

# Vorformoptimierung für das Gesenkschmieden mittels numerischer Simulation

T. Hatzenbichler und B. Buchmayr

Die Abbildung einer gewünschten Geometrie mittels Schmieden aus einem zylindrischen Vormaterial ist meist nicht in einem einzigen Schritt möglich. Für nahezu 90 % der Schmiedestücke müssen vor Erreichen der Endkontur eine oder mehrere Zwischenformen erzeugt werden, um eine Materialverteilung zu erhalten, die ein faltenfreies Bauteil mit optimaler Materialverteilung im letzten Schmiedeschritt gewährleistet. In der vorliegenden Arbeit wird am Beispiel des Schmiedens eines Pleuels eine einfache Vorgehensweise zur Vorformoptimierung beschrieben, die auch für die praktische Anwendung im täglichen Fertigungsbetrieb geeignet ist. Für den untersuchten Pleuel konnte so mit einem Arbeitsaufwand von wenigen Tagen eine Vorform gefunden werden, die im Vergleich zur bisherigen Gestaltung eine Materialeinsparung von 15 % und damit verbunden eine erhebliche Verringerung des Gesenkverschleißes an der Gratbahn ermöglicht.

*Preform Optimisation for Closed-die Forging by Numerical Simulation.* Usually, forging of a certain geometry from a cylindrical billet in one step is all but impossible. About 90 % of all forgings must be manufactured in two or more steps to obtain a material distribution which ensures components without folds and with an optimised material distribution after the last forging step. In the present paper a simple way to perform preform optimisation by numerical simulation is shown using the forging process of a connecting rod as an example. The method presented is appropriate to the daily practice in production plants. Within a few days a preform for the investigated connecting rod was found which reduces the material costs by 15% and leads to a significant reduction of the tool wear in the flash gap.

## Einleitung

Die Formgebung eines Materials während des Schmiedens erfolgt meist durch einen mehrstufigen Prozess mit unterschiedlichen Werkzeugen. In einer Stadienfolge wird das Ausgangsmaterial einfacher Geometrie schrittweise einer Endform mit komplexer Geometrie angenähert. Die Auslegung einer solchen Stadienfolge basiert in der Praxis fast ausschließlich auf der Erfahrung des Konstrukteurs, die sich meist nur auf ein sehr enges Teilespektrum beschränkt. Die Optimierungsziele bei der Auslegung einer Stadienfolge für einen Massivumformprozess können je nach Bauteil unterschiedlich sein:

- Minimierung der Umformkraft
- Minimierung der Anzahl der erforderlichen Umformstufen
- Minimierung des Einsatzvolumens
- Vermeidung von Fertigungsfehlern
- Erhöhung der Werkzeuglebensdauer
- Minimierung des Energieeinsatzes
- Einstellung definierter Gefügezustände

Grundlegende Gestaltungsrichtlinien zur Vorformauslegung von gerippten Bauteilen sind in den Arbeiten von Altan et al.<sup>1,2</sup> zu finden. Die Autoren merken prinzipiell

an, dass etwaige Schrägungswinkel der Endform grundsätzlich auch bereits in der Vorform vorhanden sein sollen. Für sehr tiefe Gravuren sollen jedoch in der Vorform größere Schrägungswinkel vorgesehen werden als in der Endform. Grundlegende Gestaltungsrichtlinien für das Schmieden an einem Schmiedehammer mit einer gratlosen Vorform (üblich für niedrig legierte und Kohlenstoffstähle) sind in Tabelle 1 dargestellt (Abmessungen lt. Abb. 1). Bauteile mit H-förmigen Querschnitten aus Aluminium- oder Titanlegierungen haben meist bereits eine Vorform mit Grat. Auch hier geben Altan et al.<sup>1,2</sup> Konstruktionsrichtlinien für die Vorform in Abhängigkeit der Endformgeometrie an (Tabelle 2 und Abb. 2). Zhuang<sup>3</sup> überprüfte die von Altan et al. aufgestellten Konstruktionsrichtlinien für H-förmige Querschnitte anhand einer umfangreichen Serie von FEM-Simulationen und stellt fest, dass, wie von Altan et al. bereits erkannt, keine allgemeine Richtlinie für die optimale Vorformgestaltung gegeben werden kann, sondern dass für jede Werkstoffgruppe eigene Konstruktionsrichtlinien gelten müssen.

Tabelle 1: Vorformdimensionen für niedrig legierte und Kohlenstoffstähle<sup>1,2</sup> (Parameter nach Abb. 1)

Endform	Vorform
Grat	Kein Grat
Gratbahnradius $R_F$	$H_R/6 < R_p < H_R/4$
Radius der Hohlkehle $R_{FF}$	$R_{pF} \approx 1,2 \cdot R_{FF} + 3,175 \text{ mm}$

Dipl.-Ing. Dr. mont. Thomas Hatzenbichler, Materials Center Leoben Forschung GmbH, Roseggerstraße 12, 8700 Leoben / Österreich;  
Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. mont. Bruno Buchmayr, Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, Franz-Josef-Straße 18, 8700 Leoben / Österreich.

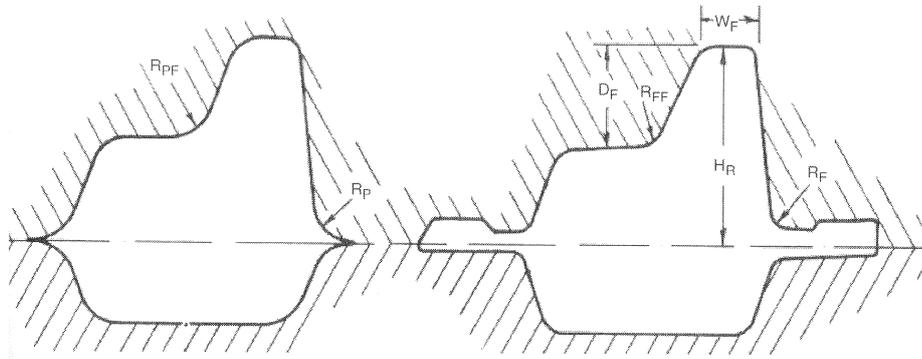


Abb. 1: Werkzeuggestaltung für eine gratlose Vorform und eine Fertigform mit Grat<sup>2</sup>

Tabelle 2: Vorformdimensionen für Aluminium- und Titanlegierungen<sup>1,2</sup> (Parameter nach Abb. 2)

Endform	Vorform	
	Aluminiumlegierung	Titanlegierung
Stegdicke $T_f$	$T_p \approx (1 \text{ bis } 1,5) \cdot T_f$	$T_p \approx (1,5 \text{ bis } 2,2) \cdot T_f$
Radius der Hohlkehle $R_{ff}$	$R_{pf} \approx (1,2 \text{ bis } 2) \cdot R_{ff}$	$R_{pf} \approx (2 \text{ bis } 3) \cdot R_{ff}$
Eckenradius $R_{fc}$	$R_{pc} \approx (1,2 \text{ bis } 2) \cdot R_{fc}$	$R_{pc} \approx (2) \cdot R_{fc}$
Schrägungswinkel $\alpha_f$	$\alpha_p \approx \alpha_f + (2 \text{ bis } 5^\circ)$	$\alpha_p \approx \alpha_f + (3 \text{ bis } 5^\circ)$
Breite der Rippe $W_f$	$W_p \approx W_f (0,8 \text{ mm})$	$W_p \approx W_f (1,6 \text{ bis } 3,2 \text{ mm})$

Trotz der oftmals großen Erfahrung der Konstrukteure und der Einhaltung von Konstruktionsrichtlinien erfordern komplexe Bauteile, wie sie die Mehrzahl der heute zu fertigenden Schmiedestücke darstellen, häufig eine hohe Zahl von praktischen Schmiedeversuchen, bis eine für die Serienfertigung akzeptable Vorformgestaltung gefunden wird. Da die praktischen Versuche in den meisten Betrieben nur auf Produktionsaggregaten durchgeführt werden können, sind damit neben den Werkzeugkosten meist auch Produktionsstillstände verbunden, die zu hohen Entwicklungskosten für neue Geometrien führen können. Computersimulationen können besonders in dieser Entwicklungsphase durch die damit verbundene Einsparung von Realversuchen zu einer erheblichen Kostensenkung führen. Dies gilt besonders für das gratlose Schmieden, bei dem eine präzise Vorhersage des Materialflusses Voraussetzung für ein Gelingen des Schmiedeprozesses ist.

Ein erheblicher Nachteil der rechnerischen Auslegung von Schmiedeprozessen ist, dass mit den konventionellen Systemen nur eine Betrachtung ausgehend von der Vorform hin zur Endform erfolgen kann. Somit muss bereits zu Beginn der ersten Simulationsschleife eine erste Werkzeugauslegung des Konstrukteurs zu Grunde gelegt werden. Diese wird rechnerisch überprüft, und aufgrund der Rechenergebnisse erfolgt eine Änderung der Vorformgestaltung. Mit dieser Vorgehensweise wird die Methode „Trial-and-Error“ vom Produktionsaggregat auf den Rechner verlegt, was zu einer erheblichen Beschleunigung der Entwicklungsschleifen führt und somit eine beträchtliche Einsparung von Kosten und Zeit bedeutet. Moderne Ansätze der Vorformoptimierung gehen jedoch einen wesentlichen Schritt weiter. Durch Rückwärtssimulation wird versucht, direkt vom Fertigmodell des Kunden auf eine optimale Vorform und eine

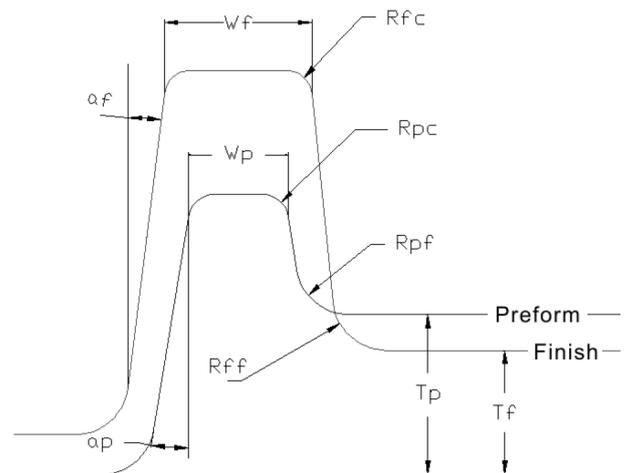


Abb. 2: Werkzeuggestaltung für eine Vorform mit Grat

optimale Gestaltung und Anzahl der Zwischenstufen zu schließen.

Erste Versuche zur Vorformoptimierung für Schmiedeprozesse mittels numerischer Simulation wurden bereits im Jahre 1996 von Takemasu et al.<sup>4</sup> durchgeführt. Eine exakte Simulation des Schmiedens war damals aufgrund von unzureichender Rechnerleistung und noch nicht ausgereiften Algorithmen (fehlendes automatisches Remeshing oder unzureichende Volumenkontrolle während des Remeshings) nahezu unmöglich. In den folgenden Jahren richtete sich der Fokus der Forschung immer stärker auf die Entwicklung von Algorithmen zur automatischen Vorformoptimierung mittels inverser Simulation. Zhao et al.<sup>5</sup> beschreiben dazu eine FEM-basierte Methode, während Alfozan und Gunasekra<sup>6</sup> auf einen auf der Oberen-Schranken-Methode (UBET) basierenden Ansatz zurückgreifen. Einen weiteren durchaus vielversprechenden Ansatz stellt Wienströer<sup>7</sup> in seiner Dissertation vor. Er verwendet zur inversen Simulation eines Schmiedeprozesses einen Ansatz nach dem Prinzip des geringsten Zwanges. Dieser basiert auf einer Arbeit von Mathieu<sup>8</sup> und wird für zweidimensionale Probleme in Form sogenannter Werkstoffverdrängungsbahnen und für dreidimensionale Aufgaben in einem Kugelmodell umgesetzt. Die Forschungen auf diesem Gebiet führten auch zu Ansätzen, welche die inverse Simulation und somit auch die automatische Vorformoptimierung für einfache rotationssymmetrische Bauteile ermöglichen<sup>9</sup>. Für komplexe Bauteile stoßen diese jedoch an ihre Grenzen, und die damit erzielten Ergebnisse sind durch-

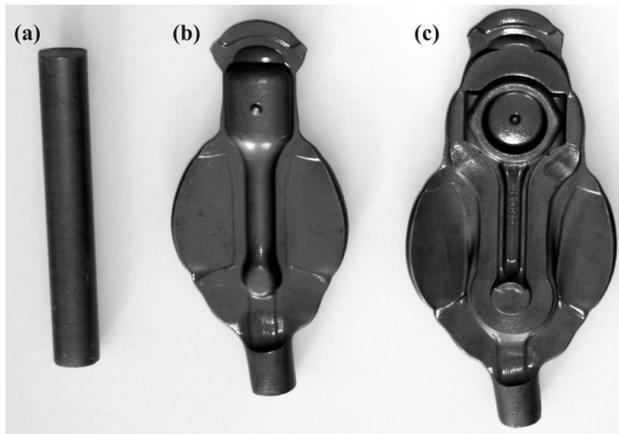


Abb. 3: Stadienfolge zum Schmieden eines Pleuels – Ausgangssituation; (a) Vorform, (b) Zwischenform, (c) Endform

aus umstritten<sup>6</sup>. Somit ist die automatische Vorformoptimierung mittels inverser Simulation für die betriebliche Anwendung derzeit als schwierig umsetzbar einzustufen, obwohl bereits diverse Anbieter kommerzieller FEM-Programme aussichtsreiche Versuche starten, inverse Modelle in ihre Software zu integrieren<sup>10</sup>.

Daher wird im Folgenden eine pragmatische Methode zur Vorformverbesserung mittels numerischer Simulation am Beispiel eines Schmiedeprozesses zur Herstellung eines Pleuels angewandt, die auch für die Anwendung in der Serienproduktion geeignet ist. Das dafür verwendete FEM-Programm ist die kommerzielle Software DEFORM<sup>TM</sup>, jedoch kann die hier gezeigte Methode auch mit nahezu jeder anderen Software angewandt werden, die zur Simulation von Schmiedeprozessen geeignet ist.

### Simulation des Ist-Zustandes

Der hier untersuchte Schmiedeprozess wird an einem Schmiedehammer durchgeführt und besteht aus den in Abb. 3 gezeigten drei Stufen. Das Vormaterial ist ein Bolzen (Abb. 3a), der zur Erzielung einer besseren Massenverteilung in einem Vorgesenk zu einer Keulenform (Abb. 3b) umgeformt wird. In einer zweiten Schmiedegravur wird diese Keulenform zur Endform des fertigen Pleuels geformt (Abb. 3c). Der letzte Schritt besteht im Entfernen des Schmiedegrates.

Aus Abb. 3 ist deutlich ersichtlich, dass während der Massenverteilung in der Vorform ein Grat mit erheblichem Volumen entsteht. Dies führt neben einer schlechten Werkstoffausnutzung auch zu einem erheblichen Verschleiß sowohl an der Gratbahn der Vorgravur als auch an jener der Fertiggravur. Ziel der Simulationsstudie ist es daher, durch eine geeignete Wahl der Vorform anstelle des zylindrischen Vormaterials die übermäßige Gratbildung am Werkstück zu verhindern.

Um eine derartige Verbesserung durchführen zu können, ist es unbedingt notwendig, zuerst den Ist-Zustand des Prozesses in einem FEM-Modell nachzubilden. Die dazu verwendeten wichtigsten Eingabedaten sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Das Ergebnis aus der Materialflussanalyse (Abb. 4) zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit dem in Abb. 3 dargestellten Materialfluss des Realprozesses, was auf eine gute Wahl der Eingabeparameter schließen lässt.

Tabelle 3: Eingabeparameter für die Schmiedesimulation

<i>Vormaterial</i>	
Geometrie	Zylinder Ø 32 x 220 mm
Vorwärmtemperatur	1200 °C
Werkstoff	Ck45 Fließkurven nach <sup>11</sup> Thermophysikalische Parameter nach <sup>12</sup>
konstitutives Modell	starr plastisch
<i>Werkzeuge</i>	
Vorwärmtemperatur	200 °C
konstitutives Modell	nicht deformierbar
<i>Kontaktbedingungen</i>	
Reibmodell	Shear
Reibzahl m	0,7
Wärmeübergangskoeffizient	5000 W/m <sup>2</sup> K
<i>Maschinencharakteristik</i>	
Maschinentyp	Oberdruckhammer
Hammerenergie	50 kNm
Bärmasse	2 t
Wirkungsgrad	0,7

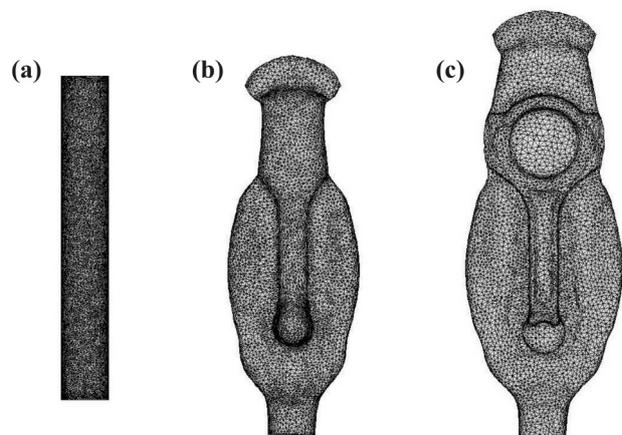


Abb. 4: Aus der Simulation ermittelte Geometrie nach den einzelnen Umformstufen; (a) Vorform, (b) Zwischenform, (c) Endform

### Schritte zur Vorformverbesserung

Aus der Analyse des Ist-Zustandes (Abb. 3 und Abb. 4) wird deutlich, dass der Großteil der Gratbildung bereits in der ersten Umformstufe erfolgt. Daher wird in der Folge versucht, in dieser Stufe durch eine geeignete Wahl der Vorformgeometrie die Gratbildung zu verringern. Dazu wird in einem ersten Schritt das Volumen des Schmiedegrates ermittelt. Da es sich beim Schmiedegrat um einen beliebig komplexen Körper handelt, ist eine exakte analytische Berechnung des Volumens nahezu unmöglich. Wesentlich einfacher ist es daher, das Gratvolumen experimentell durch mechanisches Trennen und Eintauchen in Flüssigkeit oder, wie hier erfolgt, direkt im Simulationsprogramm durchzuführen. Dazu werden in der Simulation alle FEM-Elemente, die nicht zum Grat gehören, gelöscht, und das restliche Volumen neu vernetzt. Das Volumen kann dann aus der Summe der einzelnen Volumina der FEM-Elemente bestimmt werden. Moderne FEM-Programme führen diese Berechnung automatisch durch.

Ist das Gratvolumen bekannt, wird im nächsten Schritt festgestellt, aus welchem Bereich der Vorform das den Grat bildende Material kommt. Dazu können im

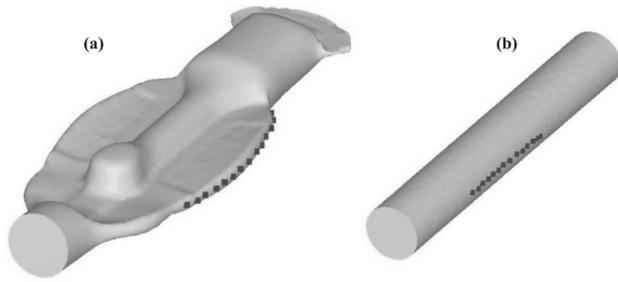


Abb. 5: Rückverfolgung des Materials am Schmiedegrat; (a) Situation nach (b) Situation vor der ersten Umformstufe

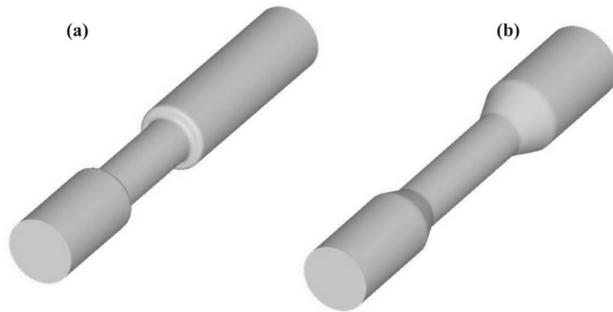


Abb. 6: Vorformvarianten; (a) nach Entfernung des gratbildenden Materials, (b) nach Verbesserung der Geometrie und der Massenverteilung

Postprozessor des Simulationsprogrammes am Ende des ersten Schmiedeschrittes Punkte am Grat definiert werden, die im Anschluss rückwärts verfolgt werden können (Abb. 5). Dies erscheint für den hier untersuchten Fall relativ einfach intuitiv möglich zu sein, kann jedoch bei noch komplexeren Werkstücken ein erhebliches Problem darstellen, das durch den inkrementellen Rechenansatz in der FEM auch für beliebig komplizierte Geometrien sehr einfach lösbar ist.

Mit diesem Wissen kann nun aus dem den Schmiedegrat verursachenden Bereich exakt jenes Materialvolumen entfernt werden, das für die Entstehung des Grates verantwortlich ist (Abb. 6a). Die so erhaltene Geometrie würde allerdings während des Schmiedens unweigerlich zu einer Faltenbildung führen und muss daher an den Radienübergängen mit entsprechenden Schrägen versehen werden. Weiters kann durch Teilung des Pleuels in drei Bereiche (kleines Auge, Schaft, großes Auge) eine weitere Optimierung der Massenverteilung an der Vorform erfolgen. Dazu wird, wie zuvor erläutert, das für jeden der Bereiche benötigte Volumen berechnet und im Anschluss eine entsprechende Anpassung der Durchmesser vorgenommen, was zu der in Abb. 6b dargestellten Vorform führt.

### Verifikation der Vorformverbesserung

Zur Verifikation der durch diese Maßnahmen erzielten Vorformverbesserung wird die Schmiedesimulation mit der neuen Vorform wiederholt. Diese zeigt, dass das Gratvolumen im ersten Umformschritt durch die verbesserte Vorform tatsächlich erheblich verringert werden kann (Abb. 7), was auch durch die experimentelle Überprüfung (Abb. 8) bestätigt wird. Abweichungen der

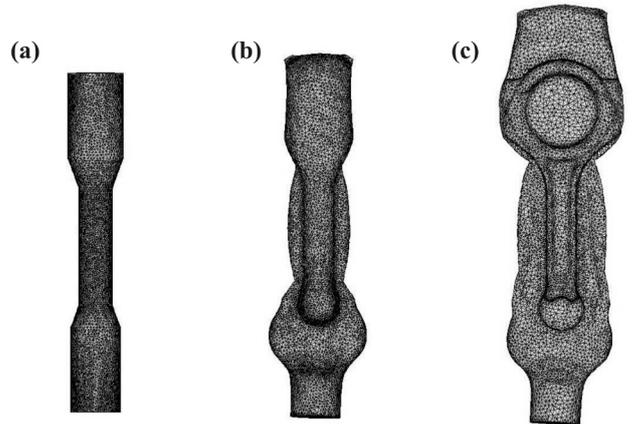


Abb. 7: Materialflussanalyse mit verbesserter Vorform; (a) Vorform, (b) Zwischenform, (c) Endform

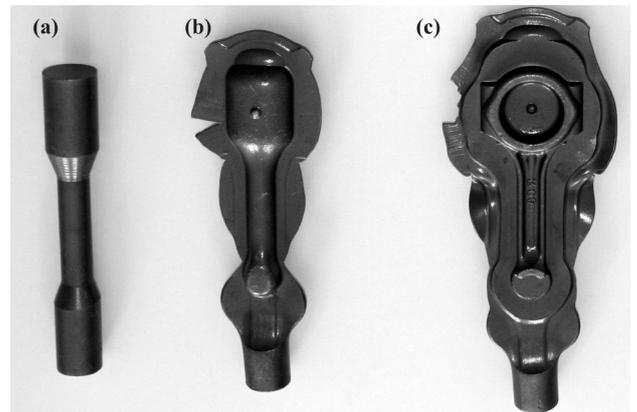


Abb. 8: Stadienfolge zum Schmieden eines Pleuels mit verbesserter Vorform; (a) Vorform, (b) Zwischenform, (c) Endform

aus den Versuchen erhaltenen Kontur im Bereich des großen Auges des Pleuels mit der aus der Simulation ermittelten sind darauf zurückzuführen, dass in den praktischen Versuchen in diesem Bereich leicht abgewandelte Werkzeuge für den ersten Umformschritt verwendet wurden.

Ein weiterer Vorteil der verbesserten Vorform ist auch die durch die schwächere Gratbildung um etwa 30 % verringerte Schmiedekraft in der ersten Umformstufe (Abb. 9).

### Zusammenfassung

Durch die in dieser Arbeit vorgestellte Methodik ist es innerhalb von wenigen Tagen möglich, eine Vorformoptimierung für das Schmieden ausschließlich virtuell in einem Simulationsprogramm durchzuführen. Der hohe Nutzen und die hohe Qualität der Aussagen aus der Umformsimulation werden durch den Vergleich mit parallel durchgeführten Betriebsversuchen bestätigt. Die verbesserte Vorform führt neben einer Materialeinsparung von etwa 15 % und einer Verringerung der Schmiedekraft auch zu einer erheblichen Abnahme des Gesenkverschleißes durch die reduzierte Relativbewegung zwischen Werkstück und Werkzeug an der Gratbahn. Für die hier präsentierten praktischen Versuche mit der verbesserten Vorform wurden gedrehte Schmiedebol-

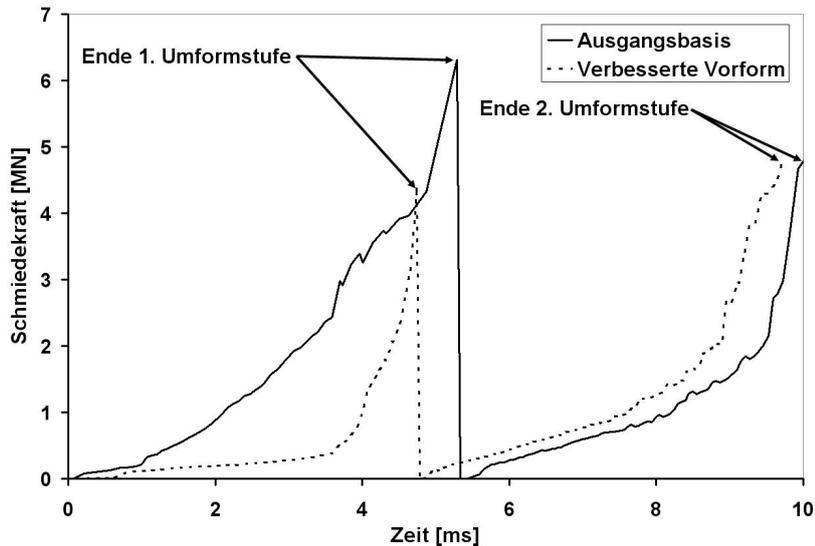


Abb. 9: Verlauf der Schmiedekraft über der Prozesszeit für die Ausgangsbasis sowie für die verbesserte Vorform

zen verwendet. In der praktischen Anwendung müssen zur Herstellung der verbesserten Vorform sinnvollerweise umformtechnische Lösungen wie beispielsweise Reck-, Querwalzen oder Freiformschmiedeverfahren angewandt werden. Dies bedeutet einen zusätzlichen Fertigungsprozess, dessen Kosten mit dem Nutzen durch die verbesserte Vorform in Relation gesetzt werden müssen. Weitere Verbesserungen an der Vorform können durch erneute Optimierungsschleifen und weitere Simulationsrechnungen nach demselben Schema erzielt werden. Allerdings gilt es auch hier, den zeitlichen und finanziellen Aufwand mit dem praktischen Nutzen in Relation zu stellen.

Neben den in dieser Arbeit dargestellten Ergebnissen bietet die Umformsimulation noch weitere Möglichkeiten zur Bewertung und Verbesserung von Umformprozessen wie beispielsweise

- Änderung der Gratbahnbreite sowie von Schrägen und Radien, um einen kontrollierten Werkstofffluss zu erhalten
- gezielte Erhöhung des Umformgrades in höher beanspruchten Bereichen
- gezielte Darstellung des Verschleißabtrages durch Kopplung mit einfachen Verschleißmodellen (z.B. Modell nach Archard oder Usui)
- sichere Vermeidung von Schmiedefalten
- Vorhersage der Korngröße durch Kopplung mit metallphysikalischen Ansätzen

## Literaturverzeichnis

- <sup>1</sup>Altan, T., F.W. Boulger, J.R. Becker, N. Akgerman und H.J. Henning: Forging Equipment – Materials and Practices. Batelle, 1973. – <sup>2</sup>Altan, T., G. Ngaile und G. Shen: Cold an Hot Forging – Fundamentals and Applications, ASM International, 2004. – <sup>3</sup>Zhuang, Y.: Preform optimization in die forging with standardized design feature. Lehrstuhl für Umformtechnik, Montanuniversität Leoben, 2007. – <sup>4</sup>Takemasu, T., et al.: Investigation of metal flow and preform optimization in flashless forging of a connecting rod. Journal of Materials Processing Technology 59 (1996), 95/105. – <sup>5</sup>Zhao, G., et al.: Preform design of a generic turbine disk forging process. Journal of Materials Processing Technology 84 (1998), 193/201. – <sup>6</sup>Alfozan, A., und J.S. Gunasekera: An upper bound elemental technique approach to the process design of axisymmetric forging by forward and backward simulation. Journal of Materials Processing Technology 142 (2003), 619/627. – <sup>7</sup>Wienströer, M.: Prozesssimulation beim Schmieden mittels Rückwärtssimulation. Universität Hannover, 2003. – <sup>8</sup>Mathieu, H.: Ein Beitrag zur Auslegung der Stadienfolge beim Gesenkschmieden mit Grat. Fortschritt-Berichte VDI Reihe 2 Nr. 213, VDI Verlag Düsseldorf, 1991. – <sup>9</sup>Shim, H.: Optimal preform design for the free forging of 3D shapes by the sensitivity method. Journal of Materials Processing Technology 134 (2003), 99/107. – <sup>10</sup>Satish, G.D., et al.: Preform optimization of pad section of front axle beam using DEFORM. Journal of Materials Processing Technology 203 (2008), 102/106. – <sup>11</sup>Doerge, E., et al: Fließkurvenatlas metallischer Werkstoffe. Hanser Verlag, München, Wien, 1986. – <sup>12</sup>Richter, F.: Die wichtigsten Eigenschaften von 52 Eisenwerkstoffen. Mannesmann Forschungsberichte 650/1974, Verlag Stahleisen m.b.H., 1974.