

## Simulation-assisted optimisation of multi-step forging tools

In forging, multi-step tools are often introduced into the production machine with a highly time consuming optimisation process with experimental character. The method for coupled simulation of multi-step forging processes developed at the Werkzeugmaschinenlabor (WZL-Machine Tool Laboratory) of the Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen

(RWTH – Technical University Aachen) enables this cost-intensive process to be shortened. To this end, already prior to manufacturing the tools, a technically simulated optimisation of the tools is carried out, under consideration of the nonlinear shifting behaviour of the later production machine.

# Simulationsgestützte Optimierung mehrstufiger Massivumformwerkzeuge

Prof. Dr.-Ing.  
Christian Brecher,  
Dipl.-Ing. Wieland Klein  
und Dipl.-Ing.  
Marco Tannert, Aachen

In der Massivumformung werden Mehrstufenwerkzeuge oft mit hohem Zeitaufwand in einem experimentell geprägten Optimierungsprozess auf der Produktionsmaschine eingefahren. Mit der am Werkzeugmaschinenlabor (WZL) der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule (RWTH) Aachen entwickelten Methodik zur gekoppelten Simulation mehrstufig belegter Massivumformprozesse kann dieser kostenintensive Vorgang verkürzt werden. Hierzu wird bereits vor der Fertigung der Werkzeuge eine simulations-technische Werkzeugoptimierung durchgeführt – unter Berücksichtigung des nicht-linearen Verlagerungsverhaltens der späteren Produktionsmaschine.

### Einleitung

Der Trend zur Fertigung stets komplexerer Teile mit kleineren Toleranzen führt zu einem steigenden Anteil mehrstufig belegter Umformprozesse, welche vorzugsweise auf automatisierten Anlagen produziert werden. Die Optimierung dieser Prozesse ist durch die gegenseitigen Interaktionen der einzelnen Prozessstufen des Werkzeugs wesentlich komplexer als die einstufig belegter. Da im Mehrstufenwerkzeug alle Prozessstufen zur Gesamtbelastung der Presse beitragen, führen bereits Veränderungen in nur einer Stufe zur Änderung von Maschinenbelastung und Maschinenverhalten – und so zu Rückwirkungen auf alle Prozessstufen, was die experimentelle Werkzeugoptimierung erschwert. Die heute verfügbaren Umformformsimulationssysteme bieten jedoch nicht ausreichend Möglichkeiten, die zwischen Mehrstufenwerkzeug und Presse stattfindenden Interaktionen abzubilden und zur simulationsgestützten Werkzeugoptimierung zu nutzen.

Daher wurden im Rahmen eines durch die Stiftung Industrieforschung geförderten und unter der Leitung des Industrieverband

Massivumformung e. V. durchgeführten Projekts am WZL der RWTH Aachen zwei Zielstellungen verfolgt. Zum einen die Entwicklung einer Methodik zur gekoppelten Simulation mehrstufig belegter Massivumformprozesse mit einem nichtlinearen Simulationsmodell der Presse, um damit eine simulationsgestützte Optimierung von Mehrstufenwerkzeugen durchführen zu können. Zum anderen die Entwicklung einer neuen Methodik zur schnellen Vermessung federnd im Fundament gelagerter Pressen während des Umformprozesses, um das Maschinenverhalten erfassen und Kennwerte für Simulationsmodelle ermitteln zu können.

Die Arbeiten wurden aktiv von einem Gremium aus Vertretern der Firmen CDP Bharat Forge, Daimler, Hirschvogel Umformtechnik, Müller Weingarten, Presswerk Krefeld, simufact engineering, SMS Meer, Sona BLW Präzisionsschmiede, ThyssenKrupp Gerlach und Transvalor sowie dem Messsystemhersteller AICON 3D Systems unterstützt.

### Analyse des Maschinenverhaltens während des Umformprozesses

Zur Erfassung des Maschinenverhaltens (Verlagerung und Kippung zwischen Pressenstößel und -tisch) federnd gelagerter Pressen während der Umformung, wurde das kamera-basierte dynamische Photogrammetriesystem MoveInspect der Fa. AICON 3D Systems eingesetzt. Neben Laborversuchen am WZL fanden damit Untersuchungen an Produktionspressen bei der Hirschvogel Umformtechnik statt, welche maßgeblich durch SMS Meer und den Messsystemhersteller AICON 3D Systems unterstützt wurden.

Für die Messung mit dem MoveInspect-System werden an Pressentisch und Stößel Bildmarken angebracht (Bild 1, links) und durch Fotografieren mit einer hochauflösenden Digitalkamera kalibriert. Während des Umformprozesses nimmt das System dann mit einer Frequenz von bis zu 1000 Hz Bilder des gesamten Messaufbaus auf, aus denen direkt in den Kameras die Positionen aller Bildmarken bestimmt werden. Die anschließende Auswertung erlaubt die Berechnung des Verlagerungsverhaltens zwischen Pressentisch und Stößel für jeden Zeitpunkt des Umformvor-

gangs. Da das System mit jeder Aufnahme auch die Referenz-Bildmarken für das Koordinatensystem erfasst, beeinflussen sowohl Eigenbewegungen der Presse als auch die in Schmiedebetrieben typischen Erschütterungen des Hallenbodens das Messergebnis nicht.

Das Diagramm in Bild 1 zeigt für eine der Produktionspressen den aus MoveInspect-Messwerten berechneten Verlauf der Auffederung in Hubrichtung (Z) während der Umformung im Vergleich zur parallel durchgeführten Referenzmessung mit Wegaufnehmern

zesse. Als Eingangsgrößen werden die Modelle der konventionellen FE-Simulation des Umformprozesses verwendet. Zudem sind für das analytische Modell der Presse Kennwerte in Form von Federzahlen und Kippfederzahlen sowie zugehörige Anfangsverlagerungen notwendig, welche messtechnisch, z. B. mit Hilfe taktile Sensorik, ermittelt werden können oder in Maschinendatenblättern verfügbar sind.

Die Berechnung der Interaktionen zwischen den einzelnen Prozessstufen und der Presse

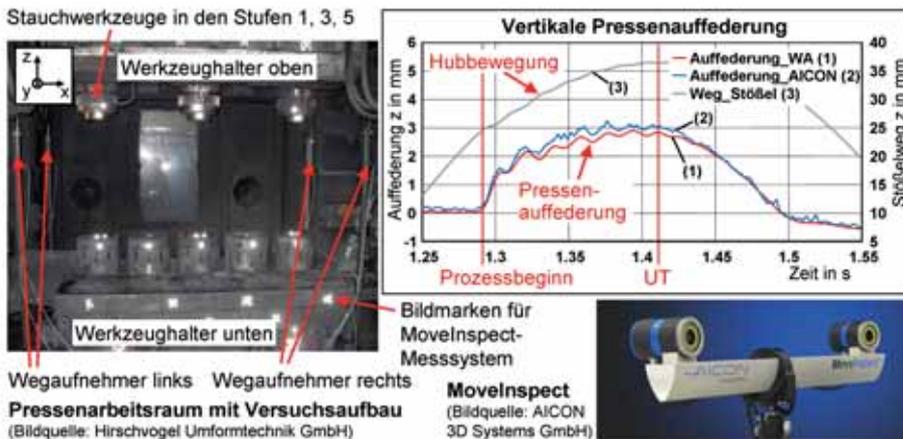


Bild 1: Dynamische Pressenmessung an einer 20000 kN Exzenterpresse.

(Messunsicherheit 0,012 mm bei einem Vertrauensniveau von 99,7 Prozent). Belastet wurde die Presse durch eine zylindrische Stauchprobe in der mittleren Prozessstufe, wobei der Umformweg 9,25 mm und die maximale Umformkraft 9500 kN betrug.

Insgesamt konnte das MoveInspect-System die Verlagerungen an der Presse gut abbilden, allerdings war die Streubreite der Messwerte durch die gewählte messtechnische Erfassung des gesamten Pressenhubes (Messbereich ca. 2000 x 2000 mm) noch hoch. Die Abweichungen der berechneten Auffederung und Kippungen betragen z. T. deutlich über 0,1 mm bzw. 0,1 mm/m gegenüber der taktile Messung. Bei einer zweiten untersuchten Presse mit geringerem Hub (kleinerer Messbereich) wurde eine höhere Abbildungsgenauigkeit erzielt. Da es sich bei der erreichbaren Messgenauigkeit des Systems um eine physikalische Grenze (Auflösung der Kameras) handelt, ist z. B. durch die Begrenzung des Messbereichs auf den eigentlichen Umformprozess mit einer deutlichen Verbesserung zu rechnen. Für den Einsatz des MoveInspect-Systems im industriellen Umfeld sind somit weitere Untersuchungen und ggf. eine Anpassung der Messstrategie notwendig.

**Gekoppelte Simulation mehrstufig belegter Umformprozesse**

Die gekoppelte Simulation von Umformmaschine und -prozess erlaubt die Einbeziehung des nicht-linear-elastischen Maschinenverhaltens in den numerischen Lösungsprozess der Simulation mehrstufig belegter Umformpro-

zesse. findet im Schnittstellenmodul der neu entwickelten Software zur gekoppelten Simulation statt. Bild 2 verdeutlicht den notwendigen Datenfluss am Beispiel eines dreistufigen Prozesses.

Grundlage für die Berechnung des Maschinenverhaltens sind die auf die Presse wirkenden Kräfte und Momente, bereitgestellt aus den FE-Prozesssimulationen der einzelnen Werkzeugstufen. Die Maschinensimulation berechnet daraus die Relativverlagerungen zwischen Stößel und Pressentisch. Eine Rückwirkung auf die Umformsimulationen erfolgt anschließend durch Übergabe der resultierenden Verlagerungen zwischen Ober- und Unterwerkzeug an die Prozesssimulation jeder einzelnen Werkzeugstufe, wo eine entsprechende Positionsanpassung des FE-Netzes der Werkzeuge stattfindet. Die Kopplung wird dabei jeweils zwischen zwei Simulationszeitschritten der Umformsimulation realisiert.

Die softwaretechnische Umsetzung der Methodik erfolgte unter der Maßgabe einer einfachen und kostengünstigen industriellen Anwendbarkeit. So unterscheidet sich die Modellierung des Umformprozesses nicht von der einer reinen Umformsimulation. An Stelle des Simulationsstarts wird jedoch zunächst die grafische Benutzeroberfläche der gekoppelten Simulation aufgerufen. Der Bediener kann hier intuitiv alle notwendigen Schritte für die gekoppelte Simulation ausführen: die Eingabe von Pressenkennzahlen für das nicht-linear-elastische analytische Pressenmodell, die Auswahl der Prozessdateien, den Start der gekoppelten Simulation und die Analyse des Ma-

schinenverhaltens. Es wird somit eine äußerst komfortable Lösung bereitgestellt. Die Analyse der Simulationsergebnisse für Werkstück und Werkzeug erfolgt – wie bei der konventionellen Umformsimulation – im Post-Prozessor des Umformsimulationssystems.

Die gewählte Methodik gewährleistet eine vollständige Berücksichtigung des Maschinenverhaltens in der Umformsimulation, wie das Beispiel eines dreistufigen Ringstauchprozesses in Bild 3 zeigt. Im Diagramm der Pressenauffederung im Bild 3 oben rechts ist deut-

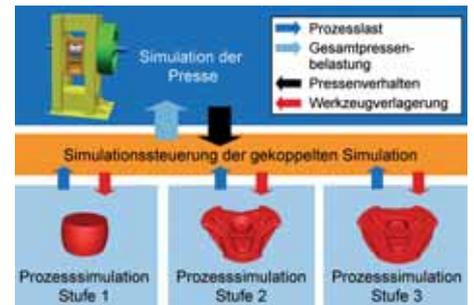


Bild 2: Datenfluss in der gekoppelten Simulation mehrstufig belegter Umformprozesse.

lich der verspätete Prozessbeginn der höheren Stufen 2 und 3 zu erkennen, welcher durch die zu den entsprechenden Zeitpunkten bereits vorhandene Pressenauffederung hervorgerufen wird. Im Diagramm der Stößelkippung wird das Durchlaufen des gesamten Kippspiels der Maschine deutlich, welches aus einem Vorzeichenwechsel des am Stößel angreifenden Gesamtmomentes resultiert.

Der Mehrwert gegenüber der konventionellen Umformsimulation liegt in realitätsnäheren Simulationsergebnissen durch die Abbildung der Prozess-Maschine-Interaktionen. Dies ermöglicht eine Entstehungsanalyse maschinenbedingter Geometrie- und Formfehler der Werkstücke oder eine Werkzeugspannungsanalyse (basierend auf maschinenbedingten Einflüssen) in der Umformsimulation und folglich eine simulationsgestützte Optimierung von Mehrstufenwerkzeugen.

**Optimierung von Mehrstufenwerkzeugen**

Die Werkzeugoptimierung beginnt mit der Durchführung einer gekoppelten Simulation. Durch Analyse der Berechnungsergebnisse im Post-Prozessor der Umformsimulation, (Werkstückgeometrie oder Werkzeugspannungen) sowie im Post-Prozessor der gekoppelten Simulation (Maschinenbelastung, Verlagerungen und Kippungen) stehen alle notwendigen Informationen zur Verfügung. Optimierungskriterium kann sowohl die Werkstückgeometrie am Ende des Umformprozesses als auch die Spannungsverteilung im Werkzeug sein.

Bild 4 zeigt ein Beispiel, bei dem aufgrund zu dicker Werkstücke in allen Prozessstufen eine Zustellung der drei oberen Werkzeuge notwendig wird. Dies wird durch Erhöhen des Prozesshubes in den Einzelstufen erreicht. Die

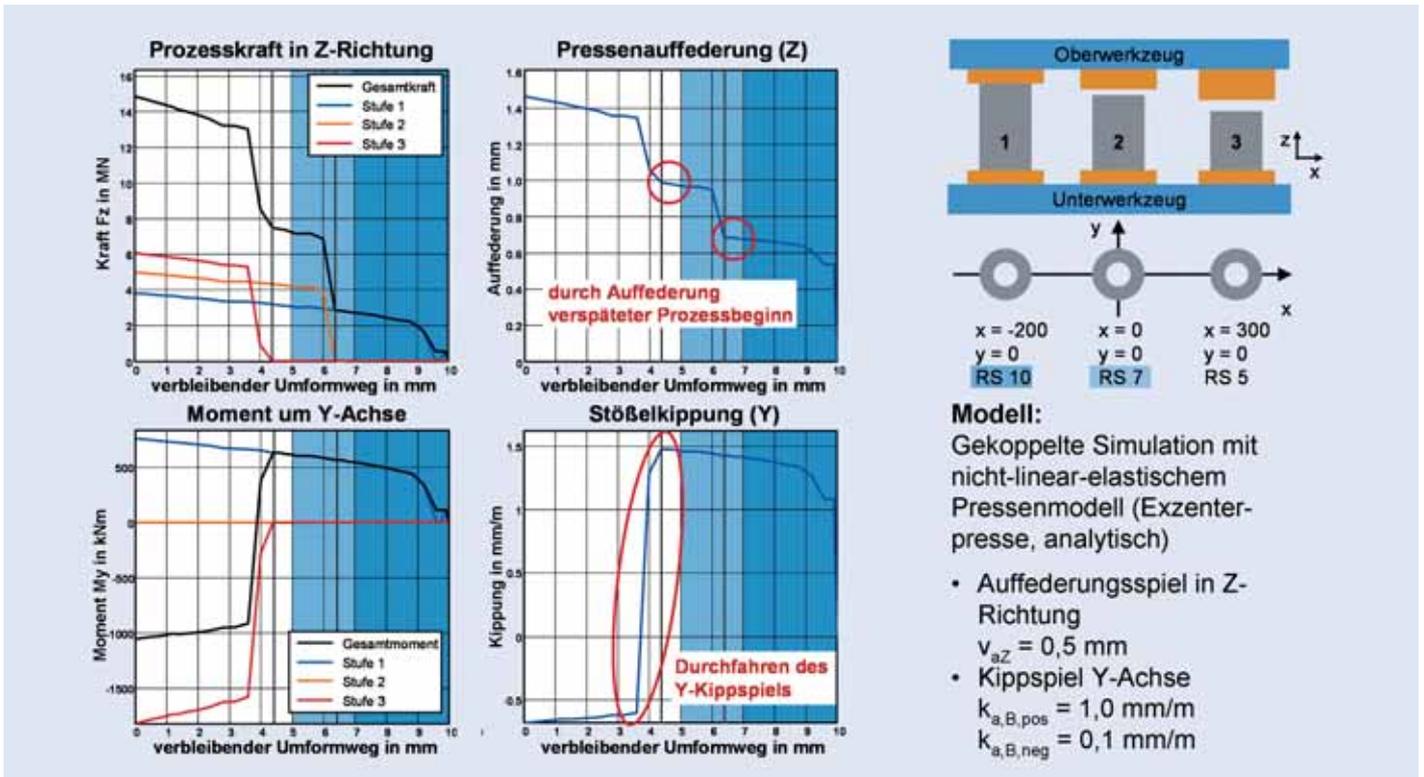


Bild 3: Ergebnisse einer mehrstufigen gekoppelten Simulation mit drei Stufen.

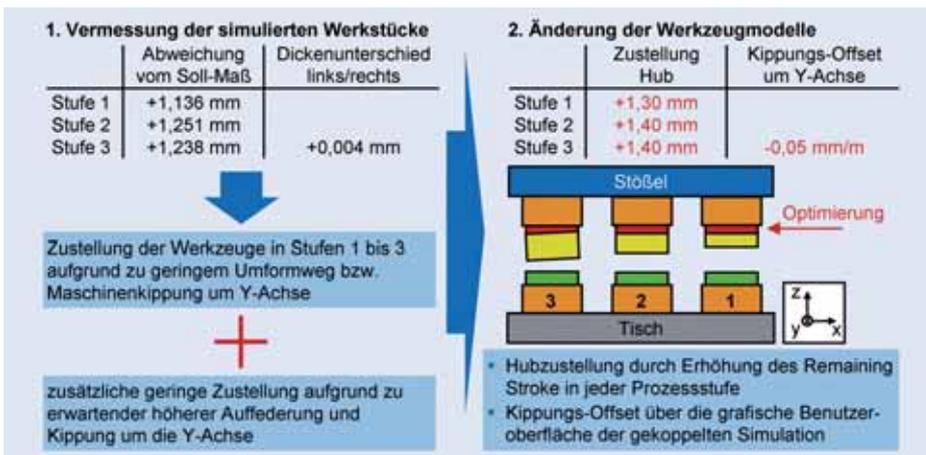


Bild 4: Werkzeugoptimierung mit Hilfe der gekoppelten Simulation.

Bilder: Autoren

Zustellung wird dabei geringfügig größer gewählt als die vorhandene Maßabweichung, um eine zu erwartende größere Maschinenauffederung durch höhere Prozesskräfte bereits vorzuhalten. Zusätzlich wird das Werkzeug in Stufe 3 mit einem Kippungs-Offset (Y-Achse) versehen, um die Stößelkippung auszugleichen und einem Dickenunterschied des Werkstücks links/rechts vorzubeugen. Nach erneu-

tem Durchlauf der gekoppelten Simulation lässt sich der Optimierungserfolg quantifizieren.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Methodik der gekoppelten Simulation mehrstufig belegter Umformprozesse bietet den Unternehmen der Massivumformung die Möglichkeit, eine simulationsgestützte pressenindividuelle Optimierung komplexer Mehrstufenwerkzeuge bereits in deren Entwicklungsphase durchzuführen. Dies trägt zur Verkürzung der praktischen Einrichtzeit der Werkzeuge auf der Presse, und somit zur Redu-

zierung der Ausfallzeiten von Produktionsmaschinen bei, was einen beträchtlichen betriebswirtschaftlichen Vorteil darstellt. Die Methodik wurde in Form eines Softwareprogramms demonstrativ für das Umformsimulationssystem Forge von Transvalor S.A. (ab Version Forge2005) umgesetzt. Es wird über den Industrieverband Massivumformung e. V. zur Verfügung gestellt und kann ohne Lizenz betrieben werden, wodurch für den Anwender keine zusätzlichen Kosten entstehen. Eine Anbindung an weitere Umformsimulationssysteme ist geplant.

Weiterhin wurde ein neuer Ansatz zur Vermessung federnd gelagerter Pressen während des Umformprozesses mit Hilfe der dynamischen Photogrammetrie vorgestellt. Eine geplante weitere Optimierung des Messverfahrens soll zukünftig eine schnelle Pressenvermessung im Schmiedebetriebe ermöglichen und auch das Werkzeugverhalten beinhalten.

Das Werkzeugmaschinenlabor (WZL) dankt der Stiftung Industrieforschung und dem Industrieverband Massivumformung e. V. für die Förderung des Projektes sowie den beteiligten Unternehmen für ihre Unterstützung bei den durchgeführten Arbeiten.

Das SI-Vorhaben Nr. S 789 ist aus Mitteln der Stiftung Industrieforschung über die Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V. gefördert worden. Die Langfassung des Abschlussberichtes kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher



Dipl.-Ing. Wieland Klein



Dipl.-Ing. Marco Tannert