

## Complete Simulation Approach for the Consideration of Solid Forming Press Tool Process Interaction

Multi-stage tools are often used in forging processes, which require a long period in an experimentally designed optimisation process with the production machine. With the methodology for coupled simulation, developed at the Laboratory for Machine Tools and Production Engineering (WZL) of RWTH Aachen University,

with which the interactions between forming machines, tool systems and forming processes in the forming simulation are considered, this cost-intensive procedure can be shortened. In order to do this, a tool optimisation by means of technical simulations is implemented even before the tool is produced – considering the non-linear displacement behaviour of the later production machines, as well as the entire tool system.

# Ganzheitlicher Simulationsansatz zur Berücksichtigung der Presse-Werkzeug-Prozess-Interaktionen

Prof. Dr.-Ing. Christian Brecher,  
Dipl.-Ing. Stephan Bäumler und  
M.Sc. Kolja Bakarinow, 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, mit der die

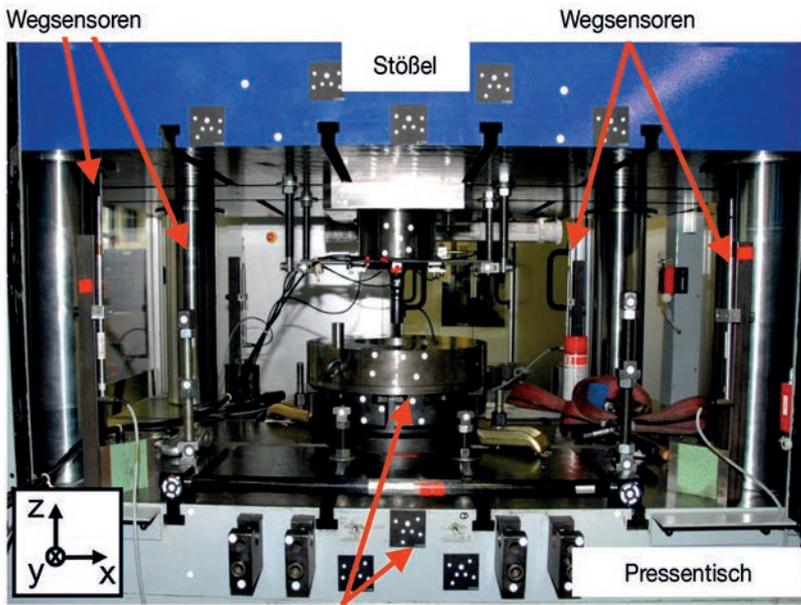
Interaktionen zwischen Umformmaschine, Werkzeugsystem und Umformprozess in der Umformsimulation Berücksichtigung findet, kann dieser kostenintensive Vorgang verkürzt werden. Hierzu wird bereits vor der Fertigung der Werkzeuge eine simulationstechnische Werkzeugoptimierung durchgeführt – unter Berücksichtigung des nichtlinearen Verlagerungsverhaltens der späteren Produktionsmaschine, sowie des gesamten Werkzeugsystems.

### Einleitung

Die Umformtechnik ist heute immer noch ein Fertigungsverfahren, bei dem die Herstellung eines Werkstücks in der Regel erst nach Vorversuchen und durch Nutzen von Expertenwissen möglich ist. Dies macht die Umformtechnik technologisch und wirtschaftlich anspruchsvoller als andere Fertigungsverfahren. Dieser Umstand resultiert nicht aus einer inkorrekten Planung, sondern vielmehr aus Effekten im Prozess, die nur durch Presse-Werkzeug-Prozess-Interaktionen beschrieben

werden können. Die auftretenden Umformkräfte führen sowohl zu einer Auffederung der gesamten Maschinenstruktur, als auch des eingesetzten Werkzeugsystems. Bei exzentrischer Belastung spielt zusätzlich die Verkipfung des Stößels eine Rolle. Insbesondere bei mehrstufig belegten Prozessen sind die Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Fertigungsstufen hochgradig komplex. Änderungen an einer Umformstufe resultieren in einem veränderten Auffederungs-, Kipp- und

Versatzverhalten des gesamten Werkzeugsatzes und haben somit wiederum Einfluss auf alle Umformstufen. Da bei mehrstufigen Umformprozessen das Umformergebnis einer Werkzeugstufe wiederum das Ausgangswerkstück der jeweils nachfolgenden Stufe darstellt, liegen bei mehrstufig belegten Prozessen sogar mehrfache Wechselwirkungen zwischen den Einzelstufen vor. Die Optimierung dieser Prozesse ist durch die gegenseitigen Interaktionen der einzelnen Prozessstufen des



Bildmarken für MoveInspect-Messsystem

	Kippung um Y in mm/m
Taktile Messung	0,88
Optische Messung (PCO.DIMAX)	0,91
Abweichung	<b>3,41 %</b>



MoveInspect (Bildquelle: AICON 3D Systems GmbH)

Bild 1: Dynamische Pressenvermessung mithilfe der Photogrammetrie.

Werkzeugs wesentlich komplexer als die Optimierung einstufig belegter Prozesse.

Im Rahmen eines durch die AiF geförderten und unter der Leitung des Industrieverbands Massivumformung e. V. durchgeführten Projekts am WZL der RWTH Aachen wurden drei Zielstellungen verfolgt: Zum Ersten die Weiterentwicklung von Messverfahren zur effizienten Vermessung des Last-Verlagerungsverhaltens von Maschinen und Werkzeugsystemen der Massivumformung im industriellen Umfeld, zum Zweiten der Gewinn und die Nutzbarmachung von Erkenntnissen und tieferem Verständnis zum Verhalten charakteristischer Werkzeugsysteme der Massivumformung und zum Dritten die Entwicklung einer Methodik für die ganzheitliche Simulation von Massivumformprozessen durch die Einbeziehung des

Last-Verlagerungsverhaltens von Maschine und Werkzeugsystem in die Prozesssimulation kommerzieller Umformsimulationssysteme.

Die Arbeiten wurden aktiv durch ein Gremium aus Vertretern der Umformindustrie, den Softwarehäusern Simufact Engineering und Transvalor, sowie dem Messsystemhersteller AICON 3D Systems unterstützt.

**Messung des Maschinenverhaltens während des Umformprozesses**

Die Genauigkeit eines Umformprozesses wird durch das Auffederungs- und Verkippenverhalten des Stößels unter Last beeinflusst. Um die Presse in der Umformsimulation zu charakterisieren, werden Feder- und Kippfederzahlen sowie Anfangsverlagerungen benötigt. Hierzu liegt mit der DIN 55189 ein standardisiertes Messkonzept vor, wobei die

Verlagerung der Presse unter statischer Last berücksichtigt wird.

Zur Erfassung des Maschinenverhaltens federnd gelagerter Pressen während der Umformung, das heißt der Verlagerung und Kippung zwischen Pressenstößel und -tisch, wurde bei den Untersuchungen das kamera-basierte dynamische Photogrammetriesystem MoveInspect des Herstellers AICON 3D Systems eingesetzt. Neben Laborversuchen am WZL fanden damit Untersuchungen an Produktionspressen von Umformbetrieben statt, welche maßgeblich durch den genannten Hersteller unterstützt wurden.

Für die Messung mit dem MoveInspect-System werden an Pressentisch, Stößel und Werkzeugsystem Bildmarken angebracht (Bild 1, links) und durch Fotografieren mit

	Optische Sensorik	Taktile Sensorik
<b>Vorteil</b>	Messgenauigkeit je nach Messvolumen	Hohe Messgenauigkeit
	Schnelle Montage der Messmarken und des Kamerasystems	Standardisiertes Verfahren (DIN 55189)
	Gleichzeitige Messung aller Punkte bezogen auf ein globales Koordinatensystem	Hohe Zuverlässigkeit
	Dynamische Referenzierung	Schnelle Auswertung
	Beliebige Anzahl und Position der Messmarken	
<b>Nachteil</b>	Kameraauflösung ist physikalisch begrenzt	Hohe Kosten pro Messpunkt
	Ungehinderte Sicht auf Messmarken ist notwendig	Zugänglichkeit erforderlich
	Aufwendige Auswertung	Hoher Montageaufwand
		Nur Relativmessung möglich

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der Messsysteme.

einer hochauflösenden Digitalkamera kalibriert. Während des Umformprozesses nimmt das System mit einer Frequenz von bis zu 1.000 Bildern pro Sekunde den gesamten Messaufbau auf.

Die anschließende Auswertung erlaubt die Berechnung des Verlagerungsverhaltens zwischen Pressentisch und Stößel für jeden Zeitpunkt des Umformvorgangs. 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.

Die Tabelle in Bild 1 zeigt für eine der Produktionspressen die aus MoveInspect-Messwerten berechnete Kippung des Stößels um die Y-Achse im Vergleich zur parallel durchgeführten Referenzmessung mit Wegaufnehmern (Messunsicherheit 0,012 mm bei einem Vertrauensniveau von 99,7 Prozent). In diesem Versuch zeigte sich eine Abweichung zwischen taktilem und optischer Messung von 3,41 Prozent.

Im Laufe des Projekts wurden mehrere Versuche mit dem MoveInspect-System durchgeführt. Im Allgemeinen können die Verlagerungen der Presse gut abgebildet werden. So ist die durchschnittliche Abweichung der Auffederung der Presse im Schnitt 0,4 Prozent höher gegenüber der taktilem Messung. Die ermittelte Verkippung des Stößels liegt im Schnitt 2,6 Prozent unter den taktilem gemessenen Werten, sodass insgesamt eine sehr hohe Übereinstimmung zwischen taktilem und optischer Messung nachgewiesen werden konnte. Zusammenfassend zeigt Tabelle 1 eine Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile der optischen Sensorik zu der standardmäßig eingesetzten taktilem Sensorik.

**Gekoppelte Simulation mehrstufig belegter Umformprozesse**

Wie eingangs erläutert, bedarf es eines Ansatzes, der es erlaubt, die Interaktionen zwischen Maschine, Prozess und Werkzeugsystem in der Umformsimulation zu berücksichtigen. Das während der Projektlaufzeit entwickelte

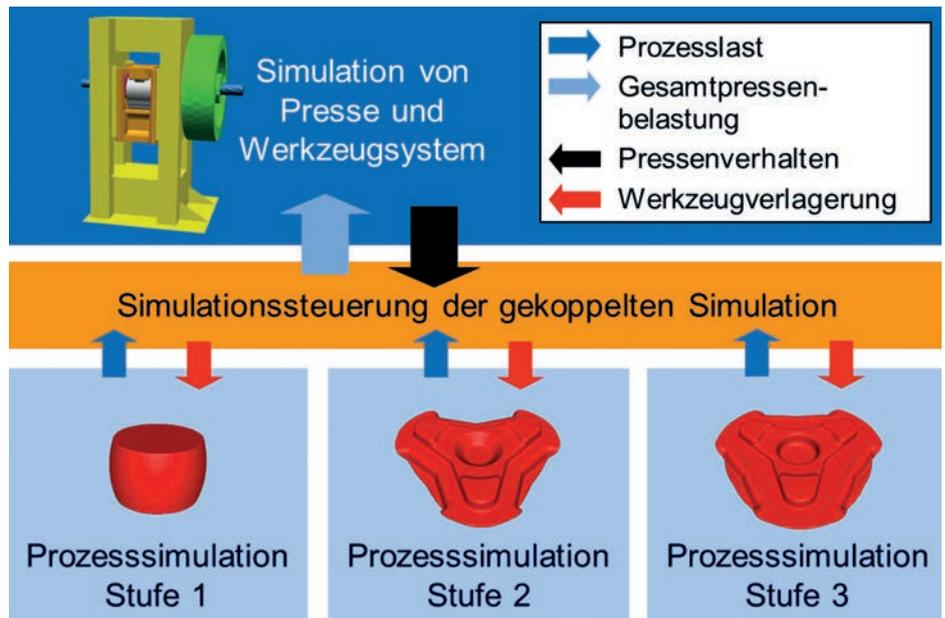


Bild 2: Datenfluss in der gekoppelten Simulation mehrstufig belegter Umformprozesse.

Softwaretool ermöglicht die Berücksichtigung nichtlinear elastischen Pressen- und Werkzeugverhaltens in der Umformsimulation. Als Eingangsgrößen werden für den Umformprozess die Modelle der konventionellen FE-Simulation verwendet. Zudem sind für die analytischen Modelle der Presse und des Werkzeugs Kennwerte in Form von Federzahlen und Kippfederzahlen sowie zugehörige Anfangsverlagerungen notwendig, welche messtechnisch (zum Beispiel mit Hilfe taktilem oder optischer Sensorik) ermittelt werden können oder in Maschinendatenblättern verfügbar sind.

Die Berechnung der Interaktionen zwischen den einzelnen Prozessstufen und der Presse findet im Schnittstellenmodul der entwickelten Software zur gekoppelten Simulation statt. Bild 2 verdeutlicht den notwendigen Datenfluss am Beispiel eines dreistufigen Prozesses. In der Simulationssteuerung werden die Prozesslasten der einzelnen Prozesssimulationen in eine Gesamtpressenbelastung umgerechnet. Mithilfe der vom Bediener hinterlegten Steifigkeits- und Spielparameter wird die Verlagerung und Verkippung des Werkzeugsystems berechnet und an die einzelnen Stufen der Prozesssimulation zurückgegeben.

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

Um die Genauigkeitserhöhung der Umformsimulation durch die Verwendung des dargestellten Ansatzes an einem Industrieprozess zu belegen, werden im Folgenden Ergebnisse einer messtechnischen Untersuchung im industriellen Umfeld vorgestellt. In diesem Fall handelt es sich um einen vierstufigen Umformprozess auf einer Gesenkschmiedepresse zur Herstellung eines Langschmiedestücks. Die Tabelle in Bild 3 zeigt die Ergebnisse der messtechnischen Untersuchung, ver-

	Gemittelte Gratdicke am Werkstück in mm
Messtechnische Untersuchung	3,33
Konventionelle Umformsituation	2,16 [-35,1 %]
Gekoppelte Simulation (Presse)	2,40 [-27,9 %]
Gekoppelte Simulation (Presse und Werkzeug)	3,34 [+0,3 %]

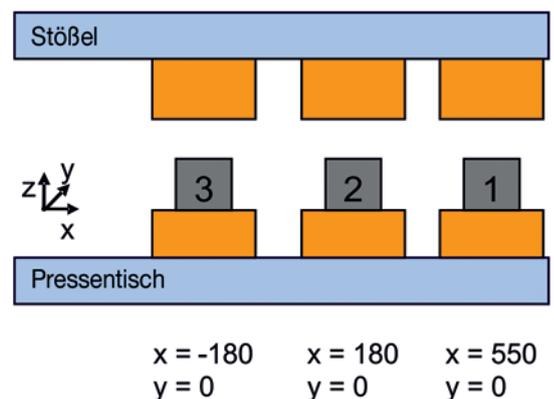


Bild 3: Ergebnisse der gekoppelten Simulation eines Industrieprozesses.

Bilder: Autoren

glichen mit den Simulationsergebnissen der konventionellen Umformsimulation (keine Berücksichtigung von Pressen- und Werkzeugverhalten), der gekoppelten Simulation der Presse (nur Pressenverhalten, kein Werkzeugverhalten) und der gekoppelten Simulation mit Berücksichtigung des Pressen- und des Werkzeugverhaltens. Als Vergleichsgröße ist die durchschnittliche Gratdicke des Werkstücks nach der dritten Umformstufe herangezogen worden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Berücksichtigung des Pressenverhaltens bereits zu einer Erhöhung der Abbildungsgenauigkeit der Umformsimulation führt. Der dargestellte Ansatz der Berücksichtigung des Werkzeugverhaltens in der gekoppelten Simulation führt zu einer weiteren Erhöhung der Simulationsgenauigkeit. In diesem Fall werden alle Interaktionen zwischen Presse, Werkzeugsystem und Prozess berücksichtigt, sodass das reale Verhalten der Presse und des Werkzeugsystems gut abgebildet wird. Das entwickelte Softwaretool bietet zudem die Möglichkeit, die Simulationsergebnisse zu analysieren. So kann zum Beispiel die auftretende Auffederung und Verkipfung der Presse sowie jeder einzelnen Umformstufe betrachtet und ausgewertet werden.

## Zusammenfassung und Ausblick

Die vorgestellte Methodik der gekoppelten Simulation zur Berücksichtigung der Interaktionen zwischen Presse, Werkzeugsystem und Prozess 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 Reduzierung der Stillstandszeiten bei, was einen betriebswirtschaftlichen Vorteil darstellt. Die im Projekt erzielten Erkenntnisse

zum Verhalten typischer Werkzeugsysteme unter Last sind in eine Wissensdatenbank eingeflossen, die der Industrie zur Verfügung gestellt wird. Die Möglichkeit zur Erweiterung der Datenbank um eigene Prozesse und Kenntnisse ist gegeben. Die Methodik der gekoppelten Simulation wurde in Form eines Softwareprogramms umgesetzt, welches über den Industrieverband Massivumformung e. V. zur Verfügung gestellt und mit kostenfreier Lizenz betrieben werden kann. Die Anbindung an die Umformsimulationssysteme FORGE (Transvalor) und DEFORM (KistlerIgel) ist erfolgreich umgesetzt. Der Hersteller Simufact hat die Methodik in Simufact.forming direkt implementiert.

Für die einfache und schnelle Gewinnung der notwendigen Steifigkeitsdaten ist ein Leitfaden entwickelt worden. Mit Hilfe der Umformung eines Referenzbauteils können Rückschlüsse auf die Steifigkeit des Gesamtsystems gezogen werden, wodurch der Anwender Steifigkeitsdaten zur Hand hat, um die gekoppelte Simulation durchführen zu können.

Da eine Maschinenuntersuchung aufgrund der fehlenden Messtechnik für viele Unternehmen in Eigenarbeit nicht zielführend ist, wurde ein Dienstleistungskonzept entwickelt, welches von der Forschungsstelle oder spezialisierten Unternehmen aus dem Bereich der Messdienstleistungen angeboten wird und – abgestimmt auf den speziellen Anwendungsfall – allen interessierten Unternehmen der Massivumformung zur Verfügung steht.

Die Methodik der Messtechnik und die entwickelte Software zur Simulation des Maschinen- und Werkzeugverhaltens werden im Rahmen eines vom Industrieverband Massivumformung e. V. angebotenen Seminars tiefergehend dargestellt. ■

## Danksagung

Das dargestellte IGF Forschungsprojekt „Messtechnische und simulative Quantifizierung des Werkzeugverhaltens in der Massivumformung“ (16707 N/1) der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen wurde via AIF durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie auf Basis

eines Entscheids des deutschen Bundestags unterstützt.

Des Weiteren möchten sich die Autoren für die Unterstützung der Industriepartner bedanken. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der Forschungsgesellschaft Stahlverformung e. V., Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Prof. Dr.-Ing.  
Christian Brecher



Dipl.-Ing.  
Stephan Bäumler



M.Sc. Kolja Bakarinow