

Wendeltiefbohren ■ nichtrostender, austenitischer Stahl ■ Modellierung und Simulation

# Kurze Späne beim Tiefbohren

Das Institut für spanende Fertigung der TU Dortmund hat Untersuchungen beim Wendeltiefbohren eines hochfesten Stahls vorgenommen, um die Spanbildung durch die Wahl geeigneter Schnittparameter so zu beeinflussen, dass kurze, prozessgünstige Späne entstehen.

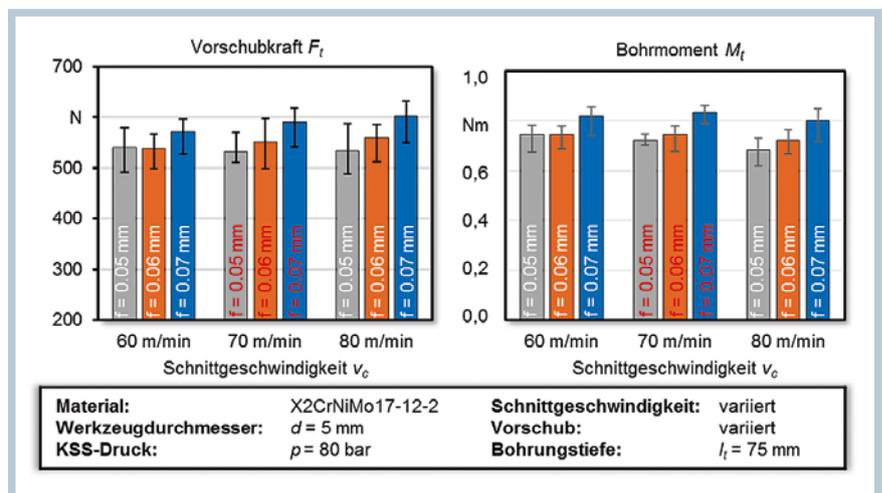
von Ekrem Oezkaya, Sebastian Michel und Dirk Biermann

Das Tiefbohren wird zur Herstellung von Bohrungen mit einem großen Länge-zu-Durchmesser-Verhältnis (L/D) eingesetzt. Zu den wichtigsten Faktoren, die den Tiefbohrprozess begrenzen, zählen die Werkzeugbelastungen, die Spanbildung und der Spanabtransport. Der Einsatz von Kühlschmierstoffen (KSS) spielt dabei eine entscheidende Rolle [1, 2]. Neben den Herausforderungen der Zerspaltung höherfester Werkstoffe kommen beim Bohren mit kleinsten Durchmessern auch die limitierten Werkzeugsteifigkeiten und das ungünstige Verhältnis von realisierbaren Spannungsdicken zur Schneidkantenverrundung hinzu. Die Spanbildung ist ein komplexer Prozess, sodass detaillierte Analysen schwierig sind und einen hohen experimentellen Aufwand erfordern.

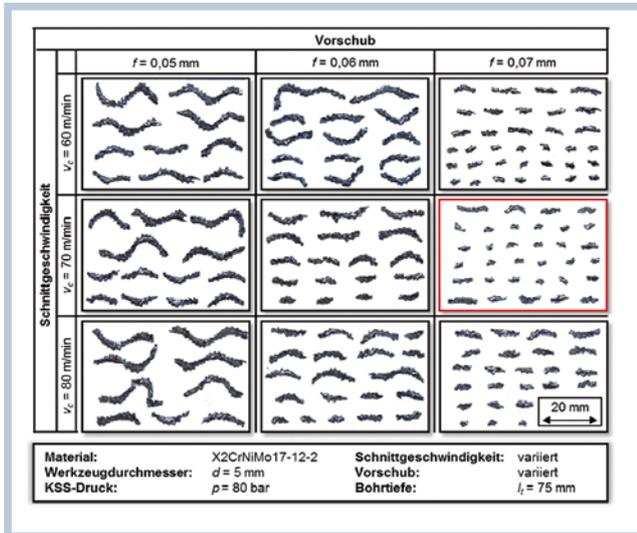
Um Prozesse besser verstehen und optimieren zu können, besteht in der Forschung und Entwicklung die Notwendigkeit, diese mit hoher Modellqualität beschreiben zu können. Derzeit ist jedoch eine vollständige Beschreibung der Spanbildung beim Wendeltiefbohren nicht möglich. In dieser Studie wird daher das Wendeltiefbohren von X2CrNiMo17-12-2 untersucht. Ziel ist es, die Spanbildung durch die Wahl geeigneter Schnittparameter so zu beeinflussen, dass kurze, prozessgünstige Späne entstehen, die während des Prozesses leicht aus der Bohrung entfernt werden können. Die Untersuchungen erfolgen unter Variation der Schnittgeschwindigkeit und des KSS- »



1 Versuchsaufbau (© ISF Dortmund)



2 Experimentelle Ergebnisse der mechanischen Belastung (© ISF Dortmund)



### 3 Experimentelle Ergebnisse der Spanformanalyse

(© ISF Dortmund)

## INFORMATION & SERVICE



### INSTITUT

Institut für spanende Fertigung (ISF)  
 der TU Dortmund

44227 Dortmund

Tel. +49 231 755-2784

[www.isf.de](http://www.isf.de)

### LITERATUR

[1] D. Schnabel, E. Oezkaya, D. Biermann, P. Eberhard: Modeling the motion of the cooling lubricant in drilling processes using the finite volume and the smoothed particle hydrodynamics methods. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 329 (2017), S. 369–395, DOI: 10.1016/j.cma.2017.09.015

[2] E. Oezkaya, N. Beer, D. Biermann: Experimental studies and CFD simulation of the internal cooling conditions when drilling Inconel 718. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 108 (2016), S. 52–65, DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2016.06.003

[3] I. Uzun, K. Aslantas, E. Oezkaya, A. Cicek: 3D numerical modelling of micro-milling process of Ti6Al4V alloy and experimental validation. *Advances in Materials and Processing Technologies* (2017), S. 250–260, DOI: 10.1080/2374068X.2016.1247343

[4] D. Biermann, M. Kirschner, D. Eberhardt: A novel method for chip formation analyses in deep hole drilling with small diameters. *Production Engineering*, 8 (2014) 4, S. 491–497, DOI: 10.1007/s11740-014-0566-7

[5] E. Oezkaya, D. Biermann: Neue Einblicke durch Strömungsanalyse in der Spanbildungszone. *NAFEMS Magazin*, 42 (2017) 2, S. 42–68

### DIE AUTOREN

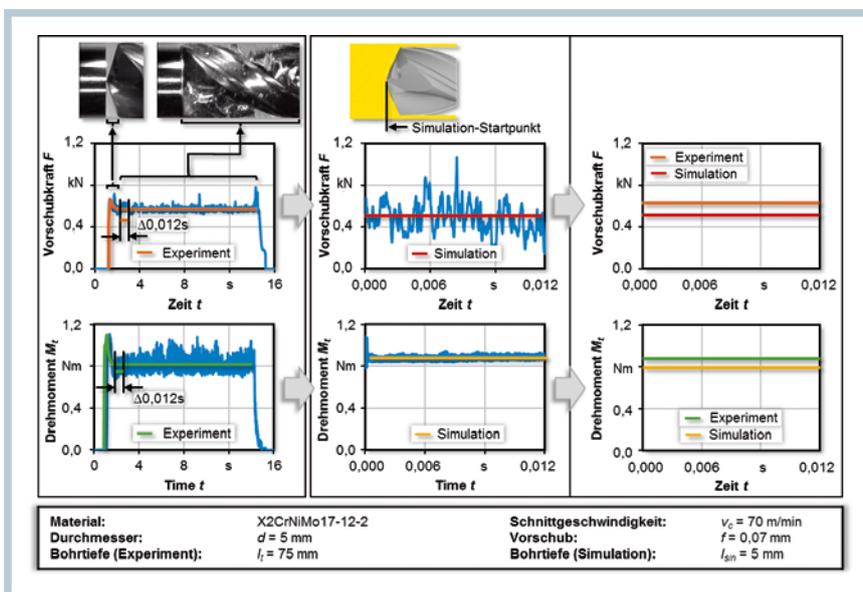
**Dr.-Ing. Ekrem Oezkaya** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am ISF [oezkaya@isf.de](mailto:oezkaya@isf.de)

**Sebastian Michel M.Sc.** ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am ISF [michel@isf.de](mailto:michel@isf.de)

**Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann** ist Leiter des ISF an der TU Dortmund [biermann@isf.de](mailto:biermann@isf.de)

### PDF-DOWNLOAD

[www.werkstatt-betrieb.de/5765817](http://www.werkstatt-betrieb.de/5765817)



### 4 Validierung der Kräfte und Drehmomente (© ISF Dortmund)

Drucks. Für die Modellierung und Simulation wird die Finite-Elemente-Methode eingesetzt, die sich für relativ einfache Bearbeitungsprozesse, wie beispielsweise Drehen, etabliert hat [3]. Die Spanbildung wurde reproduziert und dreidimensional simuliert. Die experimentellen Untersuchungen lieferten die Eingangsdaten für den Simulationsprozess und dienen der Validierung.

#### Mechanische Belastung und Spanbildung

Für die Versuche wurden Grundbohrungen mit einem Durchmesser  $d = 5 \text{ mm}$  und einer Bohrtiefe  $l = 75 \text{ mm}$  in zylindrische Werkstücke aus dem Werkstoff X2CrNiMo17-12-2 (1.4404) eingebracht (Bild 1). Die bei Durchgangsbohrungen beim Austritt des Werkzeugs auftretenden Veränderungen der mechanischen und thermischen Belastungen wurden somit verhindert. Die eingesetzten Wendeltiefbohrer waren mit TiAlN beschich-

tet. Die Versuche wurden auf der horizontalen Mikrotiefbohrmaschine des Typs ML 200 der Firma TBT durchgeführt. Zur Ermittlung günstiger Spanformen und entsprechender Schnittparameter wurden die Schnittgeschwindigkeit ( $v_c = 60/70/80 \text{ m/min}$ ), die Vorschubgeschwindigkeit ( $f = 0,05/0,06/0,07 \text{ mm}$ ) und der KSS-Druck ( $p = 40/80/120 \text{ bar}$ ) in jeweils drei Stufen variiert. Als KSS kam Tiefbohröl der Firma Motorex mit einer Viskosität  $\nu = 10,9 \text{ mm}^2/\text{s}$  ( $40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) zum Einsatz. Alle Versuche wurden zur Absicherung der Messergebnisse pro Parameterkombination zweimal wiederholt.

Die Vorschubkraft und das Bohrmoment wurden mit einem 4-Komponenten-Dynamometer des Typs 9272 der Firma Kistler und einem Ladungsverstärker des Typs 5070 gemessen. Die Späne, die während der Bearbeitung entstehen, wurden für die Analyse in regelmäßigen Intervallen aufgefangen und gesammelt. Die Spanbildung konnte mithilfe der Hochge-

	Werkzeug		Werkstück
<b>Material</b>	WC-Co	<b>Material</b>	X2CrNiMo17-12-2
		<b>Reibung; hybrid</b>	Coulomb = 0.2; Shear = 1
<b>Vorschubgeschw.</b>	$v_f = 5.2 \text{ mm/s}$	<b>Wärmeübertragungskoeffizient</b>	$h = 45 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$
<b>Elemente</b>	175.000	<b>Elemente</b>	300.000
<b>Objekttyp</b>	Starr	<b>Objekttyp</b>	Plastisch

**Tabelle: Simulationsrandbedingungen für Werkzeug und Werkstück** (© ISF Dortmund)

schwindigkeitsspannungsanalyse unter Verwendung des Tiefbohröls visualisiert werden [4].

Bei den Versuchen zeigten sich in Bezug auf den KSS-Druck nur geringfügige Unterschiede in der mechanischen Belastung. Der Druck von  $p = 40 \text{ bar}$  führte dabei zu insgesamt etwas geringeren Vorschubkräften als der Druck von  $p = 80 \text{ bar}$ ; bei einem Druck von  $p = 120 \text{ bar}$  ließ sich eine leichte Zunahme der Kräfte beobachten. Die Analysen von Vorschubkraft und Bohrmoment in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit und der Vorschubgeschwindigkeit erfolgen daher exemplarisch bei einem KSS-Druck von  $p = 80 \text{ bar}$  (Bild 2). Der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Vorschubkraft und das Bohrmoment ist dabei als sehr gering einzustufen. Mit steigendem Vorschub nehmen jedoch sowohl die Vorschubkraft als auch das Bohrmoment zu.

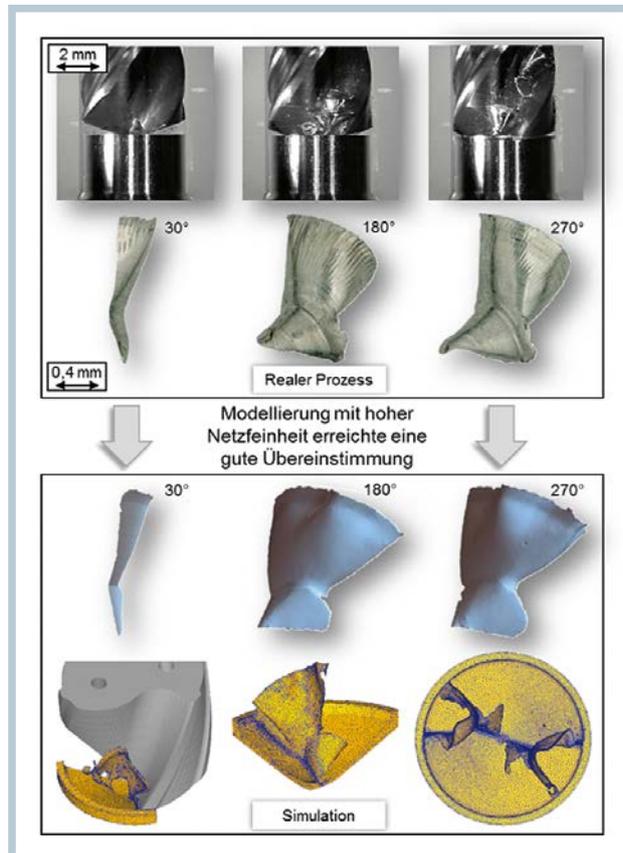
Bild 3 zeigt, dass die Spanformen stark von den Vorschubgeschwindigkeiten abhängen. Bei niedrigen Vorschubgeschwindigkeiten bildeten sich kontinuierliche lange Späne, die den Spanabtransport behindern. Die höheren Kräfte bei höheren Vorschüben begünstigen die Kaltverfestigung des Werkstoffs und damit den Spanbruch. Es entstanden kurze Späne, die leicht aus der Bohrung abtransportiert werden konnten. Die Spanformen wurden nur minimal von den Schnittgeschwindigkeiten beeinflusst. Die Auswertung der Versuche bei KSS-Drücken von  $p = 40 \text{ bar}$  und  $p = 120 \text{ bar}$  bestätigt die Zusammenhänge. In den experimentellen Untersuchungen konnten kurze und prozessgünstige Späne mit

einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 70 \text{ m/min}$  und einem Vorschub von  $f = 0,07 \text{ mm}$  erreicht werden, sodass diese als Eingangsgrößen für die FEM-Simulation dienten.

### 3D-FEM-Spanbildungssimulation

Für die FEM-Simulation wurden die verwendeten Werkzeuge digitalisiert und in ein dreidimensionales Modell umgewandelt. Die Digitalisierung erfolgte mit einem Alicona InfiniteFocus G5. Das gemessene 3D-Oberflächenprofil wurde mit der Software Geomagic überarbeitet und in die CAD-Software Solid Works importiert. Nach der Modellgenerierung wurde das 3D-CAD-Modell für die FEM-Simulation exportiert und die geometrische Kinematik des Werkzeugeingriffs mit mathematischen Methoden berechnet und konstruiert [5].

Der kinematische Abdruck des Werkzeugs auf dem Bohrungsgrund wurde »



## 5 Validierung der Spanformen

(© ISF Dortmund)

zusammen mit einer konstruierten Bohrungswand und dem Werkzeug in die FEM-Software »DEFORM 3D« importiert und modifiziert. Zur Minimierung der Rechenzeit wurde das Modell des Wendeltiefbohrer auf eine Simulationslänge von  $l_{\text{sim}} = 5 \text{ mm}$  reduziert. Der Bereich der Kontaktzone wurde sehr fein vernetzt, sodass die hohen Verformungen und die Spanbildung exakt nachgebildet werden konnten. Als konstanter Reibungskoeffizient wurde der Wert 0,2 angenommen. Die Simulationsrandbedingungen sind in der Tabelle aufgelistet.

Bild 4 zeigt die Validierung der Simulationsergebnisse mit den experimentellen Werten. Die Kräfte und Drehmomente wurden über die Zeit analysiert. Nach kurzen Ausschlägen im Moment des Werkzeugeintritts treten relativ konstante Vorschubkräfte und Drehmomente auf. Daher wurde in einem Zeitfenster von  $t = 0,012 \text{ s}$  der Mittelwert im konstanten Bereich ermittelt. Dieses Zeitfenster entspricht dabei genau einer Werkzeugumdrehung. Die Ergebnisse der Simulation zeigen nahezu identische Werte mit nur marginalen Unterschieden.

Für die Validierung der Spanformen wurden unterschiedliche Spanbildungspositionen betrachtet (Bild 5). Die Begrenzung des Werkzeugdrehwinkels auf  $270^\circ$  resultiert aus den noch vertretbaren Simulationsrechenzeiten. Die Simulationsergebnisse zeigen eine hohe Überein-

stimmung mit den real gebildeten Spanformen, was die Modellqualität bestätigt.

### Einsicht in die Spanbildung

Die experimentellen Ergebnisse dienen als Eingangsgrößen und zur Validierung der Simulation. Fazit: Vorschubkraft und Bohrmoment sind stark vom Vorschub anhängig. Ein signifikanter Einfluss der Schnittgeschwindigkeit oder des KSS-Drucks auf die Vorschubkraft und das Bohrmoment liegt nicht vor. Bei einem KSS-Druck von  $p = 80 \text{ bar}$ , der Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 70 \text{ m/min}$  und der Vorschubgeschwindigkeit von  $f = 0,07 \text{ mm}$  konnten die günstigsten Spanlängen erzielt werden. Um die Werkzeugeingriffssituation bei der Modellierung exakt abzubilden, wurde ein kinematischer Abdruck des Werkzeugs am Bohrgrund erstellt. Die Validierung der simulierten mechanischen Belastung und der Spanbildung zeigte eine hohe Übereinstimmung mit den experimentellen Werten. Die gute Modellqualität ermöglichte einen ersten tiefgehenden Einblick in den komplexen Spanbildungsprozess und eröffnet im Bereich des Wendeltiefbohrrens eine Basis für Untersuchungen zur Prozessoptimierung.

### Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens (BI 498/80). ■