

Modellierung, Simulation und experimentelle Verifikation von Größeneinflüssen bei der Gratbildung

R. Neugebauer¹, G. Schmidt¹, J. Leopold¹, M. Dix², A. Stoll²

¹Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Chemnitz

²Institut für Werkzeugmaschinen und Produktionsprozesse, Technische Universität Chemnitz

Der Grat wird in der DIN ISO 13715 als „Materialüberhang außerhalb der ideal-geometrischen Form einer Außenkante, die nach der mechanischen Bearbeitung oder einem Formgebungsprozess zurückbleibt“ [1] genormt. Dieser Grat wirkt sich durch seine Geometrieungenauigkeit und durch seine undefinierte Festigkeit negativ auf die Qualität des Bauteils aus. Der Grat besteht aus stark deformiertem Werkstückmaterial, welches häufig mit Mikrorissen versehen ist. Dies kann zum Ablösen des Grates während der Fertigung oder während der Bauteilnutzung führen. Der abgelöste Grat kann Folgeschäden verursachen, z.B. durch das Verschließen von Öl- oder Kühlmittelkanälen. Ergänzend zu diesen Qualitätsminderungen stellt der Grat durch seine Scharfkantigkeit ein Verletzungsrisiko dar.

Bei der Skalierung des Zerspanprozesses treten verschiedene Größeneffekte auf, welche auch direkten Einfluss auf die Gratbildung haben. Diese Skalierungseffekte bei der Gratbildung stehen im Mittelpunkt der Untersuchungen. Dabei wird nach theoretischen Betrachtungen am orthogonalen Schnitt die Bohrgratbildung in einem breiten Bohrerdurchmesserspektrum untersucht.

1 Einleitung

Die meisten Zerspanungsprozesse sind in die Phasen Anschnitt, konstantes Spanen und Schneidenaustritt zeitlich unterteilbar. Die Gratbildung ist dabei ein Phänomen, welches teilweise beim Schneideneintritt in der ersten Phase und verstärkt in der letzten Phase auftritt, da es im randnahen Bereich aufgrund der fehlenden Stützwirkung zu Instabilitäten im Zerspanungsprozess kommt und sich der Spanprozess in den Gratbildungsprozess umwandelt. Dieser Gratbildungsprozess weist hohe Analogien aber auch deutliche Unterschiede zum Spanbildungsprozess auf. So wird er, ähnlich wie der Spanbildungsprozess, von einer Vielzahl von Einflussgrößen, wie z.B. Zerspanungsparameter, Werkstückwerkstoffeigenschaften und Werkzeugeigenschaften, beeinflusst, jedoch ist der auftretende Effekt meist verschieden zu dem im Zerspanungsprozess.

Der auftretende Grat stellt, wie eingangs schon erwähnt, ein Qualitätsproblem dar, welches bei der spanenden Bearbeitung von duktilen, metallischen Werkstoffen unweigerlich auftritt. Bei der konventionellen Zerspanung wird der Grat meist durch einen zusätzlichen Fertigungsschritt entfernt. Dabei ist das manuelle Entgraten das am häufigsten angewendete Verfahren. Jedoch ist dieser zusätzliche Fertigungsschritt mit zusätzlichen Kosten und zusätzlicher Fertigungszeit verbunden. Ein ökonomischer Ansatz ist die Vermeidung dieses Fertigungsschrittes durch eine Reduzierung des Grates im Entstehungsprozess auf ein tolerierbares Minimum [2]. Dazu sind Untersuchungen im makroskopischen Bereich bekannt, jedoch lassen sich die Erkenntnisse aufgrund auftretender Größeneffekte nicht direkt auf die Mikrofertigung übertragen.

In den letzten Jahrzehnten zeigte sich ein zunehmender Trend zur Miniaturisierung von Bauteilen und der damit anwachsenden Mikrofertigung. Die spanende Mikrobearbeitung zeichnet sich durch eine hohe Abtragsrate und gute Geometrieungenauigkeit aus. Jedoch treten bei der Skalierung des Zerspanungsprozesses verschiedene Größeneffekte auf, welche aktuell im Fokus der Forschung stehen

[3, 4, 5]. Dabei sind der Anstieg der spezifischen Schnittkräfte bei Reduzierung der Schnitttiefe und das Unterschreiten der Mindestspannungsdicke, welche stark vom Schnitttiefen-Schneidenkantenradius-Verhältnisses abhängig ist und den Ploughing-Effekt hervorruft, die bedeutendsten Erscheinungen. Es existieren einige wenige Untersuchungen zur Gratbildung bei der Mikrobearbeitung, jedoch beschränken sich diese auf einen stark eingeschränkten Größenbereich und stellen somit keine umfassende Größenuntersuchung dar. Diese Untersuchungen zur Gratbildung bei der Mikrobearbeitung zeigten, dass die Gratgeometrien bei der Mikrobearbeitung, relativ zur konventionellen Bearbeitung, stark vergrößert auftraten [6, 7]. Die Gratproblematik wird in der Mikrofertigung durch den Mangel an Entgratwerkzeugen und Verfahren noch weiter verschärft.

2 Prozessgrößenuntersuchungen am orthogonalen Schnitt

Der orthogonale Schnitt ist eine Abstraktion des Zerspanungsprozesses auf die zweidimensionale Ebene. Dabei ist keine Spanbreitung oder Verengung in Tiefenrichtung möglich und demzufolge die Spanbreite immer konstant. Die praktische Anwendung des orthogonalen Schnittes ist auf das Hobeln, Stoßen sowie Einstechdrehen beschränkt wodurch dieser einen eher theoretischen Charakter aufweist und in der Wissenschaft zu elementaren Untersuchungen am Span- und Gratbildungsprozess eingesetzt wird.

Als Grundlage für spätere dreidimensionale numerische Untersuchungen wurden Simulationen zur Gratbildung beim orthogonalen Schnitt mittels DEFORMTM2D und AdvantEdgeTM durchgeführt. Dabei stand die Untersuchung der bestimmenden Prozessparameter der Gratbildung, sowie die Detektierung von Größeneinflüssen im Mittelpunkt. Zur Verifikation der numerischen Berechnungen wurden Spanversuche und visioplastische Untersuchungen am superplastischen Werkstückwerkstoff L-Sn 63 durchgeführt. Dabei wurden die Temperaturen während der Gratbildung und die Gratgeometrien als Verifikationsgrößen genutzt. Die hier aufgeführten Ergebnisse stellen nur einen kurzen Überblick dar. Detaillierte Informationen sind im Tagungsband des 2. Kolloquiums Prozessskalierung [8] zu finden.

2.1 Abhängigkeit der Gratgeometrie, der hydrostatischen Schüssel und der Grat-Scherzone von verschiedenen Parametern

Die primäre Ergebnisgröße bei den Gratuntersuchungen ist die Geometrie des Grates, dessen Kenngrößen am orthogonalen Schnitt von Schäfer [9] und Severt [10] definiert wurden. In den aufgeführten Untersuchungen wurden der Gratwinkel und die Gratfußbreite näher auf ihre Einflüsse und Auswirkungen betrachtet. Ergänzend zu diesen Geometrien wurde der Einfluss verschiedener Eingangsparameter auf die sogenannte hydrostatische Schüssel untersucht. Während der Gratbildung entsteht in der Gratbildungszone ein Gebiet mit stark negativem hydrostatischem Druck. Durch seine Form und den minimalen Druckwert im Zentrum wird dieses Gebiet als hydrostatische Schüssel bezeichnet. Es wird angenommen, dass ein hoher negativer hydrostatischer Druck sich minimierend auf die Gratbildung auswirkt. Im folgenden Bild sind die Gratgeometrien und die hydrostatische Schüssel dargestellt.

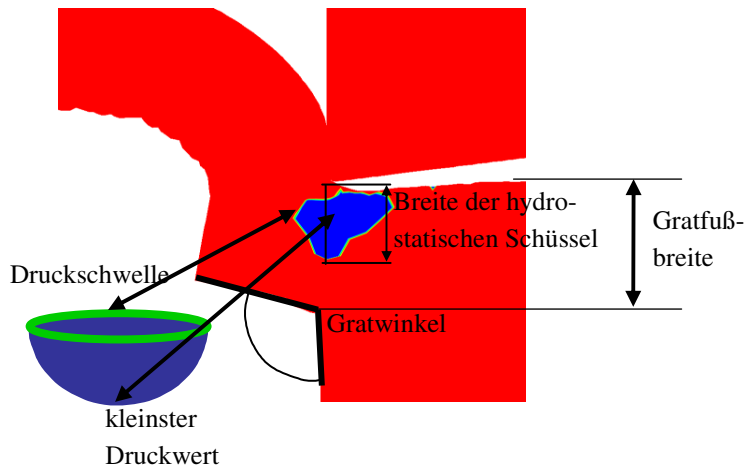


Bild 1: Hydrostatische Schüssel und Gratgeometrien

Zur Untersuchung der Einflüsse wurde das FEM-Programm AdvantEdge™ (Version 4.4) genutzt. Dabei wurden folgende Effekte ermittelt:

- Der Werkstückwerkstoff beeinflusst den Gratwinkel und die Gratfußbreite, wobei eine Erhöhung der Gratfußbreite auch zur Erhöhung des Gratwinkels führt.
- Das Vergrößern des Werkzeugparameters Spanwinkel bewirkt eine Reduzierung des Spanwinkels und der Gratfußbreite. Ein Einfluss auf die hydrostatische Schüssel ist nicht erkennbar.
- Die Werkzeug-Werkstück-Reibung hat nur bei sehr hohen Werten eine Einwirkung auf den Gratwinkel und Gratfußradius, wobei es zu einem Anstieg dieser kommt.

2.2 Prozessgrößenuntersuchungen mittels Visioplastizität gekoppelt mit numerischen Berechnungen

Die experimentellen Untersuchungen der Größeneffekte bei der Gratbildung am orthogonalen Schnitt erfolgten durch Zerspanung von LSn-63. Dieser Werkstoff weist bei niedrigen Schnittgeschwindigkeiten ein ähnliches Werkstoffverhalten wie C45E bei hohen Geschwindigkeiten auf. Zur Analyse der Fließvorgänge wurde die Methode der Visioplastizität angewandt, bei welcher über ein Gitter auf der Werkstückoberfläche die Deformationsvorgänge des Materials vermessen werden. Die Verformung dieser Gitterstruktur zusammen mit dem zerspannten Werkstoff wurde in situ fotografisch dokumentiert und anschließend vermessen und rechtechnisch ausgewertet. Während den visioplastischen Untersuchungen wurden im Zerspanungsexperiment die Kräfte mittels eines Dreikomponenten-Dynamometers von Kistler™ aufgezeichnet.

Synchron zu den experimentellen Untersuchungen wurde eine numerische Simulation mit DEFORM™2D durchgeführt. Die experimentellen visioplastischen Untersuchungen ermöglichten eine Verifikation dieses Simulationsmodells.

Die Analyse der Ergebnisse zeigte, dass bei dem Kräfteverhältnis zwischen Schnittkraft F_s und Drangkraft F_d Skalierungseffekte auftreten. So wies die Versuchsreihe mit konstantem Schneidfasen-Schnitttiefen-Verhältnis $f/h = 1$ bei steigender Fasenbreite einen Kräfteknick im Experiment auf, jedoch nicht in der Simulation. Bei konstanter Schnitttiefe $h = 3 \text{ mm}$ und ansteigendem Schneidfasen-Schnitttiefen-Verhältnis tritt ein Knick beim Verlauf der Simulation auf. Die folgende Grafik verdeutlicht die Ergebnisse grafisch. Für weitere Details sei auf die Quelle [8] verwiesen.

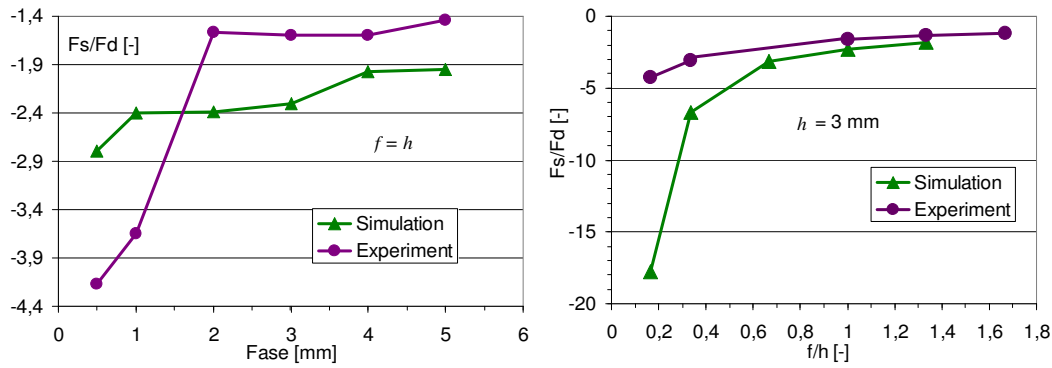


Bild 2: Verlauf des Quotienten aus Schnitt- und Drangkraft F_s/F_d (Modellversuch Werkstoff LSn – 63)

3 Skalierungseffekte bei der Bohrgratbildung

Das am häufigsten angewandte Bearbeitungsverfahren Bohren zeichnet sich durch eine mit dem Bohrerradius abnehmende Schnittgeschwindigkeit und einen mittigen Freischneidenbereich, welcher nur Material nach außen verdrängt und nicht spant, aus. Des Weiteren verändert sich über den Werkzeugdurchmesser die Schneidkeilgeometrie, wodurch ein stark dreidimensionaler Span- und Gratbildungsprozess entsteht.

Bei der Bohrgratbildung im konventionellen makroskopischen Bereich treten verschiedenen Grattypen auf, welche von Min [11] klassifiziert wurden. Dabei wird in die Grattypen Ringgrat mit verschiedenen Grathöhen, Kronengrat, Ringgrat mit Bohrkappe sowie Flügelgrat unterteilt.

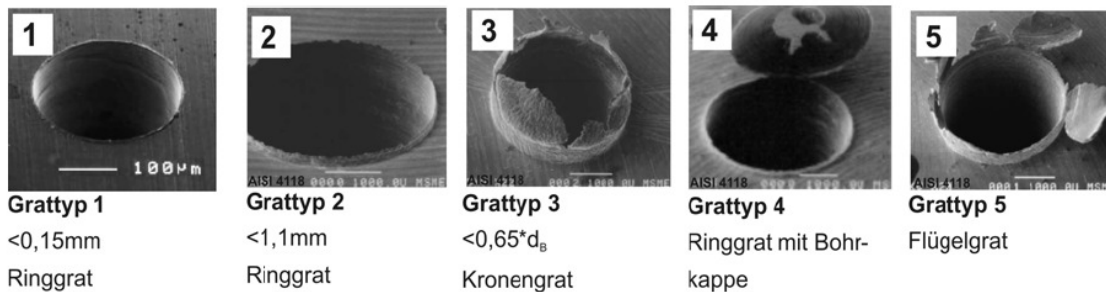


Bild 3: Grattypen nach Min [11]

Der Ringgrat (Grattyp 1 und 2) ist ein relativ flacher fest haftender Grat, welcher meist unproblematisch für die Fertigung ist und im Sinne der Gratminimierung das Ziel in Verbindung mit einer geringen Grathöhe darstellt. Der Grattyp 4 ist ebenfalls ein Ringgrat jedoch haftete die sogenannte Bohrkappe, welche während der Gratbildung entsteht, noch lokal an. Die Kontaktstelle von dieser mit dem Werkstück ist sehr gering wodurch die Gefahr des Ablösens besteht. Eine Entfernung dieser Kappe ist daher bei der Herstellung von qualitativ hochwertigen Produkten notwendig. Gleiches gilt für die Grattypen Kronengrat und Flügelgrat. Die „Kronenzacken“ oder die „Gratflügel“ sind zum einem geometrisch sehr groß, was zu hohen Geometrieabweichungen führt und des Weiteren ebenfalls relativ instabil [11]. Wegen der Ähnlichkeit von Kronengrat und Flügelgrat werden beide in dieser Arbeit als Kronengrat zusammengefasst.

3.1 Bohrversuche

In der Literatur wird die Zerspanung häufig in konventionelle Bearbeitung und in die Mikrobearbeitung untergliedert. Das Mikro bezieht sich dabei auf den Vorsatz der Längeneinheiten. Daraus ergibt sich

die Frage, ab wann von Mikrobearbeitung zu sprechen ist. In dieser Arbeit wurde der Bohrungsdurchmesser d mit $d \leq 1$ mm als Grenzkriterium für den Mikrobohrbereich zum konventionellen Bohrbereich angesetzt. Viele handelsübliche konventionelle Bohrererien beinhalten zwar Bohrer $d = 1$ mm, jedoch ist für diese Bohrergröße (HSS unbeschichtet) ein Zahnvorschub f_z im zweistelligen Mikrometerbereich empfohlen. Auf Grund des eingesetzten Werkstückwerkstoffes C45E, welcher im normalisierten Zustand eine durchschnittliche Korngröße von zirka $d_{\text{Kom}} = 10 \mu\text{m}$ aufweist, ist bei diesem Zahnvorschub bereits ein Einfluss der Gefügestruktur zu erwarten und der Werkstoff nicht mehr als Kontinuum zu betrachten.

Basierend auf der Unterteilung in Makro- und Mikrobohrversuche wurden verschiedene Versuchstände entwickelt. Im Grundprinzip des Bohrens unterscheiden sich die Versuchstände nicht, jedoch bringt die einzusetzende Mess- und Maschinenteknik große Unterschiede mit sich, weshalb die Versuche nicht mit einem einheitlichen Versuchsaufbau umsetzbar sind.

3.1.1 Aufbau des makroskopischen Bohrversuchsstandes

Zur Durchführung der makroskopischen Versuche wurde in einem Bearbeitungszentrum ein Bohrversuchsstand installiert. Ziel des Versuchstandes war die Messung der Bearbeitungskräfte während der Bohrgratbildung mit gleichzeitiger optischer Aufnahme der Gratbildungsvorgänge sowie die Messung der Temperaturverteilung in der Gratbildungszone.

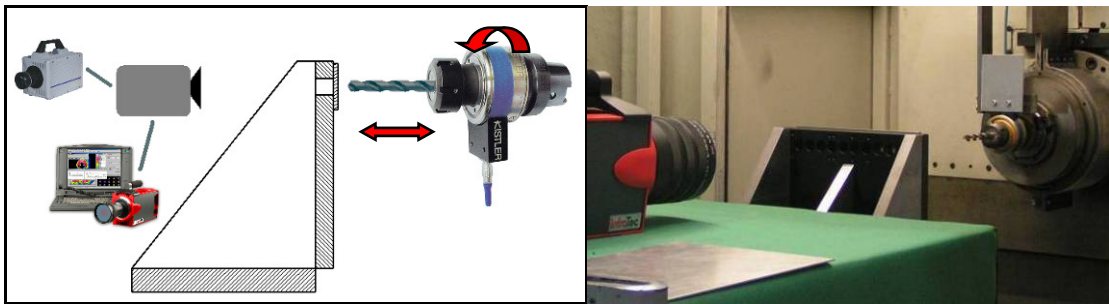


Bild 4: Bohrversuchsstand makroskopische Bohrexperimente

Die Messung der Bearbeitungskräfte Vorschubkraft F_z und Bohrmoment M erfolgte mittels eines rotierenden Schnittkraftdynamometers Kistler™ 9125A, welches das Spannfutter ersetzt und die Kräfte direkt am Werkzeug misst.

Der Austritt des Bohrers, welcher die Phase der Gratbildung darstellt, wurde durch verschiedene Kamerasysteme aufgezeichnet. Eine Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ Fastcam™ SA1 dokumentierte visuell die Gratbildungsmechanismen. Zur Aufzeichnungen der Temperaturverteilung an der Bohreraustrittsfläche während der Gratbildung kam ein Infratec™ ImageIR® Thermografiesystem zum Einsatz. Durch diese zeitlich und lokal hochauflösenden Systeme war es möglich die thermischen Vorgänge und Bildungsmechanismen während der Gratentstehung und -ausbildung detailliert aufzuzeichnen.

Wie bei allen spanenden Bearbeitungsverfahren sind auch beim Bohren die Bearbeitungsparameter stark abhängig von dem eingesetzten Werkzeug. Das Aufbringen von Schichtsystemen auf Bohrerwerkzeuge erlaubt hohe Zahnvorschübe f_z und Schnittgeschwindigkeiten jedoch ist der Fokus dieser Arbeit eine elementare Untersuchung der Bohrgratbildung und ihrer Einflussgrößen. Dazu wurden Untersuchungen mit durch Korundstrahlen angepassten Schneidkantenradien durchgeführt, wodurch nur der Einsatz von unbeschichteten Werkzeugen in Frage kam. Es wurde eine HSCO-Bohrerreihe $2 \text{ mm} \leq d \leq 14 \text{ mm}$ ausgewählt, welche sich durch identische Winkel und skalierte Geometrien zwischen den verschiedenen Bohrerdurchmessern auszeichnete wobei ergänzend dazu geometrisch und werkstofftechnisch ähnliche Bohrer im Mikrobearbeitungsbereich verfügbar waren. Die obere Grenze bei $d = 14 \text{ mm}$ beruhte darauf,

dass 95 % des jährlichen Verbrauchs an Spiralbohrern der industriellen Fertigung kleiner als $d = 14 \text{ mm}$ sind [12]. Die untere Grenze bei $d = 2 \text{ mm}$ wurde aus dem eingangs beschriebenen Grenzkriterium zum Mikrobohren abgeleitet. Bei den hier angewendeten Bohrern handelte es sich um Bohrer mit einem Kegelmantel-Anschliff und einer Aufspitzung.

3.1.2 Mikrobohrversuchstand

Eine Untersuchung von Prozessgrößen setzt die Betrachtung des gesamten derzeit angewendeten Größenbereiches des Verfahrens voraus. Besonders der Bereich kleiner geometrischer Abmessung ist dabei ausschlaggebend, da die Kornstruktur des Werkstückwerkstoffes mit abnehmenden geometrischen Größen an Bedeutung zunimmt. Der prozessgrößendefinierende Bohrerdurchmesser ist aktuell bis zu $d \geq 0,05 \text{ mm}$ bei verschiedenen Werkzeugherstellern verfügbar. Daraus schlußfolgernd wurde für die Umsetzung der Untersuchungen zum Mikrobohren ein Bohrerdurchmesserbereich von $0,1 \text{ mm} \leq d \leq 1 \text{ mm}$ festgelegt. In Anknüpfung an die makroskopischen Bohrversuche wurden unbeschichtet HSCO-Kleinstbohrer verwendet, um die Untersuchung einer skalierten Bohrreihe über zwei Zehnerpotenzen zu ermöglichen. Die dabei eingesetzten Kleinstbohrer wiesen einen Spitzenwinkel $\sigma = 118^\circ$ sowie einen Zweiflächenschliff auf. Im Vergleich zu den makroskopischen Bohrgeometrien, war demzufolge der Spitzenwinkel identisch, jedoch traten fertigungsbedingt geringe Unterschiede in der Anschliffform auf.

Die kleinen geometrischen Abmessungen des Mikrobohrens machten die Entwicklung und Umsetzung eines separaten Versuchstandes notwendig. Maschinentechnisch betrachtet erfordert das Mikrobohren neben hohen Rundlauf toleranzen der Spindel auch sehr hohe Drehzahlen im Bereich von 40.000 U/min , welche auf konventionellen Makrobearbeitungszentren nicht möglich sind. Bei diesen Versuchen wurde auf ein Mikrobearbeitungszentrum Kugler Microgantry® zurückgegriffen.

Neben dem Versuchsstand mussten die Geometrie und die Oberfläche der Proben an die Mikrobearbeitung angepasst werden. Die angewendeten Bohrer waren auf eine Bohrtiefe von $3 \times d$ beschränkt, was sehr dünnwandige Proben erforderte. Des Weiteren verlangte die präzise Messung der Mikrogratgeometrien eine polierte, spannungsfreie Oberfläche. Dies wurde durch das Schleifen und Polieren der Austrittsfläche mittels eines Präparationssystems für metallographische Schlitte, welches ein Maximum an Oberflächengüte garantiert, ermöglicht.

Im Bild 5 ist ein Überblick über den Mikrobohrversuchstand dargestellt.

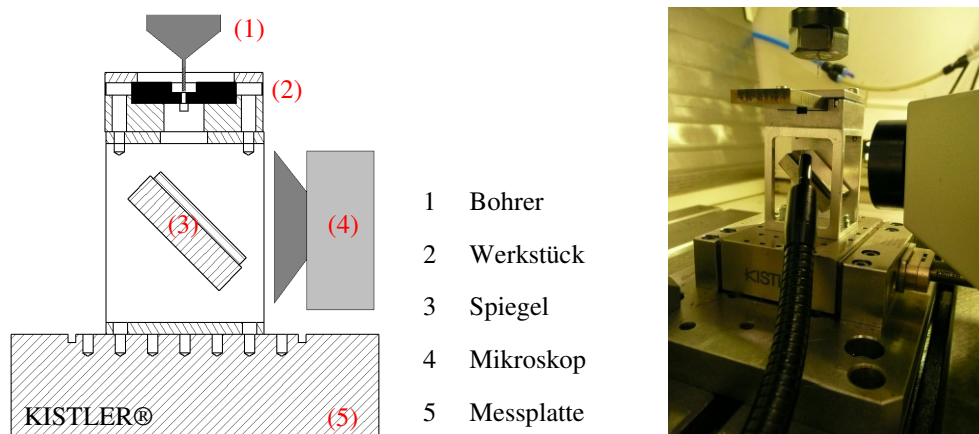


Bild 5: Versuchsaufbau Mikrobohren

Dabei ist das Werkstück (2) mit der Bohrer austrittsfläche nach unten in einem Probenhalter befestigt, welcher auf einer Kistler MiniDyn Messplatte (5) mittig verschraubt ist. Im Probenhalter ist unterhalb der

Probe ein Präzisionsspiegel (3) angebracht, welcher die Beobachtung der Austrittsfläche mittels eines Lichtmikroskopes (4) ermöglicht.

3.1.3 Vorgehensweise und Aufschlüsselung der Testserien

Zur Detektierung von Größeneinflüssen wurden die experimentellen Untersuchungen im makroskopischen Bereich in einzelne Versuchsreihen untergliedert, bei welchen verschiedene Prozessgrößen skaliert bzw. konstant gehalten wurden. Durch die gezielte Variierung der prozessbestimmenden Eingangsgrößen Schneidkantenradius r_β und Schneidenvorschub f_z sollten deren Einfluss auf die Gratgeometrie, die Gratbildungsmechanismen, die Temperaturverteilung sowie auf den Schnittkraftverlauf analysiert werden. Dabei wurde in 4 Versuchsreihen VR jeweils das makroskopische Bohrgrößenspektrum getestet. Diese Eingangsgrößen werden im Spanversuch auf ihre resultierenden Messergebnisse untersucht. Ergänzend dazu werden die Ergebnisse durch eine Visualisierung des Gratbildungsprozesses mittels Hochgeschwindigkeitskamera, welche die Verformungsmechanismen während der Gratbildung aufzeichnet, untermauert.

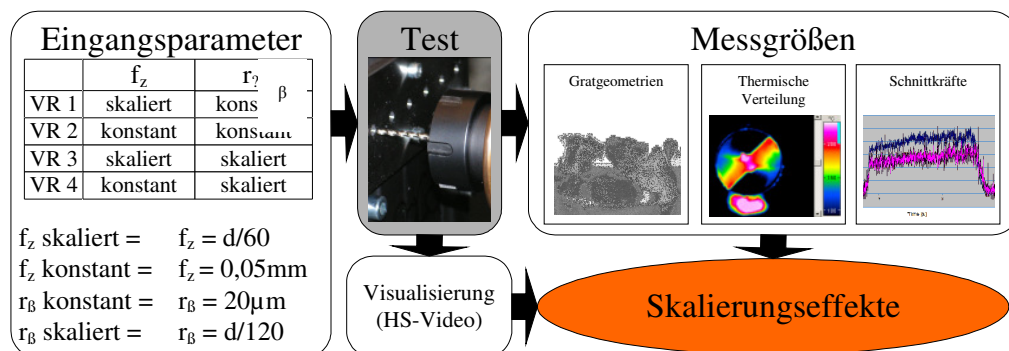


Bild 6: Versuchsreihen - makroskopische Zerspanung

Im Falle des skalierten Schneidenvorschubes wurde dieser Zerspanparameter durch den jeweiligen Bohrerdurchmesser bestimmt. Dabei betrug der Schneidenvorschub $f_z = \varnothing d/60$, was etwa den Empfehlungen des Herstellers für diese Bohrerreihe entsprach. Bei konstantem Schneidenvorschub wurde dieser für alle Bohrerdurchmesser auf $f_z = 0,05 \text{ mm}$ konstant gehalten.

Der Schneidkantenradius betrug bei den Bohrwerkzeugen in Lieferzustand im äußeren Hauptschneidenbereich $r_\beta = 20 \mu\text{m} \pm 5 \mu\text{m}$. Diese Bohrer werden nachfolgend als Bohrerreihen mit konstantem Schneidkantenradius bezeichnet. Für die Versuchsreihen VR3 und VR4 mit skaliertem Schneidkantenradius r_β wurde dieser mittels Korundstrahlens mit verschiedenen Strahlkorngrößen angepasst.

Die makroskopischen Versuchsreihen mit skaliertem Schneidenvorschub wurden durch die Mikrobohrversuche wie in Kapitel 3.1.2 beschrieben bis in den Mikrobereich erweitert. Jedoch war dabei der Schneidkantenradius aufgrund der geringen Größe nicht exakt messtechnisch bestimmbar.

3.2 Ergebnisse der Bohrexperimente

3.2.1 Gratgeometrien der makroskopischen Bohrversuche

Gestalt und Größe des Grates stellen das zentrale Ergebnis der Gratbildung dar. Wie im Kapitel 3 beschrieben, wurden die Grate der jeweiligen Proben nach ihrem Grattyp klassifiziert und ihre Grathöhe h_G vermessen. In den folgenden Abbildungen sind die Grathöhen und Grattypen über dem Bohrerdurchmesser bzw. der Schneidkantenbearbeitung aufgetragen. Jeder aufgeführte Grathöhenwert stellt dabei den Mittelwert von 5 untersuchten Bohrungen dar. Der Grattyp bei den 5 Bohrungen muss

dabei immer einheitlich gewesen sein, um einem Grattyp zugeordnet zu werden. War dies nicht der Fall wird kein Grattyp aufgezeigt und dieser Bereich ist als Übergangs- oder instabiler Bereich zu werten. (Siehe Bild 7)

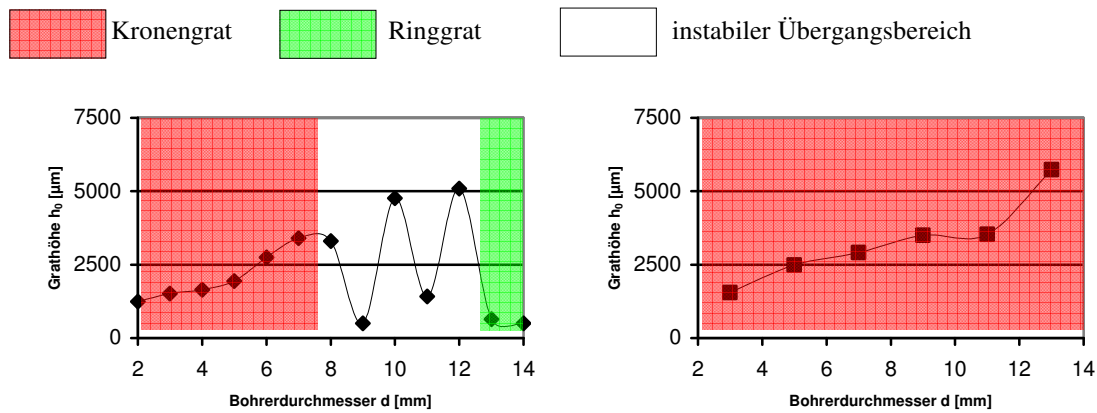


Bild 7: Gratgeometrien VR1 – f_z = skaliert, r_β = konstant und VR2 – f_z = konstant, r_β = konstant

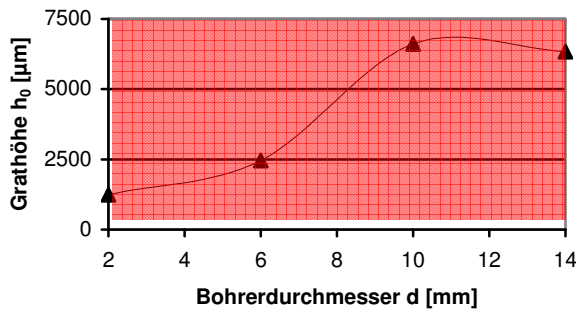
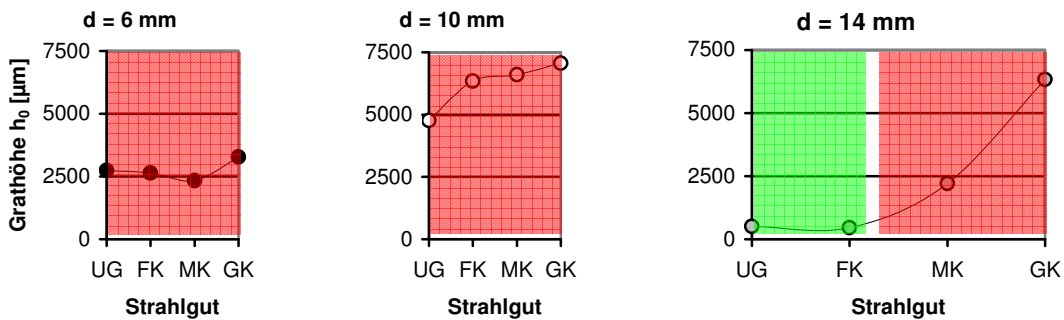


Bild 8: Gratgeometrien VR3 – f_z = skaliert, r_β = skaliert



UG \rightarrow ungestrahlt, FG \rightarrow Feinkorund, MK \rightarrow mittlerer Korund, GK \rightarrow Grobkorund

Bild 9: Gratgeometrien VR4 – f_z = konstant, r_β = skaliert

Die Versuchsreihe VR1 mit konstantem Schneidkantenradius und skaliertem Schneidvorschub, deren Gratgeometrien in Bild 7 dargestellt sind, entsprechen dem konventionell angewendeten Bohren mit dieser

Bohrerserie. Die resultierenden Gratgeometrien zeigen, dass im Bohrerdurchmesserbereich $2 \text{ mm} \leq d < 7 \text{ mm}$ es zu einem konstanten Anstieg der Grathöhe bei vorliegendem Kronengrat kam. Im Bereich von $6 \text{ mm} < d < 13 \text{ mm}$ wurden beide Grattypen auch bei identischen Bohrerdurchmesser gemessen, wodurch dieser Bereich als instabiler Bereich anzusehen ist. Für Bohrerdurchmesser größer $d > 12 \text{ mm}$ wurde immer ein Ringgrat erzeugt. Demzufolge kam es bei dieser Bohrreihe zu einem Wechsel vom Kronen- zum Ringgrat, wobei dazwischen ein instabiler Bereich auftrat.

Gegensätzlich dazu wurde bei der VR2 mit konstanten Vorschub und konstantem Schneidkantenradius immer ein Kronengrat detektiert, welcher mit zunehmendem Bohrerdurchmesser an Grathöhe zunahm.

Die VR3 mit skaliertem Schneidvorschub und skaliertem Schneidkantenradius wies ebenfalls stets einen Kronengrat auf, welcher mit steigendem Bohrerdurchmesser größer wurde.

In der VR4 wurden für verschiedene Bohrerdurchmesser verschiedene Schneidkantenradien bei gleichem Schneidvorschub getestet. Bei den beiden kleineren Bohrerdurchmessern $d = 6 \text{ mm}$ und $d = 10 \text{ mm}$ bildete sich immer ein Kronengrat aus, dessen Grathöhe für die einzelnen Schneidkantenradien unterschiedlich anstieg. Der Bohrerdurchmesser $d = 14 \text{ mm}$ zeigte im Gegensatz zu den beiden anderen Bohrerdurchmessern einen deutlichen beständigeren Einfluss des Schneidkantenradius. So stieg mit anwachsendem Schneidkantenradius die Grathöhe exponentiell an und es kam zum Wechsel vom Ring- zum Kronengrat.

Durch die Zusammenfassung der Grattypen der einzelnen Versuchsreihen wird deutlich, dass das Verhältnis $\lambda_{fz/r\beta}$ zwischen Schneidvorschub und Schneidkantenradius den resultierenden Grattyp direkt beeinflusst.

VR1 $\rightarrow \lambda_{fz/r\beta}$ steigt an \rightarrow Wechsel Kronen- zu Ringgrat;

VR2 $\rightarrow \lambda_{fz/r\beta}$ bleibt konstant \rightarrow konstant Kronengrat;

VR3 $\rightarrow \lambda_{fz/r\beta}$ bleibt konstant \rightarrow konstant Kronengrat;

VR4 $\rightarrow \lambda_{fz/r\beta}$ fällt \rightarrow Wechsel Ring- zu Kronengrat bei $d = 14 \text{ mm}$.

Die in der VR4 untersuchten Durchmesser $d = 6 \text{ mm}$ und $d = 10 \text{ mm}$, bei welchen der Wechsel vom Ring- zum Kronengrat mit fallendem Verhältnis $\lambda_{fz/r\beta}$ nicht auftrat, deuten darauf hin, dass es einen kritischen Wert für $\lambda_{fz/r\beta}$ gibt, bei welchem es zum Wechsel kommt, da dieser bei $d = 14 \text{ mm}$ auftrat. Im folgendem Bild 10 sind die Werte für alle Versuchsreihen vereint und das $\lambda_{fz/r\beta}$ über den Grattyp aufgezeichnet. Es zeigt sich ein deutlicher Einfluss des Verhältnisses $\lambda_{fz/r\beta}$ auf den entstehenden Grattyp.

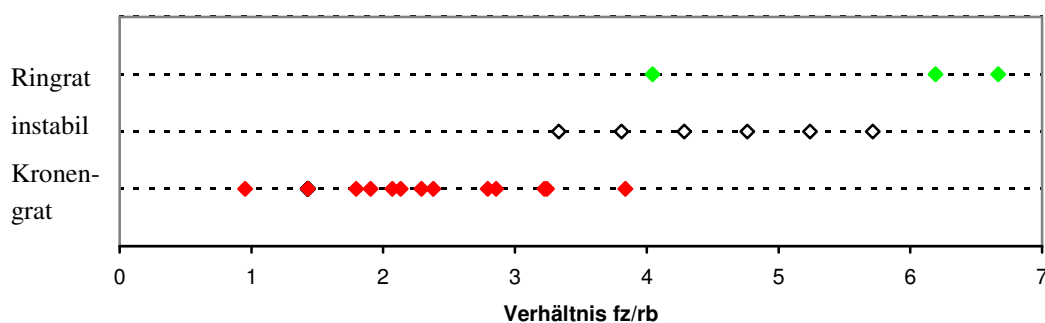


Bild 10: Grattyp im Vergleich zum Verhältnis $\lambda_{fz/r\beta}$

3.2.2 Gratbildungsmechanismen und Kraftverläufe

Zur Untersuchung der Gratbildung wurde, wie im Kapitel 3.1.1 beschrieben, die Gratbildung mit einer Hochgeschwindigkeitskamera HGK aufgezeichnet. Um den Gratbildungsprozess besser definieren zu können, wurden die Kraftverläufe (Vorschubkraft F_z und Moment M) und die HG Videos für den jeweiligen Grattypen zeitlich synchronisiert. In den folgenden Abbildungen ist die Kronen- und

Ringgratbildung aufeinanderfolgend dargestellt, um die verschiedenen Mechanismen vergleichen zu können. Die Maximalwerte der y-Achsen wurden durch 110 % des durchschnittlichen Kraftwertes während der kontinuierlichen Bohrprozesse bestimmt.

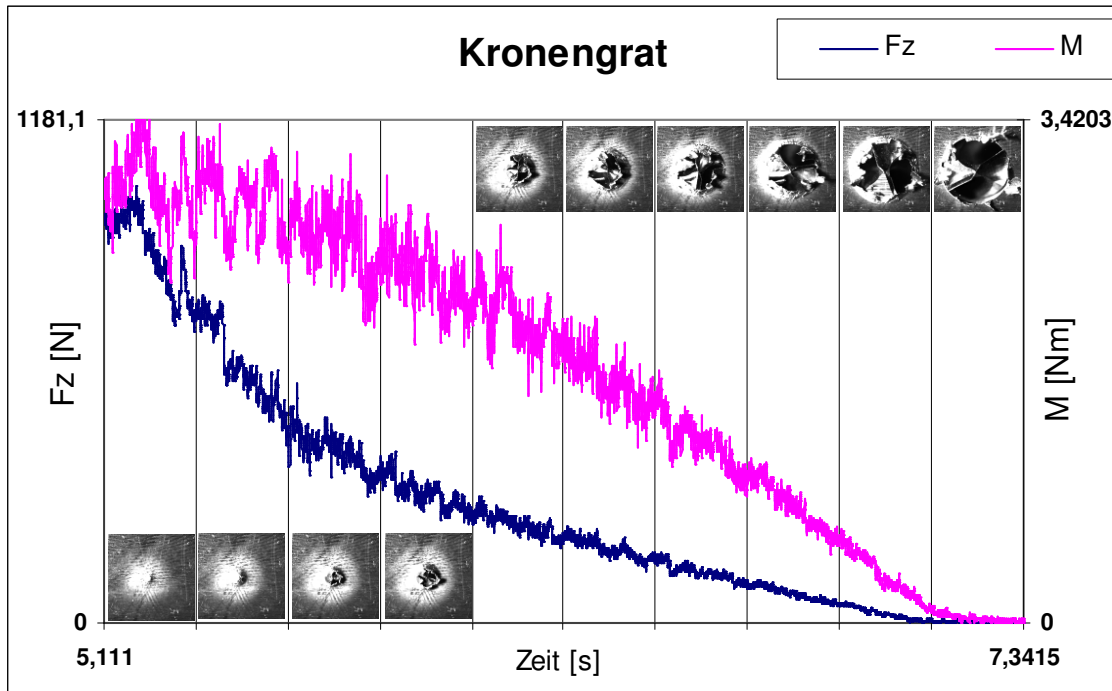


Bild 11: Kraftverläufe und HGK-Aufnahmen der Kronengratbildung

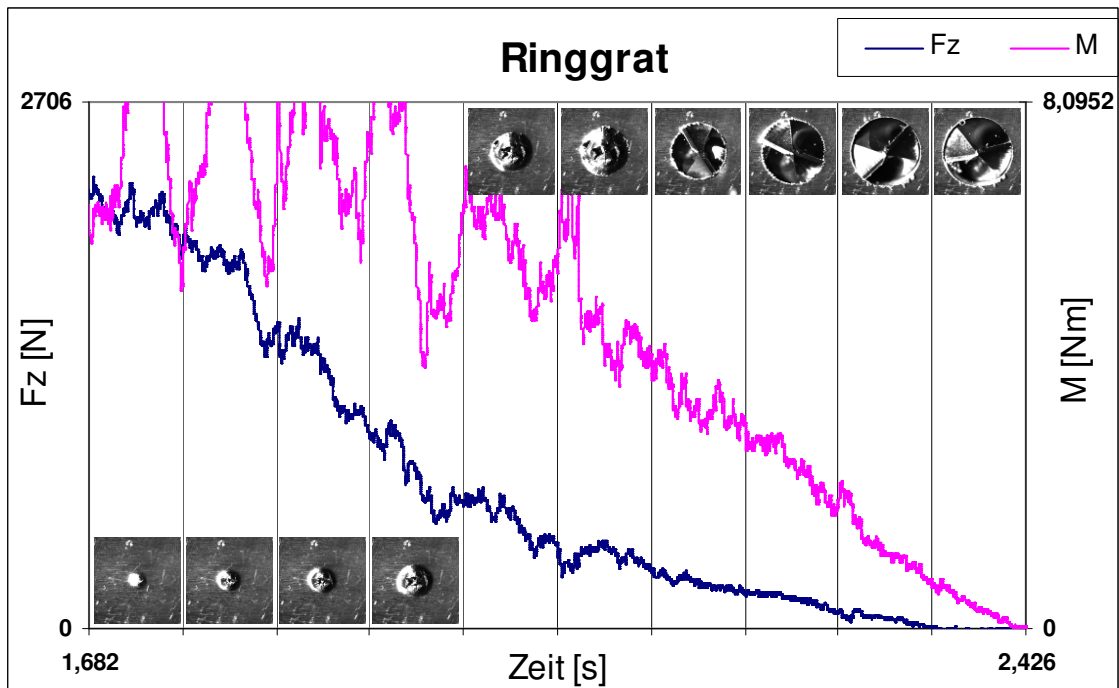


Bild 12: Kraftverläufe und HGK-Aufnahmen der Ringgratbildung

Bei der Kronengratbildung ist deutlich der kontinuierliche Abfall der Vorschubkraft F_z und des Momentes M mit fortschreitender Gratbildung zu erkennen. Die Bilder der HGK zeigen, dass die Gratbildung mit einer Verformung der Austrittsoberfläche im Bereich der Bohrermitte begonnen hat.

Diese Ausbeulung nahm mit dem Fortschreiten der Gratbildung zu und es bildete sich eine sogenannte Bohrkappe. Dabei war zu erkennen, dass die Schneiden das Werkstückmaterial nur verdrängten und nicht mehr zerspannen. Nach dem Durchbruch des Bohrers im Freischneidenbereich wurden radiale Risse durch die entstandene Bohrkappe sichtbar. Diese Risse unterteilten die Bohrkappe in die späteren Gratflügel. Diese Gratflügel wurden, ähnlich wie ein einseitig eingespannter Biegebalken, nach oben gedrückt. Dabei kam es zu hohen Deformationen im Gratfußbereich, was mit metallographischen Schliffen (siehe Kapitel 3.2.3) nachgewiesen werden konnte.

Gegensätzlich zur Kronengratbildung verlief die Ringgratbildung. In den Anfangsphasen war die Gratbildung noch ähnlich. Es entstanden erste Verformungen der Austrittsfläche bei der Bohrermitte und nachfolgend bildete sich eine Bohrkappe, bei welcher erste Durchbrüche des Bohrers im Freischneidenbereich auftraten. Jedoch war die Einleitung der radialen Risse nur sehr schwach, wodurch es nicht zur Bildung von Gratflügeln kam. Bei der Ringgratbildung entstand im Gegensatz zur Kronengratbildung ein zweiter Durchbruch des Bohrers im Bereich der Hauptschneiden und darauffolgend kam es zum Abspannen der Bohrkappe. Das äußerste nicht abgespannte Material wurde zum Ringgrat geformt.

Diese unterschiedlichen Mechanismen spiegelten sich ebenfalls bei der Zerspankraftmessung wieder. Der Vergleich der Messsignale von Kronen- und Ringgrat zeigte deutliche Unterschiede. Der Momentenverlauf beim Kronengrat wies deutlich geringere Schwingungsamplituden als beim Ringgrat im Bereich der ersten zeitlichen Hälfte der Gratbildung auf. Bei der Kronengratbildung wurde das Gratmaterial zu Gratflügeln ausgeformt. Dieser Prozess entsprach mehr einem Umformvorgang mit Risseinleitung und Risswachstum als einem Spanbildungsprozess. Bei der Ringgratbildung wurde die entstehende Bohrkappe abgespannt, was darauf hindeutet, dass der Spanbildungsprozess bis zur Entfernung der Bohrkappe anhielt. Dies spiegelte sich in den hohen Amplituden wider. Mit dem Abspannen der Bohrkappe endeten die hohen Amplituden und ein kontinuierlicher Verlauf des Momentes verdeutlichte die Ausformung des Ringrates.

Die Ring- und Kronengratbildung beruhen demzufolge auf verschiedenen Materialentfernungsmechanismen, was sich auch in deutlichen Unterschieden im Momentenverlauf zeigte.

3.2.3 Metallographische Untersuchung der Grate

Wie im Kapitel 3.2.1 beschrieben, wurden Skalierungseffekte bei der skalierten Bohrgratbildung detektiert. Es zeigte sich ein Grattypwechsel vom Kronengrat mit langen Gratflügeln zum Ringgrat, welcher sich durch eine geringe Grathöhe auszeichnet. Die Gratbildungsmechanismen zum jeweiligen Grattyp wurden im vorangegangenen Kapitel beschrieben. Die dabei aufgezeigten Verformungsmechanismen beinhalten lokale Deformationen des Werkstückwerkstoffes, welche sich ebenfalls in Gefügedeformationen wiederfinden müssen. Eine Gefügeanalyse kann demzufolge als Bestätigung der im vorangegangenen Kapitel aufgeführten Gratbildungsmechanismen dienen.

Zur Herstellung der Schliffbilder wurden charakteristische Proben mit möglichst hohem Bohrerdurchmesser ausgewählt. Die Bohrungen wurden mit einem wassergekühlten Präparationstrennschleifer leicht außermittig zerteilt.

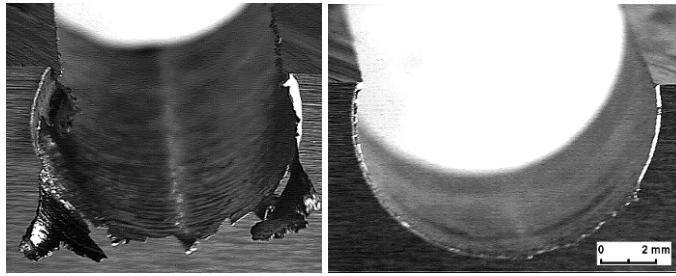


Bild 13: Proben nach dem Trennen

Anschließend wurden die Proben zur Stabilisierung in ein kaltaushärtendes Polymer eingebettet. Mittels mehrstufigen Schleifens und nachfolgenden Polierens wurden metallographische Schlitze hergestellt und durch Anätzen die Kornstruktur hervorgehoben. Als quantitative Ergebnisgröße wurde lokal die Anisotropie A des Gefüges vermessen. Bei einem Wert von 1 ist das Gefüge isotrop und nicht richtungsabhängig. Dies war bei den Proben im gratfreien Material (Bild 14 oben links) der Fall. Mit steigendem Wert weist das Gefüge eine Richtungsabhängigkeit auf, was bei starken Deformationen der Fall ist. Dabei richtet sich das Gefüge in Fließrichtung aus.

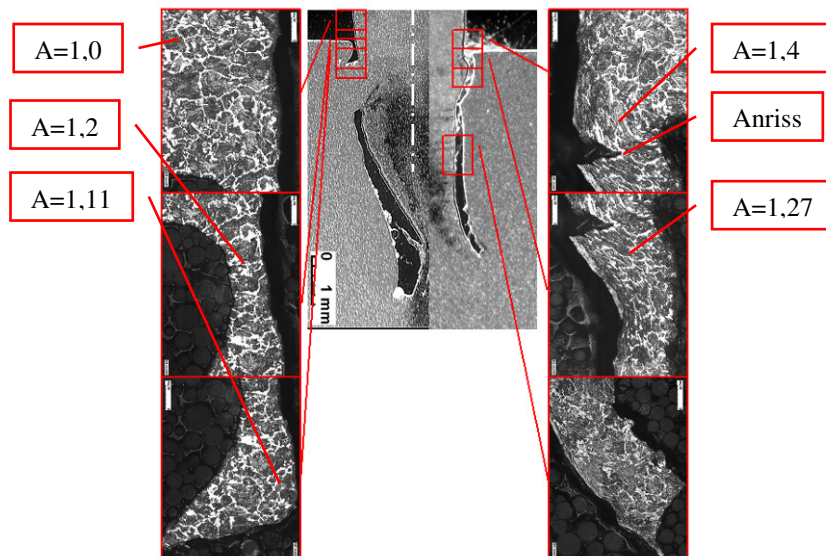


Bild 14: Schliffbild - Kronengrat

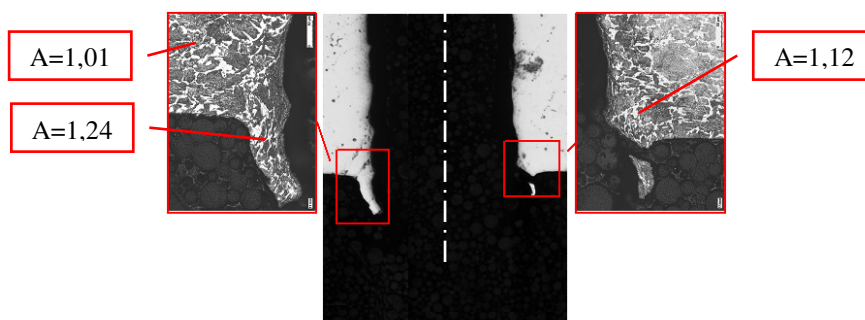


Bild 15: Schliffbild – Ringgrat

Der Kronengrat zeigt im Wurzelbereich der Gratflügel ein stark deformiertes Gefüge. Besonders der rechte Flügel wies hohe Deformationen und einen Anriss auf. Die Ausrichtung des Gefüges und der Ort und Form des Anrisses untermauern die Erkenntnisse aus den HGK-Aufnahmen, dass die Gratflügel wie

einseitig eingespannte Biegebalken nach oben gebogen wurden und an der Verbindungsstelle die höchsten Deformationen auftraten. Die Werte für die Anisotropie bestätigten dies. Das Gefüge im Gratflügel wurde ebenfalls deformiert, jedoch deutlich geringer als das Material im Gratfuß.

Beim Ringgrat wurde wiederum bei einer Messung im gratförmigen Bereich ein Wert für die Anisotropie von annähernd eins gemessen. Im Bereich des geometrisch relativ kleinen Ringgrates sind sehr starke Gefügeverzerrungen erkennbar und die Anisotropie ist ebenfalls sehr hoch. Das Material des Ringgrates, welcher im Vergleich zum Kronengrat fast nur aus einer Gratwurzel besteht, wurde demzufolge ähnlich wie beim Kronengrat stark deformiert.

3.2.4 Temperaturverteilung während der Bohrgratbildung

Die Temperaturverteilung in der Spanbildungszone beeinflusst den Zerspanungsprozess. Durch die thermische Entfestigung sinkt die Fließspannung des Werkstückmaterials in Bereichen hoher Umformung und demzufolge hoher Energiedissipation stark ab. Dies ist im unmittelbaren Schneidenbereich (Scherzone) und an der Reibkontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück der Fall.

Beim Bohren ins Volle stellt sich ein konstanter Vorlauf des Erwärmungsfeldes vor dem spanenden Bohrer ein. Dabei wird zusätzlich noch Wärme seitlich abgeführt, was zur Erwärmung des radial um die Bohrung befindlichen Materials führt. Kommt der Bohrer der Austrittsebene näher, so erreicht zuerst die vorlaufende Werkstückerwärmung die Werkstückkante. Dabei muss es unweigerlich zur Veränderung des konstant vorlaufenden Temperaturfeldes kommen, da an der Werkstückkante die Wärmeübertragung durch den Übergang an Luft deutlich geringer ist als bei der Leitung im metallischen Festkörper. Dadurch entsteht eine Art Wärmestau, welcher zur Entfestigung des Materials im Austrittsbereich führt.

Zur Untersuchung der Temperaturverteilung auf der Austrittsfläche wurde diese, wie in Kapitel 3.1.1 beschrieben, während des Gratbildungsprozess mit einem Thermografiesystem aufgezeichnet.

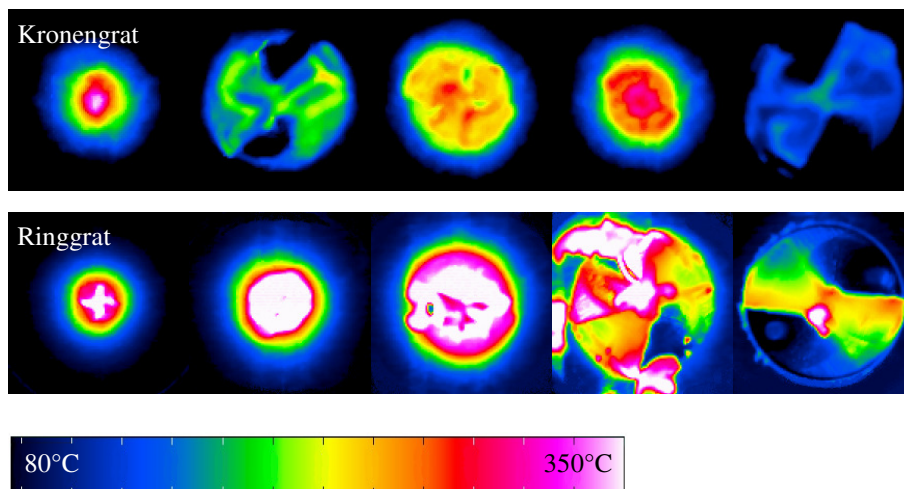


Bild 16: Thermische Verteilungen während der Gratbildung

Im Bild 16 ist jeweils eine Bildfolge für die thermische Verteilung bei der Kronen- sowie Ringgratbildung dargestellt. Dieser qualitative Vergleich ermöglicht einen Überblick über das thermische Verhalten, jedoch ist ein detaillierter radiusbezogener Vergleich damit nicht quantitativ möglich. Um diesen zu ermöglichen, wurden im Auswerteprogramm des Thermografiesystems ringförmige Zonen mit verschiedenen Radien über die Bohrung verteilt und deren Maximal- und Durchschnittstemperatur über die Zeit ermittelt. Die Ergebnisse dazu sind im folgendem Bild 17 dargestellt.

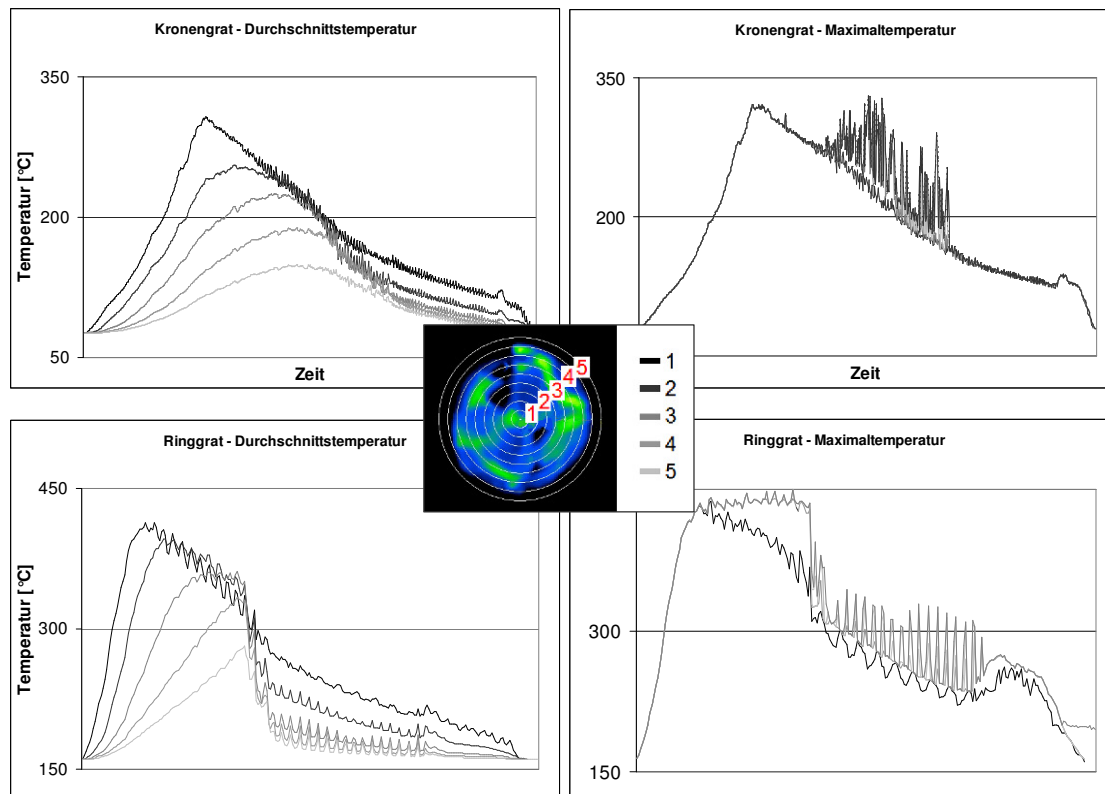


Bild 17: Vergleich der Durchschnittstemperatur über den Radius für Ring- und Kronengrat

Die Temperaturverläufe bei der Kronengratbildung zeigten einen Anstieg der Temperaturen zu Beginn der Gratbildung, welche beim Durchbruch der Hauptschnitten im Bohrerzentrum ihrer Maximalwerte erreichten. Die Temperatur nahm dabei mit steigendem Radius ab, wobei die Maximaltemperaturen entlang der Schnitten auftraten. Nach dem Durchbruch sanken alle Temperaturparameter bei der Kronengratbildung leicht degressiv ab. Die Ausschläge bei der Maximaltemperatur waren auf die Messung der Oberflächentemperatur der freiwerdenden Bohrerhauptschnitten zurückzuführen.

Die Ringgratbildung zeigte, ähnlich wie die Kronengratbildung, einen Anstieg der Temperaturen bis zum Durchbruch des Bohrers. Dabei waren die Temperaturen deutlich höher. Nach dem Durchbruch der Hauptschnitten sanken die Durchschnittstemperaturen langsam ab, jedoch blieb die Maximaltemperatur im mittleren Radienbereich auf einem hohen Niveau. Die HGK Aufnahmen in Kapitel 3.2.2 zeigten in diesem Bereich den Durchbruch der Hauptschnitten, was diese hohen Maximalwerte bestätigt. Der folgende schlagartige Abfall der Temperaturen ist auf das Abspannen der Bohrkappe zurückzuführen.

Die unterschiedlichen Materialentfernungsmechanismen, welche im vorausgegangen Kapitel 3.2.2 beschrieben wurden, spiegelten sich ebenfalls in der Temperaturverteilung wieder. So führten die verschiedenen Trennmechanismen zu verschiedenen Temperaturniveaus und resultierten in verschiedenen Verläufen der Maximal- und Durchschnittstemperaturen.

3.3 Gratbildung beim Mikrobohren

3.3.1 Grathöhen und Grattypen bei der Mikrobohrbearbeitung

Wie im Kapitel 1 beschrieben zeichnet sich die Mikrobearbeitung durch erhöhte spezifische Schnittkräfte im Vergleich zur konventionellen makroskopischen Bearbeitung sowie anisotropes Werkstoffverhalten aus. Diese Veränderungen haben auch Auswirkung auf den entstehenden Grat.

Bei den makroskopischen Versuchen zeigte die VR1 mit skaliertem Schneidvorschub und konstanten Schneidkantenradius deutlich Veränderungen in Bezug auf Grattyp und Grathöhe über den Durchmesserbereich von $2 \text{ mm} < d < 14 \text{ mm}$. Mit Hilfe der Mikrobohrversuche soll der Bohrerbereich auf $0,1 \text{ mm} < d < 14 \text{ mm}$ erweitert werden.

Synchron zu den makroskopischen Versuchen wurden bei den Mikrobohrversuchen die Grathöhen und der Grattypen aus dem Mittelwert von 5 Bohrungen ermittelt, jedoch kam statt einem Lichtmikroskop ein Rasterelektronenmikroskop zur Anwendung, da die Abmessungen des Mikrogrates eine hohe Auflösung mit hoher Tiefenschärfe forderten.

Dabei zeigten sich die im Bild 18 aufgeführten Grathöhen.

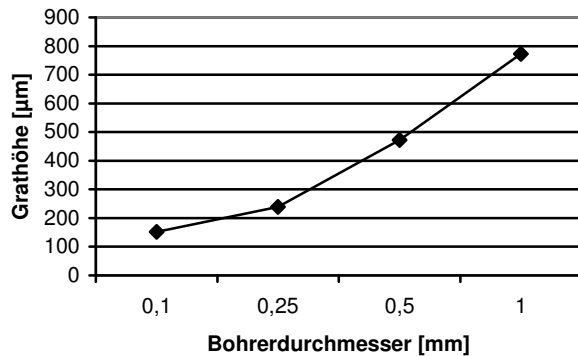


Bild 18: Grathöhen beim Mikrobohren, $f_z = \text{skaliert}$, $r_\beta = \text{konstant}$

Die Versuche zeigten, dass die Grathöhen mit abnehmendem Bohrerdurchmesser abnehmen, jedoch nur wenn die Grathöhen absolut gesehen werden. Im folgendem Bild 19 sind die Grathöhen absolut und relativ zum Bohrerdurchmesser über den gesamten Bohrerbereich aufgetragen.

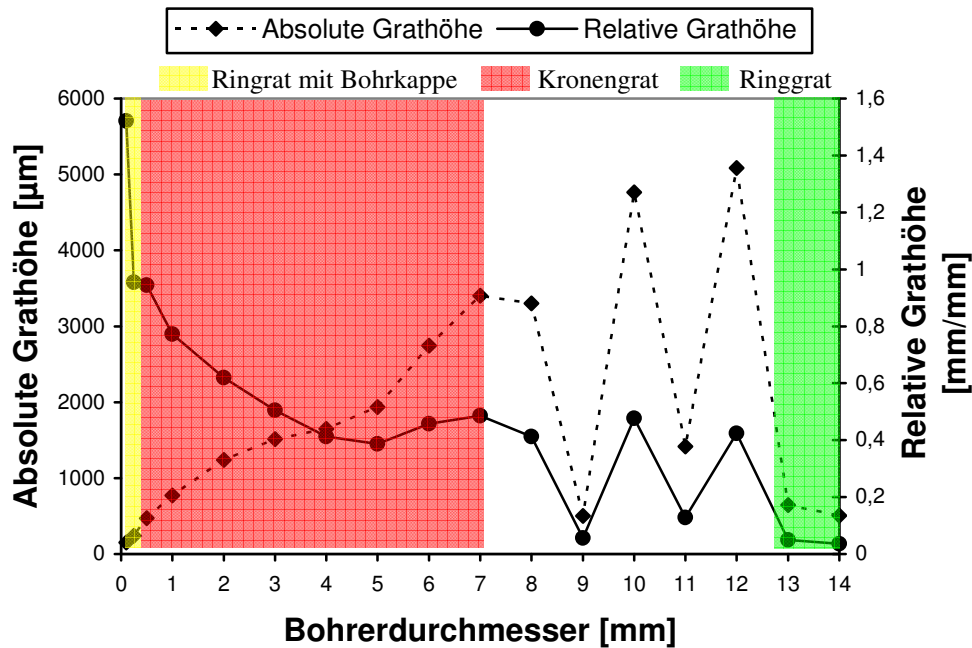


Bild 19: Relative und absolute Grathöhen über das gesamte Bohrerspektrum ($f_z = d/60$)

Die absolute Grathöhe stieg bis zum Durchmesser $d = 6$ mm mit steigenden Bohrerdurchmesser an. Nachfolgend kam es, wie im vorangegangenen Kapitel 3.2.1 beschrieben, zu einem Wechsel vom Kronengrat zum Ringgrat, welcher relativ gering von der Grathöhe ist. Der zackige Verlauf im Bereich von $6 \text{ mm} < d < 13 \text{ mm}$ beschreibt den instabilen Bereich bei welchem beide Grattypen auftraten.

Der Verlauf der Grathöhe in Relation zum Bohrerdurchmesser zeigte ein anderes Gesamtbild. Es wird deutlich, dass für Bohrerdurchmesser $d < 5$ mm es zu einem exponentiellen Anstieg der relativen Grathöhe mit abnehmenden Bohrerdurchmesser kam. Dabei weist der Verlauf der Grathöhe eine hohe Ähnlichkeit mit dem Verlauf der spezifischen Schnittenergie, welche von Abiouridouane [13] in diesem Größenbereich untersucht wurde, auf. Der Bereich $d > 5$ mm zeichnete sich durch einige lokale Maxima und Minima aus, welche im Zusammenhang mit dem mehrfach beschriebenen Grattypwechsel stehen. Ab $d > 12$ mm kam es zu einem weiteren Abfall der relativen Grathöhe, was eine Annäherung an null vermuten lässt.

Neben den Grathöhen wurden auch deutliche Veränderungen beim Grattyp im Mikrobereich detektiert.

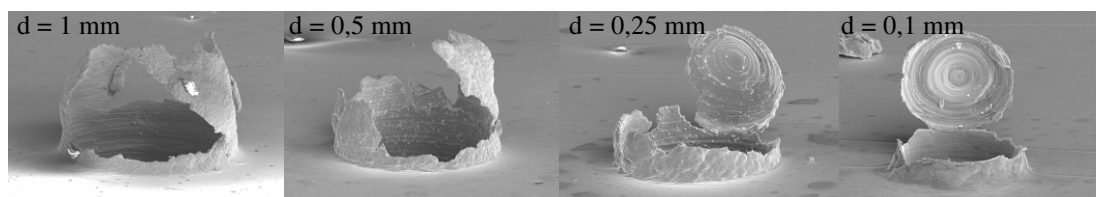


Bild 20: Gratgestalt bei den Mikrobohrungen

Bei den Gratformen der Mikrobohrungen war zu erkennen, dass es mit Abnahme des Bohrerdurchmessers es zu einer Umwandlung im Grattyp kam. Bei der Bohrung mit $d = 1$ mm trat ein Kronengrat mit relativ großen Gratflügeln auf. Mit Abnahme des Bohrerdurchmessers wurden diese Gratflügel größer. Bei der Bohrung mit $d = 0,1$ mm bildete sich eine Bohrkappe, welche an einem relativ großen Ringgrat anhaftete. Es kam demzufolge zur Umbildung vom Kronengrat zum Ringgrat mit anhaftender Bohrkappe. Dies ist bereits im Bild 19 anhand von Farbhinterlegungen im Diagramm grafisch verdeutlicht.

Wie schon bei dem Vergleich der Grathöhen im Mikro- und Makrobereich beschrieben, waren die Grathöhen in Relation zum Bohrerdurchmesser beim Mikrobohren sehr groß. Die einzelnen Abbildungen im Bild 20 zeigen ergänzend dazu, dass relativ viel Gratmaterial am Bohraustritt anhaftete und damit im Bereich der Mikrobearbeitung das Gratproblem an Bedeutung gewinnt.

Eine exakte Vermessung der Schneidkantenradien ist derzeit bei Mikrobohrwerkzeugen nicht mit konventionellen Messmitteln möglich, wodurch keine expliziten Aussagen zum Einfluss des Verhältnisses λ_{r_z/r_β} auf die Mikrobohrgratbildung möglich sind. Aufnahmen des Bohrers mittel REM, ließen Schneidkantenradien im Bereich von $r_\beta = 1-2 \mu\text{m}$ erkennen, jedoch beruht dieser Wert nicht auf einer Messung.

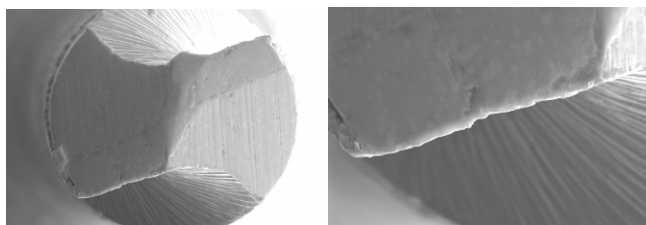


Bild 21: REM-Aufnahmen des Bohrers $d = 0,25$ mm

3.3.2 Mechanismen bei der Mikrogratbildung

Ergänzend zu den Untersuchungen der Gratbildungsmechanismen mittels Hochgeschwindigkeitsaufnahmen bei der makroskopischen Bearbeitung wurden im Mikrobereich Aufnahmen mit einem Lichtmikroskop während der Mikrobohrgratbildung durchgeführt. Die Aufnahmefrequenz war mit $f = 25 \text{ Hz}$ relativ gering jedoch waren 5-6 Bilder während der Gratbildung möglich, wodurch ein Einblick in die Gratbildungsmechanismen gewährt wurde.

Im Bild 22 ist eine Bilderserie der Bohrgratbildung bei $d = 0,25 \text{ mm}$ dargestellt.

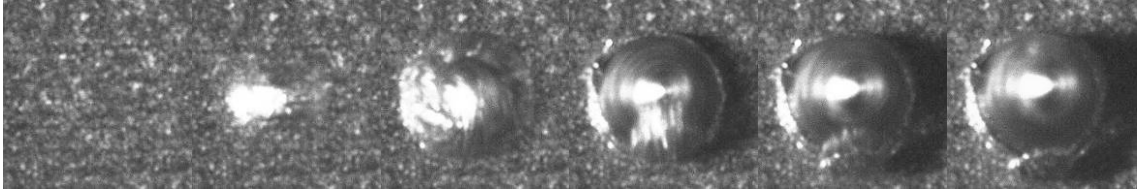
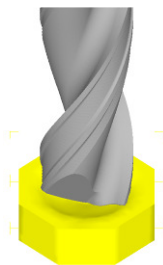


Bild 22: Gratbildungsmechanismen bei $d = 0,25 \text{ mm}$

Die Aufnahmen zeigen, dass bei der Gratbildung bei Mikrobohrungen, ähnlich wie bei den makroskopischen Bohrungen, sich erste Deformationen im Bereich der Bohrermitte bildeten. Darauf folgend entstand eine Bohrkappe aus stark deformiertem Material. Diese wurde, analog wie bei der Ringgratbildung (siehe Kapitel 3.2.2) im Bereich der äußeren Bohrerhauptschneiden durchbrochen. Jedoch wurde die Bohrkappe nicht abgetrennt wie bei Ringgrat, sondern hier zur unteren Seite aufgebogen. Ergänzend dazu bildete sich neben der anhaftenden Bohrkappe noch ein ausgeprägter Gratring, welcher verhältnismäßig groß war. Dieser Gratring ist auch sehr gut in den Abbildungen in Bild 20 im vorangegangenen Kapitel erkennbar.

4 Numerische Berechnung der Bohrgratbildung

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein numerisches Modell zur Bohrgratbildung geschaffen. Dabei wurde die Simulationssoftware DEFORM™3D V6.1 angewandt. Das Modell wies folgende Eingangsparameter auf:



- Starrer Bohrer ($d = 5 \text{ mm}$) mit Temperaturkalkulation,
- Werkstücknetz 30000 Elemente, adaptive Netzanpassung,
- Werkstoffe und Geometrien wie im Experiment,
- Reibung $\mu = 0,25$ und Wärmeübergang im Werkzeugkontakt,
- $v_c = 25 \text{ m/min}$, $f_z = 0,2 \text{ mm}$;

Bild 23: Simulationssetup des Bohrgratbildungsmodells

Die Größe des simulierten Werkstückes wurde so gewählt, dass der Bohrer zweieinhalb Umdrehungen bis zum Austritt zurücklegt. Dadurch war bei den gewählten Netzparametern eine Mindestanzahl von zirka 50000 Berechnungsschritten notwendig. In Kombination mit der hohen Anzahl an erforderlichen Netzelementen entstanden sehr große Datenumfänge, welche zu berechnen waren. Trotz modernster Rechentechnik konnten dabei Rechenzeiten im Bereich von einem Monat nicht unterschritten werden.

Die Simulation stellte ein unersetzliches Werkzeug zur Prozessanalyse dar, da Einblicke in den Prozess und die Messung von zusätzlichen Ergebnisgrößen ermöglicht wurden. So konnte der Übergang von Zerspanungsprozess zum Gratformprozess analysiert werden und die These des veränderten Materialentfernungsmechanismus (Kapitel 3.2.2) untermauert werden. Dazu sei auf die Veröffentlichung

des Autors bei der CIRP Conference of Modelling of Maching Operation 2008 in Washington verwiesen [14].

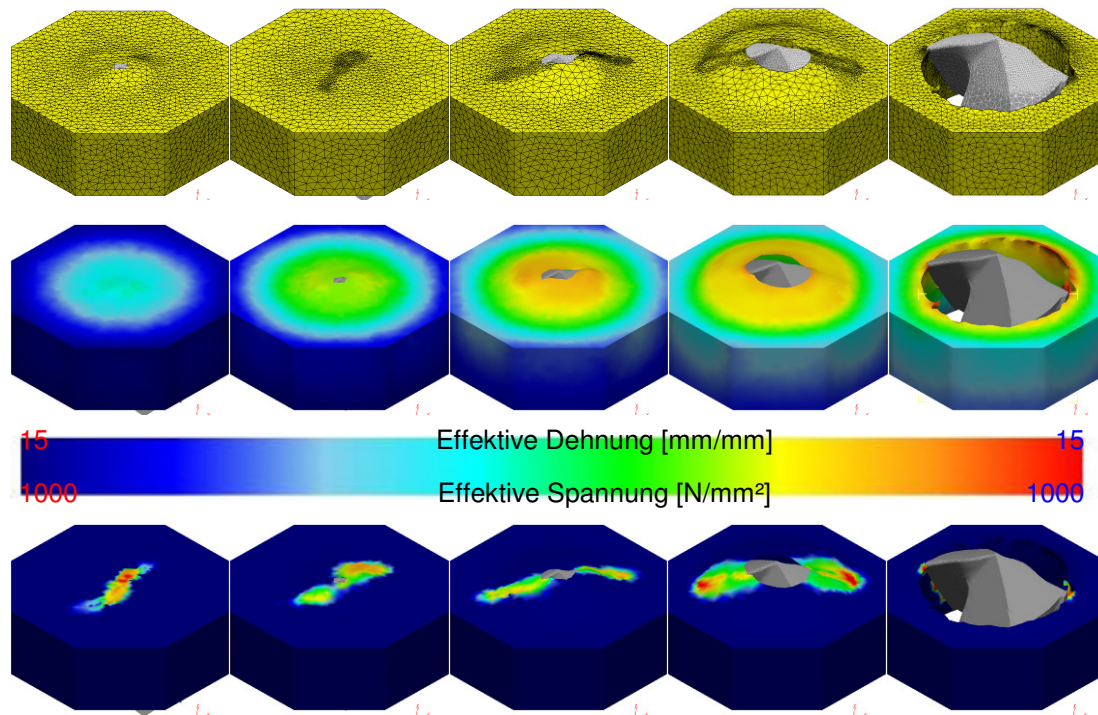


Bild 24: Ergebnisse der Bohrgratsimulation

Die Ergebnisse im Bild 24 zeigen, dass die Span- und Ringgratbildung in Relation zum Experiment numerisch sehr gut wiedergegeben wurde. Die errechneten Gratbildungsmechanismen stimmten im hohen Maße mit den im Experiment per HGK aufgezeichneten überein. Die Verteilung der effektiven Dehnung wies qualitativ hohe Analogien zu den Erkenntnissen aus der Gefügeanalyse zum äquivalenten Grat auf.

Ein noch zu lösendes Problem stellte das unerwünschte Löschen von kleinen Geometrien, wie beispielsweise kleinen Ringgratelementen, durch die notwendigen häufigen Netzneugenerierungen dar. Der in der Simulationssoftware implizierte Ansatz des lokalen Neuvernetzens brachte dabei keine Verbesserung. Des Weiteren stellten die radialen Risse bei der Kronengratbildung noch ein Problem dar, da durch die langen Rechenzeiten eine Variantenkalkulation zur Untersuchung und Anpassung von Werkstoff- sowie Rissmodellen nicht sinnvoll möglich war.

5 Schlussfolgerung

Die Skalierung von Zerspanprozessen in den Mikrobereich führt zum Auftreten von Größeneffekten, wie beispielsweise den Anstieg der spezifischen Schnittkräfte beim Bohren [13] und der auftretenden minimalen Spantiefe. Diese Größeneffekte wirken sich ebenfalls auf die Gratbildung aus.

Grundlagenuntersuchungen am orthogonalen Schnitt zeigten beim Downscalen des Modellversuchs einen deutlichen Kräfteknick im Verlauf des Verhältnisses von Schnitt- zu Drangkraft.

Auf diesen theoretischen Untersuchungen aufbauend wurden experimentelle Versuche und numerische Berechnungen zur Gratbildung beim häufig angewendeten Bearbeitungsverfahren durchgeführt. Dabei zeigte sich ein signifikanter Einfluss des Verhältnisses $\lambda_{fz/r\beta}$, welcher auch die minimale Spantiefe direkt beeinflusst, auf den entstehenden Grattyp und die Grathöhe. Die Untersuchung der Verformungsmechanismen und Kraftverläufe wies nach, dass die unterschiedlichen Grattypen auf

verschieden Materialentfernungsmechanismen beruhen. Diese unterschiedlichen Entfernungsmechanismen spiegelten sich in der Temperaturverteilung während der Gratbildung und im Momentenverlauf des Schnittkraftsignals wider.

Die Skalierung des Bohrprozesses vom Makro- in den Mikrobereich zeigte einen deutlichen Anstieg der relativen Grathöhe und einen weiteren Wechsel des Grattypes im Mikrobereich. Es kam demzufolge bei der Skalierung des Bohrprozesses ($f_z = d/60$) von $d = 14$ mm zu $d = 0,1$ mm zu einem Wechsel vom Ringgrat zum Kronengrat (bei $d < 13$ mm) und nachfolgend zum Ringgrat mit anhaftender Bohrkappe (bei $d < 0,25$ mm). Die Grathöhe wies dabei in ihrem Verlauf eine hohe Ähnlichkeit mit dem Verlauf der spezifischen Schnittkraft bei der Skalierung des Zerspanungsprozesses auf. So kommt es zu einem exponentiellen Anstieg der relativen Grathöhe mit abnehmendem Bohrerdurchmesser.

Ergänzend zu den experimentellen Untersuchungen wurde ein numerisches dreidimensionales Modell zur Bohrgratbildung geschaffen. Dieses Modell ermöglichte Untersuchungen zur Umbildung der Materialentfernungsmechanismen beim Beginn der Gratbildung sowie die Analyse von schwer messbaren Ergebnisgrößen. Vergleiche mit synchronen Experimenten zeigten für die Gratbildungsmechanismen ein hohes Maß an Übereinstimmung.

Die hier aufgeführten Ergebnisse verdeutlichen, dass bei der Skalierung des Bohrprozesses Größeneffekte bei der Gratbildung auftreten. Die im Mikrobereich auftretenden Grate sind in Typ und Größe deutlich verschieden zu den auftretenden Graten in der konventionellen Zerspanung. Die größeren Geometrien und die fehlenden Gratentfernung- und Minimierungsmethoden zeigen den zukünftigen Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

6 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG für die finanzielle Unterstützung des Forschungsprojektes Ne 568/41-1 „Modellierung, Simulation und experimentelle Verifikation von Größeneinflüssen bei der Gratbildung“. Ergänzend dazu möchten die Autoren den Kollegen im Schwerpunktprogramm 1138 „Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen“ für die gute Zusammenarbeit sowie die hilfreiche Diskussion der Forschungsergebnisse danken.

7 Literatur

- [1] DIN ISO 13715, Technische Zeichnungen - Werkstückkanten mit unbestimmter Form - Begriffe und Zeichnungsangaben, 2000
- [2] Link, R., Gratbildung und Strategien zur Gratreduzierung bei der Zerspanung mit geometrisch bestimmter Schneide, Dissertation, RTWH Aachen, 1992
- [3] Kotschenreuther, J., Empirische Erweiterung von Modellen der Makrozerspanung auf den Bereich der Mikrozerspanung, Dissertation Universität Karlsruhe (TH), Forschungsberichte aus dem wbk Institut für Produktionstechnik, Band 141, 2008
- [4] Weinert, K., Kahnis, P., Untersuchung von Größeneinflüssen auf den Mikro-Fräsprozess, „Prozessskalierung“ im Rahmen des SPP 1138 Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen entstanden, Hrsg. F. Vollertsen, Strahltechnik Band 27, BIAS Verlag, 2005, ISBN: 3-933762-17-0, 2005, S. 253-260
- [5] Kahnis, P., Weinert, K., Analysis of Tool Influence on Downscaled Milling Process, Proceedings of the 2nd International Conference on New Forming Technology, Bremen, BIAS-Verlag, 2007, S.481-489

- [6] Filiz, S., Conley, C. M., Wasserman, M., Ozdganlar, O.B, An Experimental Investigation of Micro-machinability of Copper 101 using tungsten Carbide micro-endmills, International Journal of Machine Tools and Manufacture, Band 47, Volume 7/8, 2006, S. 1088-1100
- [7] Lee, K., Dornfeld, D., Micro-burr Formation and Minimization through process control, Precision Engineering, Volume 29 (2005) 2, 2005, S. 246-252,
- [8] Stoll, A., Leopold, J., Neugebauer, R., Modellierung von Größeneinflüssen bei der Gratbildung, „Prozessskalierung“ im Rahmen des SPP 1138 Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen entstanden, Hrsg. F. Vollertsen, Strahltechnik Band 27, BIAS Verlag, 2005, ISBN: 3-933762-17-0, S. 241-252, , 2005
- [9] Schäfer, F., Entgraten in der Fertigungstechnik, Grundlagen des Entgratens, wt-Z. ind. Fertigung 63, 1973, S.692-696
- [10] Severt, W., Gratminimale Auslegung von Zerspanprozessen auf Basis rechnergestützter Datenauswertung und FEM-Simulation, Dissertation, RTWH Aachen, Shaker-Verlag, 1997
- [11] Min, S., Kim, J., Dornfeld, D., Development of a Drilling Burr Control Chart for Low Alloy Steel, AISI 4118, Journal of Material Processing Technology, Volume 113, 2001,S 4-9,
- [12] Hoff, M., Analyse und Optimierung des Bohrprozesses, Dissertation, RWTH Aachen, 1986
- [13] Abiouridouane, M., Skalierungseffekte beim Mikrobohren mit Wendelbohrern in Stahl, Arbeitskreistreffen des SPP1138 Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen, ISSN 1860-8698, 2008
- [14] Neugebauer, R., Schmidt, G., Dix, M., Simulation of a Self-deburring Drilling Process based on Local Material Modification, Proceedings of the 11th CIRP Conference of Machining Operations, Gaithersburg, USA, National Institute of Standards and Technology, 2008