

---

## Material- und Zeitersparnis durch Gratlosschmieden von Langteilen

---



### Zusammenfassung

---

Schmiedeprozesse werden zur Herstellung von unterschiedlichen, meist dynamisch hochbelasteten Bauteilen eingesetzt. Die Materialausnutzung konventioneller, gratbehafteter Schmiedeprozesse bietet jedoch Optimierungspotential. Zudem erfordern die Oberflächen und die geometrischen Abmaße konventioneller Schmiedebauteile aufgrund ihrer Qualität in der Regel eine mechanische Nachbearbeitung.

Eine Möglichkeit, die Materialausnutzung zu erhöhen und die notwendige Nacharbeit zu verringern, ist die Auslegung und Anwendung von gratlosen Präzisionsschmiedeprozessen. Sowohl die Auslegung als auch die Werkzeugkonzepte unterscheiden sich dabei von konventionellen Schmiedeprozessen und sind in der Regel aufwändiger und teurer. Da die Werkzeugkosten in der Schmiedeindustrie nur einen geringen Anteil, die Materialkosten jedoch einen Anteil von mehr als 50 % an den Herstellungskosten haben, ist diese Technologie eine Möglichkeit, um Herstellungskosten signifikant zu senken.

In diesem Whitepaper wird das industriell übliche Schmieden in mehreren Stufen beschrieben und die beiden grundlegend unterschiedlichen Ansätze des Schmiedens mit Grat sowie des Gratlosschmiedens werden erläutert. Zudem werden die Vorteile des gratlosen Präzisionsschmiedens in Form einer Verkürzung der Prozesskette und engeren erreichbaren Iso-Toleranzen dargestellt, die zu einer Reduzierung der Herstellkosten führen. Des Weiteren wird die technische Seite des Gratlosschmiedens näher betrachtet mit einer Einführung in die benötigten Werkzeugkonzepte und einer Beschreibung der Methode zur Auslegung von Gratlosschmiedeprozessen. Abschließend werden technische Randbedingungen an die Werkzeuge und Prozessparameter erläutert.

## Einleitung

---

### Hintergrundinformationen

---

Verschiedene Bauteile, die hohen statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt sind, wie Zapfen, Lenker, Injektoren oder auch Kurbelwellen, werden vielfach durch Warmmassivumformung (z. B. Querkeilwalzen, Reckwalzen und Schmieden) hergestellt. Schmiedeprozesse bieten den Vorteil eines ununterbrochenen Faserverlaufs der Bauteile, welcher diese beständiger gegenüber dynamischen Lastwechseln macht.

Schmiedeprozesse finden oftmals in mehreren Stufen statt (siehe Bild 1). Ein typisierter Ablauf besteht aus einem Stauchprozess (gedrungene oder scheibenförmige Bauteile), oder einer Massenvorverteilung z. B. durch einen Walzprozess (Langteile), einem Vorformprozess, einem Fertigformprozess und anschließend einem Loch- und/oder Entgratprozess. Die Anzahl der Vorformoperationen unterscheidet sich dabei je nach Kompliziertheit der Geometrie des Fertigteils.

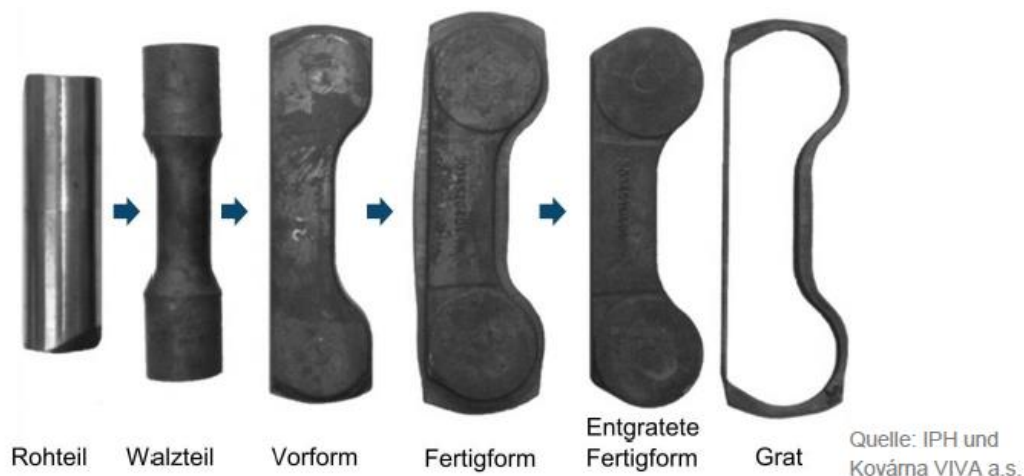


Bild 1: Stadienfolge eines Gesenkschmiedeteils

### Schmieden mit Grat

---

Ein überwiegender Anteil der Schmiedeprozesse findet im geschlossenen Gesenk statt und ist gratbehaftet (siehe Bild 2), d. h. es wird mit einem Überschuss an Material gearbeitet, welches im Schmiedeprozess über die Gratbahn verdrängt wird. Am Ende der Schmiedeprozesskette wird dieses überschüssige Material durch Entgraten wieder vom Bauteil entfernt und anschließend recycelt. Die in herkömmlichen Schmiedeprozessen auftretenden Gratanteile liegen oftmals im Bereich von 10 % bis 50 %.



Bild 2: Bauteil mit Grat am Beispiel eines Pleuels (Langteil)

### Schmieden ohne Grat

Eine neuere und in der Industrie bisher weniger verbreitete Entwicklung ist das gratlose Präzisionsschmieden. Hierzu gibt es in der Literatur unterschiedliche Definitionen. Während mit Präzisionsschmieden häufig die Einhaltung geringerer Iso-Toleranz-Klassen gemeint ist (IT7 bis IT9), ohne den Gratanteil zu berücksichtigen, definiert DOEGE das Präzisionsschmieden als Technologie zum gratlosen Schmieden in geschlossenen Gesenken<sup>1</sup>.

Das gratlose Schmieden im geschlossenen Gesenk ist ein dreistufiger Prozess. Zunächst werden die Gesenke vollständig geschlossen, um ein Austreten von Material zu verhindern. Dabei findet zunächst noch keine Umformung statt. Nachfolgend findet die Umformung in den geschlossenen Gesenken statt. Nach der Umformung werden die Gesenke wieder geöffnet. Diese drei Stufen werden, wie bei einem herkömmlichen gratbehafteten Schmiedeprozess, in einem Pressenhub durchlaufen, so dass ein gratloser Präzisionsschmiedeprozess auf verschiedenen, handelsüblichen Umformaggregaten durchgeführt werden kann.

Im nachfolgenden Bild 3 sind die beiden unterschiedlichen Varianten eines Schmiedeprozesses, das Schmieden im geschlossenen Gesenk mit Grat (links) und das Gratlosschmieden im vollständig geschlossenen Gesenk (rechts) schematisch dargestellt.

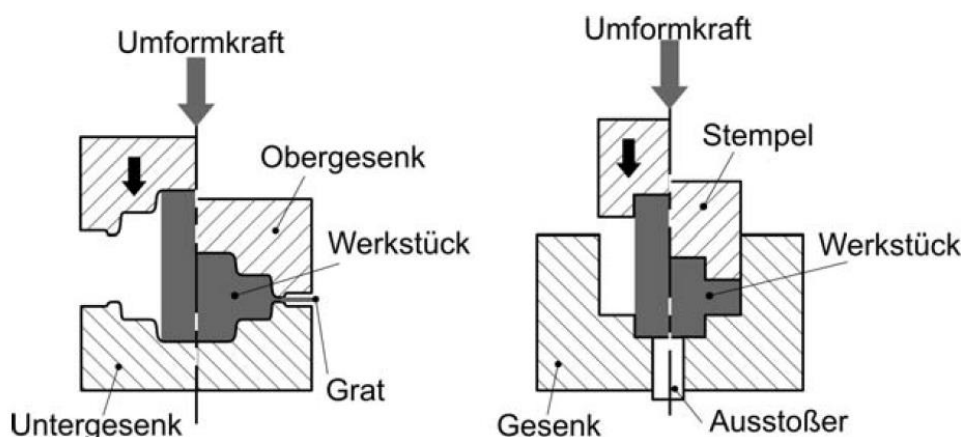


Bild 3: Schematische Darstellung eines geschlossenen Gesenks mit Gratbahn (links) im Vergleich zu einem vollständig geschlossenem Gesenk (rechts)

<sup>1</sup> Doege, E.; Behrens, B.-A.: Handbuch Umformtechnik. Springer-Verlag, Berlin u. a., 2. Auflage, 2007.

Langteile sind definiert als Schmiedeteile, die entlang einer Achse mindestens drei Mal länger sind als in ihren anderen beiden Achsen. Für Langteile findet die Technologie des Gratlosschmiedens bisher kaum Anwendung. Gedrungene oder scheibenförmige Bauteile hingegen werden zum Teil schon nach diesen bzw. einem vergleichbaren Verfahren geschmiedet. In diesen Bereich sind die Horizontalpressen der Firma Hatebur bekannt, die nahezu einbaufertige Schmiedeteile ohne Grat produzieren können.

Vorteile des Gratlosschmiedens/Präzisionsschmiedens

Im Vergleich zum konventionellen Schmieden mit Grat bietet das gratlose Präzisionsschmieden gleich mehrere Vorteile. Der wesentlichste Vorteil ist die Einsparung von Material, da nicht mehr Material im Schmiedeprozess eingesetzt wird als benötigt. Eine Ausnahme bilden Bauteile, die ausgelocht werden. Jedoch ist auch bei diesen Bauteilen die Materialausnutzung im Allgemeinen größer als 90 %. Gleichzeitig können auch die Energiekosten in der Herstellung gesenkt werden, da durch den geringeren Materialeinsatz auch nur weniger Material erwärmt werden muss. Die nachfolgende fiktive Beispielrechnung verdeutlicht das Einsparpotential des gratlosen Präzisionsschmiedens:

Bauteile pro Jahr: 1.000.000	Konventionelles Schmieden mit Grat	Gratlosschmieden
Schmiedetonnage	13.500 t	10.000 t
Materialkosten	10.800.000 €	8.000.000 €
Energiekosten	600.000 €	444.000 €
Summe der Kosten	11.400.000 €	8.444.000 €
Ersparnis	<b>2.965.000 €</b>	
Annahmen: Bauteilgewicht: 10 kg/Stk., Materialkosten: 0,80 €/kg, Energiekosten: 0,12 €/kWh, Gratanteil: 35 %		

Ein weiter wesentlicher Vorteil ist die verbesserte Maßgenauigkeit der Schmiedebauteile. Präzisionsschmiedeprozesse können die Toleranzklassen von IT 9 bis IT 8, in Ausnahmefällen IT 7 erreichen, welches eine deutliche Verbesserung gegenüber konventionellen Schmiedeprozessen darstellt, die die Klasse IT 12 erreichen. Zudem entfällt der sonst notwendige Prozessschritt des Entgratens, was eine Verkürzung der Prozesskette und somit eine Verbesserung der Wirtschaftlichkeit des gesamten Prozesses bedeutet (siehe Bild 4). Ferner können auch nachfolgende Bearbeitungsschritte wie das Zerspanen von Oberflächen durch die gute Maßgenauigkeit in ihrem Umfang zum Teil stark reduziert werden oder sogar ganz entfallen.



Bild 4: Verkürzung der Prozesskette durch gratloses Präzisionsschmieden nach Doege

### Technische Beschreibung

#### Werkzeugkonzept zum Gratlosschmieden

Werkzeuge zum Gratlosschmieden sind umfangreicher als typische Schmiedegesenke für gratbehaftete Schmiedeprozesse, da sichergestellt werden muss, dass kein Material austreten kann (siehe Bild 5). Aus diesem Grund müssen diese Schmiedewerkzeuge über einen Schließmechanismus verfügen. Dazu existieren zwei grundsätzliche Möglichkeiten. Zum einen kann das Obergesenk als Stößel in das Untergesenk eintauchen und somit die Gesenke schließen. Diese Technik findet meist bei rotationssymmetrischen Schmiedeteilen Anwendung. Eine zweite Variante ist ein Verschlussmechanismus mit einer Verschlussplatte, welche federnd gelagert ist und den Stößel umfasst. Bei dieser Variante können die Gesenkhälften zunächst geschlossen werden und anschließend findet die Umformung im geschlossenen Gesenk durch am Stößel angebrachte Stempel statt.

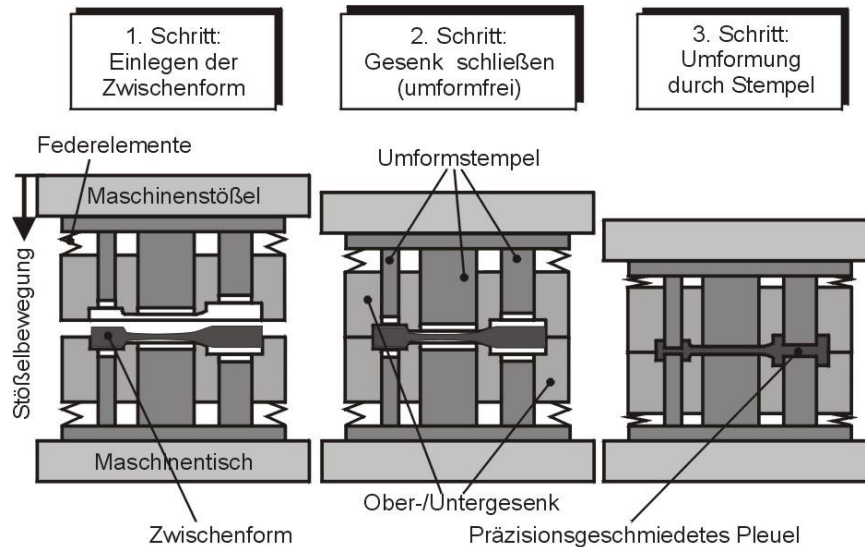


Bild 5: Prinzip eines Werkzeugkonzepts zum Gratlosschmieden

Bei der Werkzeugherstellung für einen gratlosen Präzisionsschmiedeprozess müssen sehr enge geometrische Toleranzen eingehalten werden. Als Faustregel gilt: die Toleranzen der Werkzeuge müssen mindestens zwei IT-Klassen geringer sein als die gewünschte IT-Klasse des Schmiedeteils. Bei einer gewünschten Genauigkeit von IT 8 des Bauteils, müssten die Werkzeuge somit in den IT-Klassen 5 bis 6 gefertigt werden.

#### Auslegung von Gratlosschmiedeprozessen

Eine Auslegung von Gratlosschmiedeprozessen unterscheidet sich von herkömmlichen, gratbehafteten Schmiedeprozessen, da kein bzw. kaum Materialüberschuss erlaubt ist und über Ausgleichsräume Schwankungen von nur ca. 2 % des Bauteilvolumens aufgefangen werden können.

Der prinzipielle Ablauf zur Auslegung eines mehrstufigen Schmiedeprozesses mit iterativen Schleifen ist in Bild 6 dargestellt. Als erster Schritt wird das Volumen des Fertigteils bestimmt. Dieses Volumen ist gleichzeitig das Ausgangsvolumen des Rohteils. Nun können iterativ und mit Unterstützung von FE-Analysen die Zwischenformen bestimmt und die Werkzeuge konstruiert werden. Dieses erfolgt meist nach dem Top-Down-Prinzip beginnend mit der Fertigformstufe. Von dieser ausgehend werden rückwärtsgerichtet die Vorformoperationen ausgelegt. Die Überprüfung der Stadienfolge erfolgt danach nach dem Bottom-Up-Prinzip mit der Simulation der einzelnen Umformstufen vom Rohteil bis hin zum Fertigteil. Diese Schleifen werden solange wiederholt, bis eine funktionierende Stadienfolge erreicht wird.

Je Schleife wird dabei die Auslegung in drei grundlegende Einzelprozesse unterteilt. Dazu zählen die jeweiligen Konstruktionen der Modellgesenke, die Simulationen der einzelnen Stadien und eine übergreifende Simulation, die alle einzelnen Werkzeugkonstruktionen der Stadien einschließt und eine abschließende Kontrolle der Werkzeugfunktionalität darstellt. Somit wird sichergestellt, dass die Stadien sowohl allein als auch in der kumulativen Stadienfolge fehlerfrei hergestellt werden können. Dabei wird stets auf Einhaltung umformrelevanter Kriterien, z. B. Umformgrad und Falten- und Rissbildung, geachtet.



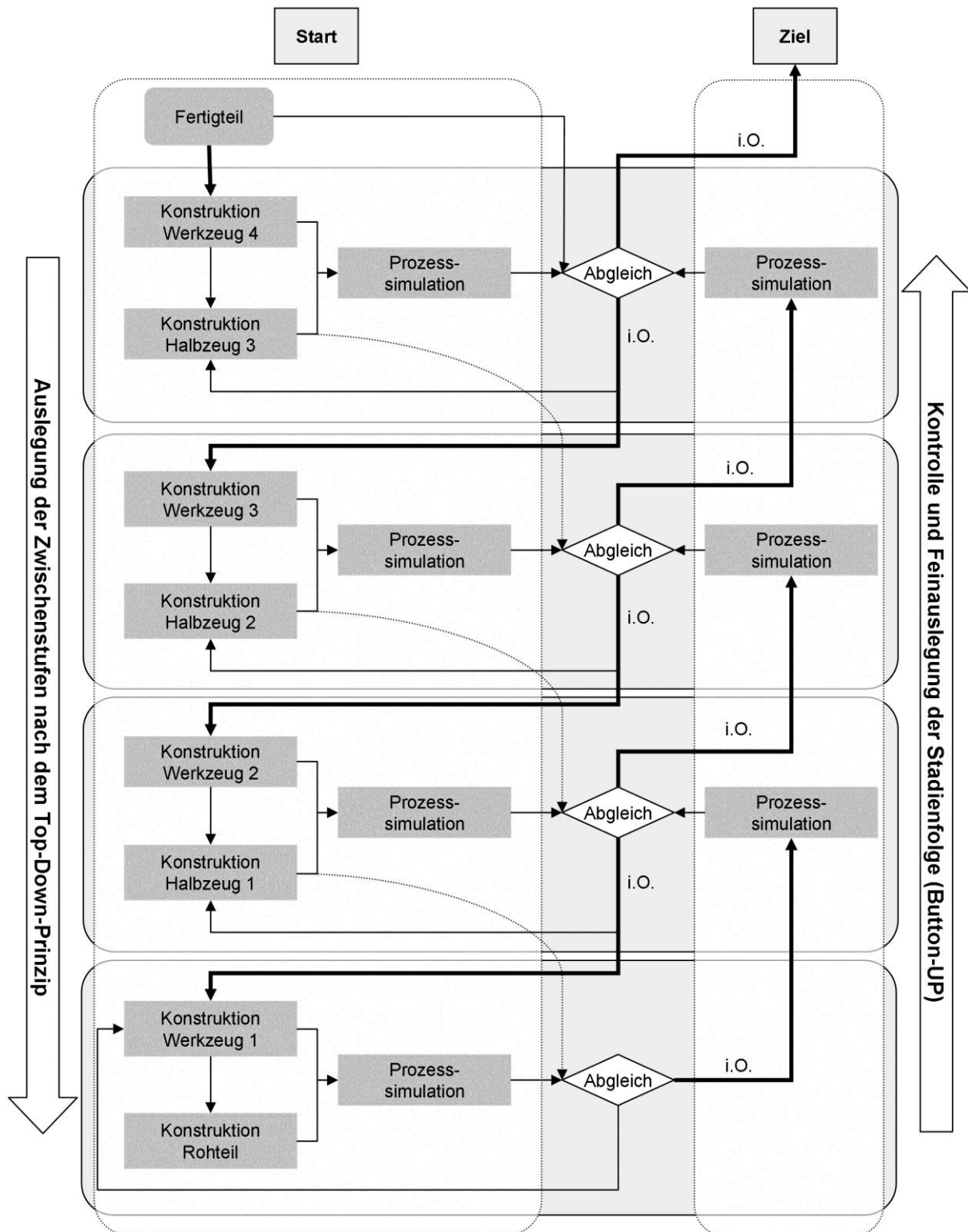


Bild 6: Ablaufdiagramm zur Auslegung eines mehrstufigen Schmiedeprozesses mit iterativen Schleifen nach [Mül11]<sup>2</sup>

<sup>2</sup> Müller, S.: Methode zur Auslegung schrumpfungskorrigierter Schmiedewerkzeuge für komplizierte Langteile. In: Behrens, B.-A.; Nyhuis, P.; Overmeyer, L. (Hrsg.): Berichte aus dem IPH, Band 03/2011, PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, Garbsen 2011.

Weiterhin ist zur Bestimmung der Zwischenstufen die Anwendung von Massenverteilungsdiagrammen hilfreich. Diese Diagramme zeigen das Volumen von kleinen Elementen (meist in 1-mm-Schritten) des Bauteils in einzelnen Stadien. Durch die Nutzung dieser Diagramme kann die erforderliche Verschiebung der Massen (Volumen) zwischen den einzelnen Stadien verdeutlicht werden. Im nachfolgenden Bild 7 sind exemplarisch drei Stadien einer Kurbelwelle dargestellt. Die Masse muss von Stadium 2 (grün) über Stadium 3 (blau) in Längsrichtung gestaucht und in Querrichtung gestreckt werden. Anschließend erfolgt die finale Formgebung, in diesem Fall der Kurbelwangen, zu Stadium 4 (rot).

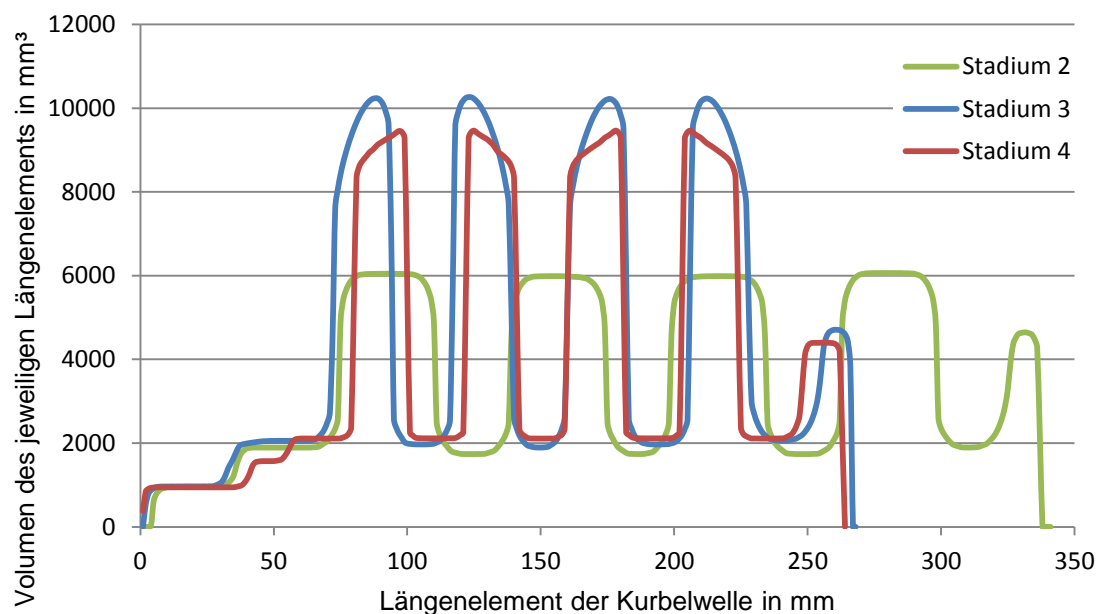


Bild 7: Massenverteilungsdiagramm dreier Stadienfolgen einer Kurbelwelle

Bei der Auslegung jedes Stadiums ist darauf zu achten, dass es zu keiner Überfüllung des Gesenks kommen kann, welches in kritischen Gesenkinndrücken resultiert und eine Schädigung des Gesenks wahrscheinlich macht. In der Fertigform sollten darüber hinaus kleine Ausgleichsräume vorgesehen werden, um leichte Volumenschwankungen kompensieren zu können. Außerdem kann in der Ebene der Gesenkteilung ein feiner Spaltgrat (Flittergrat) auftreten, der bei einer späteren Bearbeitung entfernt werden muss.

#### Randbedingungen – Werkzeuge und Prozessparameter

Grundsätzlich eignen sich alle Werkstoffe für einen gratlosen Präzisionsschmiedeprozess. Jedoch sind je nach eingesetztem Werkstoff unterschiedliche Randbedingungen zu beachten. So neigen Aluminiumlegierungen sehr schnell zur Flittergratbildung, so dass bei der Werkzeugfertigung noch engere Toleranzen eingehalten werden müssen, um Spalte zwischen den Werkzeugen so gering wie möglich zu halten. Alternativ kann auch der Einsatz spezieller Dichtungen zur Vermeidung von Flittergrat genutzt werden.

Bei der Anwendung von gratlosen Präzisionsschmiedeprozessen sind jedoch nicht nur die Eigenheiten des verarbeitenden Werkstoffs zu berücksichtigen. Vielmehr ist es von



entscheidender Bedeutung, dass sämtliche Prozessparameter dauerhaft innerhalb eines sehr engen Bereichs liegen. Dies betrifft, neben den geometrischen Toleranzen der Werkzeuge wie bereits oben beschrieben, besonders die Herstellung der Rohteile, welche nur minimale Volumenschwankungen aufweisen dürfen. Weiterhin muss die Temperaturführung bei der Erwärmung und die Erwärmungstemperatur insgesamt sehr konstant gehalten werden. Außerdem sind die Positioniergenauigkeit des Rohlings und aller Zwischenformen innerhalb der unterschiedlichen Prozessstufen genau einzuhalten und auch die Schmiedegesenke müssen exakt geführt werden. Darüber hinaus beeinflussen auch noch weitere Parameter das Schmiedeergebnis, wie z. B. die Temperaturführung der Schmiedegesenke und der Zustand der Gravur des Schmiedegesenks. Insgesamt ist eine hohe Reproduzierbarkeit sämtlicher Prozessschritte und Parameter eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen und stabilen gratlosen Präzisionsschmiedeprozess.

### Praktische Beispiele

---

Wie bereits oben beschrieben, werden gedrungene und scheibenförmige Bauteile bereits durch die Firma Hatebur nach einem vergleichbaren Verfahren geschmiedet (siehe Bild 8). Die Einsatzmasse der so zu schmiedenden Teile kann dabei bis zu 7,5 kg betragen und sie können einen Außendurchmesser von bis zu 180 mm aufweisen.



Bild 8: Schmiedeteile hergestellt mit einer Presse der Fa. Hatebur (Quelle:Hatebur)

Dass dieses Verfahren nicht nur bei gedrungenen oder scheibenförmigen Bauteilen, sondern auch bei unterschiedlichen Langteilen funktioniert, konnte schon mehrfach nachgewiesen werden. So wurden z. B. Pleuel oder Gelenkköpfe gratlos geschmiedet. Selbst die Herstellung von Langteilen mit komplizierten geometrischen Strukturen wie Kurbelwellen ist in einem gratlosen Präzisionsschmiedeprozess möglich und auch bereits durchgeführt worden (siehe Bild 9). Bei der Herstellung von solch komplizierten Teilen bedarf es jedoch neuer Werkzeugkonzepte, die mit herkömmlichen Schmiedegesenken kaum vergleichbar sind.



Bild 9: Stadienfolge einer gratlos geschmiedeten Kurbelwelle

Um eine gratlose Massenverteilung in mehreren Raumrichtungen bei Pleuellagerungen erzeugen zu können, sind mehrdirektionale Werkzeuge erforderlich, die eine gleichzeitige Bewegung in mehreren Richtungen ermöglichen, ausgehend von einer normalen eindimensionalen Bewegung des Umformaggregats. Ohne derartige Werkzeuge würden Falten entstehen, was nicht akzeptabel ist.

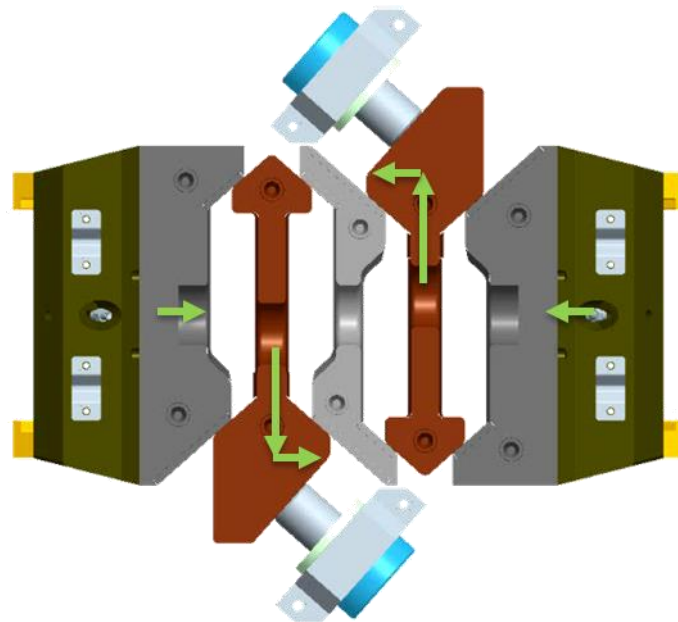


Bild 10: CAD-Modell eines mehrdirektionalen Werkzeugs für eine 2-Zylinder Pleuellagerung inkl. Umformrichtungen (Pfeile)

Nachteil dieses Konzeptes sind hohe Presskräfte, die die Wahrscheinlichkeit eines Werkzeugdefekts erhöhen bzw. zu erhöhtem Verschleiß führen können. Aus diesem Grund ist diese Technik noch nicht industriell verbreitet.

## Fazit

---

Im Zuge der allgemeinen Globalisierung und dem immer größer werdenden Konkurrenzdruck auf Firmen stellt das gratlose Präzisionsschmieden eine innovative Möglichkeit dar, Produktionskosten zu verringern und geschmiedete Bauteile effizienter herzustellen. Die primär monetären Vorteile dieses Verfahrens überwiegen bei weitem die Nachteile wie aufwändigere Prozessauslegung und höhere Werkzeugkosten. Machbarkeitsstudien, Forschungsprojekte und auch die bereits industriell etablierte Anwendung für bestimmte Bauteilgruppen zeigen das hohe Potential dieses Verfahrens auf. Im Ausblick auf zukünftige Wirtschafts- und Preisentwicklung wird die Attraktivität des Gratlosschmiedens noch an Bedeutung gewinnen.

## Kontaktdaten

---

IPH – Institut für Integrierte Produktion Hannover gGmbH  
Hollerithallee 6 | 30419 Hannover

☎ +49 (0)511 27976-0 | @ info@iph-hannover.de | 🌐 www.iph-hannover.de