

# Einfluss des Materialflusses auf die Verdichtung beim Sinterschmieden

Das häufigste Verfahren zur Formgebung metallischer Pulver ist das Matrizenpressen. Nach dem Pressen und anschließenden Sintern verbleibt eine Restporosität im Gefüge, die sich nachteilig auf die mechanischen Eigenschaften des Bauteils auswirkt. Um die Porosität weiter zu verringern, werden endkonturnah gepresste Funktionsbauteile teilweise warm nachgeschmiedet. Dabei wird das Bauteil verdichtet, wobei ein minimaler Werkstofffluss und eine Verfestigung des Pulverwerkstoffs erzeugt wird. Hierbei ist eine vollständige Schließung der Poren im Werkstoff nur schwer erreichbar.

In dem von der DFG geförderten Projekt Be1691/156-1 „Einfluss des Materialflusses auf die Verdichtung beim Sinterschmieden“ wird das Ziel verfolgt, die Werkstoffdichte beim Sinterschmieden durch gezielte Erzeugung eines hohen Materialflusses im Bauteil zu steigern. Dies kann durch eine erhöhte Formänderung während des Schmiedens erreicht werden.

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens, Dipl.-Ing. Timur Yilkiran,  
M.Sc. Najmeh Vahed, Dipl.-Ing. Conrad Frischkorn  
Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM), Leibniz Universität Hannover

## Einleitung

Auf Grund stetig steigender Materialkosten auf dem globalen Markt versuchen die produzierenden Unternehmen, gestalterische Maßnahmen zu ergreifen bzw. alternative Fertigungsverfahren einzusetzen. Wegen der hohen Materialausnutzung und des niedrigen Energieverbrauchs bietet die Sintertechnik erhebliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Fertigungsverfahren wie dem Gießen oder den spanenden Verfahren. Die Material-Verarbeitung im pulverförmigen Zustand ermöglicht außerdem eine variable Legierungsbildung sowie eine Erzeugung fester und gleichzeitig gewichtsreduzierter Komponenten (z.B. Pleuel aus Titan) [VOL03].

Der größte Teil von Sinterformteilen wird in Europa in der Automobilindustrie verwendet, gefolgt vom Maschinenbau und der Elektroindustrie (Abbildung 1, links). Typische pulvermetallurgisch hergestellte Formteile für diese Industriebranchen sind gerad- und schrägverzahnte Zahnräder mit Außen- oder Innenverzahnung, Ölpumpenräder, Zahnstangen, Pleuel, Lagerschalen und -deckel, Synchron- und Dichtungsringe, Schaltwerksteile, Stoßdämpferkomponenten usw. (Abbildung 1, rechts) [UPA11, MPI14].

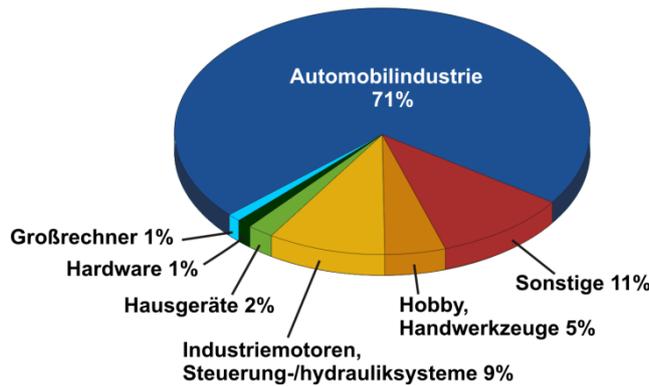


Abbildung 1: links: Anwendungsbereiche von Sinterformteilen [MPI14], rechts: Sinterbauteile für die Automobilindustrie

## Pulvermetallurgische Formgebungsverfahren

Ein typischer Verfahrensablauf bei der Herstellung von Sinterformteilen besteht aus der Formgebung des Pulvers bei Raumtemperatur (Kaltpressen) und einer anschließenden Wärmebehandlung des Presskörpers, dem sog. Sintern [SCH07]. Das für die Formgebung metallischer Pulver am häufigsten eingesetzte Verfahren ist das axiale Pressen in Matrizen. Das metallische Pulver wird hierbei in eine konturierte Matrize eingefüllt und zwischen Ober- und Unterstempel zu einem Presskörper kompaktiert. Die zum Pulververdichten benötigte Kraft kann entweder vom Oberstempel (einseitig) oder von Ober- und Unterstempel (zweiseitig) aufgebracht werden. Durch zweiseitiges Matrizenpressen mit entsprechend angepassten Werkzeugkomponenten können komplexere Bauteile in einem Pressvorgang hergestellt werden. Zur rissfreien Herstellung von abgesetzten Bauteilen werden die Stempel geteilt, so dass jeder Bauteilabsatz mit einem separaten Teilstempel gepresst werden kann. Zur Steuerung der Teilstempel ist die Verwendung eines Mehrstempeladapters erforderlich. Damit können die einzelnen Teilstempel weggebunden und mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten angetrieben werden [BEI96, SCH07]. Die anhand dieses Verfahrens gepressten Bauteile zeichnen sich durch eine glatte Oberfläche und gute Formgenauigkeit aus. Die Vorteile des Matrizenpressens liegen in einer Kombination aus vielfältigen geometrischen Gestaltungsmöglichkeiten, hoher Maß- und Wiederholgenauigkeit sowie hoher Produktivität [BEI96]. Ein wesentlicher Nachteil des Matrizenpressens ist die hohe Komplexität des Werkzeugaufbaus und der Werkzeugkinematik bei einer filigranen Bauteilgeometrie, was teilweise zu einer eingeschränkten Umsetzbarkeit bestimmter Bauteilgeometrien führt [SCH07].

Zur Festigkeitssteigerung wird das geformte Werkstück knapp unterhalb der Schmelztemperatur (ca.  $0,7 - 0,8 T_s$ ) des Grundwerkstoffs gesintert. Für eisenbasierte Legierungen beträgt die Sinterdauer ca. 30 Minuten bei  $1000 - 1150 \text{ °C}$  [DAN96, DOE10]. Beim Sintern wird die Festigkeit des Bauteils durch Diffusionsvorgänge im Oberflächenbereich der Pulverpartikel und durch die Bildung von sogenannten Sinterhälsen gesteigert sowie das Presshilfsmittel (z.B. Wachs) ausgebrannt. Durch das Sintern kann eine vollständige

Schließung der Poren jedoch nicht erreicht werden. Je nach Pressdruck und Sinter-temperatur bleibt eine Restporosität im Gefüge. Die Restporosität ist die Hauptursache für die schlechten mechanischen Eigenschaften gesinterter Bauteile im Vergleich zu Bauteilen aus Vollmaterial [ZAP81]. Durch ein zweiseitiges Pressverfahren sowie Optimierung der Prozessparameter, wie z.B. Pressdruck und -geschwindigkeit, Wandreibung sowie der Einfluss der Anwendung von Presshilfsmittel kann die Porosität der Presslinge reduziert jedoch nicht vollständig beseitigt werden.

Zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften und Erhöhung der Belastbarkeit von pulvermetallurgisch hergestellten Bauteilen können alternative Verfahren zum axialen Kaltpressen angewendet werden. Eine Möglichkeit ist das axiale Heißpressen (HP), welches als eine wichtige Fertigungsmethode bei der Herstellung von nicht oxidischen Keramikwerkstoffen sowie Metallmatrix-Verbundwerkstoffen besonders in Kleinserien eingesetzt wird. Dabei wird das Pulver unter gleichzeitigem Druck und Temperatur verdichtet. Die Prozesswärme unterstützt die Diffusionsprozesse innerhalb des Werkstoffs und fördert das Zusammenwachsen der Pulverpartikel. Somit kann eine höhere Verdichtung im Vergleich zum Kaltpressen mit anschließendem Sintern erreicht werden [THÜ93].

Ein weiteres Fertigungsverfahren ist das heißisostatische Pressen (HIP), mithilfe dessen die relative Dichte des Pulverwerkstoffs bis zu 100 % gesteigert werden kann. Das HIP-Verfahren wird aufgrund der hohen Kosten nur in der Produktion von Werkstoffen, z.B. Werkzeugstählen, angewendet, die aufgrund der besonderen Anforderungen an die Produkteigenschaften (z.B. chemische Zusammensetzung) nur pulvermetallurgisch hergestellt werden können. Die durch dieses Verfahren hergestellten Werkstoffe weisen eine feine, homogene und isotrope Mikrostruktur auf. Des Weiteren wird das HIP-Verfahren in der endkonturnahen Fertigung verwendet, wenn hierdurch trotz hoher Fertigungskosten wirtschaftliche Vorteile erzielt werden können [THÜ93]. Die HIP-Technik wird bei der Herstellung von Großteilen aus Hartmetallen sowie von Spezialsinterwerkstoffen wie Schnellarbeitsstahl, Super- oder Titanlegierungen industriell eingesetzt [SCH07].

Der Einsatz der genannten Verfahren (HP und HIP) setzt spezielle maschinelle Ausstattungen und somit hohe Produktionskosten voraus. Außerdem sind diese Verfahren aufgrund der technologischen Einschränkungen und langer Taktzeiten für Anwendung in der Großserienproduktion nicht geeignet. Eine kostengünstigere und effizientere Alternative bietet das Schmieden von gesinteren Bauteilen, d.h. Sinterschmieden, welches die Vorteile der Pulvermetallurgie und der Warmmassivumformung vereint und eine Verbesserung der mechanischen Eigenschaften von Sinterbauteilen ermöglicht [SIN06].

## **Sinterschmieden**

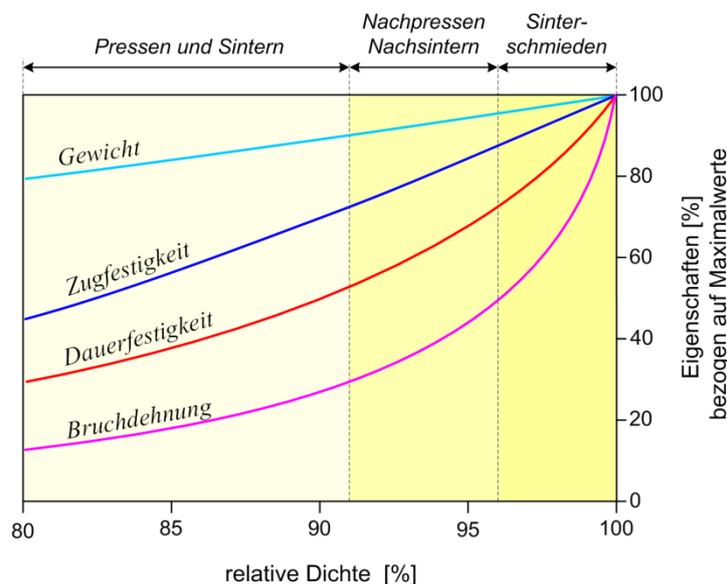
Die porösen Sinterbauteile können durch einen Kaltkalibrierschritt nachbearbeitet werden, wodurch die Bauteilfestigkeit infolge der Kaltverfestigung erhöht wird. Mithilfe von Sinterschmiedeverfahren lassen sich sehr gute Oberflächeneigenschaften und hohe Formtoleranzen realisieren. Allerdings kann eine vollständige Verdichtung aufgrund des hohen Widerstands des Materials mit zunehmender Kaltverfestigung nicht erreicht werden. Eine weitere Reduzierung der Porosität in den Bauteilen kann durch das Sinterschmieden,

d.h. eine Nachverdichtung des Sinterbauteils über der Rekristallisationstemperatur erreicht werden [SPU81]. Dieses Verfahren wurde bereits in den 70er Jahren erforscht [THÜ72], eine industrielle Einführung erfolgte aber erst in den 80er Jahren [SCH07].

Durch die Erhöhung der Materialdichte wird eine deutliche Verbesserung der mechanischen Eigenschaften erreicht. Insbesondere bei Bauteilen mit größerem Höhe-Breite-Verhältnis sowie komplexer Bauteilgeometrie ist die Verdichtung durch konventionelles Matrizenpressen unzureichend.

In Abbildung 2 wird der Einfluss von Nachbehandlungsprozessen auf die relative Dichte und somit auf die mechanischen Eigenschaften eines Sinterbauteils verdeutlicht. Die relative Dichte  $\rho_{rel}$  ist definiert als das Verhältnis der Dichte des porösen Materials  $\rho_{por}$  zur Dichte des vollverdichteten Materials  $\rho_0$ .

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{por}}{\rho_0} \quad (1)$$



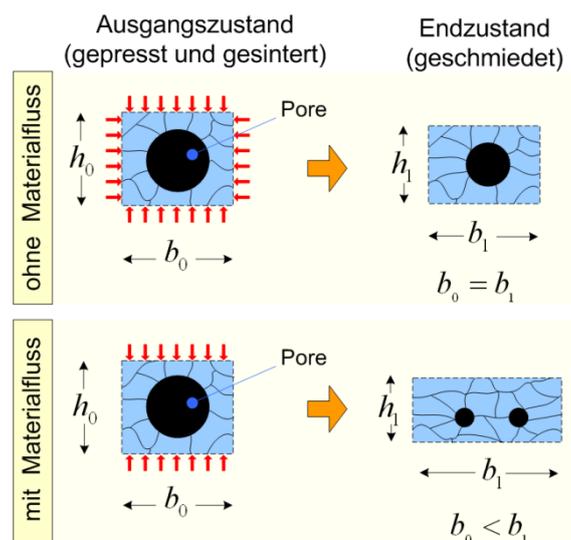
**Abbildung 2: Mechanische Eigenschaften eisenbasierter Sinterbauteile in Abhängigkeit von der relativen Dichte [SAN02, ZAP81]**

Im Unterschied zum konventionellen Sintern beinhaltet das Sinterschmieden einen zusätzlichen Prozessschritt, das Schmieden gepresster und gesinterter Bauteile. Das gepresste Rohteil kann mit vereinfachter oder mit endkonturnaher Geometrie hergestellt werden.

Bei der Anwendung eines endkonturnahen Sinterrohteils findet eine geringfügige Formänderung statt (Sinterschmieden ohne ausgeprägten Materialfluss). Der Werkstoff wird hauptsächlich in die Pressrichtung bewegt und durch eine Volumenreduktion komprimiert. Trotz des hohen Anstiegs der Dichte ist eine vollständige Beseitigung der Poren im Bauteil schwer zu erreichen. Zudem ist der Einsatz endkonturnaher Rohteile mit aufwändiger Herstellung von dichtehomogenen Presslingen verbunden. Die Dichtehomogenität des

Sinterrohteils ist für die guten Eigenschaften des geschmiedeten Endprodukts entscheidend. Um eine gleichmäßige Dichte des Bauteils unabhängig von der lokalen Bauteilhöhe zu realisieren, werden komplexe Presswerkzeuge mit mehreren Teilstempeln benötigt. Dadurch kann jeder Bauteilabsatz mit einem separaten weggesteuerten Teilstempel gepresst werden. Die Verteilung der Presskraft auf mehrere Teilstempel kann nur mit Hilfe eines Mehrstempeladapters realisiert werden [GAS11].

Durch Schmieden von einem Sinterrohteil mit einer einfachen Geometrie zu einem komplexeren Bauteil wird eine ausgeprägte Formänderung und damit eine höhere plastische Verformung im Bauteil erreicht. Mit einer starken plastischen Verformung der Sinterbauteile können Dichtewerte von bis zu 100 % der theoretischen Dichte erzielt werden. In Abbildung 3 sind die Verkleinerungs- bzw. der Beseitigungsmechanismen einer Pore in zwei Sinterschmiedeverfahren, mit und ohne ausgeprägte Formänderung, vergleichend dargestellt. Wie es auf dem Bild zu sehen ist, beim Schmieden ohne Materialfluss bleibt der Durchmesser der Probe konstant ( $b_0 = b_1$ ) aber die Höhe nimmt ab ( $h_0 > h_1$ ). Dadurch wird die Pore lediglich kleiner. Beim Schmieden mit Materialfluss führt die axiale Druckspannung zum seitlichen Materialfluss ( $b_0 < b_1$  und  $h_0 > h_1$ ). Dies verursacht eine Zerteilung einer großen Pore in kleineren Poren. Durch Erhöhung des Materialflusses wird die Teilung der Poren fortgesetzt bis sie beseitigt werden.



**Abbildung 3: Entwicklung einer Pore beim Sinterschmieden mit und ohne ausgeprägte Formänderung**

In der Praxis werden überwiegend flache Bauteile wie Pleuel oder Synchronringe sintergeschmiedet, wobei ein endkonturnahes Sinterrohteil eingesetzt wird [WEB94, GKN04]. Auf Grund der geringen Höhen solcher Bauteile besteht beim axialen Verdichten eine geringe Reibung, sowohl zwischen dem Bauteil und der Matrize als auch innerhalb des Bauteils. Durch Nachschmieden wird die Bauteildichte weitestgehend erhöht und homogenisiert. Dennoch sind die mechanischen Festigkeitseigenschaften im Vergleich zu den geometrisch vergleichbaren, aus Vollmaterial geschmiedeten Bauteilen merklich reduziert [ZAP81, LIP11]. Ursache dafür sind die trotz der Verdichtung bei hohen Temperaturen im Material verbleibenden Poren. Bei Bauteilen mit größerem Höhen-Breiten-

Verhältnis kann eine bessere Materialdichte lediglich bei verhältnismäßig hohen Umformkräften erreicht werden.

Hinsichtlich der Rohteilerwärmung werden die Schmiedeprozesse nach zwei unterschiedlichen Methoden durchgeführt. Zum einen werden die Presslinge gesintert und nach dem Abkühlen wiedererwärmt und geschmiedet [LEN80, SPU81]. In diesem Verfahren kann der Sauerstoffgehalt der Pulverwerkstoffe durch gezielte Einstellung der Sinterparameter, d.h. Temperatur und Dauer, verringert und dadurch die mechanischen Eigenschaften der Endprodukte positiv beeinflusst werden. Aus diesem Grund wird dieses Verfahren zur Herstellung von belastungsübertragenden Bauteilen sowie hoch beanspruchten Bauteilen angewendet [LEN80]. In einer weiteren Route werden die Bauteile aus der Sinterwärme direkt geschmiedet [LEN80, SCH07]. Diese Methode stellt eine kostengünstigere Variante dar.

## Ziel der Untersuchungen

Gegenstand der geplanten Untersuchungen ist die Ermittlung des Einflusses von plastischer Verformung auf die Festigkeitseigenschaften der sintergeschmiedeten Bauteile. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Materialdichte bei Sinterbauteilen durch einen angepassten Schmiedeprozess wesentlich zu erhöhen. Durch eine Reduzierung der Porosität werden die Festigkeitseigenschaften der Bauteile erheblich verbessert. Hierbei soll festgestellt werden, welchen Einfluss das Fließen des Werkstoffs während der Verdichtung auf die Schließung der Poren hat. Hierfür wird die für eine optimale Materialverdichtung benötigte Formänderung am Beispiel eines einfachen zylindrischen Sinterrohteils aufgezeigt. Es werden neben axialer Komprimierung die grundlegenden Verfahren der Massivumformung (Stauchen, Vor- und Rückwärtsfließen) durchgeführt und im Hinblick auf die erzielte Materialverdichtung untersucht und miteinander verglichen.

## Durchführung der Untersuchungen

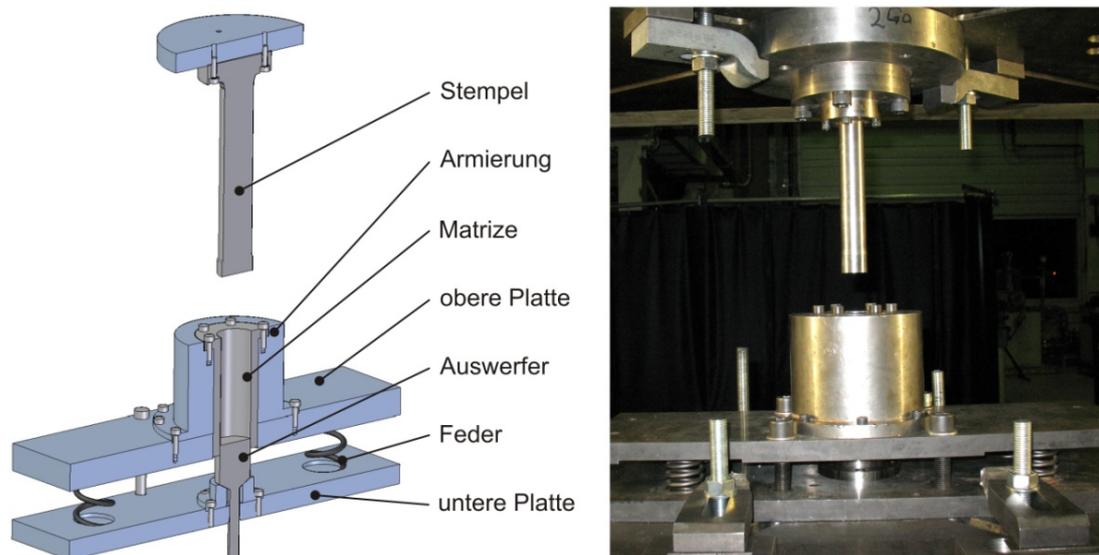
### 1. Herstellung von Rohteilen

Aufgrund der guten mechanischen Eigenschaften von sintergeschmiedeten Bauteilen im Vergleich mit konventionellen Sinterbauteilen wird dieses Verfahren zur Herstellung von hochbelasteten Bauteilen, welche eine gute Härbarkeit voraussetzen, eingesetzt. Als Ausgangswerkstoff zur Herstellung von Rohteilen für das Sinterschmieden werden gasverdüstete und somit hochreine Pulverwerkstoffe verwendet. Verunreinigungen im Pulver sowie Oxidschichten auf der Oberfläche der Pulverpartikel vermindern die Härbarkeit des Werkstoffs. Zudem wird dadurch das vollständige Zusammenwachsen der Pulverteilchen und damit die Verdichtung des Pulvers beim Sintern verhindert. Die zum Sinterschmieden geeigneten Pulverwerkstoffe bestehen aus niedrigen Anteilen von Legierungselementen mit hoher Neigung zu Oxidation, z.B. 0,2 - 0,3 % Mn oder unter 0,1 % Cr. Durch Zusatz von ca. 2 % Cu wird die Härbarkeit des Werkstoffs gesteigert [LEN80]. In Tabelle 1 sind die Zusammensetzungen der in den Untersuchungen verwendeten Pulverwerkstoffe aufgeführt.

**Tabelle 1: Eingesetzte Pulverwerkstoffe**

Pulverwerkstoff	Zusammensetzung (Gew.-%)	Herstellerfirma
Stahl	Fe (97,2 %), Cu (2 %), Graphit (0,8 %), Presshilfsmittel (1%)	QMP Metall Powders LTD
Stahl	Fe (96,35 %), Cu (1,9 %), MnS (0,35 %), Graphit (0,63 %), Presshilfsmittel (0,75 %)	Högenäs Corporation Europe
Aluminium (Ecka Alumix)	Al (>80 %), Si (6-7 %), Mg (6 %), Cu (5 %), Presshilfsmittel (2 %), Titan (0,4 %)	Ecka Granules Metal-Powder-Technologies

Aus den Pulverwerkstoffen wurden mithilfe eines axialen und zweiseitigen Matrizenpresswerkzeugs zylindrische Presslinge mit einem Durchmesser von 36 mm und einer Höhe von 30 mm hergestellt. Das Werkzeugsystem und die einzelnen Komponenten sind in Abbildung 4 dargestellt. Das Presswerkzeug verfügt über eine schwebende Matrize, welche die von der Presse einseitig eingeleitete Kraft in eine zweiseitige Kraftwirkung umleitet. Die entstehende Relativbewegung der Matrize zum Unterstempel führt zu einer beidseitigen Verdichtung der Pulversäule. Dadurch wird eine möglichst homogene Pulverdichte im Pressling eingestellt. Außerdem erlaubt das doppelseitige Pressen, die Höhengrenze des dichtehomogenen Presskörpers auf das Doppelte zu vergrößern [SCH07]. Durch ein zweiseitiges Pressen können Presslinge mit einer Höhe von bis zu 80 mm hergestellt werden [SPU81].



**Abbildung 4: Werkzeugsystem zum zweiseitigen Pulverpressen mit schwebender Matrize**

Zur Durchführung des Pressprozesses wurde das Werkzeug in eine hydraulische Presse der Firma AP&T (Typ: LPS 4000-13,  $F_N = 4000 \text{ kN}$ ) eingebaut. Das Pulver wurde zunächst manuell in die Matrize eingefüllt und durch den Stempel mit einem Pressdruck von 600 MPa verdichtet. Nach dem Verdichten des Pulvers fährt der Stempel zurück in seine Ausgangsposition und der Auswerfer stößt den Grünling nach oben hin aus. Durch den anschließenden Sinterprozess wird ein zum Sinterschmieden ausreichender Zusammenhalt

und Festigkeit der Presslinge erreicht. Die Bauteile werden für 20 min bei Sinteremperatur (1150 °C für Stahl und 560 °C für Aluminium) gesintert. In Abbildung 5 sind zwei beispielhafte Rohteile dargestellt.

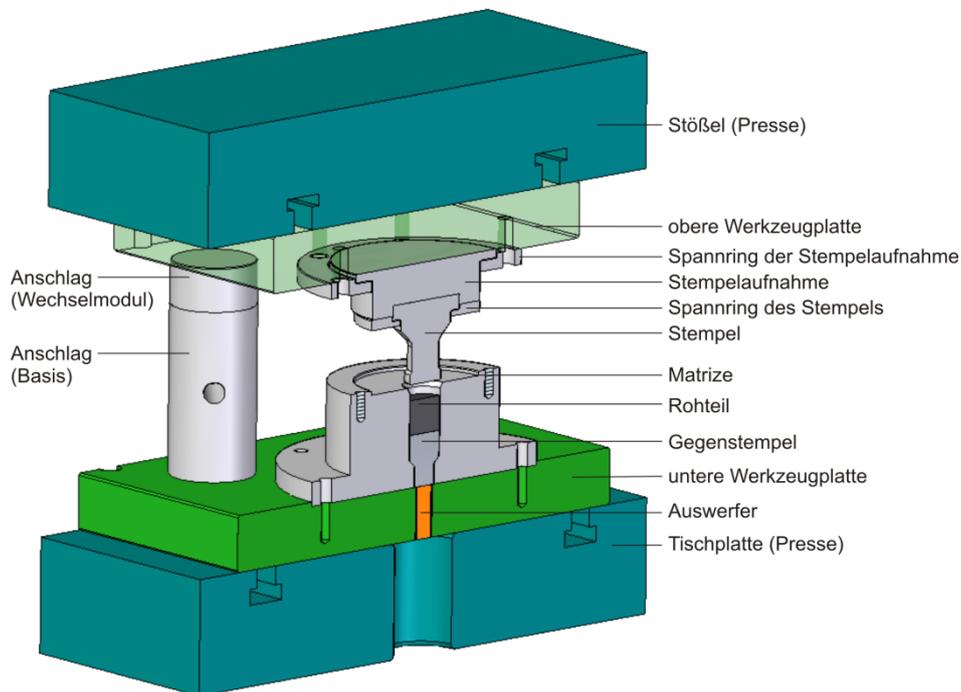


**Abbildung 5: Sinterrohteile aus Aluminium (links) und Stahl (rechts)**

## 2. Sinterschmieden

Im Rahmen der geplanten Untersuchungen werden die bereits erwähnten Prozessrouten, Schmieden aus der Sinterwärme und Schmieden nach dem Wiedererwärmen gesintertter Rohteile, erprobt. Die Prozessstemperatur beim Schmieden beträgt 1200 °C für Stahl und 400 °C für Aluminium. Bei jeder Prozessroute werden die Sinterschmiedeversuche in zwei Kategorien, Schmieden „mit“ und „ohne“ ausgeprägte Formänderung, unterteilt.

Das zum Sinterschmieden ohne ausgeprägte Formänderung eingesetzte Werkzeug ist in Abbildung 6 dargestellt. Je nach verwendetem Kraftaufwand wird der Pressling in der zylindrischen Matrize in Pressrichtung verschoben und dabei entsprechend kompaktiert.



**Abbildung 6: Umformwerkzeug zum axialen Kompaktieren**

Die eng anliegende seitliche Wandung verhindert die radiale Aufweitung des Materials und somit keine Relativbewegungen innerhalb des Werkstoffes. Durch die Beibehaltung der seitlichen Bauteilgeometrie ist der Stempelweg beim Schmieden dem Porositätsgrad im Rohteilgefüge proportional.

Anhand der Schmiedeversuche mit ausgeprägter Formänderung soll den Einfluss des Materialflusses im Werkstoff auf die Verdichtung ermittelt werden. Dazu werden zylindrische Rohteile mittels des Verfahrens Napf-Rückwärts-Fließpressen (NRFP), Voll-Vorwärts-Fließpressen (VVFP) und Stauchen umgeformt. Die genannten Verfahren werden in DIN 8580 als Untergruppen des Druckumformens definiert. Hierbei wird in Gegensatz zum Kompaktieren (Abbildung 7) eine ausgeprägte Formänderung des Rohteils und somit einen höheren Materialfluss in radialer oder axialer Richtung hervorgerufen. Dadurch ist eine nahezu vollständige Beseitigung der Poren und damit eine erhöhte Verdichtung des Werkstoffs zu erwarten. Die geplanten Versuche erlauben eine differenzierte Betrachtung des Einflusses von unterschiedlichen Umformverfahren auf die Materialverdichtung.

In Abbildungen 7 sind die Aufbauten der zum Schmieden mit ausgeprägter Formänderung eingesetzten Werkzeuge dargestellt. Zum Wechsel zwischen den Umformoperationen ist ein Austausch der Stempel, bzw. Stauchbahn und Matrize notwendig. Das Werkzeug zum Kompaktieren (Abbildung 6) wird durch Kombination des VVFP-Stempels (Abbildung 8 – Mitte) mit der NRFP-Matrize (Abbildung 7 – links) aufgebaut. Zur Steuerung des Stempelwegs wird eine Anschlagssäule im Werkzeugraum eingebaut (Abbildung 6). Der Austausch der Anschlag-Wechselmodule erlaubt eine Variation des Umformwegs.

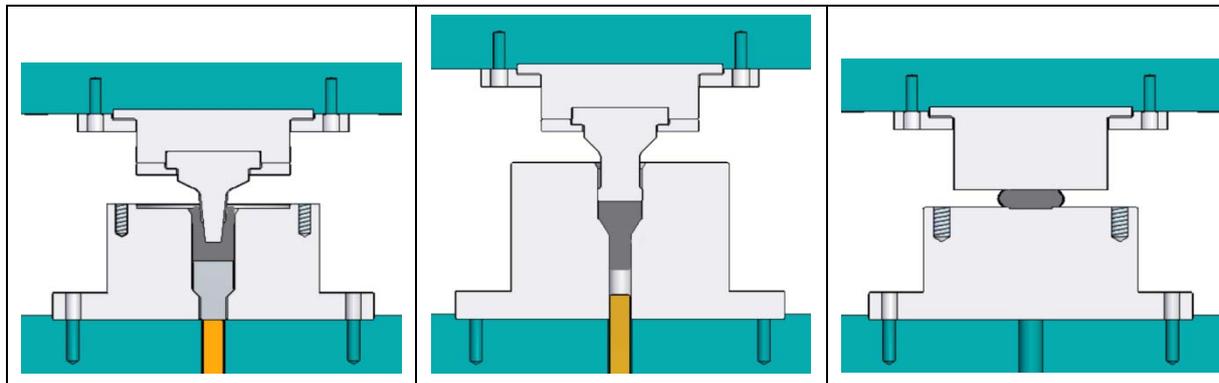


Abbildung 7: Umformwerkzeuge, Napf-Rückwärts-Fließpressen (links), Vollvorwärtsfließpressen (Mitte), Stauchen (rechts)

Die Werkzeugsysteme werden in eine Spindelpresse der Firma Weingarten (Typ PSR 160,  $F_N = 2500$  kN) eingebaut. Die Voraussetzungen, die eine Umformmaschine zum Einsatz in einem Sinterschmiedeprozess erfüllen soll, sind von Hupmann und Hirschvogel definiert worden [LEN80]. Demnach ist eine kurze Druckberührzeit zur Umformung eines Sinterbauteils erforderlich. Eine lange Druckberührzeit führt zu einer schnellen Abkühlung der Bauteiloberfläche. Dadurch nehmen die Formänderung und die damit einhergehende Verdichtung ab, was zu einer porösen Oberfläche führt. Dies schließt die Anwendung von hydraulischen Pressen aufgrund der langen Druckberührzeiten aus.

Die Schmierung beim Sinterschmieden kann entweder am Werkzeug oder am Rohteil erfolgen. Bei der Schmierung des Sinterrohteils besteht das Risiko des Eindringens von Schmierstoff in die Rohteilporen und damit der Verunreinigung des Bauteils.

## Ausblick

In weiterführenden Arbeiten werden die hergestellten Bauteile bezüglich ihrer mechanischen Eigenschaften und Gefügestruktur untersucht. Anhand von Messung der lokalen Bauteil-

dichten nach dem Sinterschmieden werden die Einflüsse des ausgeprägten und nicht ausgeprägten Materialflusses auf die Verdichtung ermittelt und miteinander verglichen. Die Kenntnisse aus den geplanten Grundlagenuntersuchungen sowie die erprobten Prozessparameter für das Sinterschmieden der verwendeten Werkstoffe sollen zukünftig auf komplexe Bauteile übertragen werden. Dafür sollen mehrere Realbauteile mit unterschiedlichen Formänderungen anhand von Sinterschmieden aus zylindrischen Rohteilen hergestellt werden. Als mögliche Realbauteile können sowohl verzahnte Bauteile mit überwiegend radialem Werkstofffluss als auch längliche Bauteile dienen. Des Weiteren sollen erforderliche Umformkräfte zur Realisierung von definierten Bauteildichten ermittelt werden.

## Literatur

- [BEI96] Beiss, P.: Möglichkeiten und Grenzen der Formgebung durch Matrizenpressen, Pulvermetallurgie (Hrsg. J. Esper), Expert Verlag, Renningen-Malmsheim 1996
- [DAN96] Danninger, H.: Pulvermetallurgie, Beispiele für den Produkteinsatz, Wirtschaftsförderungsinstitut (WiFi) Österreich, 1996
- [DOE10] Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik – Grundlagen, Technologien, Maschinen, 2. Auflage, Springer Verlag 2010
- [GAS11] Gastan, E.: Einfluss von Werkzeugschwingungen auf das Verdichtungsverhalten metallischer Pulver beim Matrizenpressen, Dissertation, IFUM, Leibniz Universität Hannover, 2011
- [GKN04] Journal Beitrag: GKN wins ‚best in Class‘ in PF Con rod race, Metal Powder Report, Metal-Powder.net, special feature, Elsevier Ltd, 2004
- [LEN80] Lenel; F.V.: Powder Metallurgy, Principles and Applications, ISBN 0-918404-48-7, Copyright: Metal Powder Industries Federation, USA, 1980
- [LIP11] Lipp, K.; Kaufmann, H.: Schmiede- und Sinterschmiedewerkstoffe für PKW-Pleuel, Motortechnische Zeitschrift MTZ, Ausgabe 5, 2011
- [MPI14] Metal Powder Industries Federation (MPIF), Uses of PM Products, Internetseite: <http://www.mpif.org/IntroPM/usesofpm.asp?linkid=7>, Stand Juli, 2014
- [SCH07] Schatt, W.; Wieters, K.-P.: Pulvermetallurgie – Technologie und Werkstoffe, Springer Verlag GmbH, 2. Auflage, Düsseldorf 2007
- [SAN02] Sander, Ch.; Ratzl, R.; Lorenz, B.; Tobie, T.: Sintered Gears – Archivable Loaded-carrying Capacities by Conventional and New Production Methods, International Conference on Gears, München 2002
- [SIN06] Singh, S.; Jha, A.K.; Kumar, S.: Dynamic effects during sinter forging of axi-symmetric hollow disc preforms, International Journal of Machine Tools & Manufacture, Ausgabe 47, Seite 1101-1113, 2007
- [SPU81] Spur, G.; Stöferle, Th.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 1, Umformen, ISBN 3-446-12532-9, Carl Hanser Verlag, 1981
- [THÜ72] Thümmler, F.: Neuere Entwicklungen in der Pulvermetallurgie, Zeitschrift für Werkstofftechnik, 3. Jahrgang, Heft 8, S. 394-414, Verlag Chemie GmbH, Weinheim 1972
- [THÜ93] Thümmler, F.; Oberacker, R.: Introduction to powder metallurgy, ISBN 0-901716-26-X, The Institute of Materials, University Press, Cambridge, 1993

- [UPA11] Upadhyaya, A.; Upadhyaya, G. S.: Powder Metallurgy: Science, Technology and Materials, ISBN 978-1-439-85746-5, Crc Pr Inc Verlag, 2011
- [VOL03] Volker, A.; Geimann, T.: Technologie und Anwendung des Pulverschmiedens, Pulvermetallurgie in Wissenschaft und Praxis, Band 21, Seite 69-82, Witten 2003
- [WEB94] Weber, M.: Pulvermetallurgisches Pleuel und Verfahren zu seiner Herstellung, Patent DE4232432A1, Offenlegungstag: 31.03.1994
- [WHI01] Whittkaker, D.: The competition for automotive connecting rod markets, Metal Powder Report, DOI 10.1016/S0026-0657(01)80216-2, Volume 56, Issue 5, 2001
- [ZAP81] Zapf, G.: Handbuch der Fertigungstechnik, Band 1: Urformen (Hrsg. G. Spur), ISBN 3-446-12532-9, Carl Hanser Verlag, München Wien 1981