

Numerische Untersuchungen zum schwingungsüberlagerten Pressen von Aluminiumpulver

Bernd-Arno Behrens, Matthias Kammler, Edin Gastan, Fabian Lange*

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Leibniz Universität Hannover (LUH)

An der Universität 2

30823 Garbsen, GERMANY

*lange@ifum.uni-hannover.de

Die Reduzierung der Restporosität stellt ein aktuelles Problem bei der Auslegung von pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen dar. In diesem Aufsatz wird beschrieben, wie über eine Schwingungsüberlagerung des Pressprozesses die Porosität im Bauteil verringert werden kann. Darauf aufbauend wird eine Möglichkeit dargestellt, das Verfahren einer rechnergestützten Auslegung auf Basis der Finite-Elemente-Methode zugänglich zu machen. Als Werkstoffmodell dient hierbei das DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell.

Keywords: Pulvermetallurgie, Pulverpressen, Schwingungsüberlagerung, Finite-Elemente-Methode (FEM)

Einleitung

Die pulvermetallurgische Fertigung bietet eine Reihe von verfahrensimmanenten Vorteilen. Die hohe Rohstoffausnutzung, der geringe Energieaufwand im Vergleich zu anderen Fertigungsverfahren und die Möglichkeit endkonturnaher Herstellung sind nur einige wenige Vorteile, die zu nennen wären. In der Regel verbleibt im Bauteil allerdings eine gewisse Restporosität, welche sich negativ auf die Festigkeit auswirkt.

Der in diesem Aufsatz beschriebene Ansatz zur Reduzierung dieser Restporosität besteht in der Schwingungsüberlagerung des Pulverpressprozesses. Hierfür wurde am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover (LUH) ein entsprechendes Werkzeugsystem entwickelt und getestet. Auf Basis von Kraft-Weg-Verläufen, die während des Pressprozesses aufgenommen wurden, erfolgte die Parameterbestimmung für ein Werkstoffmodell, um die Schwingungsauswirkungen auf die Dichteverteilung simulativ abbildbar zu machen. Mit Hilfe der so bestimmten Werkstoffparameter erfolgte die numerische Berechnung des Pressprozesses. In diesem Rahmen wurden Vergleichsrechnungen für Pressprozesse mit und ohne Schwingungsüberlagerung gegenübergestellt.

Beschreibung des Werkzeugs zum schwingungsüberlagerten Pressen und der erstellten Probekörper

Beim Pulverpressen kommt es insbesondere in der Grenzfläche zwischen Pulvermaterial und Matrize zu einem starken Einfluss der Reibung. Diese führt zu unerwünschten Dichteinhomogenitäten im Presskörper. Um gezielt an dieser Stelle das Pressergebnis positiv zu beeinflussen, baut das realisierte Werkzeugkonzept auf einer Schwingungsanregung der Matrize auf. In Bild 1 ist die Konstruktionsskizze des Werkzeugsystems dargestellt.

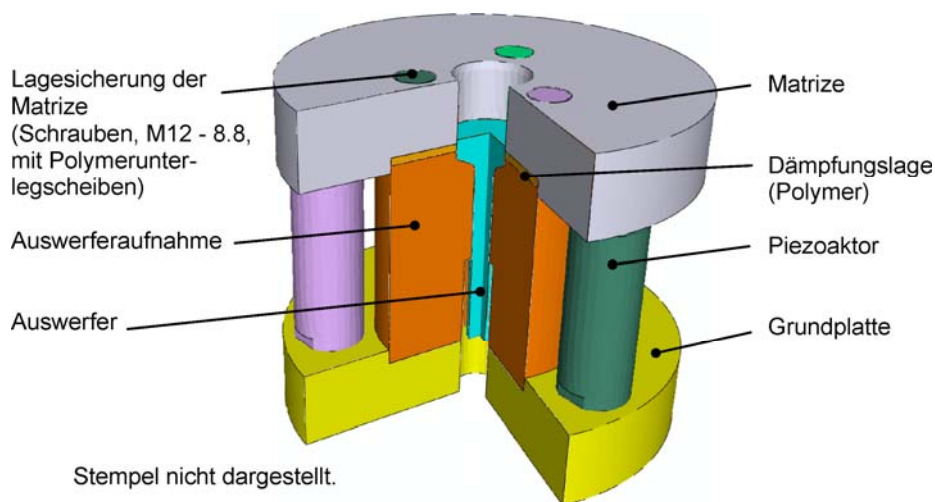


Bild 1: Konstruktionsskizze des entwickelten Werkzeugsystems

Beim hier verfolgten Werkzeugkonzept wird eine elastisch gelagerte Matrize über drei parallel angesteuerte Piezoaktoren in axialer Richtung zu Schwingungen angeregt. Der Effekt der Schwingungsüberlagerung kommt somit direkt in der Mantelfläche des Pressgutes zum tragen, wo die größten Relativbewegungen zwischen Pulver und Werkzeugwandung herrschen. Durch die elastische Bettung der Matrize ergibt sich als Nebeneffekt eine wirkungsvolle Überlastsicherung für die vergleichsweise empfindlichen Piezoaktoren.

Das realisierte Werkzeugsystem ermöglicht die schwingungsüberlagerte Fertigung von zylindrischen Grünkörpern mit einem Nenndurchmesser von 48 mm und einer Höhe von bis zu 30 mm. In Bild 2 ist das Werkzeugsystem nach dem Einbau in die Presse gezeigt.

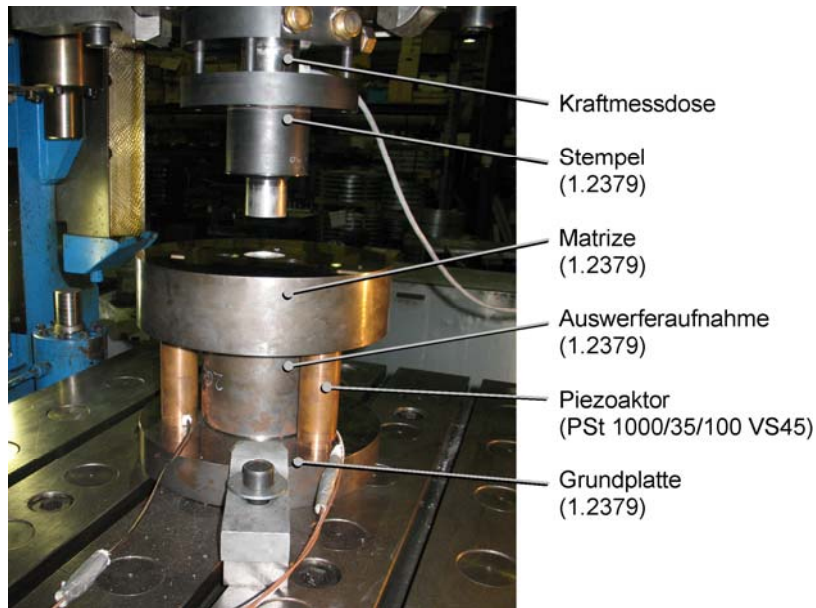


Bild 2: Eingebautes Werkzeugsystem

Erstellung der Probekörper

Zur Erprobung des entwickelten Werkzeuges und zur Bestimmung der Auswirkungen des schwingungsüberlagerten Pressens auf die Eigenschaften der hergestellten Grünkörper wurden zunächst Untersuchungen zum prinzipiellen Verdichtungsverhalten unter Einfluss von überlagerten Schwingungen bei Frequenzen von $f=0$ Hz bis $f=18$ kHz durchgeführt. Die mittels dieser Pressversuche ermittelten Kraft-Weg-Verläufe, die als erstes Kriterium für das Verdichtungsverhalten herangezogen wurden, zeigten jedoch keine signifikanten Auswirkungen für höhere Frequenzen. Im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen wurden deshalb Pressversuche bei Frequenzen von $f=0$ Hz (Referenzversuche), sowie 30, 60 und 90 Hz durchgeführt.

Die Probekörper wurden aus Aluminiumpulver (Alumix 13 der Fa. ECKA) mit zwei Maximal-Presskräften (250 und 500 kN) gepresst und anschließend gesintert. Der kraftgesteuerte Betrieb der eingesetzten Presse wurde gewählt, um eine Überlastung der vergleichsweise empfindlichen Piezoaktoren auszuschließen.

An den erstellten Probekörpern wurde auf experimentelle Weise lokal die Dichte bestimmt, um die Auswirkung der Schwingungsüberlagerung zu untersuchen. Für die Ergebnisse sei auf [1] verwiesen.

DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell

Für die numerische Analyse des schwingungsüberlagerten Pressens müssen die Parameter eines geeigneten Materialmodells bestimmt werden. Als Basis hierfür dient das ursprünglich für die Bodenmechanik entwickelte DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell [2], welches sich allerdings auch eignet, um Pulverpressprozesse abzubilden [3].

Das Material wird mit Hilfe des DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell als elastisch-plastisches, kompressibles Kontinuum beschrieben. In Bild 3 ist das Materialmodell in der Ebene des hydrostatischen Drucks p und der VON MISES-Vergleichsspannung q aufgetragen.

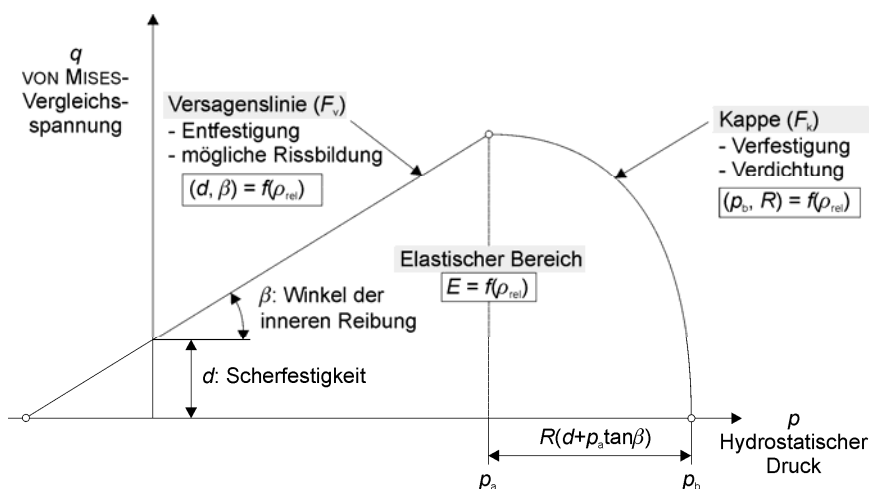


Bild 3: DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell

Der elastische Bereich ist linksseitig durch die Versagenslinie begrenzt, welche durch die Scherfestigkeit d und den Winkel der inneren Reibung β beschrieben wird. Erreicht ein Spannungszustand diese Gerade, kommt es zur Entfestigung des Materials, was zu einer erhöhten Gefahr der Rissbildung führt. Die rechtsseitige Begrenzung des elastischen Bereichs stellt die elliptische Verdichtungskappe dar. Ihr Erreichen führt zu einer Verdichtung und somit Verfestigung des Materials. Ein Spannungszustand außerhalb der beiden Begrenzungen ist nicht definiert [4].

Die elliptische Verdichtungskappe F_k und die Versagenslinie F_v sind durch folgende Definitionsgleichungen gegeben:

$$F_k = \sqrt{(p - p_a)^2 + (Rq)^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (\text{Gl. 1})$$

$$F_v = q - p \cdot \tan \beta - d = 0 \quad (\text{Gl. 2})$$

Der Parameter R repräsentiert die Exzentrizität der Verdichtungskappe, d die Scherfestigkeit, β den Winkel der inneren Reibung und p_a den Druck, bei dem die Verdichtungskappe in die Versagenslinie übergeht (Bild 3).

Parameterbestimmung für das DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell

Zur Ermittlung der Kennwerte der Verdichtungskappe wurden die im Rahmen der Pressversuche aufgenommenen Kraft-Weg-Verläufe herangezogen. Für die weitere Auswertung dieser Verläufe und Ableitung der für das Drucker-Prager-Kappenmodell notwendigen Parameter wurden die überlagerten Schwingungen durch Bildung eines gleitenden Durchschnittes aus dem Kraft-Weg-Signal herausgefiltert. Die derart geglätteten Verläufe sind in Bild 4 beispielhaft für eine Verdichtung bei einer Maximalkraft von etwa 240 kN dargestellt. Der wellenförmige Verlauf der Kurve für 90 Hz ist technologisch bedingt, da sich bei der Verwendung von Piezoaktoren für höhere Frequenzen größere Kraftamplituden bei gleichzeitig geringeren Wegamplituden ergeben.

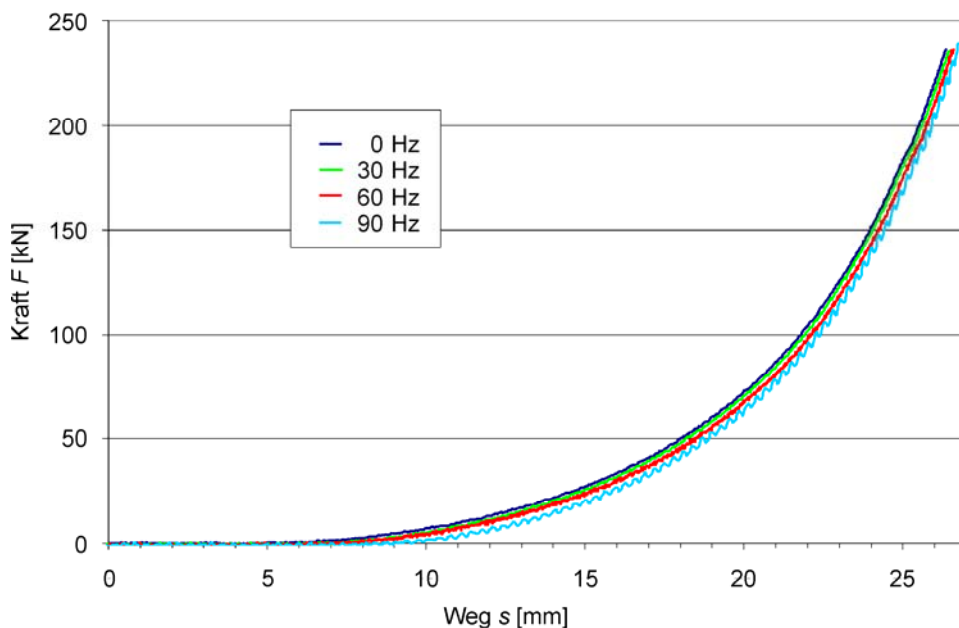


Bild 4: Geglättete Kraft-Weg-Verläufe bei unterschiedlichen Überlagerungsfrequenzen von $f = 0, 30, 60$ und 90 Hz

Da die Unterschiede zwischen den Versagenslinien unterschiedlicher relativer Dichte für Aluminium minimal sind (siehe auch [5]), stellt es eine hinreichend genaue Näherung dar, für die Versagenslinien unterschiedlicher relativer Dichte die Steigung

der Versagenslinie $\tan(\beta)$ zu $\tan(70^\circ)$ und eine Scherfestigkeit von null anzunehmen. Diese Annahme wird in dieser Untersuchung auch für unterschiedliche Frequenzen übernommen.

Anhand von experimentellen Untersuchungen für drei Überlagerungsfrequenzen (30, 60 und 90 Hz) sowie den Referenzversuchen ohne Schwingungsüberlagerung wurden die Parameter des DRUCKER-PRAGER-Kappenmodells dichteabhängig bestimmt. Im Folgenden wird auf die zugrunde liegende analytische Herleitung der Parameter eingegangen, wie sie auch in der Arbeit von BEHRENS ET. AL [5] verwendet wurde.

Die Probekörper wurden mittels rotationssymmetrischen Axialpressen im geschlossenen Gesenk hergestellt. Auf Basis dessen wird angenommen, dass keine Dehnungen in radialer und tangentialer Richtung herrschen, somit also

$$\varepsilon_r = \varepsilon_t = 0 \quad (\text{Gl. 3})$$

gilt. Hieraus ergibt sich für den Dehnratentensor folgende Form:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \dot{\varepsilon}_{zz} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl. 4})$$

Der Dehnratentensor lässt sich in den hydrostatischen Anteil

$$\dot{\varepsilon}_h = \frac{1}{3} \dot{\varepsilon}_{zz} \quad (\text{Gl. 5})$$

und den deviatorischen Anteil

$$\dot{\varepsilon}_d = \frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{zz} \quad (\text{Gl. 6})$$

zerlegen. Auf der Kappe des DRUCKER-PRAGER-Kappenmodells liegt assoziiertes Fließen vor [6], die Dehnrate steht also senkrecht zur Fließfunktion. Die Dehnrate

lässt in die Komponenten Dilatanz und Scherung aufteilen. Die Dilatanz ist diejenige Komponente, die für die Volumenänderung verantwortlich ist, während die Scherung die Gestaltänderung verursacht. Für die Berechnung der Steigung der Kappe des DRUCKER-PRAGER-Kappenmodells ergeben sich zwei Varianten. Die erste Variante baut darauf auf, dass sich die elliptische Kappe über die, zuvor genannte, Definitionsgleichung

$$F_k = \sqrt{(p - p_a)^2 + (Rq)^2} - R(d + p_a \tan \beta) = 0 \quad (\text{Gl. 7})$$

beschreiben lässt [7]. Die Steigung der Kappe lässt sich durch Umformen von (Gl. 7) zu

$$\frac{dq}{dp} = \frac{-(p - p_a)}{R^2 \sqrt{\left[\frac{-(p - p_a)^2}{R^2} + (d + p_a \tan \beta)^2 \right]}} \quad (\text{Gl. 8})$$

errechnen. Die zweite Variante zur Bestimmung der Steigung der Kappe ergibt sich aus dem assoziierten Fließen. Hierdurch gilt:

$$\frac{dq}{dp} = -\frac{\dot{\varepsilon}_d}{\dot{\varepsilon}_h} = -2 \quad (\text{Gl. 9})$$

Über (Gl. 8) und (Gl. 9) bzw. (Gl. 7) und (Gl. 10) lassen sich dann die Koordinaten des Fließortes p bzw. q berechnen:

$$p = p_a + \frac{2R^2(d + p_a \tan \beta)}{\sqrt{4R^2 + 1}} \quad (\text{Gl. 10})$$

$$q = \frac{(d + p_a \tan \beta)}{\sqrt{4R^2 + 1}} \quad (\text{Gl. 11})$$

Die Exzentrizität R der Kappe lässt sich nun aus (Gl. 11) zu

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{\left[\left(\frac{p_a \tan \beta + d}{q} \right)^2 - 1 \right]} \quad (\text{Gl. 12})$$

bestimmen und der Druck p_a bei dem die Kappe in die Versagenslinie übergeht zu

$$p_a = - \left(\frac{d}{\tan \beta} + \frac{q}{\tan^2 \beta} \right) + \sqrt{\left(\frac{d}{\tan \beta} + \frac{q}{\tan^2 \beta} \right)^2 - \left(\frac{d^2 - q^2}{\tan^2 \beta} - \frac{2qp}{\tan^2 \beta} \right)} \quad (\text{Gl. 13})$$

durch das Einsetzen von (Gl. 12) in (Gl. 10).

Mit Hilfe dieser Herleitung können die Fließorte im DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell bestimmt werden. In Bild 5 sind sich für die betrachteten Frequenzen ergebenden Fließorte dichteabhängig dargestellt. Die Dichteabhängigkeit ist über die relative Dichte

$$\rho_{\text{rel}} = \frac{V_P}{V_G} \quad (\text{Gl. 14})$$

dargestellt, also dem Verhältnis aus dem Partikelvolumen V_P zum Gesamtvolumen des Körpers V_G .

Erwartungsgemäß ist in Bild 5 zu erkennen, dass für eine stärkere Verdichtung des Materials größere Spannungen benötigt werden. Dies ergibt sich daraus, dass für steigende Werte der relativen Dichte eine Vergrößerung des Fließortes eintritt.

Die Auswirkung der Schwingungsüberlagerung zeigt sich durch den Vergleich der Kurven gleicher relativer Dichte. Es lässt sich erkennen, dass die Referenzkurve der Versuche ohne Schwingungsüberlagerung bei den relativen Dichten 75 und 80 % praktisch mit den Kurven der Versuche mit Schwingungsüberlagerung zusammenfallen. Bei einer relativen Dichte von 85 % und insbesondere bei einer relativen Dichte von 89 % liegt die Verdichtungskappe für das Pressen ohne Schwingungsüberlagerung zu höheren Spannungen verschoben, was zeigt, dass hier größere Kräfte zur Verdichtung des Pulvers benötigt werden.

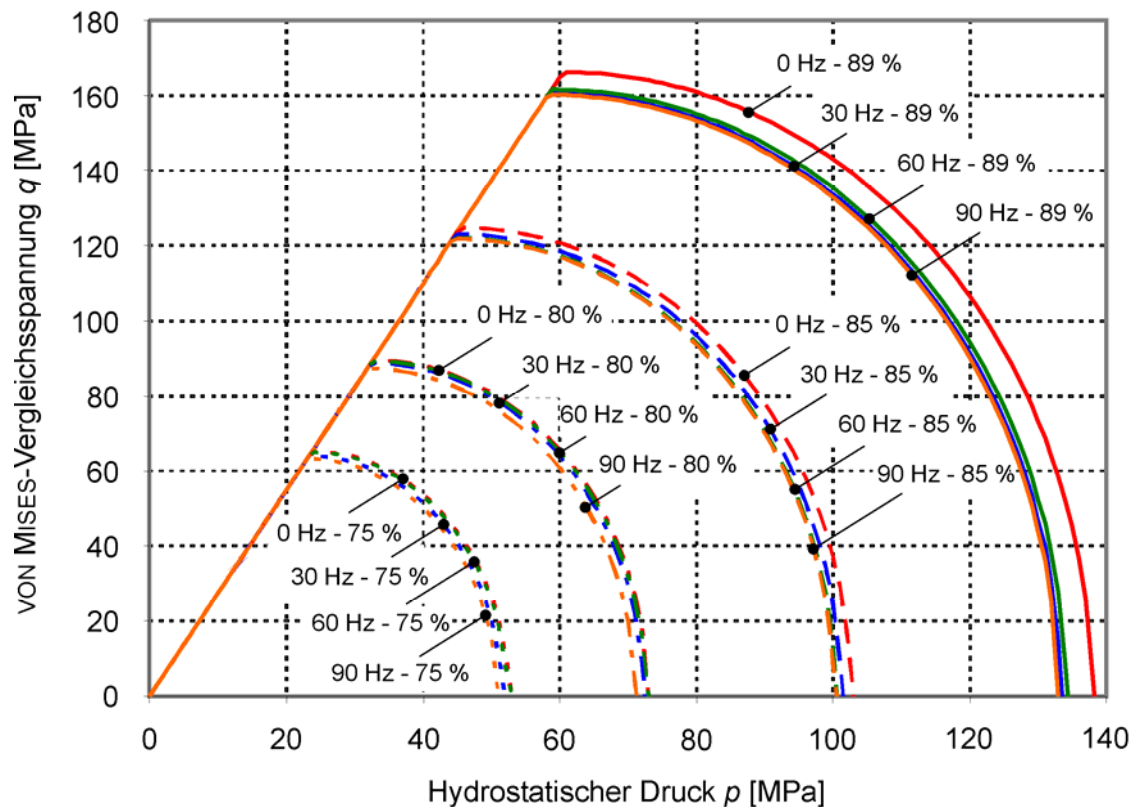


Bild 5: Dichteabhängige Fließorte des DRUCKER-PRAGER-Kappenmodells für eine relative Dichte von 75, 80, 85 bzw. 89% bei 0, 30, 60 und 90 Hz Überlagerungsfrequenz

Numerische Simulation des schwingungsüberlagerten Pressprozesses

Im Folgenden werden die durchgeführten Simulationsrechnungen beschrieben: Für die numerischen Untersuchungen kam das FE-System Abaqus/Standard zur Anwendung. Die Implementierung des Werkstoffmodells in das Programm-System erfolgte über eine User-Subroutine, wobei das Pulvermaterial als elastisch-plastisches, kompressibles Kontinuum und die Werkzeuge starr modelliert wurden.

Beim betrachteten Pressprozess wurden zylindrische Probekörper mit einer Schütthöhe von 40 mm auf eine Endhöhe von 24 mm gepresst. Bei der Simulation wird also für alle Probekörper ein identischer Pressweg angenommen.

Der Fokus dieser Arbeit lag in der numerischen Untersuchung der Auswirkungen des schwingungsüberlagerten Pressens auf die sich in einem Presskörper einstellende Verteilung der lokalen Dichte. In Bild 6 sind die Ergebnisse der Simulationen zur Ermittlung der Dichteverteilung am Ende der Pressphase gezeigt. Analog zu den durchgeführten Versuchen wurden Simulationsrechnungen für alle drei Frequenzen sowie den Referenzversuch ohne aufgedrängte Schwingung durchgeführt.

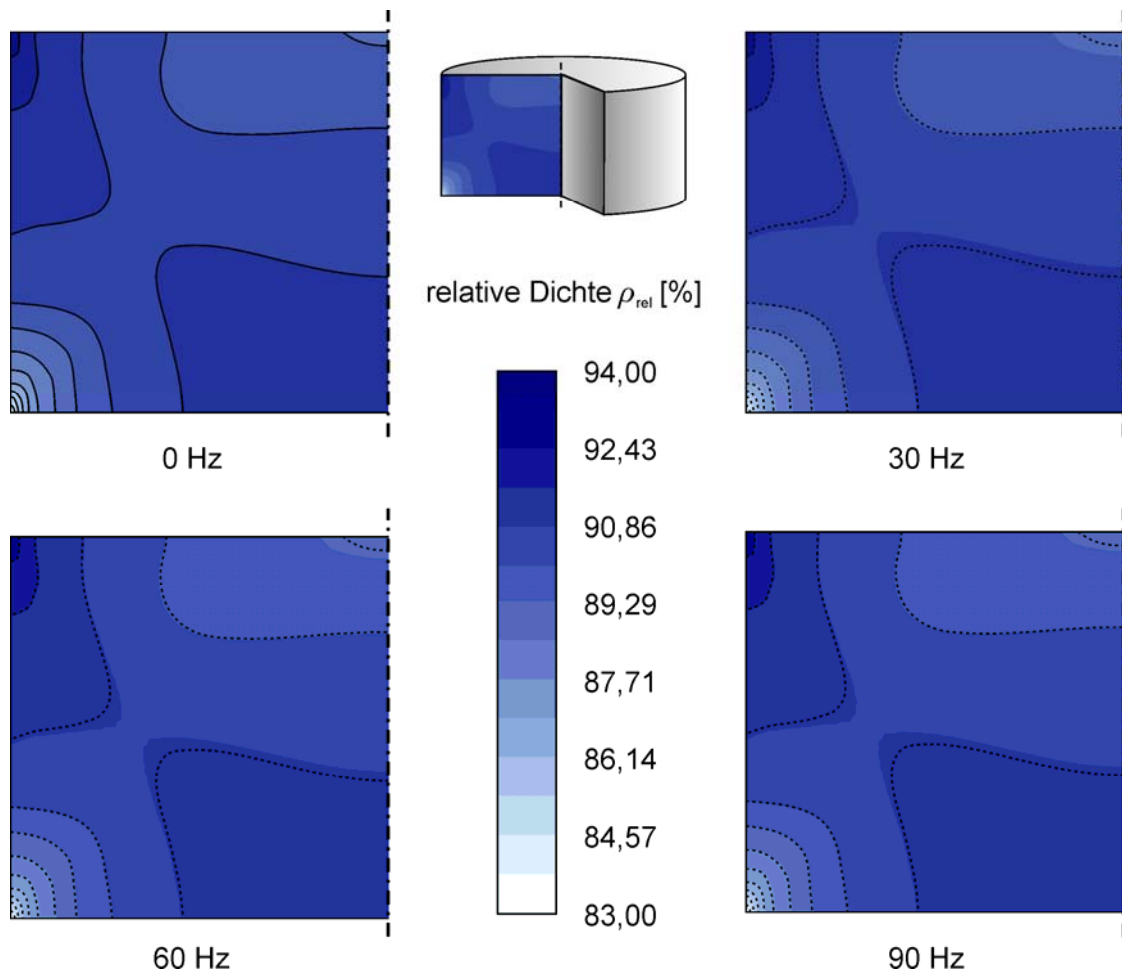


Bild 6: Simulationsergebnisse der relativen Dichte in Abhängigkeit von der Frequenz beim schwingungsüberlagerten Pressen von einer Schütthöhe von 40 mm auf eine Endhöhe von 24 mm

Für alle Probenquerschnitte zeigt sich linksseitig (also matrizenseitig) ein axialer Dichtegradient mit einem Minimum im unteren Bereich des Probekörpers und einem Maximum im oberen Bereich. Er resultiert aus der Wechselwirkung zwischen Pulver und Matrize. Ein Vergleich zwischen den Ergebnissen für den Referenzversuch und den Versuchen mit Schwingungsüberlagerung zeigen Unterschiede in der Verteilung der relativen Dichte; die Unterschiede zwischen den Ergebnissen für verschiedene Überlagerungsfrequenzen sind nur marginal (zur Verbesserung der Vergleichbarkeit sind die Verläufe des Referenzversuchs bei den Versuchen mit Schwingungsüberlagerung gestrichelt dargestellt). Daraus ergibt sich, dass die Auswirkungen einer Frequenzvariation der Schwingungsüberlagerung im hier betrachteten Frequenzbereich relativ gering sind.

Zusammenfassung

Im Rahmen dieses Artikels wurden Untersuchungen zum schwingungsüberlagerten Pressen von Aluminiumpulver vorgestellt. Hierzu wurde zu Beginn auf die Konstruktion des verwendeten Werkzeugsystems sowie die Probekörperherstellung geschildert. Im Anschluss wurde auf die Parameteranpassung des Werkstoffmodells eingegangen, um das Verdichtungsverhalten unter Schwingungsüberlagerung numerisch abbildbar zu machen. Als Werkstoffmodell dient das DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell, welches das Material als elastisch-plastisches, kompressibles Kontinuum beschreibt. Zum Ende des Artikels wurden vergleichende Simulationen eines Beispielpressprozesses vorgestellt.

Im Rahmen der Bestimmung der dichteabhängigen Fließorte für das DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell konnten die Auswirkungen der Schwingungsüberlagerung dargestellt werden. Es zeigte sich, dass die Schwingungsüberlagerung dazu führt, dass geringere Spannungen benötigt werden, um den gleichen Wert der relativen Dichte zu erreichen, als dies im Referenzversuch ohne eingebrachte Schwingungen der Fall ist. Anhand darauf aufbauender Vergleichsrechnungen eines Beispielpressprozesses auf Basis der Finite-Elemente-Methode zeigten sich entsprechend Änderungen im Verlauf der relativen Dichteverteilung. Die Auswirkungen der Schwingungsüberlagerung für das verwendete Aluminiumpulver sind zwar relativ gering, da dieses schon sehr gute Verdichtungseigenschaften besitzt. Für weiterführende Untersuchungen an schwer pressbaren Pulvern werden entsprechend größere Auswirkungen auf das Verdichtungsverhalten erwartet.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse entstanden im Rahmen des Forschungsprojekts „FEM-Simulation des Aluminium-Sinterschmiedeprozesses“ am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) der Leibniz Universität Hannover (LUH). Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

Literatur

- [1] Behrens, B.-A.; Kammler, M.; Gastan, E.; Lange, E.: *Experimentelle Untersuchungen zum schwingungsüberlagerten Pressen von Aluminiumpulver*, UTF Science, 4/2009, S. 1-8, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2009

- [2] Drucker, D. C.; Gibson, R.E.; Henkel, D.J.: *Soil mechanics and work-hardening theories of plasticity*, Transactions American Society of Civil Engineers 122, pp. 338–346, 1957

- [3] Coube, O.; Riedel, H.: *Numerical simulation of metal powder die compaction with special consideration of cracking*, Powder Metallurgy, Vol. 43, No. 2, pp. 123-131, 2000
- [4] Kraft, T.; Coube, O.; Riedel, H.: *Numerische Simulation des Pressens und Sinterns – Grundlagen und Anwendungen*, Fraunhofer Institut für Werkstoffmechanik, http://www.iwm.fhg.de/arbeitsgebiet/lb/thema_lb41/pressen-sintern.pdf, Freiburg, 2001
- [5] Behrens, B.-A.; Bouguecha, A.; Hanini, K.: *Beschreibung des Verfestigungsverhaltens von Aluminiumpulver im DRUCKER-PRAGER-Kappenmodell*, UTF Science, 2/2004, S. 1-4, Meisenbach Verlag, Bamberg, 2004
- [6] Riedel, H.: *Rechnerisch optimiertes Pressen und Sintern: Formgenaue und rissfreie Teile*, Schweizer Maschinenmarkt, Heft 20, S. 54-56, 1997
- [7] Doege, E.; Hanini, K.; Schmidt-Jürgensen, R.: *Numerische und experimentelle Untersuchungen zum Pulverpressen von Aluminium*, Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, Jhg. 34, S. 729-735, 2003

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) in Hannover. Er war Leiter der Abteilung Umformtechnik bei der Salzgitter AG. Im Jahr 2002 wurde sein Verantwortungsbereich auf die gesamte Anwendungstechnik des Konzerns erweitert. Seit Oktober 2003 ist er Leiter des IFUM der Leibniz Universität Hannover (LUH).

Dr.-Ing. Matthias Kammler studierte Bauingenieurwesen an der Universität Hannover und promovierte am IFUM. Seit 2001 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Numerische Methoden am IFUM, derzeit in der Funktion des stellvertretenden Abteilungsleiters.

Dipl.-Ing. Edin Gastan studierte Maschinenbau an der Universität Hannover. Seit 2003 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Massivumformung am IFUM.

Dipl.-Ing. Fabian Lange studierte Maschinenbau an der Universität Hannover. Seit 2006 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung Numerische Methoden am IFUM.