

## Titel

# Pulvermetallurgische Herstellung von gradierten Werkzeugwerkstoffen für die Warmmassivumformung

IGF-Nr.: 17271 N

## Forschungsstellen

Forschungsstelle 1: Institut für Werkzeugforschung und Werkstoffe, Remscheid (IFW)

Forschungsstelle 2: Forschungs-Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen  
Leibniz Universität Hannover (IFUM)



Ansprechpartner beim IFW-Remscheid: Dipl.-Ing. Helmut Brand 02191 / 5921.0  
[brand@fgw.de](mailto:brand@fgw.de)

Ansprechpartner beim IFUM-Hannover: M.Sc. Najmeh Vahed 0511 / 762 2166  
[vahed@ifw.uni-hannover.de](mailto:vahed@ifw.uni-hannover.de)

---

## Danksagung

Das IGF-Vorhaben 17271 N der Forschungsvereinigung Werkzeuge und Werkstoffe wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



## Ausgangssituation

Das Fertigungsverfahren Massivumformung - als Untergruppe der Umformtechnik - stellt neben weiteren gießtechnischen oder spanenden Fertigungsverfahren eine effiziente Methode für die Serienproduktion dar. Die Bandbreite der gesenkgeschmiedeten Bauteile reicht von wenigen hundert Gramm leichten Bauteilen wie z.B. Maulschlüsseln bis hin zu über hundert Kilogramm schweren Schiffspfeuern. Das umformtechnische Fertigungsverfahren Schmieden erzeugt Bauteileigenschaften, die von anderen Fertigungsverfahren wie der Zerspanung aus Vollmaterial nicht erzielt werden können.

Die industriell eingesetzten Schmiedegesenke aus Warmarbeitsstahl unterliegen einem komplexen Belastungskollektiv aus mechanischen, thermischen, chemischen und tribologischen Beanspruchungen. Dies führt zu hohem Verschleiß, der den frühzeitigen Ausfall der Werkzeuge bedingen und so die Standmenge entscheidend verringern kann. Die Standmenge eines Werkzeugs wird definiert als die Anzahl der Teile, die bis zum Ausfall des Werkzeugs hergestellt werden kann, und stellt einen wichtigen Faktor für die wirtschaftliche Herstellung von Schmiedeteilen dar. Neben den unmittelbaren Herstellkosten der Werkzeuge entstehen weitere Kosten durch Rüst- und Einrichtungszeiten beim Werkzeugwechsel. Durch eine Steigerung der Gesenkstandmenge lassen sich demnach die Kosten des Bauteils deutlich reduzieren, zusätzlich ergibt sich eine höhere Fertigungssicherheit. Des Weiteren führen die hohen Belastungen an den Schmiedewerkzeugen durch neue und schwer umformbare Werkstoffe zu schwankenden Durchlaufzeiten, was einer geforderten Termintreue widerspricht. Ausgehend von den Kundenwünschen nach immer komplexer werdenden Konturen der Schmiedeteile, hat der Verschleißschutz und die daraus resultierende Standmengenerhöhung der zum Einsatz kommenden Gesenke immer mehr an Bedeutung gewonnen.

Zur Herstellung von Werkzeugen der Warmmassivumformung werden überwiegend Warmarbeitsstähle eingesetzt. Eine Qualitätserhöhung dieser vergütbaren, meist hochlegierten und teuren Werkstoffe ist durch erzeugungs- und legierungstechnische Maßnahmen möglich. Eine Alternative liegt in der oberflächennahen Erhöhung der Verschleißbeständigkeit, welche eine wirtschaftlichere Lösung darstellt und in aktuellen Forschungsarbeiten stark vorangetrieben wird.

Die Pulvermetallurgie und Sintertechnologie wiederum sind weitere (urformende) Fertigungsverfahren, die zur Herstellung von verschleißfesten Werkzeugwerkstoffen eingesetzt werden können. Durch die Pulvermetallurgie können Werkstoffkombinationen hergestellt werden, die gießtechnisch schwierig oder teilweise nicht herstellbar sind. Aufgrund technologischer und qualitativer Vorteile der Sintertechnologie hat sich dieses Herstellverfahren in den letzten Jahren immer stärker gegenüber anderen Verfahren durchgesetzt. Im Vergleich zu den konventionellen Fertigungsverfahren können eine höhere Wirtschaftlichkeit, eine größere Formgebungsfreiheit, eine gesteigerte Produktivität sowie eine verbesserte Bauteilqualität erzielt werden.

Das Ziel des Vorhabens ist es, pulvermetallurgisch hergestellte Gradientenwerkstoffe für das Gesenk Schmieden zu entwickeln und einzusetzen. Durch die einsatzangepasste Gradierung auf Basis pulvermetallurgisch hergestellten Hartmaterialverbunde sollen belastungsangepasste Gesenke erprobt werden.

## Forschungsziel

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens war die Erhöhung der Verschleißfestigkeit und somit der Standmenge von Werkzeugen der Warmmassivumformung durch den Einsatz von belastungsangepassten Werkzeugstählen auf Basis pulvermetallurgisch hergestellter Verbundwerkstoffe. Über die gezielte Kombination und pulvermetallurgische Verbindung von metallischen Werkstoffen und Hartstoffen in einem Werkstoffsystem sollten gradierte Halbzeuge zur Fertigung von Schmiedegesenken entwickelt und hergestellt werden. Durch die Erzeugung angepasster Eigenschaften können diese Werkstoffsysteme speziell im Bereich der Warmmassivumformung angewendet werden. Die geplanten Arbeitspunkte in diesem Forschungsvorhaben können wie folgt zusammengefasst werden.

- Erprobung eines manuellen Verfahrens zur Herstellung gradiert Pulverschüttungen
- Ausarbeitung und Optimierung der Werkstoffzusammensetzung der gradierten Werkstoffsysteme als Ausgangsmaterial für Schmiedewerkzeuge
- Untersuchung der möglichen pulvermetallurgischen Formgebungsverfahren zur Herstellung von gradierten Werkstoffen mit guten mechanischen Eigenschaften
- Bestimmung der Herstellungsparameter der Gradienten unter Berücksichtigung der konstruktiven Gestaltung der Gesenke
- Erkenntnisgewinn zum Eigenspannungsverhalten gradiert Schmiedegesenke
- Vergleich der neuen gradierten Gesenke mit konventionellen Gesenken mit gleichen Geometrien durch Einsatz in einem Schmiedeprozess

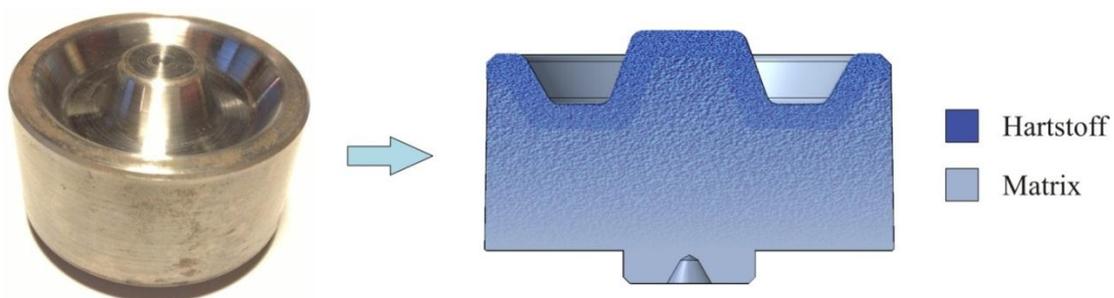


Abbildung 1: Ein verschleißfestes Schmiedegesenke aus gradiertem Pulverwerkstoff

Stufe	WFN Gew. %	Hart-werkstoff Gew. %
1	100%	0%
2	95%	5%
3	90%	10%
4	85%	15%
5	80%	20%
6	75%	25%
7	70%	30%

Abbildung 2: : Mischungsverhältnisse von Grundpulver und Hartstoff in Gradientenstufen

## Forschungsergebnisse

Im ersten Schritt wurde mit der Abstimmung durch den PbA die abschließende Umformstufe zur Herstellung eines Maulschlüssels als Modelprozess und das eingesetzte Unterwerkzeug als Modelwerkzeug festgelegt. Die Geometriedaten des Modell-Schmiedebauteils (Maulschlüssel) wurden von dem Projektpartner, der Firma Hazet<sup>®</sup>, zu Verfügung gestellt. Eine Beurteilung der fertigungstechnischen Umsetzbarkeit der gewählten Werkzeuggeometrie erfolgte durch IFUM. In Abbildung 3 sind das primäre Konzept des Presswerkzeugaufbaus sowie der Pressvorgang einer gradierten Pulverschüttung dargestellt. Das Einfüllen einer gradierten Pulverschüttung in die Pressmatrize sollte manuell erfolgen, indem dünne Schichten mit konstant variierenden Mischverhältnissen aus zwei Pulverwerkstoffen sukzessive eingefüllt werden.

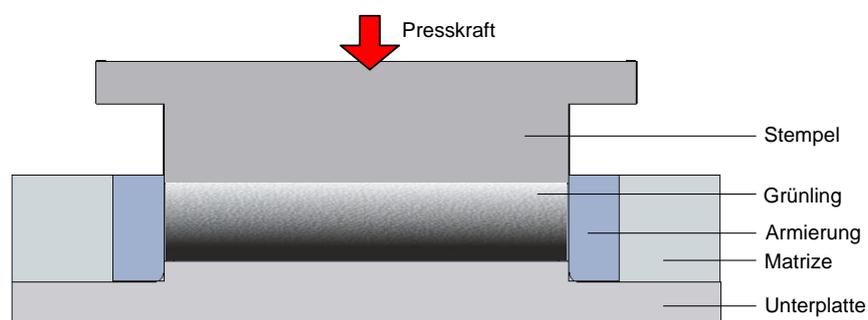


Abbildung 3: Aufbau des Presswerkzeugs

Das Ausmaß des Schmiedewerkzeugs wurde unter Berücksichtigung der zur Verfügung stehenden Fertigungsmöglichkeiten am IFUM bewertet. Das geplante Verfahren zur pulvermetallurgischen Herstellung des Schmiedewerkzeugs war das einseitige Axialpressen mit anschließendem Sintern.

Die geplante Umsetzung des einseitigen axial-Pressen bestand im Einsatz einer hydraulischen Presse der Fa. Schirmer und Plate mit einer Maximalen Stößel-Nennkraft von 12.500 kN. Dazu war die Konstruktion eines Presswerkzeugs zur Formgebung des Pulvers erforderlich. Die Berechnung der Pressfläche und Betrachtung der maximalen Maschinen-Betriebskraft von 12.000 kN ergibt einen Pressdruck von 600 MPa.

Die weitere Aufgabe dieses Vorhabens bestand in der beanspruchungsgerechten Gestaltung pulvermetallurgisch herzustellender, gradierten Schmiedewerkzeuge mit möglichst räumlich veränderlichen Materialeigenschaften. Grundlegende Voraussetzung für einen derartigen, äußerst anspruchsvollen Entwurf solcher Werkzeuge, ist die räumlich orts aufgelöste Kenntnis der tatsächlich im praktischen Betrieb auftretenden Beanspruchungen der Werkzeuge. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde hinsichtlich einer gradierten Gestaltung das Unterwerkzeug der abschließenden Umformstufe zur Herstellung eines Maulschlüssels (Abbildung 4) betrachtet. Die für die entsprechenden numerischen Untersuchungen erforderlichen 3D-CAD-Daten dieses - in der laufenden Fertigung eingesetzten - Zweistufenwerkzeugs wurden von der Firma Hazet<sup>®</sup> zur Verfügung gestellt.

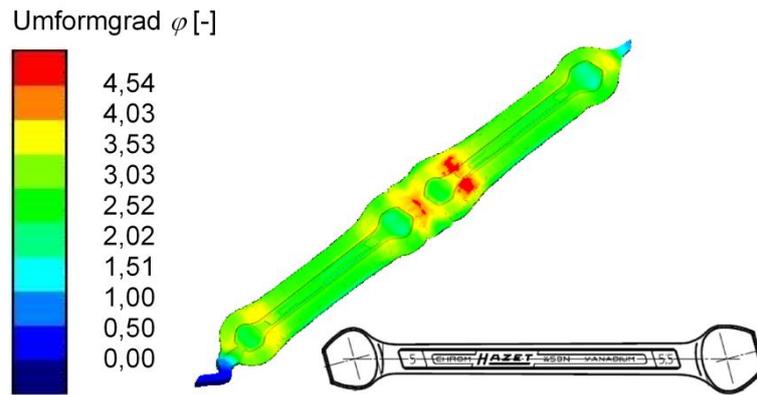


Abbildung 4: Verteilung des Umformgrades am Ende der abschließenden Umformstufe zur Fertigung eines Maulschlüssels

Der Modelprozess führte zur Änderung der Modellgeometrie. Dabei wurden zwei konturierte Obergesenke als Modelbauteile festgelegt (Abbildung bildung 5). Die ausgewählten Gesenkegeometrien werden bereits am IFUM im Bereich der Tribologie und Verschleißuntersuchungen eingesetzt. Die Dornbereiche der Gesenke sind während des Schmiedens starken thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt und gelten als verschleißkritische Stellen. Die flachere Form des auf der rechten Seite dargestellten Werkzeugs erzeugt höhere Umformgrade. Demzufolge entstehen hohe Gleitwege, welche die Untersuchung des Reibungsverhaltens zwischen Werkstoff und Werkzeug begünstigen. Um die mechanischen Kräfte zu minimieren ist das Werkzeug offen und ohne ausgeprägte Gratbahn ausgelegt. Die ausgewählten Konturen sind in ähnlichen Formen in Schmiedewerkzeugen wiederzuerkennen und sind deshalb geeignet für die Übertragung der Ergebnisse auf weitere Umformprozesswerkzeuge.



Abbildung 5: konturierte Gesenke zur Verschleißuntersuchung

Ein wichtiger Aspekt bei der Entwicklung von gradierten Werkstoffen ist die Auswahl geeigneter Matrix- und Hartstoffphasen. Dabei bestehen große Anforderungen an die Pulverkorngöße und -form sowie Kombinationen von Pulverwerkstoffen. Die Paarungen der Werkstoffe sollen keine Diffusionsvorgänge während des Sinterprozesses hervorrufen, da in diesem Fall eine unerwünschte Änderung der Werkstoffeigenschaften und der Gradientenstruktur möglich ist. Des Weiteren sollen die Korngrößen der zu kombinierenden Pulverwerkstoffe aufeinander abgestimmt sein, so dass eine möglichst homogene Verteilung der Hartpartikeln im Matrixwerkstoff erzielt wird. Das Mischpulver wird bei der Sintertemperatur des Matrixwerkstoffs gesintert, so dass die Hartstoffpartikel inert bleiben und lediglich formschlüssig in die Matrix eingeschlossen werden. Außerdem das IGF 17271 GWW-gradierte Werkzeuge

Mengenverhältnis von Hartstoff zu Metallmatrix ist entscheidend. Die Untersuchungen von H. Berns haben gezeigt, dass eine Erhöhung des Hartstoffanteils ab 30 Vol-% in einem Hartverbundwerkstoff keinen positiven Einfluss auf die Verschleißfestigkeit des Werkstoffs hat.

Im Rahmen der Versuche wurden die Werkstoffgradienten durch Mischung von einem eisenbasierten Pulver als Grundwerkstoff mit einem karbidischen Pulver als Hartphase hergestellt. Die ersten Proben wurden aus Stahlpulver als Grundwerkstoff und Wolframkarbid als Hartstoffanteil hergestellt. Die Gradienten entstanden durch Variation des Wolframkarbid-Anteils entlang der Bauteilhöhe. Die detaillierten Werkstoffdaten sind in Abbildung 6 aufgeführt.

Matrix- werkstoff	Bezeichnung	Hersteller Firma	Partikelgröße [µm]	Zusammensetzung					
				C	O	S	Mn	P	Cu
	ATOMET 1001HP (St)	QMP	P < 250	0,004	0,06	0,004	0,015	0,01	0,02
Hart- stoff	Wolframkarbid (WC)	QMP	P < 10	min. 99,5 % WC					

Abbildung 6: Auswahl der Werkstoffe

Für die Herstellung der gradierten Proben wurde zuerst das Grundpulver mit Hartstoff in kleinstufig absteigenden Mischungsverhältnissen gemischt und vorbereitet. Die verschiedenen Pulvermischungen wurden anschließend schichtweise mit möglichst gleichmäßigen Höhen sukzessive nach absteigendem Hartstoffanteil in eine Pressmatrize manuell eingefüllt. Anschließend wurde die gradierte Pulverschüttung einseitig und axial mit einem Pressdruck von 600 MPa zu einem gradierten Grünling verdichtet. Die verwendeten Pulvermischungen sowie ihre Zuordnung in der gradierten Pulverschüttung sind in Abbildung 7 dargestellt. Nach dem Pressvorgang wurden die gradierten Grünlinge gesintert. Der Sinterprozess wurde unter Berücksichtigung der Anforderungen von Grundwerkstoff, d.h. Stahlpulver, durchgeführt. Die Parameter und Ablauf waren mit denen des bereits vorgestellten Sinterzyklus von homogenen Mischungen in Kapitel „Grundlagen“ identisch.

Stufe	Stahl	Wolframkarbid
1	100 %	0 %
2	95 %	5 %
3	90 %	10 %
4	85 %	15 %
5	80 %	20 %

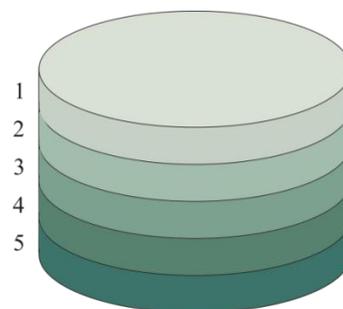


Abbildung 7: Mischungsverhältnisse der Gradientenstufen

In weiteren Versuchen innerhalb dieser Forschungsarbeit wurde die Herstellung von gradierten Schmiedegesenken mithilfe vom HIP-Verfahren realisiert. Die Durchführung der Versuche wurde mit freundlicher Unterstützung des Projektpartners, Firma Bodycote mit dem Sitz in Haag-Winden, ermöglicht. Um die Nachbearbeitung der Gesenkkonturen insbesondere auf der Funktionsfläche mit hohem Anteil an Hartstoff weitgehend zu verringern, werden formgebende Elemente aus Vollmaterial verwendet. Dadurch wird eine endkonturnahe Formgebung des Pulvers realisiert. Das Prinzip dieser Idee ist in Abbildung 8 veranschaulicht. Ein Vorteil dieser Methode ist die zur Gesenkkontur parallele Positionierung der Gradientenstufen. Dadurch wird eine Entfernung von verschleißfesten Bereichen während der spanenden Endbearbeitung und somit die Beeinträchtigung der gradierten Struktur des Werkstoffs verhindert.

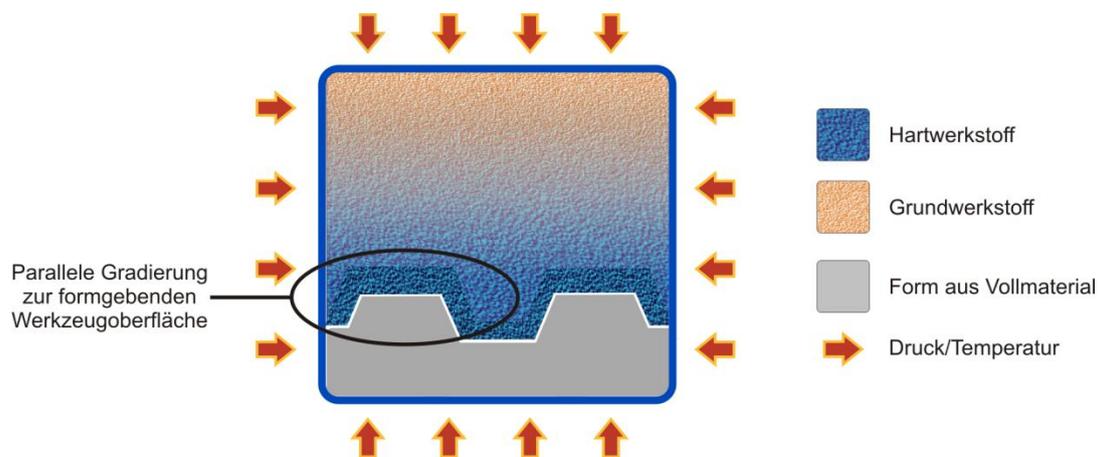


Abbildung 8: Prinzip der endkonturnahen Herstellung eines gradierten Schmiedegesenks mithilfe von heißisostatischem Pressen (HIP)

Nach dem HIP-Prozess erfolgt die Entfernung der Kapsel anhand von mechanischen oder chemischen Verfahren. Durch eine spannende Bearbeitung wird eine hohe Maßgenauigkeit erzielt. Die rostfreien Werkstücke in Kapseln aus einem nicht korrosionsbeständigen Stahlblech können in Säure gebeizt werden. Dieses Verfahren erfordert ein spezielles und umweltfreundliches Beizbad. Eine weitere Methode ist das Abziehen der Kapsel, wobei eine Trennschicht zwischen Kapselblech und Pulverwerkstoff notwendig ist.

Eine Herausforderung bei der Entkapselung der in diesem Projekt hergestellten Bauteile bestand in der Entfernung der Formelemente ohne Zerstörung der Werkzeugkontur. Zur Entwicklung einer Lösung wurde zunächst den inneren Aufbau des Kapsels genauer untersucht. Hierzu wurde eine Kapsel entlang des Durchmessers anhand von Draht-Erodiervorgängen getrennt und die Schnittfläche im Hinblick auf die Grenzzone zwischen Formelement und Pulver sowie die innere Kontur des Kapselmantels metallographisch untersucht.

Die heißisostatisch gepressten Gesenke wurden nach der Entkapselung nach Zeichnungen endbearbeitet. Dabei wurden lediglich die Mantelflächen bearbeitet, da eine Fertigung der Gesenkkonturen aufgrund der endkonturnahen Herstellung nicht notwendig war. Für die ersten Versuche wurde auf eine Feinbearbeitung der Gesenkoberflächen verzichtet, um eine Beschädigung des gradierten Aufbaus durch Materialabnahme zu vermeiden.

Anschließend wurden die Gesenke nach Vorgaben des Werkstoffherstellers vergütet. Dabei wurden die Bauteile nach dem Austenitisieren bei 1080°C für 60 Minuten in Öl abgeschreckt und anschließend bei 460°C angelassen.

In den Schmiedeversuchen konnte die grundsätzlichen Eignung und Haltbarkeit der heißisostatisch gepressten Gesenke bestätigt werden. In Abbildung 9 ist das Gesenk im eingebauten Zustand und die damit umgesetzte Schmiedegeometrie dargestellt. Der Schmiedeversuch wurde unter Verwendung einer vollautomatisierten Exzenterpresse Fa. Eumuco mit einer Nennkraft von 3150 kN durchgeführt. Es wurden Rohteile aus 42CrMo4 mit einer Temperatur von 1200°C durchgeführt.

Die pulvermetallurgisch hergestellten Gesenke weisen ein vergleichbares Prozessverhalten wie die konventionellen Gesenke aus Vollmaterial auf.



Abbildung 9: links: das Schmiedegesenk eingebaut in einer Exzenterpresse, rechts, das mit dem Gesenk geschmiedetes Bauteil

### **Zusammenfassung**

Im Rahmen dieses Forschungsprojekts wurde durch Zugabe von karbidischen Hartphasenanteilen (TiC, WSC) zu einem Grundwerkstoff aus Warmarbeitsstahl ein gegen abrasive Verschleißbeanspruchung widerstandsfähiger Werkstoff hergestellt. So wurde durch Erhöhung des Hartstoffanteils in der metallischen Matrix die Verschleißfestigkeit an der Gesenkoberfläche, die hohen thermischen und mechanischen Belastungen ausgesetzt ist, erhöht. Hingegen wurde durch Verminderung des Hartstoffanteils in das Gesenkinnere die Werkstoffduktilität zur Aufnahme der Prozesskräfte gesteigert.

Es wurden zunächst kleine zylindrische Bauteile gradiert hergestellt. Dabei wurde ein manuelles Verfahren zur Erzeugung von gradierten Pulverschüttungen erprobt und die Einflussfaktoren auf die Aufbauqualität der Gradienten untersucht. Als wichtigste Faktoren gelten das Mischverfahren der Werkstoffphasen sowie die eingesetzte Methode zur Formgebung des gradierten Bauteils.

Später wurde das heißisostatische Pressverfahren (HIP) zur Herstellung von gradierten Werkzeugen eingesetzt. Dieses Verfahren ermöglichte eine vollständige Beseitigung der IGF 17271 GWW-gradierte Werkzeuge

Poren, wodurch sehr gute Werkstoffeigenschaften erzielt wurden. Darüber hinaus wurde mithilfe eines formgebenden Elements aus niedriglegiertem Stahl, welcher in HIP-Kapsel platziert wurde, eine endkonturnahe Herstellung von gradierten Werkzeugen realisiert. Dieses Verfahren ermöglichte die Herstellung von zur Gesenkkontur quasi parallelen Gradientenstufen.

Die experimentellen Untersuchungen wurden durch metallographische Analysen hinsichtlich der Einbettung von Hartstoffphasen in die Stahlmatrix sowie durch Härteverläufe innerhalb des Werkzeugs ergänzt. Die Härtemessungen und die optische Bewertung der Hartstoffverteilung auf einer Schnittfläche entlang des Werkzeugdurchmessers bestätigten den gradierten Werkstoffaufbau.

Neben den grundlegenden Beurteilung der erreichbaren geometrischen Form der gehipten Werkzeuge wurden in weiteren Untersuchungen auch die werkstofftechnischen Eigenschaften (Härte, Zugfestigkeit) der gradierten Werkstoffe analysiert und mit den ortsabhängigen Hartstoffanteilen korreliert.

---

Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die Unterstützung bei der Durchführung der Forschungsarbeiten.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, [www.fgw.de](http://www.fgw.de), angefordert werden.

Weitere Informationen erhalten Sie bei Herrn Dipl.-Ing. Helmut Brand unter 02191 5921.0.