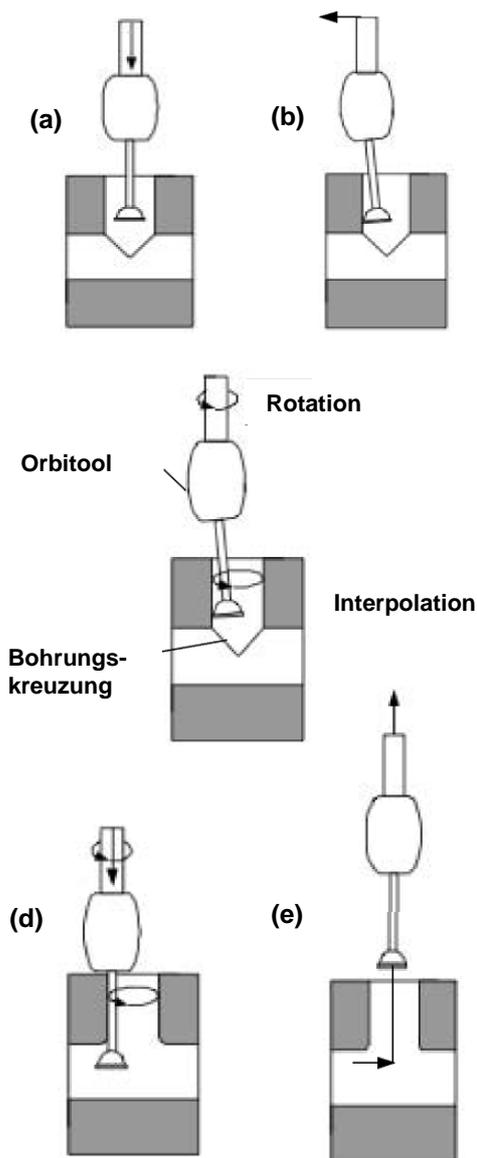


ABBILDUNG 2. ÜBERSICHT DES ORBITOOL-WEGES. (a) EINFÜHREN IN DIE BOHRUNG, (b) ANSETZEN, (c) BEGINN BEARBEITUNG, ROTATION UND INTERPOLATION, (d) BEARBEITUNGSENDE (e) RÜCKZUG.

die Werkzeugachse mit dem Interpolationsdurchmesser übereinstimmt (b). Die daraus resultierende Spannung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück ist eine Steifigkeitsfunktion sowohl der Kupplung aus Elastomer als auch der Werkzeugwelle. In dieser Phase ist nur die Schutzscheibe in Kontakt mit der Bohrungsoberfläche. Das Werkzeug wird dann um seine eigene Achse gedreht und gleichzeitig spiralförmig in die Bohrung hinein interpoliert (c). Während die Werkzeugspitze die Kreuzung erreicht, berührt der Hartmetallfräser die Kante und der Entgratprozess beginnt. Sobald das ganze Profil des Fräasers die Kreuzung durchlaufen hat (d) wird das Werkzeug angehalten, ins Zentrum der Bohrung zurückgeführt und aus dem Werkstück zurückgezogen (e).

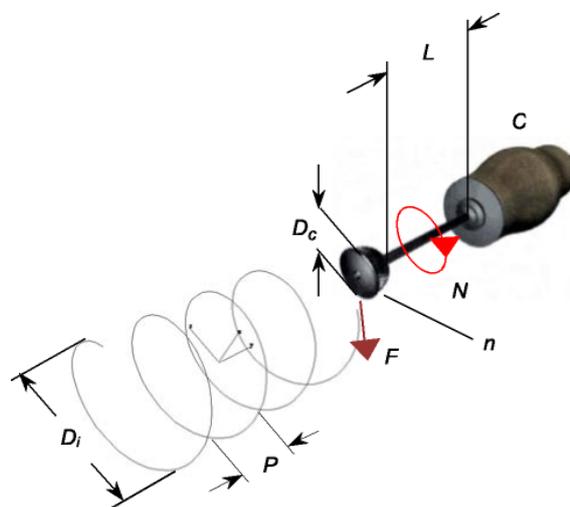


ABBILDUNG 3. ORBITOOL ENTGRATPROZESSPARAMETER.  $D_i$ : DURCHMESSER DER SPIRALFÖRMIGEN INTERPOLATION,  $P$ : SPIRALSTEIGUNG,  $L$ : WELLENLÄNGE,  $C$ : KUPPLUNGSART,  $D_c$ : SCHNEIDENDURCHMESSER,  $n$ : ANZAHL SCHNEIDEN,  $N$ : SPINDELDREHZAHN,  $F$ : VORSCHUBRATE.

### WERKZEUGWEG UND ENTGRATPROZESSPARAMETER

Abbildung 3 zeigt eine schematische Ansicht der Prozessparameter und des Werkzeugweges des Entgratprozesses. Der normale Werkzeugweg von Orbitool verläuft spiralförmig im Verhältnis zu einem Bezugssystem auf dem Werkstück. Die spiralförmige Interpolation wird durch den Durchmesser der Interpolation  $D_i$  und der Spiralsteigung  $P$  definiert.  $D_i$  hängt von der Geometrie des Werkstücks und des Werkzeugs ab, d.h.:

$$D_i = D - D_s - \delta \quad (1)$$

$D$  ist der Bohrungsdurchmesser,  $D_s$  ist der Durchmesser der Werkzeugwelle und  $\delta$  ist ein diametraler Zwischenraum zur Verminderung von schabenden Bewegungen zwischen Welle und Werkstück (Abbildung 4).  $P$  bezeichnet die Anzahl Werkzeugdurchläufe entlang der Kreuzung. Kleine  $P$ -Werte verringern die Spiralbewegungsgeschwindigkeit und erhöhen den Materialabtrag. Die Länge der Werkzeugwelle  $L$  und der Durchmesser des Fräasers  $D_c$  hängen ebenfalls von der Geometrie des Werkstücks ab.  $L$  wirkt sich auf die Biegesteifigkeit des Fräasers aus und sollte so angepasst werden, dass das ganze Fräserprofil die zu entgratenden Bereiche der Bohrungskreuzung erreicht.  $L$  sollte jedoch so kurz wie möglich eingestellt werden um ein übermäßiges Unrundlaufen des Werkzeugs zu verhindern. Andererseits sollte der Werkzeugdurchmesser klein genug sein um in die Bohrung zu passen und um frei interpolieren zu können, wobei der Fräser gerade groß genug sein sollten um die tatsächliche Schnittgeschwindigkeit und den Materialabtrag zu maximieren.  $n$  bezeichnet die Anzahl Schneiden am Fräser. Ein grober Fräser ist zwar effizienter, resultiert jedoch, verglichen mit einem feinen Fräser, in geringerer Oberflächengüte.  $C$  zeigt die Art des flexiblen Verbindungsstücks, welches sich durch seine biegende Steifigkeit und seine Masse auszeichnet.  $C$  wirkt sich auf Fräuserspannung und den Materialabtrag aus. Kinematische Parameter des Entgratprozesses sind Translationsgeschwindigkeit (Interpolation) oder Vorschubrate  $F$  und Spindeldrehzahl  $N$ .

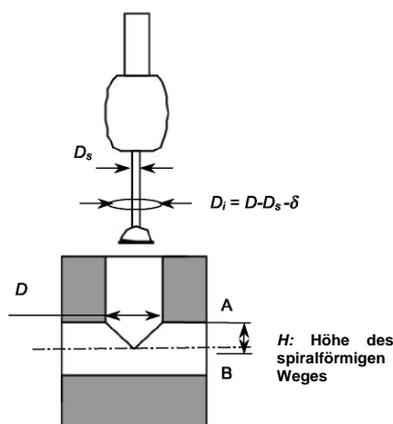


FIGURE 4. SCHEMATISCHE ANSICHT DES BOHRUNGSDURCHMESSERS AN DER KREUZUNG ( $D$ ), INTERPOLATIONS-DURCHMESSER ( $D_i$ ), UND HÖHE DES SPIRALFÖRMIGEN WEGES ( $H$ ).

Die Dauer eines Entgratvorganges, mit  $t$  bezeichnet, hängt von der Länge des spiralförmigen Werkzeugweges und der Interpolationsgeschwindigkeit entlang des Weges ab. Die Länge des Weges wiederum hängt vom Durchmesser der Interpolation, der Spiralsteigung und der Höhe des spiralförmigen Weges  $H$  ab. Die Zykluszeit wird wie folgt berechnet:

$$t = \frac{H}{PF} \sqrt{(P^2 + \pi^2 D_i^2)} \quad (2)$$

### AUSWAHL DER PROZESSPARAMETER FÜR OPTIMALES ENTGRATEN

Um eine vollständige Gratentfernung und das Einhalten von Maßtoleranzen zu gewährleisten sowie den Ansprüchen an die Oberflächengüte gerecht zu werden, sollte der Auswahl der Entgratprozessparameter spezielle Aufmerksamkeit zuteil werden. Zu geringe Spiralbewegungsgeschwindigkeit oder ein zu kleiner Vorschub kann eine zu große Anfasung der Kanten zur Folge haben. Ebenso kann eine zu große Spiralbewegungsgeschwindigkeit oder eine zu niedrige Drehzahl dazu führen, dass die Grate überhaupt nicht entfernt werden. In vielen Fällen ist es vorteilhaft, so wenig Material wie möglich maschinell zu bearbeiten, um die Grate so vollständig und lückenlos wie möglich zu entfernen. Ganz offensichtlich ist die optimale Anfasungsgröße oder der optimale Materialabtrag abhängig von der Größe der Grate, im Speziellen von deren Wurzelstärke. Deshalb müssen aus dem vorausgehenden Bohrprozess limitierte und wiederholbare Gratgrößen resultieren um das Anfasen während des Entgratprozesses zu minimieren.

Prozessdaten, die die Abhängigkeit von Anfasungsgröße und Oberflächengüte in Bezug auf Eingangsparameter zeigen, erlauben dem Prozessingenieur die Wahl der adäquaten Rahmenbedingungen, gestützt auf Konstruktionspezifikationen und Gratwurzelstärke, die sich während des vorgeschalteten Bohrprozesses bilden. In der vorliegenden Studie wurden Diagramme der Anfasungsgröße und Rauheit entwickelt, speziell für das Entgraten von A1 6061-T6 mit einem halbkugelförmigem Orbitool Hartmetallfräser von 6.35 mm (1/4 in.) Durchmesser und 36 Schneiden.

Ebenfalls kritisch sind Beschränkungen der Zykluszeit während der Wahl der Prozess-

parameter. Die Minimierung von  $H$  ist insofern von Vorteil als während des Entgratzyklus keine Zeit verloren geht. Zu diesem Zweck soll die Anlaufscheibe von Orbitool im Schnellvorschub direkt über die Kreuzung, Punkt A, wie in Abbildung 4 gezeigt, geführt werden. Zusätzlich kann der Entgratvorgang abgeschlossen werden bevor der Fräser die Kreuzung, bei Punkt B, vollständig durchlaufen hat, weil gewisse Bereiche aufgrund des größeren Austrittswinkels gratfrei sind. Die Zykluszeit des Abakus wie in Abbildung 5 gezeigt, die von der Gleichung (2) stammt, ist ein nützliches Mittel der voraussichtlichen Entgratzeiten basierend auf  $H$ ,  $P$ ,  $D_i$  und  $F$ .

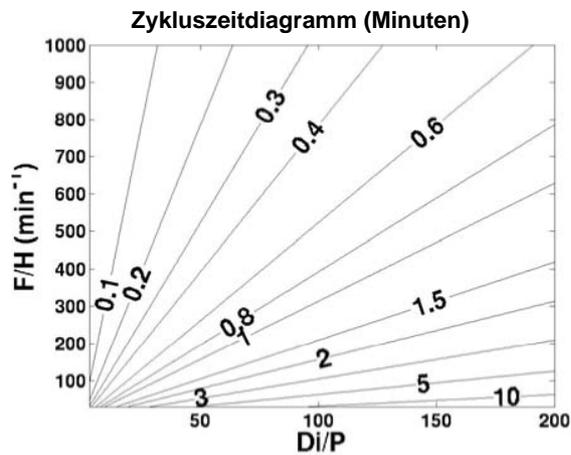


ABBILDUNG 5. ZYKLUSZEITDIAGRAMM ALS FUNKTION VON  $F$ ,  $P$ ,  $D_i$ , UND  $H$ .

### UNTERSUCHUNGSVERLAUF

Ursprünglich wurde eine vollständig faktorisierte Versuchsplanung benutzt um den maschinellen, lokalen Entgratprozess von sich kreuzenden Bohrungen unter Anwendung von Orbitool zu prüfen. Ein vollständig faktorisiertes Schema wurde mit der unbekanntenen Reaktion der Ausgangsparameter auf die genannten Steuergrößen der Orbitool Entgrattechnik begründet. Das Ziel des Experiments war die Berechnung der Auswirkungen der Eingangsfaktoren auf die Anfasungsgröße und Rauheit. Die steuerbaren Eingangsfaktoren, die variierten waren: elastische Kupplungsart ( $C$ ), Werkzeugwellenlänge ( $L$ ), Spiralsteigung ( $P$ ), Vorschubrate ( $F$ ) und Spindeldrehzahl ( $N$ ). Auf der anderen Seite wurden Durchmesser ( $D_c$ ) und die Anzahl Fräterschneiden ( $n$ ) während des gesamten Experiments beibehalten. Tabelle 1 zeigt die Testmatrix mit den Steuergrößen und den entsprechenden Werten.

Messproben wurden aus A1 6061 T6 Stangen hergestellt. In jede Materialprobe (Abbildung 6) wurden 22 sich kreuzende Bohrungen gebohrt. Die geometrischen Eigenheiten der Bohrungskreuzungen werden in Tabelle 2 angegeben.

Die Entgratexperimente wurden mit einem vertikalen Bearbeitungszentrum der Marke Matsuura MC-510V CNC durchgeführt. Die Variante Trockenschneiden wurde deshalb ausgewählt, weil der Orbitool Entgratprozess allgemein eine niedrige Materialabtragsrate und geringe Wärmeentwicklung bedingt. Jede Größenkombination ist zweimal durchgeführt worden um die statistische Bedeutung sicherzustellen.

TABELLE 1. STEUERGRÖSSEN DER VOLLSTÄNDIGEN FAKTORISIERTEN VERSUCHSPLANUNG.

Steuergrößen	Werte	
Schneidendurchmesser ( $D_c$ )	$D_c = 6.35 \text{ mm (1/4 in.)}$	
Anzahl Schneiden ( $n$ )	$n = 36$	
Kupplungsart ( $C$ )	C1	Steifigkeit: 1.8 N ! m/ deg
		Masse: 34.12 g
	C2	Steifigkeit: 3.2 N ! m/ deg
		Masse: 63.02 g
Wellenlänge ( $L$ ) (mm)	L1 = 51 ( 2.0 in.)	
	L2 = 102 (4.0 in.)	
Spiralsteigung ( $P$ ) (mm)	P1 = 0.05 (0.002 in.)	
	P2 = 0.36 (0.014 in.)	
	P3 = 0.66 (0.026 in.)	
	P4 = 0.96 (0.038 in.)	
	P5 = 1.27 (0.050 in.)	
Vorschubrate ( $F$ ) (m/min)	F1 = 0.33 (13 in./min)	
	F2 = 2.7 (106 in./min)	
	F3 = 5.0 (198 in./min)	
Spindeldrehzahl ( $N$ ) (rpm)	N1 = 2000	
	N2 = 4000	
	N3 = 6000	
	N4 = 8000	

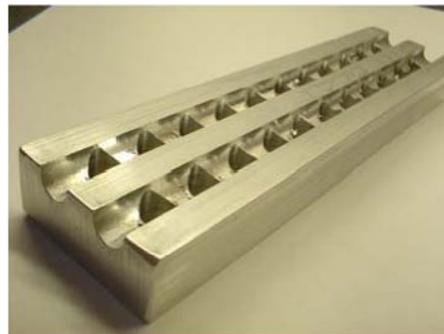


ABBILDUNG 6. Al 6061-T6 MESSPROBE.

TABELLE 2. GEOMETRISCHE DATEN VON BOHRUNGSKREUZUNGEN.

Geometrische Daten	Wert
Bohrungsdurchmesser	7.94 mm (5/16 in.)
Verhältnis Durchmesser sich kreuzende Bohrung und Bohrungskreuzung	1
Kreuzungswinkel	90°
Seitlich verschobener Abstand	0.0 mm (0.00 in.)

Der geplante Anfasungsquerschnitt  $W_c$  wurde als Metrik der Anfasungsgröße gewählt um die Messung zu vereinfachen. Der geplante Querschnitt wurde mit Hilfe einer optischen Koordinatenmessmaschine gemessen. Die Messungen wurden an den diametral gegenüberliegenden Punkten vorgenommen, wo der Kantenwinkel in der meridionalen Ansicht 90° beträgt; die beiden gemessenen Werte wurden gemittelt. An diesen Punkten beträgt der Austrittswinkel der Bohrung 90°. Mit den in Tabelle 2 aufgeführten geometrischen Daten ist 90° der maximale Austrittswinkel der Kreuzung entlang, wo eine maximale Gratentwicklung stattfindet. Dies wird damit erklärt, dass die Gratgröße mit abnehmendem Austrittswinkel gleichförmig zunimmt (Kim et al., 1999). Für erfolgreiches Entgraten sollte die Größe der Anfasung mindestens der Wurzeldicke der größten Grate an der Kreuzung entsprechen. Infolgedessen wurden die Messungen des An-

fasungsquerschnitts an den oben erwähnten Punkten durchgeführt. Es wurden Konturprozessdiagramme (contour charts) erstellt, in denen die  $W_c$  Daten den Steuergrößen gegenübergestellt wurden. Zusätzlich wurden Durchschnittsdiagramme (marginal mean graphs) mit den widerstandsfähigen Entwurfsverfahren nach den Taguchi-Methoden aufgezeichnet, um die Auswirkung jeder einzelnen Steuergröße auf  $W_c$  und deren Wechselwirkung besser zu verstehen und um die Faktoren mit den stärksten bzw. schwächsten Auswirkungen auf das Prozessergebnis zu eruieren. Für die Durchführung der Analyse wurde eine rechtwinklige Anordnung  $L_{16}$  ( $2^5$  partielle faktorisierte Versuchsplanung mit Auflösung V) gewählt.

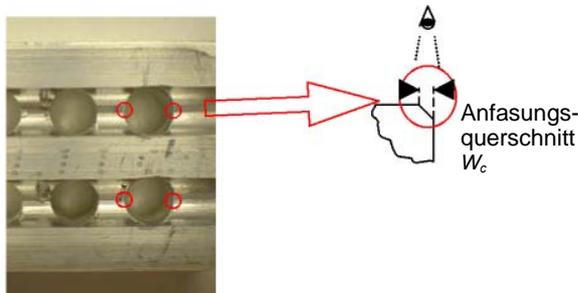


ABBILDUNG 7. GEPLANTER ANFASUNGSQUERSCHNITT.

An den mit  $L1$  und  $C2$  übereinstimmenden Bedingungen wurde die Rauheit an den Kanten gemessen.  $R_a$  und  $R_t$  Rauheitswerte wurden mit einem optischen Interferometer von Veeco gemessen. Proberichtstrahle wurden auf einen der  $90^\circ$  Austrittswinkelbereiche der Kreuzung fokussiert. Innerhalb jedes Probefensters wurden 3 vertikal zu den Werkzeugmarkierungen verlaufende Profile festgehalten und deren Rauheitswerte  $R_a$  und  $R_t$  gemittelt. Bei den Rauheitsmessungen wurden die Versuche lediglich einmal durchgeführt, da eine gute Wiederholgenauigkeit festgestellt werden konnte.

## UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE UND DISKUSSION

Abbildungen 8, 9 und 10 zeigen Diagramme der Anfasungsgröße als eine Funktion der Spindelgeschwindigkeit und der Spiralsteigung unter Anwendungen der Vorschubraten  $F1$ ,  $F2$  bzw.  $F3$ . Die Diagramme entsprechen den Bedingungen  $L2C2$  (lange Welle, steife Kupplung). In Bezug auf den Entgratprozess des Orbitools sind

eine einige signifikante Aspekte erwähnenswert. Ein wichtiges Ergebnis ist das gleichförmige Verhalten von  $W_c$  gegenüber  $P$  und  $N$ . Die Größe der Anfasung nimmt mit zunehmender Spindeldrehzahl und abnehmender Spiralsteigung zu. Dasselbe Verhalten konnte durch alle Versuchsbedingungen hindurch beobachtet werden. Zweitens wird die Zunahme der Anfasung mit zunehmender Spindeldrehzahl weniger wichtig je näher  $N$  8000 U/min kommt. Ein solches Verhalten lässt vermuten, dass die dynamischen Auswirkungen der Rotationsmasse des Werkzeugs über 8000 U/min die Anfasungseffizienz beeinträchtigen könnten. Drittens veranschaulicht ein Vergleich zwischen den Diagrammen, dass der Materialabtrag mit zunehmender Vorschubrate abnimmt. Erwähnenswert ist jedoch die Tatsache, dass die Abnahme des Anfasungsquerschnitts mit der Variierung der Vorschubrate von  $F2$  zu  $F3$  bescheiden ausfällt. Dieses Ergebnis ist insofern recht vorteilhaft als schnellere Zykluszeiten bei niedriger Reduktion der Anfasungseffizienz realisiert werden können. Desgleichen wurden die beiden letzteren Ergebnisse durch alle Versuchsbedingungen hindurch nachgewiesen.

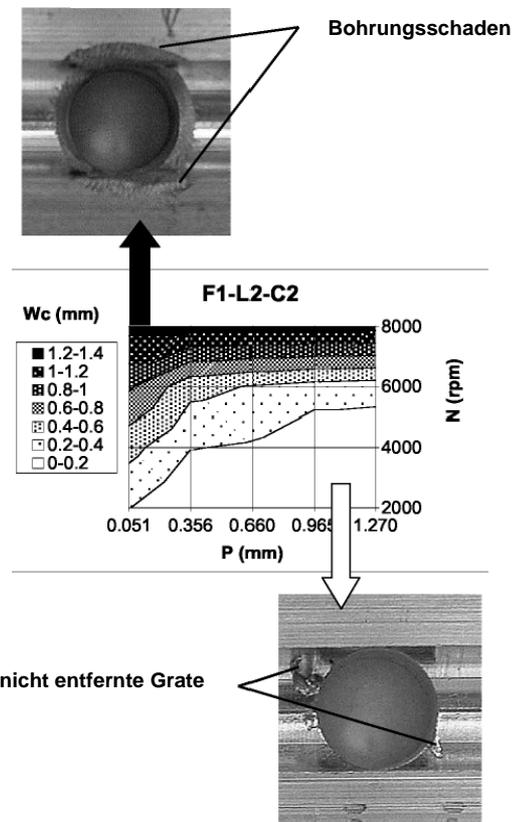


ABBILDUNG 8. GEPLANTER ANFASUNGSQUERSCHNITT  $W_c$  ALS FUNKTION DER SPIRALTEIGUNG ( $P$ ) UND DER SPINDELDREHZAHL ( $N$ ). INTERPOLATIONSGESCHWINDIGKEIT ( $F1$ ) = 0.33 m/min, WELLENLÄNGE ( $L2$ ) = 102 mm,  $C = C2$ . EBENFALLS DARGESTELLT: DRAUFSICHT VON BOHRUNGSKREUZUNG MIT ÜBERMÄSSIGER ÜBERSCHNEIDUNG (OBEN) UND UNGENÜGENDE ANFASUNG FÜR DEN GRATABTRAG (UNTEN).

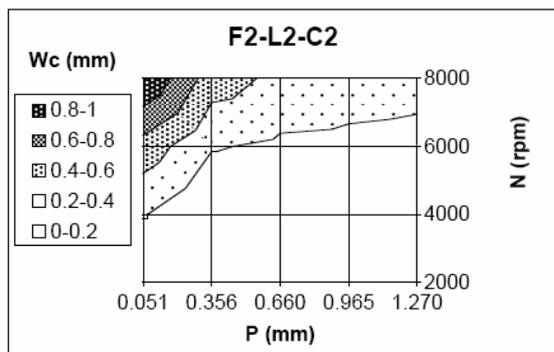


ABBILDUNG 9. GEPLANTER ANFASUNGSQUERSCHNITT  $W_c$  ALS FUNKTION DER SPIRALSTEIGUNG ( $P$ ) UND DER SPINDELDREHZAHL ( $N$ ). INTERPOLATIONSGESCHWINDIGKEIT ( $F2$ ) = 2.7 m/min, WELLENLÄNGE ( $L2$ ) = 102 mm.,  $C = C2$ .

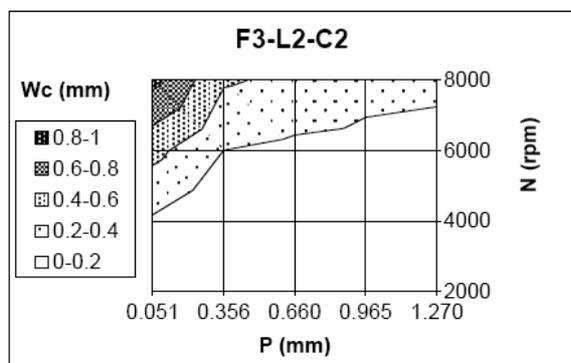


ABBILDUNG 10. GEPLANTER ANFASUNGSQUERSCHNITT  $W_c$  ALS EINE FUNKTION DER SPIRALSTEIGUNG ( $P$ ) UND DER SPINDELDREHZAHL ( $N$ ). INTERPOLATIONSGESCHWINDIGKEIT ( $F3$ ) = 5.0 m/min., WELLENLÄNGE ( $L2$ ) = 102 mm,  $C = C2$ .

Die Fotografien in Abbildung 8 zeigen den Extremfall, wenn die Anfasung im Verhältnis zum Durchmesser der Bohrung (7,94mm (5/16 in.) im Durchmesser), bzw. zur maximalen Gratwurzelstärke der Proben (ca. 0.20 mm (0.008 in.)

entweder zu ausgeprägt oder zu klein ist. Der erste Fall entspricht dem obersten Teil des  $W_c$  Konturprozessdiagramms, wo die Schneidebedingungen in Anfasungsquerschnitten von mehr als 1.20 mm (0.047 in.) resultieren. Obwohl eine solche Überschneidung Bohrungsverletzungen in der getesteten Geometrie, wie in der oberen Fotografie gezeigt, verursachen kann, sollte festgehalten werden, dass dies in größeren Geometrien mit Gratquerschnitten von gegen 1mm nicht der Fall ist. In der unteren Fotografie wird das gegenteilige Szenario dargestellt. Die Anfasung ist im Verhältnis zur Gratwurzelstärke zu klein, sodass die Grate an den Kanten bleiben. Dieser Fall stimmt mit dem weißen Bereich am unteren Ende des Diagramms überein. Im Falle der getesteten Werkstücksgeometrie beträgt der Anfasungsquerschnitt, die eine Gratentfernung mit einem Minimum an Überschneidung garantiert, 0.20 mm (0.008 in.). Unabhängig von der Werkstücksgeometrie und den Bohrungsbedingungen, ist die optimale Anfasung vom maximalen Gratwurzelquerschnitt abhängig.

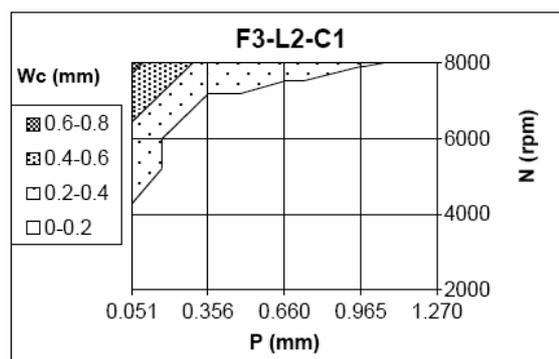


ABBILDUNG 11. GEPLANTER ANFASUNGSQUERSCHNITT  $W_c$  ALS EINE FUNKTION DER SPIRALSTEIGUNG ( $P$ ) UND DER SPINDELDREHZAHL ( $N$ ). INTERPOLATIONSGESCHWINDIGKEIT ( $F3$ ) = 5.0 m/min, WELLENLÄNGE ( $L2$ ) = 102 mm.,  $C = C1$ .

Abbildung 11 zeigt das  $W_c$  Konturprozessdiagramm mit schneller Vorschubrate  $F3$ , langer Werkzeugwelle  $L2$  und steifer Kupplung  $C2$ . Ein Vergleich dieses Diagramms mit Abbildung 10 veranschaulicht die Auswirkung der Kupplungsart auf die Anfasungseffizienz. Im Wesentlichen entfernt die steife Kupplung bei allen Testbedingungen mehr Material als die flexible Kupplung. Mit der flexiblen Kupplung ist der „benutzbare“ Bereich des  $W_c$  Konturprozessdiagramms erheb-

lich kleiner und nach rechts verschoben, im Vergleich zum Diagramm der steifen Kupplung. Dies bedeutet, dass zur Erlangung desselben Anfasungsquerschnitts kleinere Spiralsteigungen und somit längere Zykluszeiten nötig sind, wenn die flexible Kupplung verwendet wird. Tatsächlich erhöht die C2 Kupplung den Materialabtrag bei Spindeldrehzahl von weniger als 8000 U/min.

Die Auswirkungen der Wellenlänge wurden folgendermaßen berechnet: meistens erhöht sich der Materialabtrag leicht wenn die Wellenlänge von 51mm (2 in.) auf 102 mm (4 in.) verlängert wird. Ein Vergleich der  $W_c$  Diagramme in Abbildung 12 und 10 zeigen die Auswirkung der Wellenlänge auf  $W_c$ . Dieses Ergebnis ist äußerst positiv; es zeigt, dass zur Erreichung von Kreuzungen, die sich tief im Innern des Werkstücks befinden, die Wellenlänge bis zu einem gewissen Grad vergrößert werden kann, ohne dass die Anfasungsleistung übermäßig verringert wird.

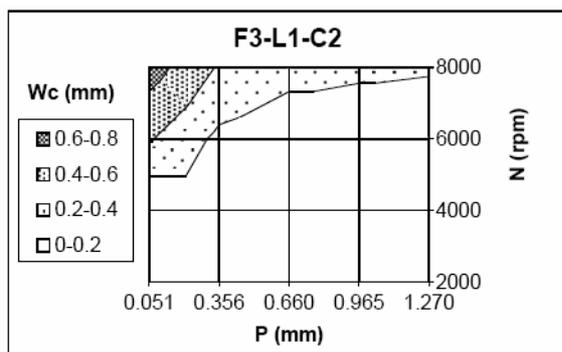


ABBILDUNG 12. GEPLANTER ANFASUNGSQUERSCHNITT  $W_c$  ALS EINE FUNKTION DER SPIRALSTEIGUNG ( $P$ ) UND DER SPINDELDREHZAH ( $N$ ). INTERPOLATIONSGESCHWINDIGKEIT ( $F3$ ) = 5.0 m/min., WELLENLÄNGE ( $L1$ ) = 51 mm,  $C$  = C2.

Durchschnittsdiagramme (marginal mean diagram) von  $W_c$ , mit den höchsten und tiefsten Werten sind in Abbildung 13 sichtbar. Die Faktoren und 2-Faktorenkombinationen mit den größten Auswirkungen auf die Reaktion (Kontrast) von  $W_c$  werden klar hervorgehoben. In der Reihenfolge ihrer Wichtigkeit sind dies: Spindeldrehzahl ( $N$ ), Spiralsteigung ( $P$ ), Vorschubrate ( $F$ ), Spindeldrehzahl – Kupplungsart ( $N-C$ ) Wechselwirkung, Kupplungsart ( $C$ ) und Wellenlänge – Kupplungsart ( $L-C$ ) Wechselwirkung. Es erstaunt nicht, dass die Spindeldrehzahl die Steuergröße mit dem mit Abstand größten Gegensatz ist. Der resultierende

Anfasungsquerschnitt  $W_c$  ist ebenfalls abhängig von der Spindelsteigung, weil dieser Faktor den Überschneidungsgrad zwischen den Werkzeugdurchgängen entlang der Bohrung

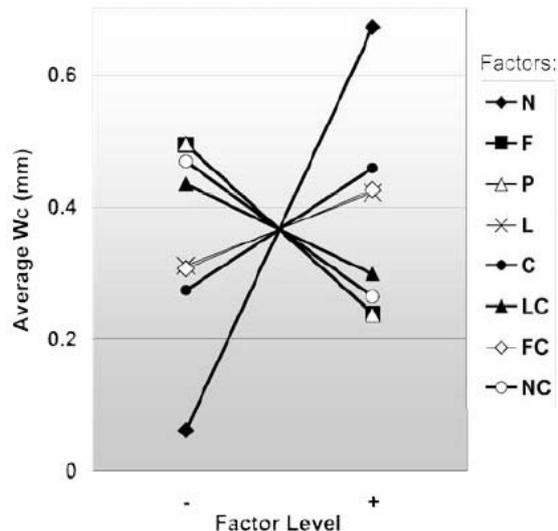


ABBILDUNG 13. DURCHSCHNITTSDIAGRAMME DES GEPLANTEN ANFASUNGSQUERSCHNITT ( $W_c$ ).

Kreuzung bestimmt. Ebenso ist die durchschnittliche Reaktion empfindlich auf eine zwischen  $F1$  und  $F3$  variierende Vorschubrate. Allerdings flacht die Reaktion merklich ab wenn die Werte zwischen  $F2$  und  $F3$  liegen. Deshalb ist es ratsam  $F$  und nicht  $P$  anzupassen um den Anforderungen an eine niedrige Zykluszeit gerecht zu werden. Im Vergleich zu den anderen Hauptfaktoren kann bestätigt werden, dass die Wellenlänge ( $L$ ) eine relativ schwache Auswirkung auf  $W_c$  hat. Abgesehen von  $N-C$  und  $L-C$ , wurde beobachtet, dass 2-Faktorenkombinationen eine schwache Auswirkung auf die durchschnittliche Reaktion von  $W_c$  haben.

Der von  $N-C$  und  $L-C$  veranschaulichte Gegensatz kann weiter erforscht werden, indem die separaten Wechselwirkungsdiagramme, die in Abbildung 14 bzw. 15 gezeigt werden, untersucht werden. In Abbildung 14 wird bei Verwendung der steifen Kupplung eine erhöhte Zunahme des Materialabtrags bei zunehmender Spindelgeschwindigkeit beobachtet. Auf der anderen Seite zeigt das  $L-C$  Wechselwirkungsdiagramm entgegengesetzte Neigungen der Frequenzkurven. Mit der steifen Kupplung wird der Materialabtrag durch eine längere Welle begünstigt, wobei mit der flexiblen Kupplung eine

Zunahme von  $L$  in geringerem Materialabtrag resultiert. Beide Verläufe resultieren aus den dynamischen Auswirkungen der Masse der Kupplung und der Hebelwirkung der Welle. Die

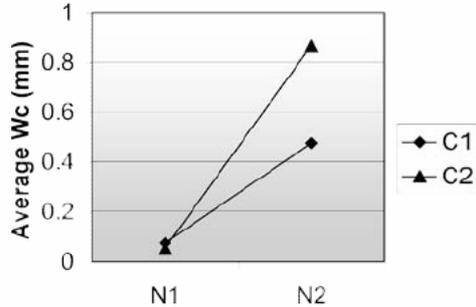


ABBILDUNG 14. N-C WECHSELWIRKUNGS-DIAGRAMM.

zentrifugale Kraft, die durch die steife Kupplung, fast doppelt so schwer wie die flexible Kupplung, erzeugt wird, begünstigt den Materialabtrag. Letztendlich stammt die Anfasungsverbesserung beim Einsatz der steifen Kupplung mit zunehmender Spindeldrehzahl von der Masse und nicht von der Steifigkeit.

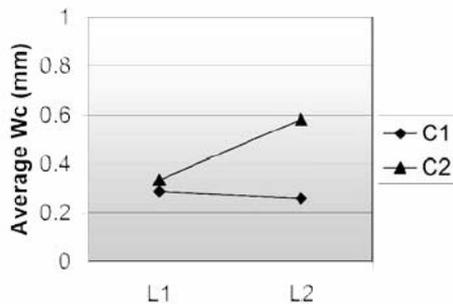


ABBILDUNG 15. L-C WECHSELWIRKUNGS-DIAGRAMM.

Abbildung 16 und 17 zeigen die Auswirkungen der Steuergrößen auf die Rauheit  $R_t$  der angefasten Oberfläche. Die Rauheit nimmt mit zunehmender Spindeldrehzahl und Spiralsteigung stetig zu. Auf der anderen Seite nimmt die Rauheit leicht ab wenn die Interpolationsgeschwindigkeit (Vorschubrate) von 0,33 m/min. (13 in./min) auf 2,7 m/min (106 in./min) steigt, nimmt dann jedoch sprunghaft zu bei  $F = 5,0$  m/min (198 in./min). Dieses Resultat sollte in Betracht gezogen werden wenn Interpolationsgeschwindigkeiten zur Reduktion von Zykluszeiten gesteigert werden müssen. Ein guter Kom-

promiss zwischen Oberflächengüte und Zykluszeit wird bei einer Vorschubrate von 2,7 m/min erzielt.

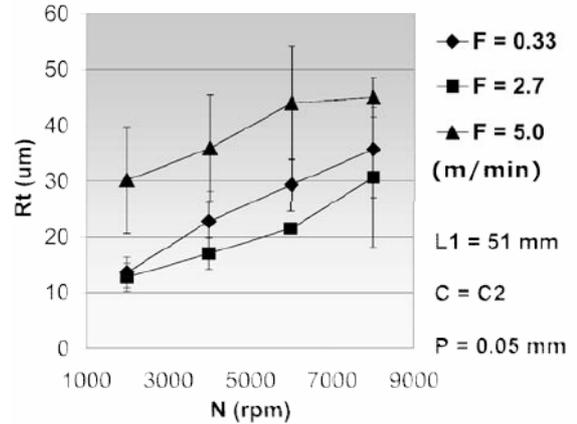


ABBILDUNG 16. RAUHEIT  $R_t$  DER ANGEFASTEN KANTEN ALS EINE FUNKTION DER SPINDELDREHZAHL UND DER VORSCHUBRATE.  $L = 51$  mm,  $C = C2$ ,  $P = 0,05$  mm.

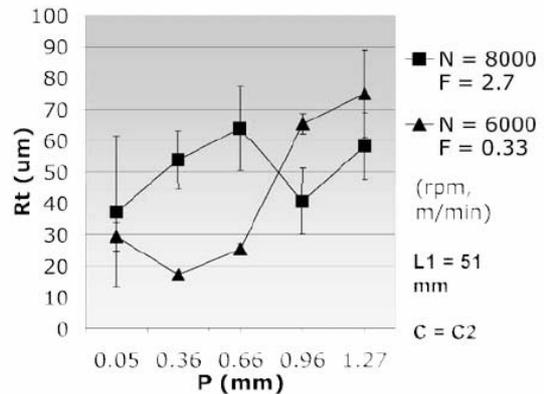


ABBILDUNG 17. RAUHEIT  $R_t$  DER ANGEFASTEN KANTEN ALS EINE FUNKTION DER SPIRALSTEIGUNG.  $L = 51$  mm.,  $C = C2$ .

### SCHLUSSFOLGERUNGEN

Unter Anwendung von Orbitool der Größe 6,35 mm (1/4 in.) wurden Versuchsdaten von Anfasungsgröße und Rauheit zusammengetragen um die automatisierte Anfasung sich kreuzender Bohrungen zu untersuchen. Zur Selektion von Bearbeitungsbedingungen auf der Grundlage von bestehender Gratwurzeldicke und Anforderungen bezüglich Oberflächengüte wurden Prozessdaten entwickelt. Die Ergebnisse sind im Folgenden zusammengefasst:

1. Das mechanisierte Entgraten mit Orbitool ist eine praktikable Alternative zum abrasiven Bürstspanen. Die Vorteile liegen in der verbesserten Kontrolle der Anfasung, gleich bleibenden Ergebnissen und der minimalen Beschädigung der Bohrungsoberflächen. Diese Technik eignet sich hervorragend für die praktische Anwendung in konventionellen Werkzeugmaschinen und hat keinerlei verunreinigende Auswirkungen auf das Werkstück.
2. Der Materialabtrag an den Kanten der Bohrungskreuzung wird hauptsächlich von der Drehzahl von Orbitool, zwischen 2000 und 8000 U/min, angetrieben, gefolgt von der Spiralsteigung des Werkzeugweges. Die größten Anfasungen wurden zwar mit 8000 U/min erzielt, die Zunahme der Anfasung verringert sich jedoch aufgrund des dynamischen Effektes asymptotisch während sich die Spindeldrehzahl 8000 U/min nähert. Die Anfasungseffizienz nimmt mit zunehmender Spiralsteigung ab.
3. Die Interpolationsgeschwindigkeit von 2.7 bis 5.0 m/Minute wirkt sich nur leicht auf den Materialabtrag aus. Um den Anforderungen an niedrige Zykluszeiten gerecht zu werden, wird die Anpassung des Vorschubs anstelle der Spiralsteigung empfohlen. Es ist zudem empfehlenswert schnellere Vorschubraten (größer als 5m/min,) einzusetzen, da keine Nachteile bei der Anfasungseffizienz zu erwarten sind.
4. Die optimale Anfasungsgröße für einen bestehenden Entgratprozess ist die kleinst mögliche, die eine konsistente Entfernung des Grates garantiert, und ist abhängig von der Gratwurzeldicke.
5. Dynamische Einflüsse von Kupplungsmasse beeinflussen den Materialabtrag weit mehr als statische Kupplungssteifigkeit. Solche Auswirkungen verbessern die Anfasung im Bereich zwischen 2000 und 8000 U/min, über 8000 U/min sind sie jedoch kontraproduktiv. Bei solchen Wellengeschwindigkeiten ist eine unbewegliche Kupplung von Vorteil um die Rotationsmasse zu reduzieren.
6. Die Rauheit  $R_t$  verschlechtert sich mit zunehmender Wellendrehzahl, zunehmender Spiralsteigung und zunehmender Vorschubgeschwindigkeit. Mit Vorschub-

geschwindigkeiten von 0.33 und 5.0 m/min. erreicht die Rauheit  $R_t$  ein Minimum. Die gemessenen Werte lagen zwischen 15 und 75  $\mu\text{m}$ .

Die Zykluszeit von in Werkzeugmaschinen durchgeführten Entgratvorgängen ist besonders kritisch weil der Anteil an Betriebszeit der Werkzeugmaschinen für Abläufe mit Wertzuwachs maximiert werden muss. Um die Zykluszeit zu reduzieren sind bereits Tests mit nicht-spiralförmigem Werkzeugweg und Interpolationsgeschwindigkeiten von über 5m/min in Bearbeitung. Orbitool-Werkzeuge mit weniger als 36 Schneiden werden ebenfalls getestet um einen höheren Materialabtrag zu erzielen.

#### **DANKSAGUNG**

Diese Studie wurde unterstützt von JWDone Company und den Mitgliedern des *Consortium on Deburring and Edge Finishing (CODEF)*.

#### **LITERATURVERZEICHNIS**

Dornfeld, D., Lisiewicz, V. (1992), "Acoustic Emission Feedback for Precision Deburring" CIRP Annals, Band 41, Nr. 1, Seiten 93-96.

Fistere, Howard C. (1985), "Deburring Cross-holes", Die Casting Engineer, Band 29 Nr. 1, Seiten 30-32.

Gillespie (1975), "Hand Deburring of Precision Miniature Parts", Bendix Aerospace, Kansas City Division Report Nr. BDX 613-1443.

Gillespie, L. K., (1990), "Deburring and Surface Finishing: The Past Ten Years and Projections for the Next Ten Years", Proc. Deburring Salon, Burr, Edge, and Surface Technology, Japan, Japan Society of Precision Engineers, Nagoya, Japan.

Kim, J., Dornfeld, D., Furness, R. (1999), "Experimental Study of Burr Formation in Drilling of Intersecting Holes With Gun and Twist Drills", Tech Papers SME/NAMRI, Seiten 39-44.

Koelsh, J. R., (1990), "Banish Manual Deburring", Manufacturing Engineering, Band 105 Nr. 1,

Seiten 71-75.

Ohshima, I., Maekawa, K., Murata, R. (1993),  
"Burr Formation and Deburring in Drilling Cross  
Holes", Journal of the Japan Society of Precision  
Engineering, Seimitsu Kogaku Kaishi. Vol. 59 No.  
1, January, pp.155-160.

Beim vorliegenden Text handelt es sich um eine  
Übersetzung aus dem Englischen. Originaltitel:  
„Deburring of cross-drilled hole intersections by  
mechanized cutting“

Übersetzung von Barbara Jakob