

Simulation von Span- und Gratbildung zur Qualitätserhöhung beim Bohren

Neugebauer, R.; Schmidt, G.; Dix, M., Hoyer, K.

Abstract

Der starke Wettbewerbsdruck im Maschinenbau führt zu immer höheren Anforderungen an die Technologie. Sehr gute Fertigungsqualität, große Prozessstabilität, hohe Verfügbarkeit und Anpassungsfähigkeit an schnell wechselnde Produkte und Losgrößen sind dabei Grundforderungen, die bereits während der Prozessentwicklung zu berücksichtigen sind. Virtuelle Techniken bieten die Möglichkeit, Prozesse und Fertigungsabläufe vorab zu simulieren und so Prozesse zu optimieren und die Einführung neuer Prozessketten zu beschleunigen. Im Beitrag werden ausgewählte Schwerpunkte der am Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik (IWU) betriebenen Arbeiten zur Spanbildungssimulation am Beispiel des Bohrens dargestellt.

1 Einleitung

Ein Kernproblem bei der ganzheitlichen Simulation spanender Bearbeitungsprozesse ist die Modellierung der Vorgänge bei der Spanentstehung selbst. Dabei können die auf Werkstück, Werkzeug und Maschine wirkenden thermischen und mechanischen, statischen und dynamischen Belastungen ermittelt werden. Diese bestimmen die grundlegenden Faktoren wie beispielsweise Bearbeitungsqualität, Energiebedarf, Werkzeugverschleiß, Arbeitssicherheit und damit die Effizienz des gesamten Prozesses.

Durch numerische Simulationen können die sehr komplexen Zusammenhänge transparent gemacht werden, um bereits in der Produktionsvorbereitung die Auswirkung einzelner Einflüsse zu überprüfen und so den Bearbeitungsprozess zu optimieren.

Darüber hinaus bilden die so ermittelten mechanischen und thermischen Belastungen die Basis zur Simulation des Werkzeug- und Maschinenverhaltens. Dabei wer-

den in der Regel berechnete Zerspankraftkomponenten und Prozesstemperaturen genutzt, um genauigkeits- und sicherheitsrelevante Verformungen und Beanspruchungen an Werkzeug, Werkstück, Vorrichtungen und Maschine zu bestimmen. Eine in sich geschlossene ganzheitliche Simulation der gegenseitigen Rückwirkungen von Prozess und Maschine stößt jedoch wegen der sehr komplexen Zusammenhänge noch auf Schwierigkeiten. Gekoppelte Simulationen sind erst in Ansätzen möglich [1], wobei mindestens eines der beiden Teilmodelle stark vereinfachende Annahmen enthält. Die Methode der Finiten Elemente (FEM), oft auch in Verbindung mit analytischen und empirischen Ansätzen, ist dabei ein bewährtes Simulationswerkzeug.

Derartige Simulationsmodelle berücksichtigen beispielsweise die Eigenschaften der realen Steuerung [2], den Einfluss der Fräsbahn und die von der relativen Lage von Werkzeug und Werkstück abhängigen Prozesskräfte [3], [4].

Durch NC-Simulation werden Kollisionen vermieden, Bearbeitungsabläufe optimiert und Anlaufzeiten verkürzt ([2], [5]). Dabei handelt es sich jedoch meist um eine reine Bewegungssimulation ohne Berücksichtigung der statischen und dynamischen Verformungseigenschaften von Maschine, Werkzeug und Werkstück, obwohl diese ganz wesentlich den Zerspanungsprozess und dessen Ergebnisse, wie Maß- und Formgenauigkeit, beeinflussen.

Die Verbindung mit CAD-Modellen ermöglicht eine enge Verbindung mit dem jeweiligen Produkt. Mit Hilfe verschiedener Simulationen können Bauteile fertigungsrecht konstruiert, die Fertigungstechnologie auf das Produkt abgestimmt und Planungsfehler in der Prozessentwicklung vermieden werden. Dadurch ergibt sich ein hohes Potential zur Einsparung von Kosten und Zeit ([6], [7], [8]). Nach [9] lassen sich damit Verkürzungen im Produktionsanlauf von mehr als 30% und ein um bis zu 40% verringerter Planungsaufwand realisieren.

Das erklärte Ziel einer umfassenden numerischen Simulation spanender Bearbeitungsprozesse setzt zunächst einmal die Beschreibung des mechanischen und thermischen Verhaltens von Werkzeug und Werkstück unter den prozessspezifischen Belastungen voraus. Alle weiterführenden Untersuchungen bauen dabei auf der Kontinuumsmechanik und Thermodynamik des Spanbildungsvorganges an der unmittelbaren Wirkstelle auf. Dies soll am Beispiel zweier technologischer Zielstellungen zur Qualitätsverbesserung beim Bohren und Ausbohren näher erläutert werden.

2 Kompensation prozessbedingter Werkzeug- und Werkstückverformungen

Effektivität und Prozesssicherheit sowie Qualität der erzeugten Bauteile werden während der spanenden Bearbeitung durch das Zusammenwirken von Werkzeugmaschine, Werkzeug, Werkstück und technologischen Parametern sowie weiteren, von außen einwirkenden Störgrößen, bestimmt. Durch statische und dynamische elastische Auslenkungen und Verformungen von Maschine, Werkzeug und Werkstück unter der Wirkung von periodisch wechselnder Zerspankraft und Spannkraften entstehen am Werkstück Maß- und Formabweichungen.

Die Kompensation dieser Verformungen ist zunehmend Gegenstand der Forschung. Dabei werden auch die speziellen Probleme bei der Bearbeitung von hochfesten und Verbundwerkstoffen einbezogen. Die Verbesserung der Bauteilqualität von Verbundwerkstoffen durch angepasste Prozessauslegung ist beispielsweise Gegenstand der in [10] beschriebenen Arbeiten. Mit dem Bauteilverzug durch Spannkraften beschäftigen sich [11] und [12]. Selbst Verformungen, die nicht fertigungsbedingt sind, sondern erst bei der späteren Montage auftreten, können durch definiert herbeigeführte Maß- und Formabweichungen bei der spanenden Bearbeitung kompensiert werden. Dies geschieht mittels einer geeigneten Vorrichtung, die in das Bauteil definierte Kräfte einleitet, welche den später zu erwartenden Montageverzug simulieren [13]. Das so bearbeitete Bauteil weist dann im entlasteten Zustand eine von der Sollgeometrie abweichende Form auf, während am fertig montierten Bauteil wieder die gewünschte verzugsfreie Endform entsteht. Eine andere Möglichkeit besteht darin, auf der Grundlage vorausberechneter Form- und Lagefehler gezielt Formelemente so herzustellen, dass sich erst im bei der Montage vorgespannten Zustand die Sollgeometrie ergibt. Beide Kompensationsverfahren setzen jeweils die genaue Kenntnis des zu kompensierenden Bauteilverzuges voraus.

Die thermische Bauteilverformung beim Spanen und die daraus resultierenden Bauteilfehler werden in [14] und [15] untersucht. Die Kompensation der elastischen Werkzeugabdrängung steht dagegen in [3] und [4] im Vordergrund.

Bild 1 zeigt die Simulation der Werkzeugverformung am Beispiel des Versatzes einer Wendeschneidplatte in einem Fräswerkzeug bei hohen Drehzahlen, wodurch Arbeitssicherheit und Produktqualität beeinträchtigt werden können. Neben der rein elastischen Verformung müssen dabei auch Relativverschiebungen zwischen einzelnen Werkzeugkomponenten in Verbindung mit Reibungseinflüssen berücksich-

tigt werden. Der elastische Schneideckenversatz bei rein elastischer Fliehkraftaufweitung ist bei dem hier betrachteten massiv ausgeführten Fräskopf mit 2 bis 3 μm relativ gering, liegt aber bei hochpräzisen Bearbeitungsaufgaben bereits im Bereich der geforderten Bauteilgenauigkeit und ist damit nicht mehr vernachlässigbar. Beim Überschreiten einer kritischen Belastung löst sich außerdem die Schneidplatte aus dem Sitz. Ein sicheres und exaktes Arbeiten ist dann nicht mehr gewährleistet. Darüber hinaus besteht eine akute Bruchgefahr der Klemmelemente, wodurch einzelne Werkzeugkomponenten und Bruchstücke mit hoher kinetischer Energie freigesetzt werden können. An schlanken und lang auskragenden Werkzeugen sind durch zusätzliche Biegebeanspruchungen noch wesentlich größere Versatzwerte zu erwarten. Simulationsrechnungen sind ein gut geeignetes Mittel zur Ableitung von Kompensationsmaßnahmen und zur Abschätzung zulässiger Grenzbelastungen von Werkzeugen.

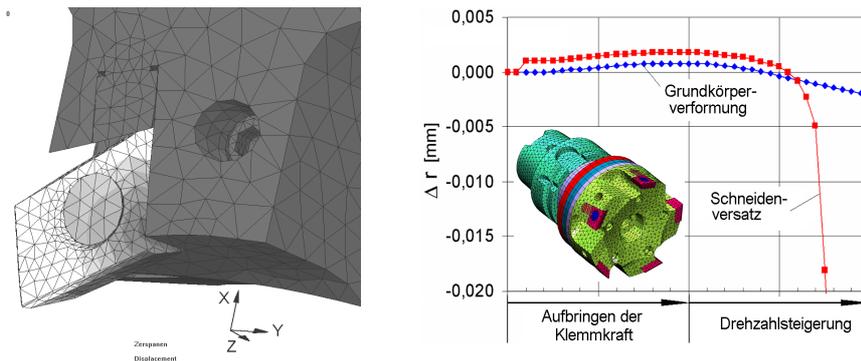


Bild 1: Mittels FEM berechneter Versatz einer Wendeschneidplatte durch Klemmkraft und Fliehkraft im Vergleich zur rein elastischen Verformung des Werkzeuggrundkörpers

Insbesondere bei der zunehmend angewandten Trockenbearbeitung kann auch die Werkstückerwärmung zu nicht vernachlässigbaren Maß- und Formabweichungen am wieder abgekühlten Teil führen. Probleme entstehen vor allem dann, wenn komplex geformte Bauteile in einer Bearbeitungsfolge mit einer Vielzahl von Bohrungen versehen werden und es dabei zur Akkumulation und zu einer ungleichmäßigen Verteilung der entstehenden Prozesswärme kommt. Bild 2 zeigt die Wärmeverteilung in einem Testwerkstück nach der Herstellung aller Bohrungen in einer bestimmten Reihenfolge [16].

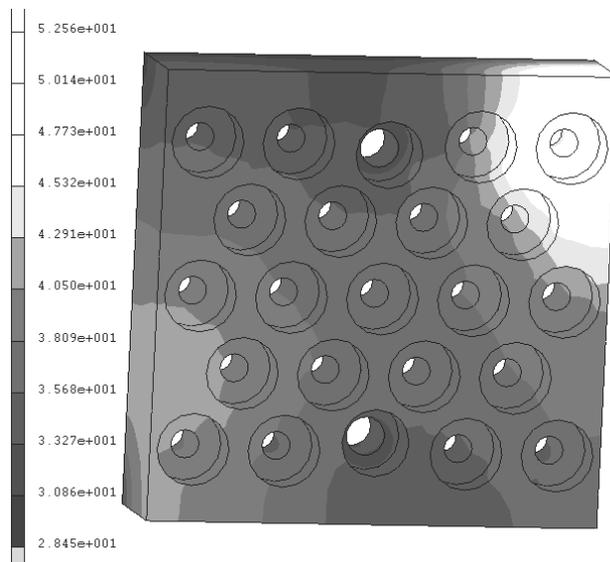


Bild 2: Temperaturfeld in °C in einem Testwerkstück nach dem Bohren in einer Bearbeitungsfolge

Durch diese Temperaturdifferenzen während der Bearbeitung kommt es zur lokal unterschiedlichen Wärmeausdehnungen im Bauteil und die entstehenden Bohrungen weisen nach dem Abkühlen Maß- und Formabweichungen auf.

Während die Simulation elastischer Verformungen hauptsächlich bei sehr großen und komplex geformten Werkstücken an rechentechnische Grenzen stoßen kann, ist bei thermisch gekoppelten Analysen vor allem die Bestimmung der temperaturabhängigen mechanischen und thermischen Modellparameter schwierig. Gemessene und in der Literatur verfügbare allgemeine Werkstoffkenngrößen führen in Verbindung mit einem FEM-Modell nicht zwangsläufig zu einer adäquaten Abbildung des realen Prozesses. Vielmehr führt meist erst ein iterativer Abgleich zwischen Modell und Realprozess zum Erfolg ([16], [17]). Dabei sind Modellparameter so zu bestimmen, dass das vereinfachte Modell die relevanten Zustandsgrößen des realen Prozesses in guter Näherung nachbildet.

Zur Ermittlung der thermischen Verformungen sind vor allem der Wärmeeintrag durch den Spanbildungsprozess und der Wärmeübergang in Kühlmedienströme, angrenzende Maschinenkomponenten und die Umgebungsluft von Bedeutung.

Der Wärmeeintrag ergibt sich aus der im Spanbildungsprozess entstehenden Umformwärme. Dabei wird der größte Teil der Wärmeenergie mit den Spänen abgeführt [18].

Die dreidimensionale numerische Simulation eines Bohrvorganges stellt noch immer eine Herausforderung sowohl an die Modellbildung selbst, wie auch an die eingesetzte Rechentechnik dar. Bild 3 zeigt das Modell eines Bohrvorganges ins Volle mit Hilfe des Programms DEFORM™. Die Berechnung nahm auf einem Arbeitsplatz-PC in insgesamt 50.000 Simulationsschritten einen ununterbrochenen Berechnungszeitraum von mehr als drei Wochen in Anspruch. Dies unterstreicht die Notwendigkeit einer größtmöglichen Modellreduzierung auf die für das Berechnungsziel relevanten Werkstückbereiche und Einflussparameter. Das gezeigte Modell beschreibt nur einen Teil des Bohrers und die unmittelbare Bohrungsumgebung. Das Werkzeug wurde als starr angesehen, während für das Werkstückmaterial ein plastisches Stoffgesetz mit Ver- und Entfestigung aus der DEFORM-Datenbasis Verwendung fand. Für komplexe Bauteile und Fertigungsfolgen mit mehreren Bohrungen ist eine solche FEM-Simulation noch nicht mit vertretbarem Aufwand realisierbar. Wirkende Zerspankraftkomponenten und die umgesetzte Umformenergie können aber in guter Genauigkeit berechnet werden. In Bild 4 ist der berechnete Verlauf der Vorschubkraft der Messkurve eines entsprechenden Experimentes gegenüber gestellt.

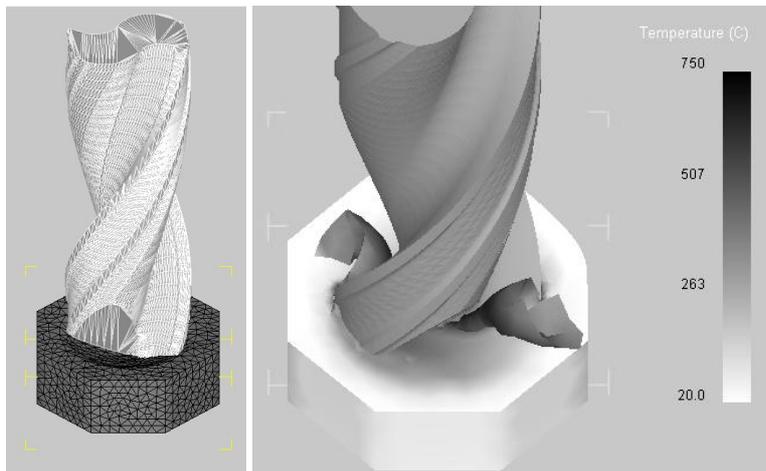


Bild 3: Dreidimensionales FEM-Modell des Bohrvorganges

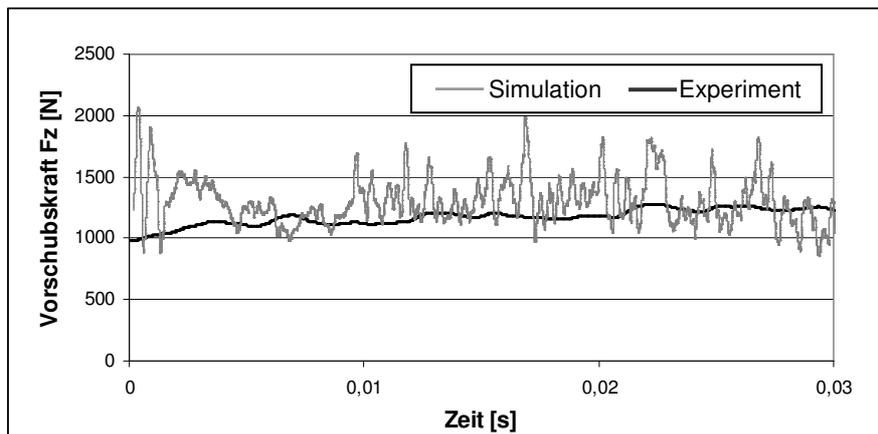


Bild 4: Vergleich der berechneten und der gemessenen Vorschubkraft (0,01s → 1 Bohrerumdrehung)

Durch Vergleiche der Abkühlkurven an ausgewählten Stellen eines Testwerkstückes bei experimentellen Untersuchungen (s. Bild 1) und numerischen Simulationsrechnungen wurden die Wärmeübergangszahlen zu Umgebungsluft und Werkstückauflage bestimmt.

Ziel der Untersuchungen war die Ermittlung des Einflusses thermischer Bauteilverformungen während der spanenden Bearbeitung sowie der Einfluss der Bearbeitungsfolge. In Bild 5 werden in stark überhöhter schematischer Darstellung Form- und Lageabweichungen von Bohrungen in der Folge thermischer Bauteilverformungen gegenübergestellt.

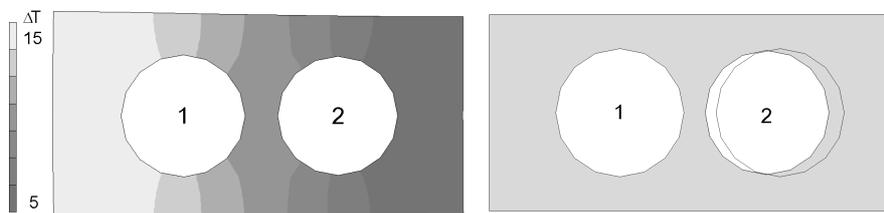


Bild 5: Thermisch bedingte Form- und Lageabweichungen von Bohrungen (links: Temperaturverteilung und Verzug nach Fertigung der Bohrung 1 und 2 im erwärmten Zustand, rechts: Lageabweichung der Bohrung 2 nach Werkstückabkühlung)

Bei der Herstellung der Bohrung 1 wird das Bauteil erwärmt. Der dadurch entstehende thermische Verzug führt dazu, dass die anschließend mit den Sollkoordinaten eingebrachte Bohrung 2 nach dem Abkühlen einen Lagefehler aufweist. Abhängig von der Bauteilgeometrie und der Materialverteilung kann es außerdem zu Kreisformabweichungen kommen. Im oben gezeigten Beispiel mit zwei Bohrungen \varnothing 12 mm erreicht der Lagefehler der Achse von Bohrung 2 einen Wert von 2,7 μm . Der Durchmesser der Bohrung 2 ist außerdem im abgekühlten Zustand um 1,5 μm zu klein.

Durch die Simulation des Bohrprozesses können mögliche Bearbeitungsfolgen und Schnittparameter verglichen werden, so dass eine Optimierung bezüglich der Form- und Maßhaltigkeit des abgekühlten Bauteiles möglich wird. Der Lagefehler in Bild 5 könnte kompensiert werden, indem die Bauteilausdehnung berücksichtigt und die Bohrung 2 um 1,5 μm versetzt eingebracht wird.

3 *Beeinflussung der Gratbildung*

Die Gratbildung beim Bohreraustritt stellt in der Regel einen unerwünschten Effekt dar. Entstehende Grate schränken die Werkstückqualität ein, erschweren Montageoperationen und bergen durch ihre Scharfkantigkeit Verletzungsrisiken. Im späteren Betrieb des Bauteiles abfallende Gratbestandteile können verstärkten Verschleiß bewirken und durch Verstopfen von Medienzuführungen sogar zu schwerwiegenden Schäden führen. Grate stellen deshalb meist ein Risiko dar und müssen in zusätzlichen Bearbeitungsschritten entfernt werden, wodurch ein beträchtlicher Zeit- und Kostenaufwand verursacht wird.

Weitaus günstiger ist deshalb die Vermeidung der Gratentstehung oder das Ablösen des Grates im Zerspanungsprozess. Der Grat entsteht während der Zerspanung im randnahen Bereich durch plastisches Fließen des zu bearbeiteten Werkstoffes vor der Schneidenspitze. Wesentliche Einflussmöglichkeiten auf die Gratbildung mit dem Ziel, die plastische Verformung des Werkstoffes möglichst gering zu halten, bestehen durch folgende Parameter:

- Werkzeuggeometrie (Schneidenform, Schärfe, Winkel),
- Schneidstoff (Substrat und Beschichtung, geringe Reibung),
- Vorschub während des Werkzeugaustrittes (niedrige Passivkraft),
- Effektivität der Kühlung

Ebenfalls sehr wichtig ist die konstruktive Gestaltung des Bauteiles:

- Form und Lage der Bohreraustrittsfläche am Werkstück (Austrittswinkel),
- Materialauswahl.

Zur Gratvermeidung bzw. -minimierung sind demzufolge die Analyse des plastischen Materialflusses und die Klärung der Zusammenhänge zwischen den Ausgangsparametern mit dem sich bildenden Grat erforderlich. Da eine rein empirische Herangehensweise durch Zerspanversuche sehr zeit- und kostenaufwändig ist, sind Simulationsrechnungen mit der FEM eine günstige und effektive Alternative. Des Weiteren ermöglicht die Simulation Einblicke und Messungen in Bereiche, die im Experiment verfahrensbedingt nicht erreichbar sind.

Bild 6 zeigt verschiedene Stadien der Gratbildung am Beispiel eines Modellversuches und die entsprechende Simulation mittels FEM.

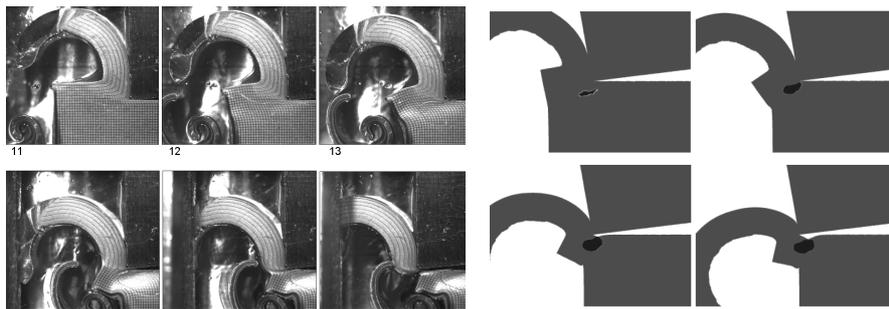


Bild 6: Gratbildung im Modellversuch mittels Visioplastizität (ebener Deformationszustand, links) und als numerische FEM-Simulation (Maxima des hydrostatischen Druckes, rechts)

In Simulationsrechnungen konnte beispielsweise gezeigt werden, dass Spanform und Gratausbildung durch gezielte Parametervariationen beeinflussbar sind (s. Bild 7).

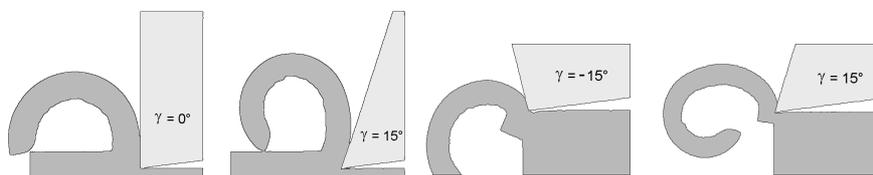


Bild 7: Einfluss von Zerspanparametern auf die Span- und Gratform am Beispiel des Spanwinkels γ

Je stärker das plastische Fließen ausgeprägt ist, umso größer ist die Neigung zur Gratbildung. Eine erhöhte Sprödigkeit des Werkstoffes kann dagegen zum Ablösen des Grates während des Bohreraustritts genutzt werden. Ein möglicher Ansatzpunkt zur Gratvermeidung ist damit die gezielte Beeinflussung der plastischen Verformung des Werkstoffes im Bereich des Werkzeugaustritts. Dies kann beispielsweise durch Kühlung der Austrittsfläche und einer damit verbundenen Versprödung des Werkstoffes im Bereich der Gratbildung erfolgen. Durch gezielte Änderung von Bohrerzahl und Vorschub vor dem Bohreraustritt ist die entstehende Umformwärme steuerbar, was zu einer verringerten Aufheizung des Materials und damit zu reduziertem plastischen Fließen führt. Eine dritte Variante ist die definierte Versprödung des gespannten Werkstoffes im Bereich des Bohreraustritts durch lokales Härten. Dies setzt die Zugänglichkeit des Bohreraustritts voraus, lässt sich aber bei Einsatz des Laserstrahlhärtens sehr genau dosieren. Für die letztgenannte Variante werden im Folgenden numerische Simulationen vorgestellt und mit den Ergebnissen experimenteller Untersuchungen verglichen.

3.1 Numerische Simulation der Gratbildung

Die Simulation der Gratentstehung erfolgte mit dem Programmsystem DEFORM™. Bild 8 zeigt das 3D-Modell während der Bohrgratbildung im Vergleich mit Hochgeschwindigkeitsaufnahmen des äquivalenten Bohrexperiments. Da Berechnungen der Spanbildung sehr rechenzeit- und speicherintensiv sind, waren Modellvereinfachungen nötig, um den Rechenaufwand in vertretbaren Grenzen zu halten. Simuliert wurde nur der Spanbildungsvorgang auf dem letzten halben Millimeter vor dem Durchbruch der Werkzeugspitze. Das Werkzeug mit einem Durchmesser von 5 mm wurde dabei als starr betrachtet. Als Werkstückmaterial diente Stahl C45E. Das verwendete Stoffgesetz berücksichtigt plastisches Materialverhalten mit Ver- und Entfestigung in mechanisch-thermisch gekoppelter Berechnung. Das FEM-Netz unterliegt einer adaptiven Netzverfeinerung mit einer minimalen Elementgröße von 0,05 mm.

Sowohl im Experiment als auch bei den numerischen Simulationen ist erkennbar, dass ab dem vollständigen Ausbilden der Bohrkappe das Material nicht mehr zerspannt wird, sondern der Bohrer den Werkstoff ähnlich wie beim Umformen verdrängt (s. Bild 8). Dadurch ist es möglich, das Endstadium der Gratbildung mit einem vereinfachten und damit weniger rechenzeitintensiven achssymmetrischen zweidimensionalen Modell näher zu untersuchen.

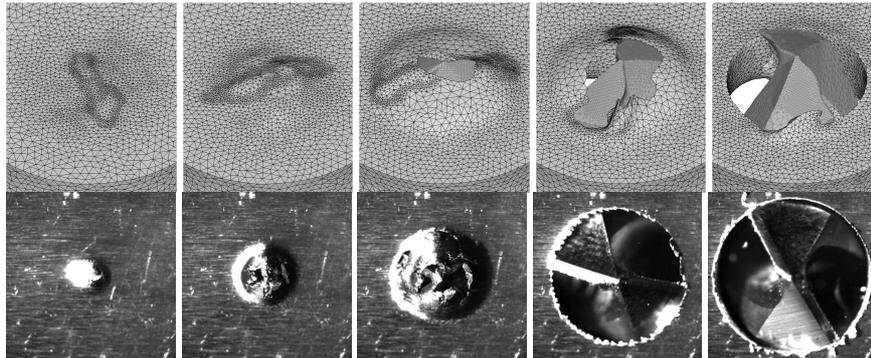


Bild 8: Visueller Vergleich des Gratbildungsvorgangs in Simulation und Experiment

Ausgangspunkt ist dabei ein Zustand, in dem das Werkzeug bereits beginnt aus dem Werkstück auszutreten. Das Werkzeug wird nun axial aus der Bohrung geschoben und drückt dabei den vor dem Bohrer verbliebenen Werkstoff als Grat nach außen. Die zu diesem Zeitpunkt vorliegenden Geometrien wurden aus dem Längsschnitt des dreidimensionalen Werkstückmodells ermittelt und als Ausgangszustand in das zweidimensionale Modell übertragen (Bild 9).

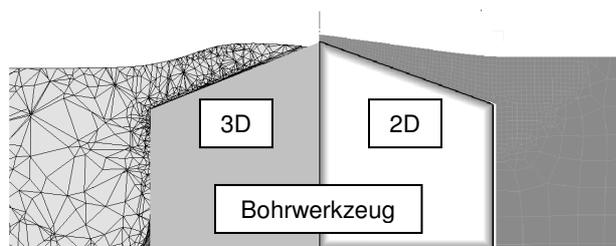


Bild 9: Zweidimensionales Modell der Gratbildung

Die so berechneten Verformungen des Werkstoffes unterscheiden sich je nach Härtezustand im Austrittsbereich. Bei geeigneter Wahl der Härteparameter kommt es zur Risseinleitung im Übergangsbereich zwischen gehärtetem und ungehärtetem Material und nachfolgend zum Abtrennen des gesamten Werkstoffüberhangs vor der Werkzeugspitze, so dass ein gratfreier Bohrungsrand entsteht (Bild

10, links). Bei zu groß oder zu klein gewählter Härtelinse verläuft die Materialtrennung nicht im Grenzbereich und ein gratiger Werkstücküberhang entsteht (Bild 10, rechts).

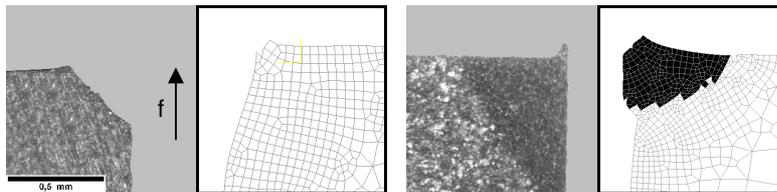


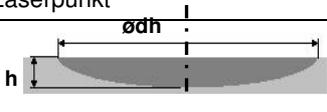
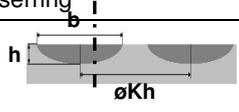
Bild 10: Berechnete Gratformen im Vergleich mit experimentellen Ergebnissen

Die numerische Variantenrechnung ermöglicht eine schnelle kostengünstige Ermittlung der zielführenden Härteverteilung und zeigt ablaufende Deformationsvorgänge auf. Dies ermöglicht die Herstellung von gratfreien Bohrungen mittels einer vorgelagerten Laserhärtung.

3.2 Experimentelle Überprüfung

Als Werkstoff diente der Stahl C45E. Die Härtezone an der Bohreraustrittsstelle war entweder punkt- oder ringförmig gestaltet (s. Tabelle 1). Im Querschliff (Bild 11) ist der gehärtete Querschnitt gut erkennbar. Die dunklere Martensitstruktur hebt sich vom umgebenden perlitisch-ferritischen Gefüge deutlich ab.

Tabelle 1: Form der Härtezone und erreichte Härtewerte

Laserpunkt				Laserring		
						
	P1	P2	P3		R1	R2
ødh [µm]	5250	6680	7150	øKh [µm]	7000	5000
h[µm]	1000	1400	1800	h[µm]	300	575
				b[µm]	2500	4500

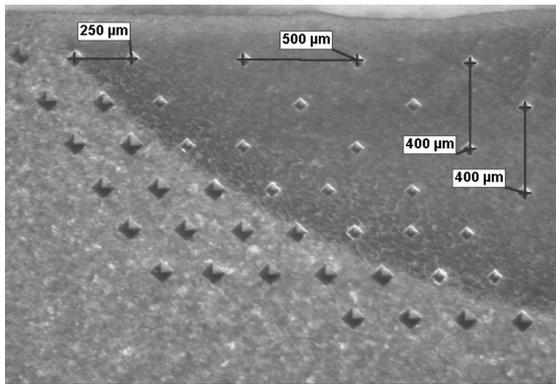
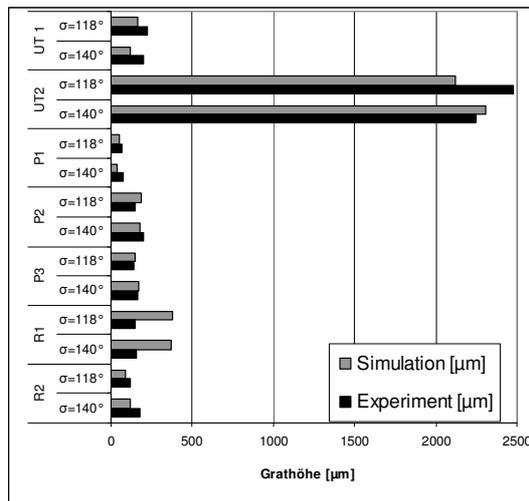


Bild 11: Querschliff durch eine Härtelinse mit Mikrohärteeindrücken

Zum Einsatz kam ein Nd:YAG-Laser des Typs Rofin Sinar DY22. Beim Härten wurde der Effekt der Selbstabschreckung genutzt. Dabei wird die zu härtende Zone durch den Laserstrahl schockartig erhitzt und kühlt durch die Wärmeabführung ins umgebende Material sehr schnell ab, so dass kein zusätzliches Kühlmedium notwendig ist. Die Größe der Härtelinse und die erreichte Härte lassen sich durch die Laserparameter mit guter Reproduzierbarkeit steuern.



UT1 unbehandelt
(WZ-Standzeitbeginn)
UT2 unbehandelt
(WZ-Standzeitende)
P1 Laserpunkt $t=1$ s
P2 Laserpunkt $t=1,5$ s
P3 Laserpunkt $t=2$ s
R1 Laserring $\varnothing 7$ mm
R2 Laserring $\varnothing 5$ mm
 σ Bohrerspitzenwinkel

Bild 12: Vergleich zwischen experimentell erzeugten Grathöhen und Simulationsergebnissen

Bei der Wahl der Härteparameter wurde berücksichtigt, dass die Härtezone möglichst klein sein sollte, um das Spanen im harten Bereich weitgehend zu vermeiden, da dies eine hohe Verschleißbeanspruchung für die Werkzeugschneiden bedeutet.

In Bild 12 sind die gemessenen maximalen Grathöhen h_b den numerisch berechneten Werten gegenüber gestellt. Dabei zeigt sich eine gute Übereinstimmung.

Wie die Simulation bereits zeigte, entsteht im Fall des Härtepunktes P1 eine annähernd gratfreie Bohrung. Mit einer Grathöhe $h_b < 80 \mu\text{m}$ ist der Grat nicht mehr taktil messbar und verursacht keine Qualitätsprobleme mehr.

4 Zusammenfassung

Der Wettbewerbsdruck im Maschinenbau ist sehr hoch. Um sich gegenüber ausländischen Wettbewerbern erfolgreich am Markt behaupten zu können, müssen Entwicklungszeiten und -kosten bei hoher Erzeugnisqualität gesenkt werden. Die vorausschauende Planung und Optimierung künftiger spanender Fertigungsprozesse ist dazu ein wichtiger Schritt. Numerische Simulationen sind ein mächtiges Werkzeug zur Klärung von Zusammenhängen zwischen Prozessparametern, Erzeugniseigenschaften sowie der Kosten- und Energieeffizienz von Fertigungsprozessen. Auch im Rahmen der sogenannten „Digitalen Fabrik“ als Instrument zur vorausschauenden Planung künftiger Fertigungsprozesse ist die Virtualisierung einzelner spanender Prozessabschnitte eine wesentliche Voraussetzung zur effektiveren Prozessgestaltung. Obwohl gerade auf dem Gebiet der Zerspanungssimulation noch Forschungsbedarf besteht, kann doch in vielen Fällen bereits heute eine gute Abschätzung von günstigen Bearbeitungsparametern und von Tendenzen im Prozessverhalten bei Parameteränderungen erfolgen. Am Beispiel des Bohrens konnte dies durch eine gute Übereinstimmung zwischen Experiment und Simulation gezeigt werden.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft für die Förderung der Arbeiten zur Gratsimulation im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 1138 „Modellierung von Größeneinflüssen bei Fertigungsprozessen“.

Literatur

- [1] Witt, S.; Brecher, C.; Steinicke, M.; Piendl, S.; Marsolek, J.: Konzepte zur Kopplung von Zerspanungsprozess- und Maschinensimulation und deren mögliche Umsetzung. Abschlusskolloquium des BMBF-Verbundprojektes SindBap, Aachen, 24. Mai 2007
- [2] Produktives Trockentraining. *Fertigung*, 34(2006)9, S. 20-22
- [3] Pritschow, G.; Korajda, B.; Franitza, T.: Kompensation der Werkzeugabdrängung. *Werkstattstechnik online*, 95(2005) Heft 5, S. 337-341
- [4] Tönshoff, H. K.; Storr, A.; Selle, J.; Heusinger, S.: Präventive Fehlerkompensation beim Schlichtfräsen. *wt Werkstattstechnik*, 91(2001) Heft 7, S. 398-403
- [5] Linner, S.: Reduzierung der Inbetriebnahmezeiten von Fertigungsanlagen durch Einsatz von Simulationswerkzeugen. *Wiss. Berichte des Forschungszentrum Karlsruhe Technik und Umwelt*, 213(2006), S. 69-76
- [6] Dombrowski, U.; Tiedemann, H.: Digitale Vernetzung von Produktentwicklung und Fabrikplanung. *Wiss. Schriftenreihe des Inst. Für Betriebswirtschaft und Fabrikssysteme*, Bd. 7(2003) S. 32-46
- [7] Geckler, D.; Rehnelt, C.: Die „Digitale Fabrik als neue Wissensdrehzscheibe zwischen OEM und Zulieferer. *Projektmanagement aktuell*, Bd. 15(2004) Heft 1, S. 26-30
- [8] Westkämper, E.: Digitale und virtuelle Fabriken. *FTK - Stuttgarter Fertigungstechnisches Kolloquium*, (2003), S. 159-180
- [9] Menges, R.: Frühzeitige Produktbeeinflussung und Prozessabsicherung. *Die Digitale Fabrik ist der Schlüssel zum Erfolg. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 100(2005)1/2, S. 25-31
- [10] Denkena, M.; Reichstein, M.; Boehnke, D.: Prozessauslegung für die Zerspannung von Zylinderkurbelgehäusen in Aluminium-Grauguss-Mischbauweise., in *Vortragstexte des 15. Symposiums Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde*, 6.-8. April 2005, Kassel, S. 541-549
- [11] Brinksmeier u.a.: Analyse des mechanischen und thermischen Belastungskollektive als Verzugspotential bei der spanenden Bearbeitung. *SFB 570: Verzugsbeherrschung in der Fertigung, Arbeitsbericht zum Teilprojekt A4*, Universität Bremen, IWT (2003)
- [12] Pingfa Feng: Berechnungsmodell zur Ermittlung von Spannkräften bei Backenfuttern. *Dissertation*, TU Berlin, 2003

- [13] Heuberger, A.; Nowak, D.: *Kompensation zu erwartender Verformungen bei der Montage*. EP 20030793662, (2005)
- [14] Weinert, K.; Grünert, S.: *Thermische Simulation des Bohrprozesses*. wt Werkstattstechnik online, 97(2007) Heft 1/2, S. 30-34
- [15] Sukaylo, V. u. a.: *Numerical simulation of thermally induced workpiece deformation in turning when using various cutting fluid applications*. J. of Material Processing Technology, 167(2005), S. 408-414
- [16] Dürr, H.; Hoyer, K.; Hanke, M.: *Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung*. VDI-Zeitschrift, 147(2005)11/12, S. 32-34
- [17] Weinert, K.; Grünert, S.: *Wärmeverteilung beim Bohren*. wt Werkstattstechnik online, 96(2006)10, S. 778-781
- [18] Tönshoff, K. H.; Denkena, D.: *Spanen: Grundlagen*. Springer, 2004
- [19] Leopold, J.; Schmidt, G.; Hoyer, K.; Freitag, A.: *Modeling and simulation of burr formation - state-of-the-art and future trends*. 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Chemnitz, 10.-11.5. 2005, Proceedings, ISBN 3-937524-24-X, pp. 73-83
- [20] Freitag, A.; Sohrmann, C.; Leopold, J.: *Simulation of burr formation*. 8th CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations, Chemnitz, 10.-11.5. 2005, Proceedings, ISBN 3-937524-24-X, pp. 641-650