

# Durchgängige Simulation der Herstellung und des Einsatzverhaltens sintermetallisch gebundener Schleifscheiben

■ Schleifwerkzeuge werden für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen eingesetzt und umfassen daher ein weites Feld an unterschiedlichen Formen und Spezifikationen<sup>[1]</sup>. Im Bereich von Diamantschleifwerkzeugen heben sich dabei metallisch gebundene Werkzeuge unter anderem durch ihren hohen Verschleißwiderstand und die hohe Wärmeleitfähigkeit von keramisch oder kunstharzgebundenen Werkzeugen ab. Der Herstellprozess von sintermetallisch gebundenen Schleifscheiben hängt dabei stark von der genauen Bindungszusammensetzung und dem Korntyp, der Korngröße und -form sowie der Kornkonzentration ab. Die Prozessauslegung basiert dabei im Wesentlichen auf Expertenwissen, empirischen Kenntnissen und allgemeinen Erfahrungen. Eine ganzheitliche, simulationsgestützte Abbildung der Herstellungsprozesse bis hin zum Einsatzverhalten ist derzeit noch nicht möglich. Die Simulation bietet jedoch das Potenzial das Herstellungsergebnis genau vorherzusagen und so die Schleifwerkzeugauslegung schneller, kostengünstiger und effektiver zu gestalten. Während einzelne Prozessschritte bei der Schleifwerkzeugerstellung bereits simulativ abgebildet werden können, besteht eine besondere Herausforderung in der Abbildung sämtlicher Fertigungsschritte und deren Verknüpfung untereinander. Dafür müssen zum einen Teilsimulationen aufgebaut werden, welche die Realität möglichst genau abbilden. Für die Simulationen müssen zum anderen geeignete Schnittstellen entwickelt werden, die die relevanten Ausgangsgrößen an die jeweils nächste Teilsimulation übergeben.

### **Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena**

Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen an der Leibniz Universität Hannover

### **Dr.-Ing. Alexander Krödel**

Bereichsleiter Fertigungsverfahren am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen an der Leibniz Universität Hannover

### **M. Sc. Mateus Kostka**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen an der Leibniz Universität Hannover

### **M. Sc. Patrick Dzierzawa**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen an der Leibniz Universität Hannover

### **Dr. rer. nat. Fabian Leander Kempf**

wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen an der Leibniz Universität Hannover

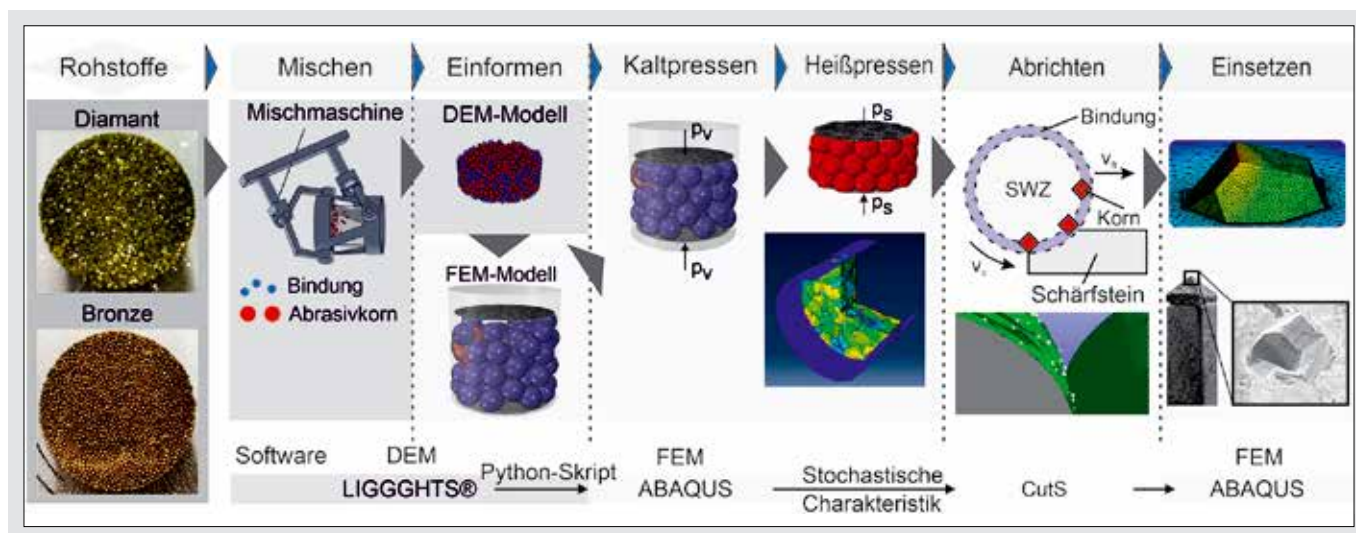
Da es sich bei dem finalen Produkt um Werkzeuge handelt, sollte bei der Werkzeugauslegung insbesondere auch das Einsatzverhalten berücksichtigt und somit in die simulative Prozesskette eingebunden werden. Eine solche ganzheitliche Betrachtungsweise und Simulation der Prozessschritte wird daher derzeit am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) erforscht und experimentellen Untersuchungen zur Validierung gegenübergestellt. Dabei werden das Mischen, Einformen, Kaltpressen, Heißpressen und Abrichten ebenso wie das Einsatzverhalten im Schleif- und Ritzprozess selbst berücksichtigt (*Bild 1*). In diesem Artikel wird das am IFW entwickelte Simulationsmodell zusammen mit den experimentellen Untersuchungen im institutseigenen Schleifscheibenlabor vorgestellt. Unter dem Link: <https://youtu.be/-2KE-zh907Y> kann weiterhin ein erklärendes

Video abgerufen werden. Im Folgenden werden die einzelnen Prozessschritte sowohl innerhalb der Simulation als auch im Experiment detailliert beschrieben.

Im Rahmen dieses Beitrags wird dabei beispielhaft der Prozessablauf bei der Herstellung einer bronzegebundenen Schleifscheibe mit einer Diamantkorngröße D851 und der Kornkonzentration C100 untersucht. Die Wahl dieser Partikelgröße stellt eine verhältnismäßige Kalkulationszeit im Simulationsmodell und die Beobachtbarkeit des Prozesses sicher. Als industrienaher Anwendungsfall für die Schleifuntersuchungen wird das Schleifen von Hartmetall gewählt.

### **Rohstoffe**

Die Herstellung von Schleifwerkzeugen beginnt mit der Bereitstellung und Charakterisierung der notwendigen Rohstoffe. Als Schleifkorn werden dabei im



vorliegenden Fall blockige Diamantkörner eingesetzt, die eine einheitliche Partikelform aufweisen und folglich in der Simulation durch ein für alle Schleifkörner gleiches Modell abgebildet und dadurch simplifiziert werden können. In diesem konkreten Fall weisen die Körner die Form eines Oktaederstumpfs auf. Als Bindungspulver wird ein grobes Bronzepulver der Zusammensetzung 89 m% Kupfer und 11 m% Zinn verwendet, das hauptsächlich aus  $\alpha$ -Bronze besteht. Das Bindungspulver wurde durch Gasverdüsen gewonnen und weist eine sphärische Form auf. Die Größe wurde ähnlich der Schleifkorngröße gewählt und auf 800  $\mu\text{m}$  bis 1.000  $\mu\text{m}$  gesiebt. Eine gleiche Größe der Diamantkörner und Bronzepartikel führt zu besseren Mischergebnissen und geringeren Entmischungseffekten. Durch die vergleichsweise hohe Partikelgröße wird ein besserer Abgleich zwischen den simulierten und den experimentell ermittelten Größen ermöglicht.

### Mischen und Einformen

Im Anschluss an die Charakterisierung der Rohstoffe wird der Mischprozess untersucht. Dabei wird ein Turbula Mischer vom Typ T2F der Firma Willy A. Bachofen bei variablen Drehzahlen und Zykluszahlen eingesetzt. Die Ergebnisse der entwickelten Mischsimulation werden

dann den experimentellen Ergebnissen gegenübergestellt.

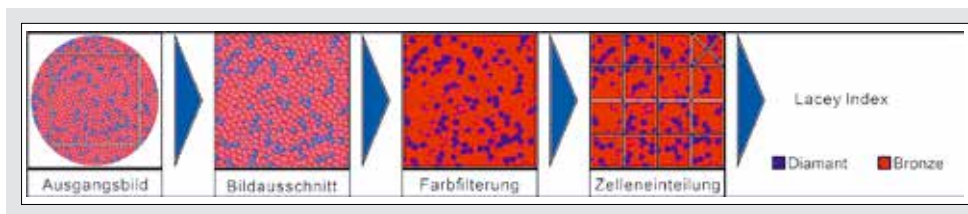
Die Rohstoffmischung aus Bindung und Schleifkorn wird zunächst in einem Polypropylengefäß (HDPP) eingewogen und mit dem Turbula Mischer gemischt. Die Mischkinematik wurde für die spätere Simulation aus den ausgemessenen Ankerpunkten des Turbula Mixers mithilfe eines CAD-Modells abgeleitet und zeichnet sich durch eine Kombination von Translation und Inversion aus. Die Mischgeschwindigkeit kann über ein variables Riemengetriebe eingestellt werden. Für den Vergleich zwischen Experiment und Simulation werden zylindrische Probekörper mit einem Durchmesser von 22 mm und einer Höhe von 5 mm hergestellt. Das dafür benötigte Pulver wird in einem zylindrischen Mischbehälter mit einem Innendurchmesser von 26,5 mm und einer Höhe von 30 mm gemischt. Die Kornkonzentration wurde mit 25 V% im dichtgesinterten Probekörper eingestellt. Für das Mischen werden Drehzahlen der Antriebswellen des Turbula Mixers von 26 1/min, 52 1/min und 100 1/min bis zu einer Zykluszahl von 20 untersucht. Experimentell wird die Partikelverteilung in Abhängigkeit der Zykluszahl auf der Oberfläche des Mischbehälters mit einer Spiegelreflexkamera aufgenommen. Die Mischexperimente für ein-

zelne Probekörper werden für 5, 10 und 20 Umdrehungen jeweils viermal durchgeführt, um eine statistische Absicherung der Ergebnisse zu ermöglichen. Auf diese Weise wird die Frühphase, Mittelphase und Spätphase des Mischprozesses abgebildet. Die Versuchsbedingungen werden anschließend mit dem Simulationsmodell nachgebildet und mit den experimentellen Ergebnissen verglichen.

Der Mischprozess wird mit der Software LIGGGHTS®-PUBLIC simuliert, die eine Modellierung von Partikelwechselwirkungen, die Abbildung der Mischkinematik und die Einstellung der Mischgeschwindigkeit und Mischzeit ermöglicht. Die Modellierung der Partikelbewegung erfolgt dabei mit der Diskreten Elemente Methode, der eine zeitdiskrete Auswertung der Newton'schen Bewegungsgleichungen zugrunde liegt. Während des Kontaktes wird das Hertz Mindlin Kontaktmodell angewendet, das Reibung, Elastizität und Dämpfung berücksichtigt<sup>[2]</sup>.

Bei der Simulation des Mischprozesses können verschiedene Aspekte angepasst werden. Ausgegangen wird dabei von der Zusammensetzung des Mischguts sowie den Partikelgrößen und -formen seiner Bestandteile. Die Grundlage für das eigentliche Mischen stellen die Rahmenbe-

**Bild 1**  
Modellierung der Prozesskette zur Herstellung metallisch gebundener Schleifwerkzeuge.



**Bild 2**  
Optische Auswertung der Durchmischung im Simulationsmodell mit dem Lacey Index<sup>[3]</sup>.

dingungen des Mischers in Form der Mischkinematik und der Probengefäßabmessungen dar. Als Prozessstellgrößen des jeweiligen Mischers kann dann zum Beispiel die Mischgeschwindigkeit oder die Mischdauer angepasst werden. In Abhängigkeit von diesen Größen wird die Partikelverteilung analysiert. Im Simulationsmodell werden die Partikel sphärisch modelliert, um die Komplexität zu beschränken. Das Diamantkorn hat einen Durchmesser von 851 µm und das Bronzekorn einen gemittelten Durchmesser von 900 µm. Für einen Probekörper ergeben sich in der Simulation folglich 4.122 Bronzepartikel und 1.617 Diamantpartikel.

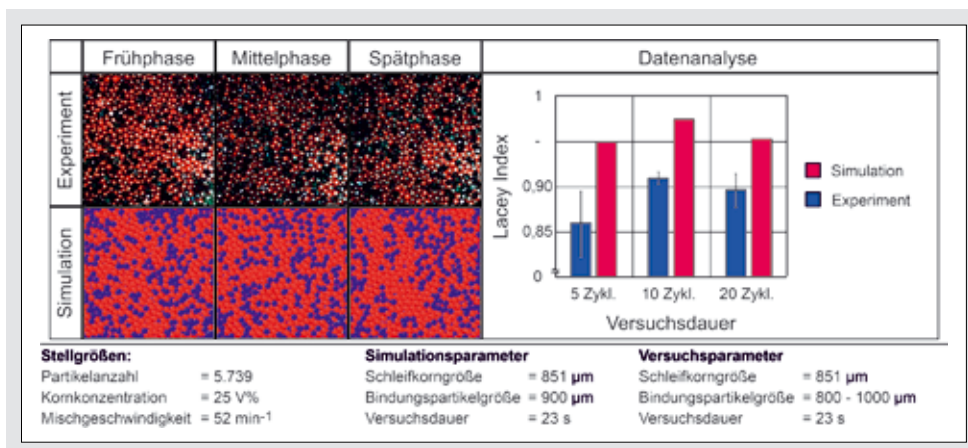
Die Auswertung des Guts nach dem Mischen erfolgt mithilfe des Lacey Index. Dieser stellt eine Kenngröße zur Beschreibung der Durchmischung eines Mischguts dar.

Zur standardisierten Auswertung der Simulationen wird ein Bild der Probe durch ein Raster in 16 gleichgroße Zellen geteilt (Bild 2). Über eine computergestützte Bildverarbeitung werden die Partikel anhand ihrer charakteristischen Farben identifiziert. Über die Farbkanäle für rote Pixel

(Bronze) und blaue Pixel (Diamant) werden die Partikel getrennt und die Anzahl der entsprechenden Pixel in jeder Zelle gezählt. Anschließend wird die Standardabweichung der Pixelverteilung pro Zelle und in der gesamten Stichprobe unter Verwendung der Partikelkonzentration pro Zelle für die gesamte Stichprobe berechnet. Mit dem Verhältnis der Standardabweichungen wird der Lacey Index berechnet<sup>[3]</sup>. Der Lacey Index mit dem Wert 0 charakterisiert den Zustand der totalen Entmischung. Bei einer idealen Durchmischung nimmt der Index den Wert 1 an.

Eine Betrachtung des Einflusses der Mischzeit im Experiment und in der Simulation ist in Bild 3 gegenübergestellt. Die Ergebnisse des Mischprozesses sind dort in drei Phasen aufgeteilt: Früh-, Mittel- und Spätphase. Diese Einteilung ist abhängig von der Partikelanzahl, wobei weniger Partikel eine kürzere Zeit gemischt werden müssen. Für den hier betrachteten Fall sind diese Phasen als 5, 10 und 20 Zyklen definiert. Aus Bildern, wie sie in Bild 3 links gezeigt sind, wurde für die Beurteilung der Durchmischung der Lacey Index berechnet. Für die

**Bild 3**  
Analyse der Durchmischung im Experiment und in der Simulation mit dem Lacey Index.



Mischexperimente wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen berechnet.

Die Mischsimulation, wie auch das Experiment zeigen, dass eine gute Durchmischung bereits nach wenigen Zyklen erreicht wird. Ein Mischindex von über 0,9 kann dabei als gut durchmischt angesehen werden. Der Verlauf des Mischindex der Mischsimulation zeigt dabei bereits eine gute Übereinstimmung mit dem Experiment, wobei das Mischergebnis der Simulation generell einen höheren Lacey Index aufweist. Diese Abweichungen werden in zukünftigen Forschungsarbeiten weiter untersucht und soweit möglich reduziert. Hierzu ist geplant, die Reflektionen über eine verbesserte Bildverarbeitung zu reduzieren und die Kinematik und Parametrisierung im Simulationsmodell zu optimieren. Die Durchmischung ist in beiden Fällen in der Mittelphase maximal und stabilisiert sich anschließend auf einem hohen Niveau. Die Standardabweichung des experimentellen Ergebnisses ist zu Beginn maximal. Dies ist auf Ungenauigkeiten der Bildaufnahmen speziell bei sehr geringer Zyklenzahl zurückzuführen. Diese ergeben sich aus Schwankungen in der Anzahl der Zyklen, da diese nicht direkt einstellbar sind, und aus Abweichungen in der Partikelstartposition im Mischbehälter. Auffällig ist die bessere Durchmischung in der Simulation, die insbesondere auf Entmischungseffekte nach dem Entnehmen des Mischbehälters aus dem Turbula Mischer, Artefakte in der Bildauswertung durch Reflexionen und eine noch nicht vollständig abgeschlossenen Parametrisierung des Simulationsmodells zurückzuführen sind.

Die Konformität im Durchmischungstrend von diesem Experiment stärkt die Annahme, dass die Mischsimulation qualitativ richtige Ergebnisse liefern kann. Somit kann im Folgenden



die Mischgeschwindigkeit im Simulationsmodell variiert werden. Eine Betrachtung des Einflusses der Mischgeschwindigkeit auf den berechneten Lacey Index bei gleicher Mischzeit von 6,9 s ist in *Bild 4* gezeigt.

Die Mischgeschwindigkeiten  $v_1$  (26 min<sup>-1</sup>),  $v_2$  (52 min<sup>-1</sup>) und  $v_3$  (100 min<sup>-1</sup>) sind so gewählt, dass sie sich jeweils etwa verdoppeln. Damit dabei dieselbe Mischdauer untersucht wird, werden die untersuchten Zyklenzahlen entsprechend auf 3, 6 und 12 angepasst. Es wird deutlich, dass sich ein Optimum der Durchmischung bei mittlerer Geschwindigkeitsstufe ergibt und dass eine weitere Erhöhung der Mischgeschwindigkeit darüber hinaus keine weitere Verbesserung zur Folge hat. Mit der Mischgeschwindigkeitsanalyse kann der Rückschluss gezogen werden, dass mit mittleren Geschwindigkeiten die höchste Wirtschaftlichkeit erzielt wird, da die Taktzeit bei hoher Mischgüte beschränkt werden kann.

Nach dem Mischvorgang werden die Partikel in der experimentellen Prozesskette direkt aus dem Mischbehälter in die Sinterformen eingefüllt. Durch das Einfüllen wird so die Schüttung für die weitere Verarbeitung erzeugt. Simulativ kann dieser Prozess wie auch das Mischen mit Hilfe der DEM abgebildet werden. Im Simulationsmodell wird der Mischbehälter aufgestellt, sodass sich die Partikel auf dem Grund des Behälters absetzen.

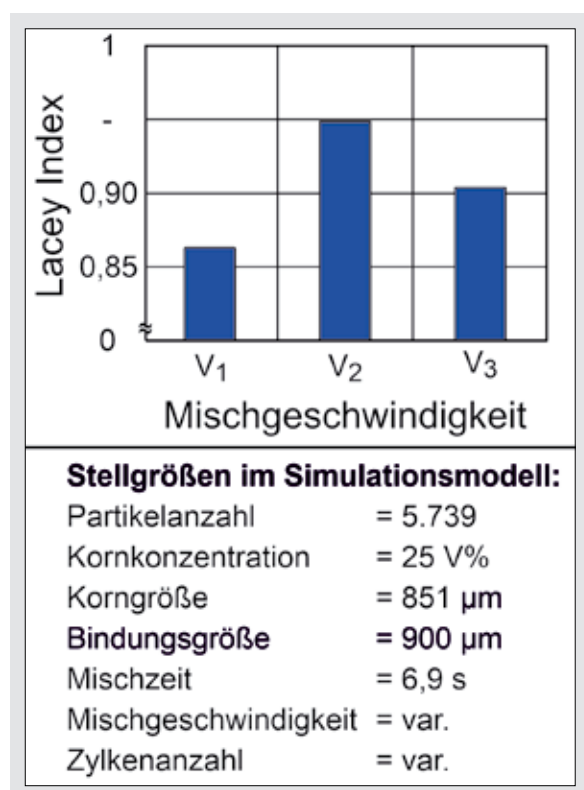
### Kalt- und Heißpressen

Dem Einfüllen schließt sich das Kaltpressen an, worauf das Heißpressen folgt. Beim Kaltpressen werden die Sinterstempel bei Raumtemperatur mit Druck beaufschlagt und das Sintergut vorverdichtet. Während des darauffolgenden Heißpressens an einer Drucksinterpresse vom Typ DSP 510 der Firma Dr. Fritsch wird der Druck auf eine exakte Flächenpressung geregelt und

auf die eigentliche Sintertemperatur geheizt. Es wird eine Flächenpressung von 35 MPa verwendet und eine Sintertemperatur von 720 °C eingestellt. Über die Stempel in der Sinterform wird die Flächenpressung erzeugt und das Sintergut entsprechend eines Temperaturverlaufs geheizt. Die Verdichtung korreliert dabei unmittelbar mit dem gemessenen Stempelweg aus dem Heißpressprozess und kann somit zur Verifikation genutzt werden.

Beide Prozesse können mithilfe der Software Abaqus und der Finiten Elemente Methode (FEM) abgebildet werden. In der Simulation wird dazu eine zylindrische Sinterform mit zwei Stempeln konstruiert. Es wird eine miniaturisierte repräsentative Probe betrachtet, in der 200 Partikel innerhalb der Sinterform angeordnet sind. Die Partikelverteilung mit 32 Diamantpartikeln und 168 Bronzepartikeln wird aus dem Mischsimulationsergebnis bei 10 Zyklen über eine Python-Schnittstelle extrahiert und an Abaqus übergeben. Durch die Wahl der Stichprobe anstelle des gesamten Mischguts wird der Rechenaufwand in der Sintersimulation deutlich reduziert. Die Bronzepartikel werden sphärisch und die Diamantpartikel in der Form eines Oktaederstumpfs modelliert und vernetzt.

Im Simulationsmodell wird diese Probe anschließend den experimentell genutzten Temperatur- und Druckverläufen ausgesetzt. Über die Stempel wird die Flächenpressung entsprechend dem tatsächlichen Prozess erzeugt und das Sintergut durch ein Temperaturfeld geheizt. In Dilatometeruntersuchungen an Proben, die aus dem experimentell verwendeten Pulver gefertigt wurden, wurden die mechanischen Eigenschaften im relevanten Temperaturbereich ermittelt und für die Parametrierung der Simulation genutzt. Mit den im Dilatometerversuchen ermittelten tempe-



**Bild 4**  
Geschwindigkeitsabhängige Durchmischungsanalyse mit dem Lacey Index.

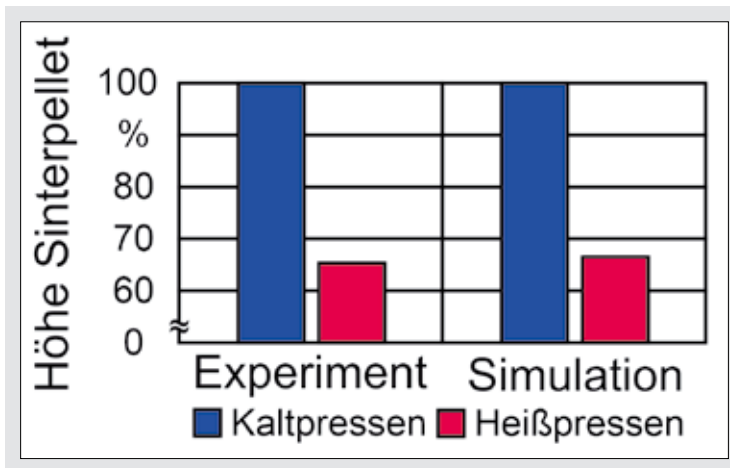
raturabhängigen Spannungs-Dehnungs-Diagramm und dem temperaturabhängigen Elastizitätsmodul sowie dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten und der spezifischen Wärmekapazität können so die thermomechanischen Prozesse während des Heißpressens abgebildet werden. Neben mechanischen Spannungen innerhalb des Schleifbelags wird die Verdichtung des Sinterguts zeitabhängig bestimmt.

Für die Simulation des Kaltpressens wird eine Flächenpressung von 3,7 MPa bei Raumtemperatur verwendet. Der Heißpressprozess erfolgt parallel zur Simulation auch experimentell an der Sinterpresse. Zur Bewertung des experimentellen Vorgangs wird dabei auf die Prozessüberwachung der Maschine zurückgegriffen. Der aufgenommene Temperatur- und Druckverlauf stellen dabei die Eingangsgrößen dar.

Es ist zudem bekannt, dass die Porosität metallisch gebundener Schleifscheiben maßgeblich von der Sintertemperatur und dem Sinterdruck abhängt<sup>[4]</sup>. Daher

**Bild 5**

Validierung der Simulation des Heißpressens mit der relativen Probenhöhe des Sinterpellets.



bietet das Simulationsmodell eine kostengünstige Alternative zur gezielten Einstellung der Porosität bei verringerter Versuchszahl. Die Auswertung der Verformungen innerhalb der Probe zeigt nach dem Kaltpressen eine Probenhöhe von 2,27 mm und nach dem Heißpressen von 1,51 mm, was einer Verdichtung von 34 % entspricht. Dies stimmt gut mit dem Experiment überein, bei dem sich die Probenhöhe ebenfalls um etwa 35 % reduziert. Dies wurde aus der Endhöhe der Sinterproben von 6,4 mm und dem Stempelweg von 3,4 mm berechnet. In Bild 5 ist die Verdichtung im Ex-

periment und in der Simulation dargestellt.

Das Ergebnis des Kaltpressens ist in Bild 6 oben und das Ergebnis des Heißpressens ist in Bild 6 unten visualisiert. Es ist eine Verformung der Bronzepartikel zu beobachten. Die typischerweise sehr hohe Verdichtung mit geringer Porosität kann dabei in der Simulation gut nachgestellt werden. Neben der makroskopischen Verdichtung können mithilfe der Simulation jedoch auch die Von Mises Spannungen und die lokale plastische Dehnung ermittelt werden. Diese Größen geben Aufschluss über die Bela-

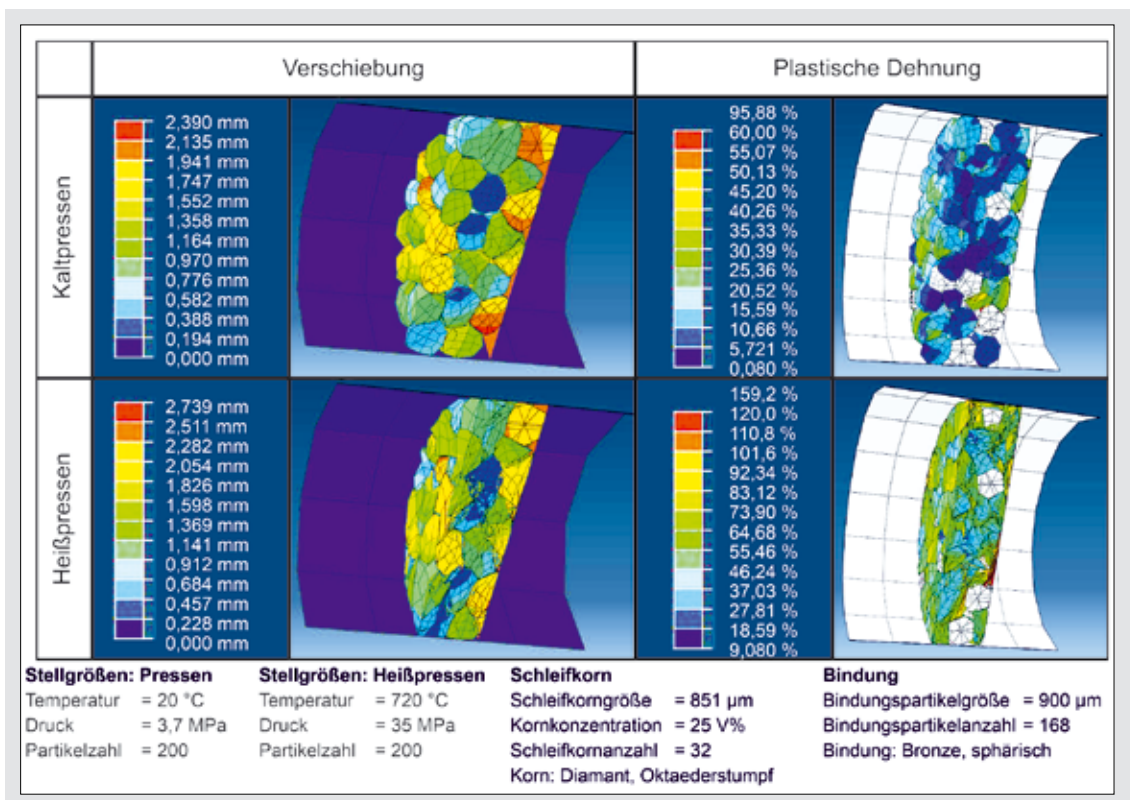
stungen im Korn-Bindungs-Interface. Die plastische Verformungen sind in Bild 6 rechts dargestellt. Die Bronzepartikel verformen sich deutlich um bis zu 95,8 % beim Kaltpressen und 159,2 % beim Heißpressen. Nach dem Heißpressen wird infolge des Zerfließens der Bronze die Verformung gleichmäßiger. In den Diamantkörnern treten aufgrund der Inkompressibilität erwartungsgemäß keine Verformungen auf. Die maximalen Spannungen entstehen folglich auf der Oberfläche der Diamantkörner. Während die maximale Spannung beim Kaltpressen bei 1,2 GPa lag, ergibt sich für das Heißpressen eine maximale Spannung von 7,9 GPa.

In Bild 7 ist die Fläche der gesinterten Probe unter dem Stempel gezeigt.

Die obere Darstellung zeigt eine Mikroskopaufnahme des Experiments nach dem Heißpressen und die untere Darstellung das entsprechende Simulationsergebnis. Diese ist so skaliert, dass sie eine mit der Simulation vergleichbare Fläche darstellt. Zu erkennen ist die pla-

**Bild 6**

Ergebnisse der Simulation nach dem Kaltpressen und dem Heißpressen.



stische Verformung der Bronze in der Simulation und im Experiment und dass die Bronzepartikel in der Stempelkontaktfläche eingedrückt werden, wohingegen die Diamanten ihre Form beibehalten. Die ermittelte Porosität der Sinterpellets beträgt 12,18 %. Die repräsentative Probe im Simulationsmodell weist eine Porosität von 8,78 % nach dem Heißpressen auf. Ziel ist es, diese hinreichend gute Übereinstimmung in Folgeprojekten durch die Abbildung von Diffusionseffekten und einer optimierten Parametrisierung weiter zu verbessern.

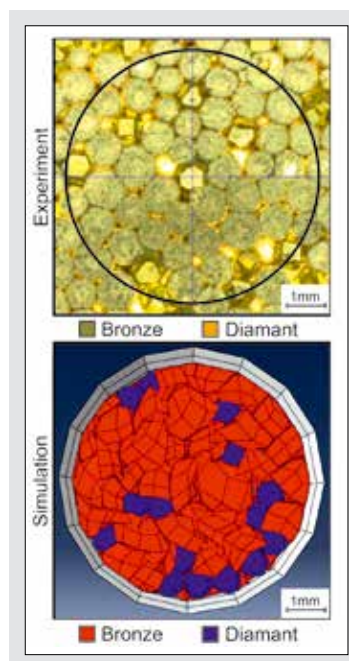
### Abrichten

Nach dem Sintern des Schleifwerkzeugs wird dessen Ausgangstopografie im Abrichtprozess erzeugt. Das experimentelle Profilieren erfolgt dabei durch eine Siliciumcarbid-Formrolle im Gegenlauf auf einer Geibel & Hotz Flachsleifmaschine. Die über die Prozesskette hinweg genutzte Korngröße von D851 erlaubt es, den erzeugten Bindungsrücken bereits mit bloßem Auge zu erkennen, *Bild 8*, oben.

Im Hinblick auf die simulative Abbildung des Abrichtprozesses erlaubt es die Auswertung der Einformsimulation bzw. der Heißpresssimulation, die Kornverteilung im Schleifbelag stochastisch zu beschreiben. Hierzu werden zukünftig Partikelabstands- sowie Abstandshäufig-

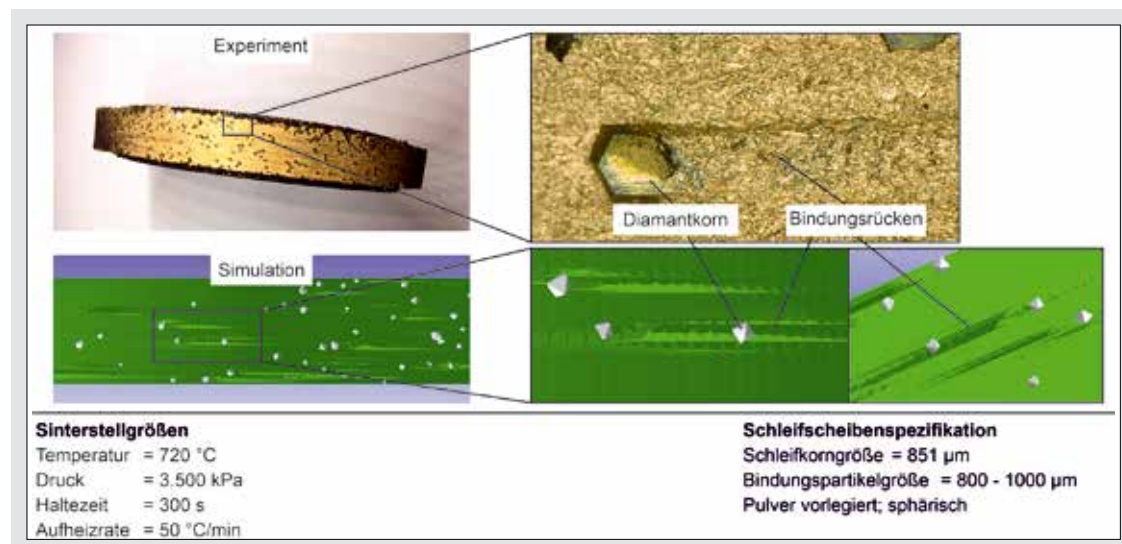
keitsanalysen herangezogen, die es ermöglichen, Effekte wie Clusterbildung oder eine gleichmäßige Kornverteilung zu identifizieren und diese in der Simulation nachzubilden. Mithilfe dieser stochastischen Charakteristik gelingt der Transfer der repräsentativen Partikelverteilung auf ein makroskopisches Schleifwerkzeugmodell, das für die Abrichts simulation genutzt wird. Die **de-xelbasierte** Materialabtragssoftware IFW-CutS<sup>[5]</sup> ermöglicht es, den Abrichtprozess und dessen Auswirkungen auf die Topografie am Schleifwerkzeug nachzustellen. Hierfür wurde IFW-CutS um ein Plugin erweitert, welches den wechselseitigen Abtrag von Diamantschleifscheibe und Siliciumcarbid-Formrolle abbildet. Dabei unterscheidet die Simulation zwischen Formrolle, Bindung und Schleifkorn, sodass ein unterschiedlich hoher Abtrag der einzelnen Komponenten ermöglicht wird. Hierdurch ist es möglich, über die Eingriffskinetik resultierende Topografieänderungen und insbesondere auch den sich ausbildenden Bindungsrücken hinter dem Diamantkorn simulativ darzustellen *Bild 8*, unten.

Für die Verknüpfung der Abrichts simulation mit den vorangegangenen Prozessschritten können verschiedene Stellgrößen verwendet und variiert werden. Eine Korndatenbank ermöglicht beispielsweise den Zugriff auf unter-



**Bild 7**  
Optischer Abgleich zwischen Experiment und Simulation nach dem Heißpressen.

schiedliche zuvor charakterisierte Kornformen und -größen. Die Verteilung der Körner kann zudem entweder diskret erfolgen, wobei jedes Korn einzeln gesetzt wird, oder über Verteilungsfunktionen stochastisch verteilt werden. Die diskrete Vorgehensweise bietet dabei gerade bei wenig Körnern auf dem Schleifwerkzeug, wie es zum Beispiel bei Trennwerkzeugen der Fall sein kann, den Vorteil, dass die Korneingriffe sehr genau abgebildet werden. Bei höheren Kornkonzentrationen oder mehrschichtigen Schleifwerkzeugen bietet sich eine zufällige Kornorientierung und eine Verteilung anhand von Verteilungsfunktionen an. Letztere können zum Beispiel



**Bild 8**  
Gegenüberstellung Profilergebnisse Experiment und Simulation.



sowohl aus dem experimentellen, als auch aus dem simulierten Heißpressergebnis abgeleitet werden. Künftig sollen noch weitere Aspekte aus der Herstellung, wie zum Beispiel die Abbildung von porösen Bindungen oder die Wechselwirkung zwischen erzeugter Kornhaltekräft und der Bindungshärte, berücksichtigt werden. Letztere beeinflusst zusammen mit dem angewendeten Abrichtprozess den erzeugten Kornüberstand signifikant. Zudem wurde der bei metallischen Bindungen üblicherweise eingesetzte Schärffprozess noch nicht simulativ abgebildet.

**Einsatzverhalten**

Aufgrund des noch nicht untersuchten Prozessschrittes Schärfen wurden keine experimentellen Einsatzuntersuchungen mit der profilierten Schleifscheibe durchgeführt. Es wurden jedoch bereits Ritzversuche mit den am IFW entwickelten Einzelkornwerkzeugen<sup>[6]</sup> beim Einzelkornschleifen von Hartmetall durchgeführt. Die sich aus den Versuchen ergebende Verschiebung des Diamantkorns und die damit verbundene plastische Bindungsdeformation nach mehreren Eingriffen des Schleifkorns wird insbesondere durch die Verkipfung des Korns in den Mikroskopaufnahmen erkennbar, Bild 9, links. Zudem kann das Einzelkorn mit der umgebenden Bin-

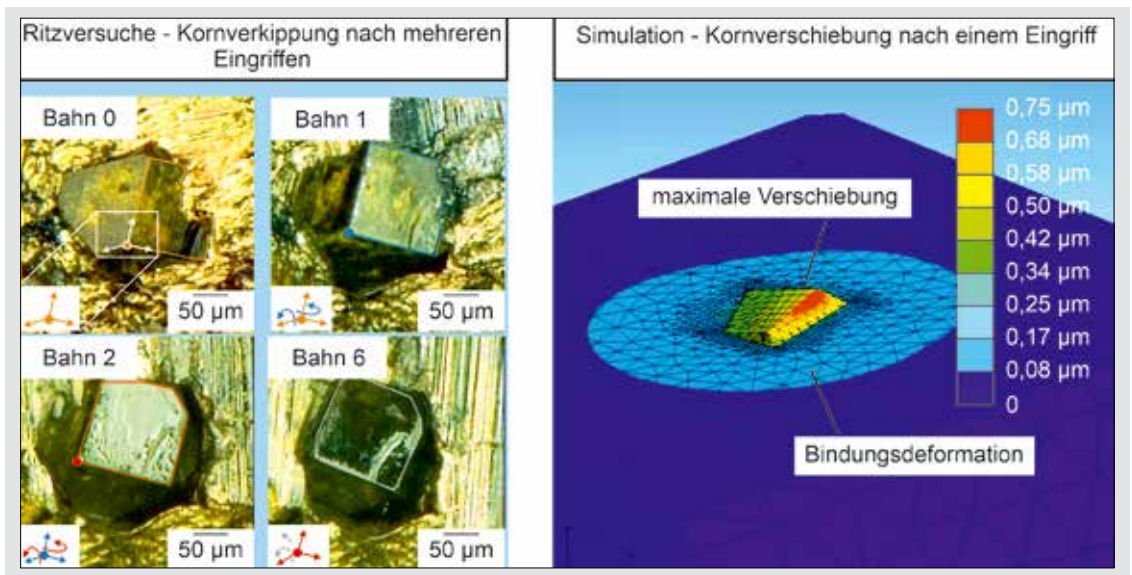
dung zu Berechnung von Bindungsdeformation simuliert werden. Dazu wird aus der berechneten Topografie der Schleifscheibe nach dem Abrichten ein einzelnes Diamantkorn mit der umgebenden Bindung extrahiert und an eine FEM-Simulation übergeben. Der so erzeugte Ausschnitt der Schleifscheibenoberfläche berücksichtigt folglich auch den Kornüberstand und den stützenden Bindungsrücken, die aus dem Abrichtprozess resultieren. Auf Basis der Kontaktbedingungen können mittels der FEM-Simulations Software Ansys dann Spannungen am Schleifkorn, plastische und elastische Verformungen der Bindung und Temperaturverläufe im Schleifbelag abgebildet werden. Durch die Verformungen der Bindung kommt es dabei zu einer Verschiebung des einzelnen Korns. In Bild 9, rechts ist die Verschiebung, die sich in der Simulation nach einem Eingriff berechnet, qualitativ dargestellt. Derartige Effekte beeinflussen die Werkstücktopografie und sollen zukünftig genutzt werden, um den Werkzeugverschleiß abzubilden. Hierfür sind jedoch noch detailliertere Untersuchungen notwendig.

**Zusammenfassung und Ausblick**

Der ganzheitliche Ansatz für die Modellierung der Herstellung und des Einsatzes von sin-

termetallischen Schleifwerkzeugen stellt ein vielversprechendes Hilfsmittel für die Entwicklung und Auslegung neuer Schleifwerkzeuge dar. Durch das Ineinandergreifen der Teilsimulationen wird dabei sichergestellt, dass das Gesamtwerkzeug mit seinem Einsatzverhalten und nicht ein einzelner Fertigungsschritt im Fokus der Modellierung steht. Die Einbeziehung der Einsatzvorbereitung und des Einsatzverhaltens stellt ferner sicher, dass die Ergebnisse auch eine direkte industrielle und wissenschaftliche Relevanz für die Schleiftechnologie aufweisen.

Trotz der sich noch in der Entwicklungsphase befindenden Simulation wurde bereits gezeigt, wie der Misch- und Einformprozess für die Optimierung der Fertigungskette verbessert werden kann. Dabei können Mischgeschwindigkeit und -dauer der Mischgüte gegenübergestellt und so abgestimmt werden, dass unnötige Mischzeiten eingespart werden. Die aus der Simulation erhaltene Verteilung der unterschiedlichen Partikel innerhalb des Sinterguts stellt dabei eine realistischere Partikelverteilung als die andernfalls eingesetzten Zufallsverteilungen dar. Diese Verteilung wird genutzt, um die Vorgänge während des Kalt- und Heißpressens zu modellieren. Es können Span-



**Bild 9**  
Gegenüberstellung des Ritzversuchs Experiment und Simulation.

nungen im Sintergut sowie dessen Verdichtung simuliert werden. Letztere ermöglicht zum Beispiel auch die Vorhersage der im Schleifbelag vorhandenen Restporosität abhängig von den jeweiligen Prozessbedingungen. Zudem kann über die Partikelanalyse eine stochastische Charakteristik ermittelt werden, welche eine Nachbildung des Schleifwerkzeugs in der Materialabtragssimulation ermöglicht. In dieser Simulation des Abrichtprozesses kann die Schleifscheibentopografie in Abhängigkeit der eingestellten Prozessstellgrößen abgebildet werden. Die so erhaltenen geometrischen Randbedingungen, wie zum Beispiel die Größe des Bindungsrückens,

können dann in den weiterführenden Simulationen berücksichtigt werden. Auf makroskopischer Ebene kann hierbei direkt auf das Abrichtergebnis zurückgegriffen werden, da beide Prozessschritte mit dem gleichen Simulationsprogramm simuliert werden. Für die Simulation auf mikroskopischer Ebene kann auf diese Weise zudem die Umgebung eines Kornes realistisch abgebildet werden, in dem der Kornüberstand und die Kornorientierung nachgebildet werden. Temperaturverläufe und Spannungen sowie die daraus resultierenden Verformungen können so bestimmt und Rückschlüsse auf Belastungsgrenzen gezogen werden. Diese können wie-

derum in der makroskopischen Materialabtragssimulation verwendet werden, um Verschleißbedingungen bei der Simulation des Schleifprozesses zu berücksichtigen.

Aufbauend auf der in diesem Artikel aufgezeigten Gesamtsimulation werden die einzelnen Teilsimulationen in Zukunft weiter optimiert und parametrisiert sowie weitere Verknüpfungen zwischen den einzelnen Simulationen geschaffen. Insbesondere die weitere Vernetzung zwischen Herstellungsprozess und Einsatzvorbereitung sowie Einsatzverhalten wird dabei intensiv durch experimentelle Untersuchungen vorangetrieben und validiert. ■

**Weitere Infos:** [www.ifw.uni-hannover.de](http://www.ifw.uni-hannover.de)

**Bildnachweis:** Verfasser

**Literaturnachweis:** [1] Webster, J.; Tricard, M.: *Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding*, CIRP Annals-Manufacturing Technology 2004, 53(2), 597–617 [2] Zu, E. X.; Zhou, P.; Jiang, Z. H.: *Discrete Element Method of Coke Accumulation: Calibration of the Contact Parameter*, IFAC PapersOnLine, 2018, 51(21), 241–245 [3] Chou, S. H.; Song, Y. L.; Hsiau, S. S.: *A Study of Mixing Index in Solid Particles*, KONA Powder and Particle Journal, 2017, 34, 275–281 [4] Denkena, B.; Breidenstein B.; Krödel, A.; Bouabid, A.: *Influence of the Manufacturing Process on the Local Properties of Bronze-Bonded Grinding Tools*, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 2020, 142, 1–8 [5] Denkena, B.; Böß, V.: *Technological NC simulation for grinding and cutting processes using CutS*, Proceedings of the 12th CIRP conference on modelling of machining operations, Vol. II, 7. –8. Mai, Donostia-San Sebastian, Spanien, 563–566 [6] Denkena, B.; Bouabid, A.; Krödel, A.: *Single grain grinding: a novel approach to model the inter-actions at the grain/bond interface during grinding*, The international Journal of Advanced Manufacturing Technology 2020, 107, 4811–4822.



 Dr. Harnisch  
Publications

Ihre Newsletter-Anmeldung unter:  
[www.harnisch.com](http://www.harnisch.com)

# Digital as usual.

## Der Newsletter des Dr. Harnisch Verlags

Immer wissen, was es Neues gibt? Ergänzend zu unseren Print-Magazinen halten wir Sie mit unserem Newsletter auf dem Laufenden, völlig kostenlos.

Erhalten Sie aktuelle Informationen und exklusive Inhalte aus verschiedenen Branchen. Die Anmeldung zum Newsletter unter: [www.harnisch.com](http://www.harnisch.com)