

Finite-Elemente-Simulation in der Zerspangung

Modellbasierte Nachbildung erlaubt schärfere Analysen

Dank der Flexibilität der Finite-Elemente-Methode (FEM) lässt sich der Zerspanvorgang umfassender beschreiben und messtechnisch schwer oder gar nicht zu Erfassendes besser abbilden als mit experimentellen Untersuchungen.

VON BEREND DENKENA,
LUIS DE LEON UND MAYA OTTE

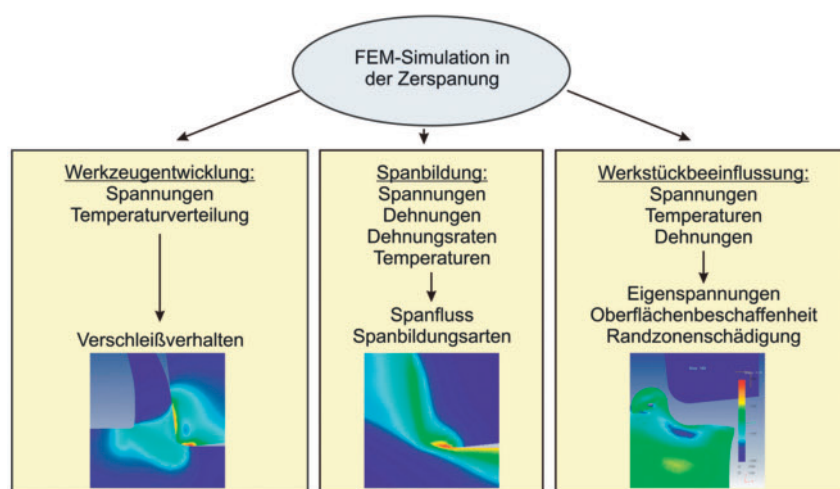
→ Die Modellierung und Simulation von Fertigungsprozessen sind ein wesentlicher Schritt zur Reduzierung von Fertigungszeit und -kosten. Simulationen als Entwicklungswerkzeuge dienen präventiv zur Qualitätssicherung und Optimierung und können somit Risiken und Versuchsaufwand beim Produktionsstart minimieren. Die Finite-Elemente-Methode (FEM) ist ein numerisches Verfahren, um insbesondere ingenieurtechnische Fragen näherungsweise zu lösen, und inzwischen weit verbreitet. Das Berechnungsgebiet wird zunächst in eine beliebig große Anzahl »endlich« (finit) kleiner Elemente unter-

teilt. Innerhalb jedes finiten Elements wird die Lösung gesucht, die jedoch nur auf wenigen Teilgebieten ungleich null ist. Die

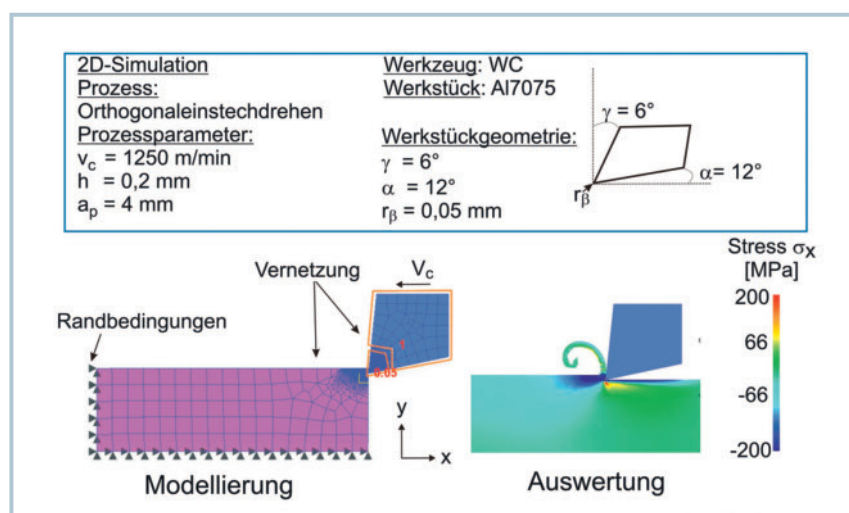
Lösung über dem gesamten Lösungsgebiet berechnet sich aus einem häufig sehr großen, jedoch dünn besetzten, linearen Gleichungssystem, das sich ergibt, wenn die Elementmatrizen aufaddiert werden [1, 2].

In der Zerspangung bildet die Finite-Elemente-Simulation (FE-Simulation) den Zerspanprozess mit mathematischen Modellen nach und liefert als Ergebnis Temperaturen, Dehnungen, Dehnraten, Spannungen und Kräfte, die für beliebige Orte und Zeitpunkte im Prozessverlauf berechnet werden können. Die FE-Simulationen werden zur Unterstützung experimenteller Versuche in verschiedenen Bereichen eingesetzt (Bild 1).

In der Werkzeugentwicklung spielt die Leistungsfähigkeit, das heißt Werkzeugverschleiß und Produktivität, eine entscheidende Rolle, da dadurch Produktivität und Qualität im gesamten Fertigungsprozess



1 FE-Simulation in der Zerspangung

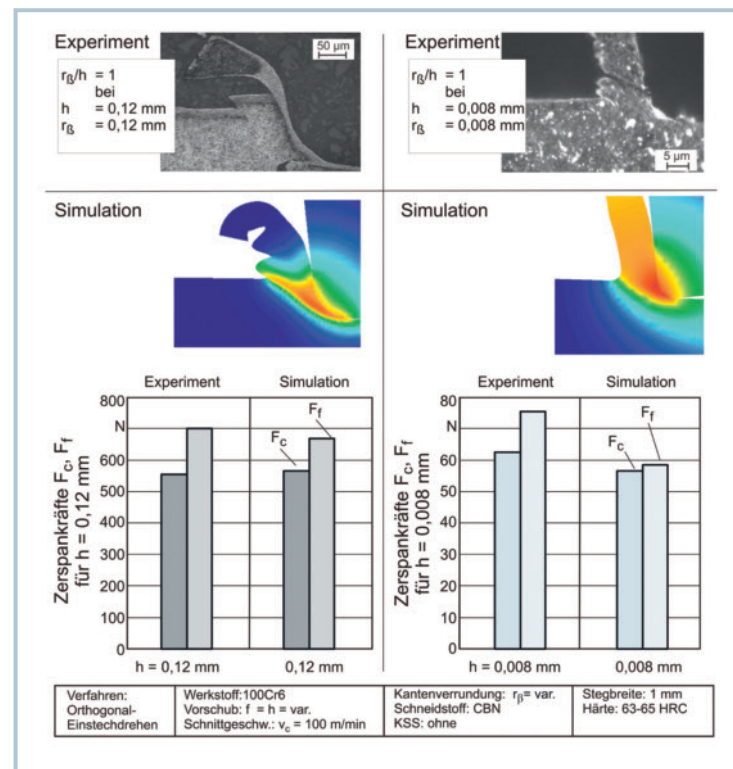


2 2D-Modell des Orthogonaleinstechdrehens

beeinflusst werden. Eine optimale Auslegung von Werkzeugen erhöht Standzeit und Bearbeitungsqualität. Zur Ermittlung optimierter Werkzeuggeometrien erweitern modellbasierte Betrachtungen des Zerspanvorgangs das Verständnis für thermische und mechanische Belastungen von Werkzeugen. Dazu werden die Spannungen und Temperaturen entlang der Schneidkante und innerhalb des Werkzeugs analysiert. Detaillierte Kenntnisse der Spannungen, Dehnungen und Dehnraten sowie Temperaturfelder während des Eingriffs des Schneidkeils unterstützen die Analyse der Spanbildungsmechanismen.

Werkstückseitig lässt sich mittels FEM die Beeinflussung der Bauteilrandzone durch den Zerspanprozess in bestimmten Grenzen vorhersagen. Das Verständnis der Mechanismen zur Entstehung von Eigenspannungen im Werkstück ermöglicht es, deren Induzierung während des Prozesses gezielt zu steuern und damit spezifische Bauteilrandzoneneigenschaften einzustellen.

In Bild 2 ist beispielhaft die Modellierung des Orthogonaleinstechdrehprozesses dar-

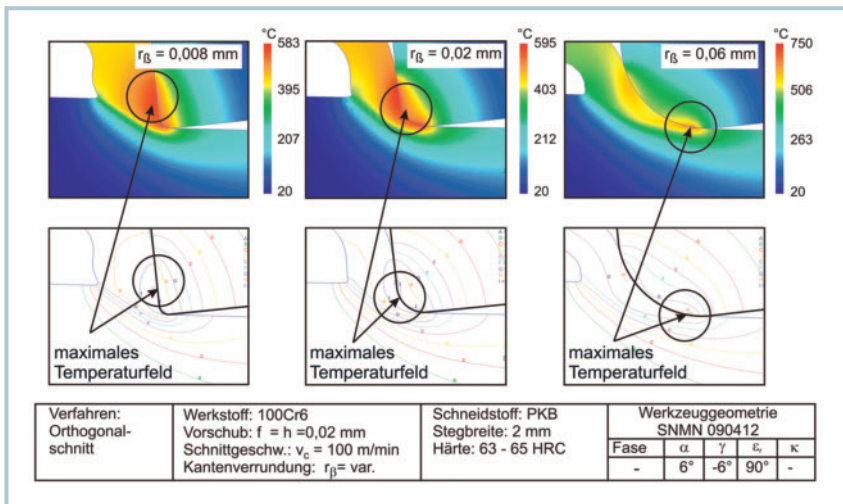


3 Spanbildung und Kräfte für große (links) und kleine (rechts) Spannungsdicken und Schneidkantenverrundungen

gestellt. In einem ersten Schritt wird das Werkzeug mit der beschriebenen Geometrie erstellt und vom FE-Programm (hier »Deform 2D«) automatisch vernetzt. Dem

ebenfalls vernetzten Werkstück werden zusätzlich Randbedingungen zugewiesen. Als Materialdaten für eine elastisch-plastische Berechnung des Bauteilverhal-

»»»

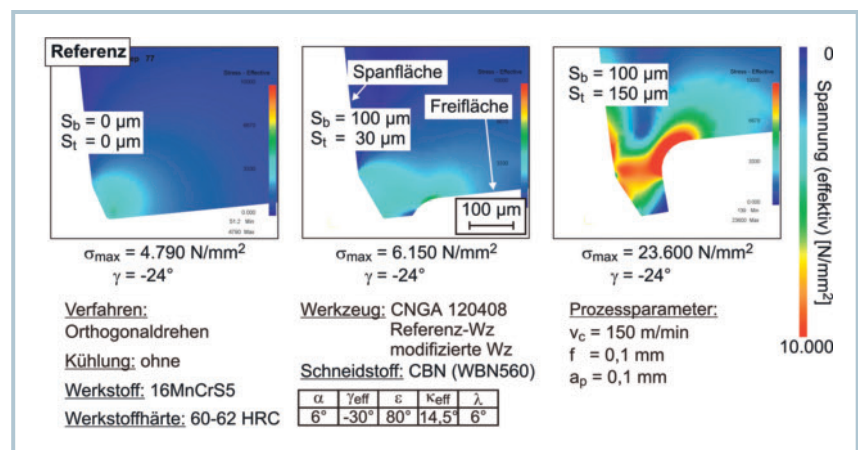


4 Temperaturen für verschiedene Schneidkantenverrundungen

» tens wird ein passendes Materialmodell gewählt. Nach der Festlegung von Kontaktbedingungen zwischen den definierten Körpern bekommt das Werkstück eine Geschwindigkeit zugewiesen, mit der es sich durch das Bauteil bewegt. Anschließend wird die Berechnung gestartet und lässt sich dann unter verschiedenen Gesichtspunkten auswerten. Bild 2 zeigt die Auswertung der Spannungen in X-Richtung.

Bei der Anwendung von FE-Simulationen ist eine Validierung der berechneten Ergebnisse unerlässlich, da die FEM keine exakte Abbildung des realen Prozesses darstellt. Abweichungen zwischen Experiment und Simulation treten bereits beim Aufbau des Modells auf. Während im Experiment zum Beispiel große Bauteile zerspannt werden, wird bei der Simulation nur ein kleiner Ausschnitt des Gesamtvolumens betrachtet. Das verwendete Material wird mit Materialmodellen nachgebildet, die das reale Materialverhalten nur annähern. Die Validierung der Simulationsergebnisse kann anhand experimenteller Daten zum Beispiel durch den Vergleich der Spanformen, experimentell ermittelter Kräfte oder Eigenspannungsanalysen erfolgen.

Die Finite-Elemente-Methode ermöglicht die Auswertung zeit- und ortsauflö-



5 Simulation der Werkzeugbelastung beim Hartdrehen

löst, was eine deutliche Erweiterung der experimentell ermittelbaren Messgrößen bedeutet. So lassen sich durch FE-Modellierung zusätzliche Informationen gewinnen, zum Beispiel über Vorgänge in der Scher- oder Kontaktzone während der Spanbildung. Die FE-Simulationen können Zerspanexperimente nicht nur ergänzen, sondern in weiten Bereichen sogar ersetzen.

Der zweidimensionale Orthogonalrehprozess

Als Anwendungsbeispiel einer zweidimensionalen FE-Simulation wird hier der Orthogonalrehprozess beschrieben. Das Ziel der Simulation ist hier die Ermittlung der Größeneinflüsse beziehungsweise geometrischen Skalierungseffekte auf Spanbildung, Zerspankräfte und Eigenspannungen beim Hartdrehen. Die Finite-Elemente-Modellierung wurde mit Materialdaten durchgeführt, denen ein Werkstoffmodell von Poulachon [3] zugrunde liegt. Zusätzlich zu den FE-Simulationen wurden Zer-

spanversuche vorgenommen, um die berechneten Werte anhand experimenteller Daten zu validieren.

Bild 3 zeigt die Spanbildung bei gehärtetem 100Cr6. In der oberen Reihe ist die mithilfe der Methode der Segmentbeschleunigung experimentell gewonnene Spanwurzel wiedergegeben, während die Bilder darunter die Simulationsergebnisse zeigen. Im unteren Bereich sind die simulierten Zerspankräfte den experimentell ermittelten Kräften gegenübergestellt. Die linke Spalte zeigt jeweils die Ergebnisse für eine Spanungsdicke und Schneidkantenverrundung von $r_b = h = 120 \mu\text{m}$. In der

rechten Spalte ist der simulierte Span für kleine Spanungsdicke und Schneidkantenverrundung von $r_b = h = 8 \mu\text{m}$ dargestellt.

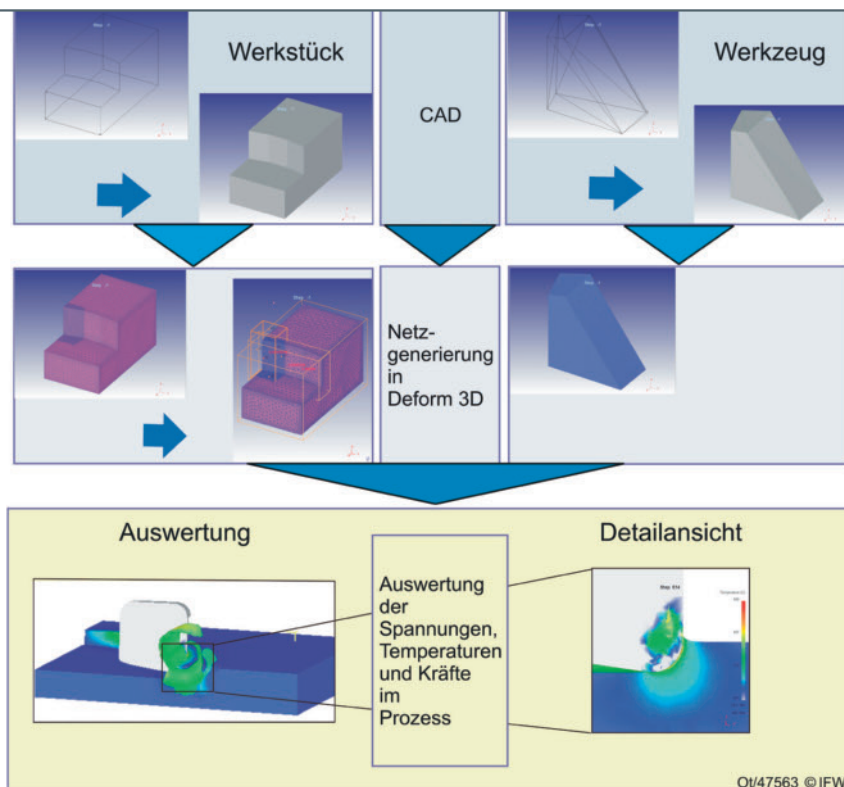
Für das Verhältnis $r_b/h = 1$ und bei Spanungsdicken von $h = 0,12$ mm beziehungsweise $h = 0,008$ mm liefert die Simulation sehr gute Ergebnisse hinsichtlich der Spanbildung und der Prozesskräfte. Zur Simulation der Eigenspannungen in der Bauteilrandzone ist die Berücksichtigung des elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens erforderlich. Im Anschluss an die Simulation des Orthogonaleinstechdrehprozesses erfolgt ein weiterer Simulationsschritt. Das Bauteil wird mechanisch und thermisch entlastet, indem der Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück entfernt und das Bauteil auf Umgebungstemperatur abgekühlt wird. Die hiernach im Bauteil verbleibenden Spannungen sind Eigenspannungen. Auch hier wurde eine gute Übereinstimmung der experimentellen Ergebnisse mit den berechneten Werten nachgewiesen.

i INSTITUT

Institut für Fertigungstechnik
und Werkzeugmaschinen (IFW)
Leibniz Universität Hannover
30823 Garbsen
Tel. 0511 7622553
Fax 0511 7625115
→ www.ifw.uni-hannover.de

Eine weitere wesentliche Analysemöglichkeit mittels der FEM ist die Untersuchung der Temperaturentwicklung während des Bearbeitungsprozesses. Diese Größe ist experimentell nicht zu ermitteln. In Bild 4 werden exemplarisch die simulierten Temperaturen bei der Zerspänung von C45E im Orthogonalschnitt bei Verwendung von Werkzeugen mit unterschiedlichen Schneidkantenverrundungen dargestellt. Der Bereich der maximalen Temperaturen liegt für relativ kleine Verrundungen ($r_\beta = 0,01 \text{ mm}$) im Verhältnis zur Spanungsdicke ($h = 0,02 \text{ mm}$) auf der Spanfläche (Bild 4, links). Mit zunehmendem Verhältnis r_β zu h verschiebt sich die maximale Temperatur von der Spanfläche hin zur Freifläche (Bild 4, Mitte und rechts).

Mit diesen Ergebnissen lässt sich nachweisen, dass der Ort der im Prozess auftretenden maximalen Temperaturen vom Verhältnis r_β zu h abhängig ist. Bei zunehmendem r_β -zu- h -Verhältnis fließt mehr Wärme ins Bauteil und weniger mit dem Span ab. Es ist also möglich, durch Größe



6 3D-Modell des Fräsprozesses

und Form des Werkzeugs die Lage und Größenordnung der maximalen Temperaturen zu beeinflussen und damit die ther-

mische Werkzeugbelastung zu regulieren. In der Werkzeugentwicklung spielt die Werkzeugbelastung während des Ein- >>>

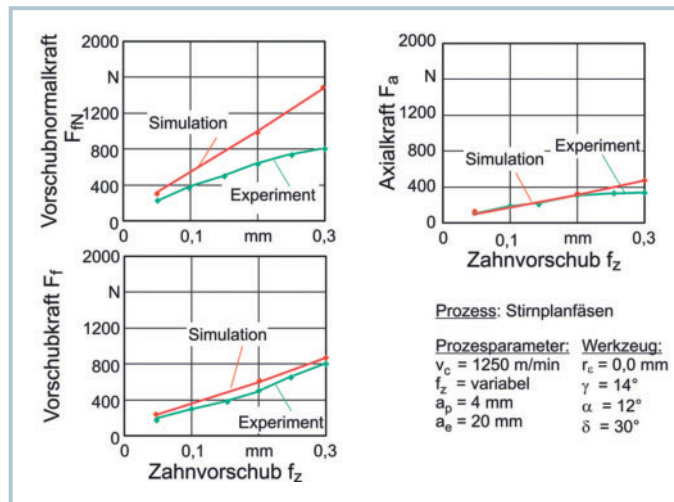
» griffs die entscheidende Rolle bei der Geometrieauslegung. Die FE-Simulation bietet ein gutes Hilfsmittel, um die thermische und mechanische Belastung ohne aufwendige Versuche zu ermitteln. In Bild 5 sind die numerisch ermittelten Lastzustände im Werkzeug für verschiedene Hinterschnittgeometrien während eines Hartdrehprozesses dargestellt. Die Simulationsergebnisse zeigen: Die Größe des Hinterschnitts beeinflusst die Werkzeugstabilität, und eine Auslegung der Freiflächengeometrie mit einer Stegbreite von zum Beispiel $S_b = 100 \mu\text{m}$ mit maximaler Stegtiefe S_t minimiert die mechanische Werkzeugbelastung.

3D-Simulation von Fräsprozessen

Um den Fräsprozess mittels der Finite-Elemente-Simulation nachbilden zu können, wird zunächst ein dreidimensionales Modell von Werkstück und Werkzeug erstellt. Im FE-Programm findet eine automatische Netzgenerierung statt, wobei der Anwender die Möglichkeit hat, Regionen von besonderem Interesse feiner zu vernetzen als andere. Die Modellierung des Prozesses wird hier am Beispiel der Software »Deform-3D« beschrieben.

In Bild 6 ist ein fest stehendes Werkstück dargestellt, das im Bereich des Werkzeugeingriffs erheblich feiner vernetzt ist als im übrigen Bauteil. Das Werkzeug wird in diesem Fall als Starrkörper modelliert. Mit einer definierten Geschwindigkeit und Richtung bewegt es sich durch das Werkstück und trägt Material ab. Die feine Vernetzung des Werkstücks in der Eingriffszone des Werkzeugs bewirkt, dass die entstehenden Spannungs- und Temperaturgradienten aufgelöst werden können. Dies ist die Voraussetzung für eine gute Abbildung der Zerspankräfte und der Simulation der Spannungen in der Eingriffszone. Im Anschluss an die Berechnung können Detailansichten erzeugt werden, in denen die Auswertung der Prozessausgangsgrößen zeit- und orts aufgelöst stattfindet. Bild 6 unten zeigt beispielhaft die Temperaturverteilung im Bauteil nach dem dritten Schnitt.

In der hier vorgestellten Simulation wird ein Aluminiumbauteil im Hochgeschwindigkeitsbereich gefräst. Die Prozessparameter werden im Hinblick auf Schnittgeschwindigkeit, Zahnvorschub



7 Einfluss des Zahnvorschubs auf die Kräfte beim Fräsen

und Fräsermakrogeometrie variiert, um deren Einfluss auf die Zerspankräfte und Spannungen in der Werkstückrandzone zu untersuchen. In Bild 7 sind die Prozesskräfte in Abhängigkeit des Zahnvorschubs dargestellt. Ein Vergleich mit den experimentell ermittelten Kräften zeigt eine gute qualitative Übereinstimmung der Ergebnisse. Auch für die Variation der Schnittgeschwindigkeit und des radialen Spanwinkels konnte eine Validierung der simulierten Daten anhand der experimentell ermittelten Kräfte stattfinden.

Tieferes Verständnis der Vorgänge im Zerspanprozess

Fazit: Die Untersuchungen zeigen, dass es mithilfe der FEM möglich ist, den Zerspanprozess abzubilden. Hierzu wurden die zweidimensionale Simulation des Orthogonaleinstechdrehens und die dreidimensionale Simulation des Fräsprozesses erläutert. Gegenüber experimentellen Untersuchungen bietet die Simulation die Möglichkeit, die Werkzeugbelastung thermisch und mechanisch getrennt voneinander sowie zeit- und orts aufgelöst zu untersuchen. Des Weiteren lassen sich über die Experimente hinausgehende Analysen wie zum Beispiel die Untersuchung der Temperaturentwicklung während des Prozesses vornehmen. Für eine robuste Aussage ist eine Validierung der Simulationsergebnisse anhand experimenteller Daten, zum Beispiel durch Abgleich der Prozesskräfte oder der Spanformen, erforderlich. Die Simulation bietet die Möglichkeit zur qualitativen Vorhersage des Belastungskollektivs an Zerspanwerkzeugen sowie der Bauteilbeeinflussung und ermöglicht ein tieferes Verständnis der Vorgänge im Zerspanprozess.

Aktuelle Arbeiten beschäftigen sich mit der Simulation beschichteter Werkzeuge. Hierfür werden Simulationen durchgeführt, die den Einfluss der schwer zu ermittelnden Werkstoffparameter, wie Wärmeleitfähigkeit und Wärmeübergangskoeffizient, auf das Simulationsergebnis untersuchen. ■

Artikel als PDF unter www.metall-infocenter.de
Suchbegriff → **WB110097**

LITERATUR

- 1 Zienkiewicz, O. C.; Taylor, R. L.; Zhu, J. Z.: The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals, Sixth Edition, Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005
- 2 Zulehner, W.: Numerische Mathematik – Eine Einführung anhand von Differentialgleichungsproblemen. Stationäre Probleme, Nr. 1, Birkhäuser, 2008
- 3 Poulachon, G.; Moisan, A.; Jawahir, S.: On Modelling the Influence of Thermo-Mechanical Behavior in Chip Formation During Hard Turning of 100Cr6 Bearing Steel, Annals of the CIRP, Vol. 50/1, 2001, pp. 31-36

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena leitet das Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover

→ denkena@ifw.uni-hannover.de

Dipl.-Ing. Luis de Leon ist Bereichsleiter Fertigungsverfahren am IFW der Leibniz Universität Hannover

→ leon@ifw.uni-hannover.de

Dipl.-Math. M.Sc. Maya Otte ist wissenschaftliche Mitarbeiterin am IFW der Leibniz Universität Hannover

→ otte@ifw.uni-hannover.de