

Schwerpunktprogramm der DFG: Datengetriebene Prozessmodellierung in der Umformtechnik

Einrichtassistenzsystem für Transferpressen

R. Krimm, L. Hinz, M. Nagel, J. Scheu

Bei mehrstufigen Umformprozessen interagieren diverse Einflüsse auf die Qualität erzeugter Werkstücke. Wiederanläufe nach Fertigungsunterbrechungen sind eine erhebliche Herausforderung. Bediener nutzen dabei implizites Wissen für erfahrungsbasierte Nachjustierungen, ohne dass die eigentliche Ursache in jedem Fall bekannt ist oder direkt behoben werden kann. Der Vorgang entzieht sich bislang der Simulation. Das hier skizzierte neue Forschungsvorhaben schafft Abhilfe.

STICHWÖRTER

Umformtechnik, Künstliche Intelligenz (KI)

1 Ausgangslage

Bei mehrstufigen Prozessen zur Herstellung umformtechnischer Produkte interagieren die Einflüsse verschiedener Randbedingungen untereinander und überlagernd. Die Bauteilqualität hängt neben der Prozesstemperatur, den Material- und Maschineneigenschaften, den Umformkräften oder dem Verschleißzustand der Werkzeuge auch von den Einstellungen der einzelnen Stufen ab. Die Erst- und auch die Wiedereinrichtung nach Fertigungsunterbrechungen von mehrstufigen Werkzeugen ist daher eine erhebliche, zeitintensive Herausforderung. Treten in einer Stufe Änderungen der Prozessparameter auf, die zum Beispiel zu veränderten Prozesskräften führen, beeinflusst dies den Prozessablauf auch in anderen Stufen. Zur Wiedererlangung der Gutteilproduktion nutzt das Personal implizites Wissen, das insbesondere auch Eigenschaften der verwendeten Maschine umfasst. Die tatsächlichen Ursachen bleiben oft unberücksichtigt. Nach dem Stand der Forschung entzieht sich dieser Vorgang der Simulation beziehungsweise dient dazu, Abweichungen zwischen Simulationsergebnissen und der Realität zu überbrücken.

1.1 Herausforderung 1: Hohe Fertigungsqualität

Bei der mehrstufigen, umformenden Verarbeitung von Blechhalbzeugen kommen unterschiedliche Werkzeugkonzepte zum Einsatz: in Folgeverbundwerkzeugen werden Werkstücke mittels bestehender Verbindungen zum Blechband von einer Stufe zur nächsten transportiert und erst in der letzten Stufe vom Halbzeug getrennt (**Bild 1**, [1]).

Bei Stufen- oder Transferwerkzeugsätzen werden hingegen Werkstückrohlinge aus dem Halbzeug in der ersten Stufe

Setup assistent for transfer presses

In multi-stage forming processes, diverse impacts interact to affect the quality of generated workpieces. Therefore, re-launches after production interruptions pose considerable challenges. Operators use implicit knowledge for experience-based readjustments without knowing or being able to eliminate the cause in every case. So far, this process defies simulation. The new approach described in this paper provides a remedy.



Bild 1. Blechstreifen mit Stadienfolge aus einem Folgeverbundwerkzeug. Foto: [1]

herausgetrennt (**Bild 2**, [2]) und über im Werkzeug oder Pressenraum integrierten Transfersystemen von Stufe zu Stufe transportiert [3].

Stufenwerkzeuge haben sich schon länger zur Herstellung kleiner bis mittelgroßer Bauteile mit großen Losgrößen und hohen Umformgraden etabliert [4]. Die Anforderungen an produzierte Werkstücke werden immer höher. Ein fehlerhaftes Werkstück kann schwerwiegende Folgen haben und erheblichen Schaden bedeuten. Kontinuierlich maßhaltige, fehlerfreie Werkstücke am Ende der Produktionskette sind für eine wettbewerbsfähige Produktion entscheidend [5]. Dabei hängt die erreichbare Fertigungsgenauigkeit bei Mehrstufenpressen von vielen Einflussgrößen ab. Dazu gehören Materialparameter (Dicke, Festigkeit, Beölung), Prozessparameter (Hubzahl, Prozesskraft, Prozesstem-



Bild 2. Batteriegehäuse, mittels Transfer-Stufenwerkzeug hergestellt. Foto: [2]

peratur, Umformgrad) und Werkzeugparameter (Geometrie von Wirkflächen und deren Lage zueinander, Fertigungstoleranzen, Verschleißanfälligkeit, Einstellhöhen, Positioniergenauigkeit des Transfersystems).

Alle Randbedingungen müssen so aufeinander abgestimmt sein, dass das gefertigte Produkt den Qualitätsansprüchen genügt. Aufgrund der hohen Komplexität des Einrichtvorgangs sind dabei aufwendige Produktionspausen gegenwärtig unvermeidbar [6].

1.2 Herausforderung 2: Zügige Erst- und Wiedereinrichtung

Bei Umformmaschinen besteht der Rüstvorgang vor dem Produktionsbeginn meist aus zwei Schritten: der Einarbeitung und dem Einrichten. Beim Einarbeiten wird mittels mechanischer Bearbeitung der Wirkflächen eine Erhöhung der Umformqualität erreicht. Beim Einrichten werden der Werkzeugeinbau, Einstellungen an der Umformmaschine und Nachjustierungen am Werkzeug vorgenommen. Bei Karosseriewerkzeugen nimmt der Werkzeugeinbau in die Presse nur wenige Minuten in Anspruch, während die Einarbeitung mehrere Arbeitstage dauern kann [6, 7]. Bei kleinen Werkzeugen besteht die Einarbeitung meist aus geringfügigen Polierarbeiten, während der erstmalige Rüstvorgang aufwendiger ist und mit steigender Stufenzahl stark an Schwierigkeit zunimmt [8].

Der Produktionsanlauf ist auch beim Wiedereinbau erprobter Werkzeuge ein nennenswerter Kostenfaktor [9]. Die Reproduzierbarkeit des Rüstens ist begrenzt [6, 10]. Nach wie vor ist eine aufwendige manuelle Einrichtung durch speziell geschultes Personal erforderlich [11].

Zur Senkung des Einrichtaufwandes an Stufenpressen wurde schon in der Vergangenheit der Einsatz von Messtechnik untersucht [6]. In [12] ist eine auf einer Kraftmessung basierende Rüsthilfe für Wiederholaufträge der Kaltmassivumformung dargestellt. In [13] ist die Messung von Prozesskräften, der Stoßelkippung und der vertikalen Auffederung einer dreistufigen

Schmiedepresse beschrieben. Die festgestellten Zusammenhänge zwischen der Maschinenverformung und den Kräften müssen zur Erlangung der bestmöglichen Bauteilqualität bei der Einrichtung berücksichtigt werden. Die Einflüsse der Einbauhöhen an mehrstufigen Werkzeugen für Massivumformprozesse sowie die Nutzung der Erkenntnisse als Grundlage einer Software ist in [14] beschrieben. Auch in [15] wird die Notwendigkeit von während des Einrichtens erfassten Messgrößen zur Parametrierung der Produktionsanlage und Erreichung eines reproduzierbar stabilen Prozesses deutlich.

Für eine verkürzte oder teilautomatisierten Einrichtung von Stufenpressen stehen nach dem derzeitigen Stand der Technik keine Grundlagen oder Systeme zur Verfügung. Domänenspezifisches Wissen des Einrichtpersonals ist nach wie vor unverzichtbar.

2 Ziel, Idee, Plan

Im Rahmen des von der DFG neu eingerichteten Schwerpunktprogramms 2422 „Datengetriebene Prozessmodellierung in der Umformtechnik“ wird in Zusammenarbeit des Instituts für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) und des Instituts für Mess- und Regelungstechnik (IMR) ein Forschungsvorhaben bearbeitet, welches die Bereitstellung von Grundlagen zur Schaffung von Systemen für eine Verkürzung des Wiedereinrichtvorgangs von Stufenwerkzeugsätzen zum Gegenstand hat.

2.1 Ziel

Übergeordnetes Ziel ist die Beschleunigung der Wiedereinrichtung von Werkzeugsätzen nach Produktionsunterbrechungen aufgrund veränderter Prozessrandbedingungen (Verschleiß, Temperaturänderungen, Änderungen von Werkstoffeigenschaften). Stellgrößen des Maschineneinrichters sind vor allem die Einbauhöhen der Werkzeugstufen, die infolge der sich unter variablen Stufenkräften elastisch verformenden Presse für die Gutteilproduktion abgestimmt werden müssen. Der größte Teil des Aufwandes entsteht aufgrund der Interaktion der Werkzeugstufen über die Presse. Die Variation der Einbauhöhe und somit der Belastungskraft in einer Stufe hat eine Änderung der Auffederungen und Kräfte auch in allen anderen Stufen zur Folge, was umgekehrt die Auffederung und Prozesskraft in der initial betrachteten Stufe beeinflusst. In der Praxis bleibt dieser Sachverhalt bei der Simulation des Umformprozesses unberücksichtigt, was zu Abweichungen zwischen simulierten und realen Umformergebnissen führt.

2.2 Idee

Die Schließung dieser Lücke wird mittels der Messung und Aufbereitung von Prozessdaten unter Nutzung domänenspezifischen Wissens der Einrichter und KI (Künstliche Intelligenz)-basierter Methoden angestrebt. Auf dieser Basis können dann fundierte Handlungsempfehlungen für die Einrichtung von Umformprozessen entstehen.

2.3 Plan

Zunächst werden die versuchstechnischen Voraussetzungen geschaffen, um die messdatenbasierte Modellierung des Einricht-

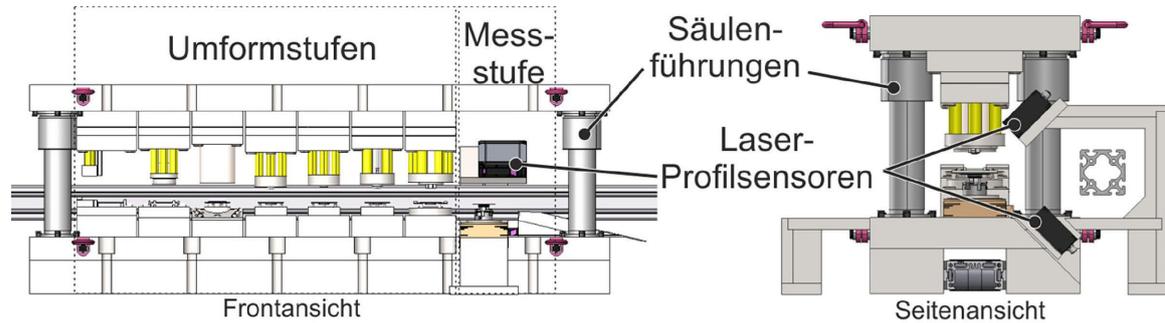


Bild 3. Stufenwerkzeugsatz mit Messstufe. Grafik: IFUM

vorgangs einer Folge von Umformprozessen zu ermöglichen. Geplant ist die Definition geeigneter geometrischer Größen (Schnittkantenqualität, Ziehtiefen, Absätze, Radien, Funktionsmaße) anhand eines akademischen Demonstratorbauteils in Anlehnung an Bremsträgerplatten, wie sie in heutigen und künftigen Automobilen verbaut und somit längerfristig in hoher Stückzahl benötigt werden. Diese dienen der späteren Quantifizierung der Qualität der erzeugten Bauteile.

Die Beschreibung des Umformsystems erfordert eine Datenbasis in Form messtechnisch akquirierter Datensätze. In Frage kommende Messgrößen werden hinsichtlich ihres potenziellen Prozesseinflusses eingeordnet (zum Beispiel Einbauhöhen, Geschwindigkeiten, Ölschichtdicke, Prozesskräfte, Temperaturen, Blechdickenschwankungen, Schwingungen, Netzleistung). Werkzeugseitige Größen werden in der Konzeption eines Werkzeugsatzes zur Herstellung des Demonstratorbauteils berücksichtigt. Die Stufen des geplant vier- bis achtstufigen Werkzeugsatzes umfassen zum Beispiel Schneiden, Ziehen, Abstrecken, Nachformen, Anschnitt oder Prägen, Randbeschnitt, Kalibrieren, Lochen. Die Umformstufen werden über eine parametrische Konstruktion mit der jeweils vorgeschalteten Umformstufe in Beziehung gesetzt und bei konstruktiven Veränderungen automatisch angepasst. Mittels FE-Simulationen werden umformkritische Zonen wie enge Radien und Anhäufungen von Material detektiert. Dies erlaubt zunächst die Auslegung der Prozesse, in künftigen Bearbeitungsphasen dann die Steigerung der Robustheit mittels Optimierung der Werkzeuggeometrie.

Jede Stufe wird als Einheit höhenverstellbar ausgeführt. Weiterhin wird in geeigneten Stufen die Höhenvariabilität und Austauschbarkeit von lokalen Formelementen vorgesehen. Die letzte Stufe des Werkzeugs umfasst die Messung der Qualitätsgrößen auf Basis rekonstruierter Oberflächengeometrien (Bild 3).

Die Variabilität des Werkzeugsatzes wird zur Generierung von Datensätzen zum Training von KI-Modellen benötigt. Jeder Datensatz besteht aus sämtlichen Messgrößen und den am Bauteil gemessenen Qualitätsgrößen. Stellgrößen sind insbesondere die Einbauhöhen der Werkzeugstufen, welche infolge der sich unter variablen Stufenkräften ändernden Stufenauffederungen nach unterschiedlichen Produktionsintervallen angepasst werden müssen. Die Trainingsdaten für die KI-Modelle werden sowohl bei der Ersteinrichtung als auch bei Wiedereinrichtungen bei definiert variierten Prozessbedingungen gewonnen. Der Einrichter versucht dabei, die geänderten Prozessbedingungen durch geeignete Justierung der Stellgrößen zu kompensieren. Gleichzeitig werden alle messbaren Größen mit den Qualitätsgrößen verknüpft.

Verschleiß an Werkzeug und Presse führt zu einer Degeneration der Fertigungsqualität. Maschineneinrichter versuchen daher, nach werkstückindividuellen Hubzahlintervallen, verschleißbedingte Änderungen der Prozessbedingungen mittels geeigneter Justierung der Stellgrößen zu kompensieren und die Gutteilproduktion mit geringem Aufwand aufrecht zu erhalten. Im beschriebenen Forschungsvorhaben sind Produktionsversuche mit verschleißanfälligen Werkzeugelementen vorgesehen. Dabei werden der Einfluss des Verschleißes auf die Messgrößen beobachtet und nach geeigneten Hubzahlintervallen Wiedereinrichtungen zur Wiedererlangung der Gutteilproduktion durchgeführt. Alle messbaren Größen werden mit den Qualitätsgrößen verknüpft und den KI-Modellen (siehe unten) zur Verfügung gestellt. Dieser Vorgang wird so oft wiederholt, bis mit dem verwendeten Satz Aktivelemente keine zufriedenstellende Qualität mehr erreicht werden kann. Zur datengetriebenen Modellierung der Systemzusammenhänge wird gemäß Bild 4 ein Ansatz aus zwei ineinandergreifenden KI-Modellen erarbeitet.

So werden in einem ersten Modell die systeminhärenten Wechselwirkungen identifiziert, um auf Basis aller quantifizierbaren Prozesseingänge (wie Umgebungsbedingungen) sowie vom Einrichter modifizierbarer Stellgrößen (wie Einbauhöhen) die während des Prozesses messbaren Systemgrößen zu präzisieren. Über eine rekursive Architektur wird ergänzend eine temporale Netztopologie erforscht, um auch die notwendige Adaption bezüglich nutzungsbedingter Veränderungen abzubilden.

Ergänzend zu rekurrenten Architekturen wird auch an einsehbarer Netztopologien geforscht, um zusätzlich eine Erklärbarkeit der identifizierten Wirkzusammenhänge zu ermöglichen. Ein zweites KI-Modell wird dann auf Basis der Prozesseingänge und den gemessenen beziehungsweise vom ersten Modell präzisierten Systemgrößen die geometrischen Merkmale auf Basis der Laser-Profilsensoren (gemäß Bild 3) vorhersagen. Dies ermöglicht eine Verknüpfung der Maschinenkonfiguration mit dem Prozesszustand im Sinne von Abweichungen zu idealen geometrischen Parametern bei optimaler Prozesseinrichtung.

Das somit vollständig virtuelle Maschinenmodell wird anschließend in eine nichtlineare Parameteroptimierung eingebettet und in jedem Evaluationsschritt vollständig durchlaufen, um Handlungsempfehlungen für eine optimale Maschineneinrichtung zur Wiedererlangung der Gutteilproduktion abzuleiten.

Auf dieser Grundlage ist geplant, ein Einrichtersassistentensystem zu schaffen, welches dem Einrichter bei jedem Einrichterschritt Handlungshinweise gibt, wie er die Gutteilproduktion schnellstmöglich erreichen kann. Sofern die Empfehlungen des Einrichtersassistenten nur teilweise zu einer Verbesserung der Bauteilqualität beitragen und eine Finalisierung durch den Einrichter

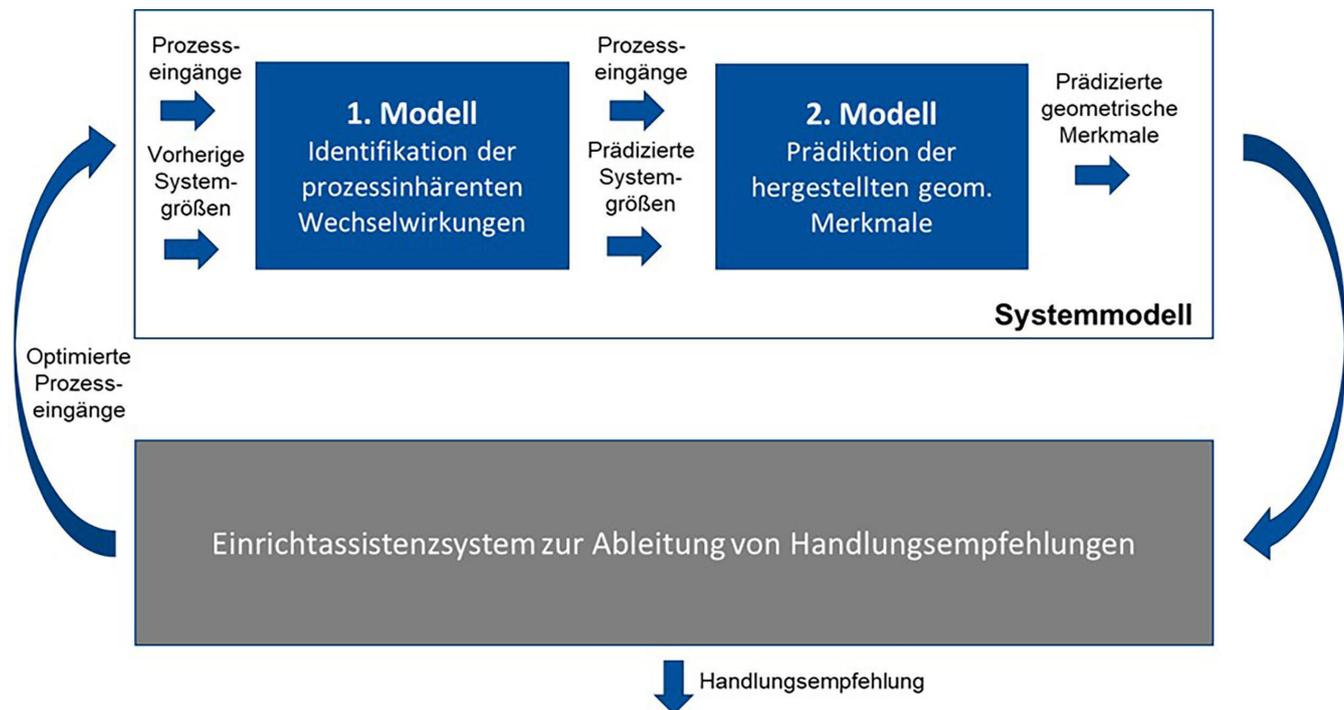
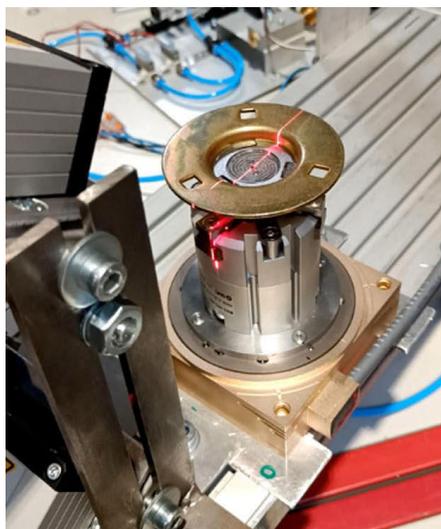
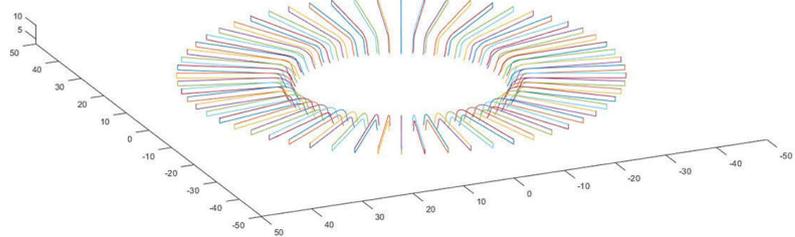


Bild 4. Mehrstufiges KI (Künstliche Intelligenz)-Modell und Einrichtassistentensystem. Grafik: IMR



Prüfstand

Bild 5. Messstufe und an einem gedrehten Bauteil gemessene Konturlinien. Foto: IFUM



3D-Gesamtkontur eines Musterbauteils

erfordern, entsteht ein neuer Trainingsdatensatz für das datenbasierte KI-Modell. Bei einer künftigen produktionsbegleitenden Implementierung würde dieses damit stets auf dem aktuellen Stand des Produktionssystems gehalten.

3 Erste Untersuchungen

Die Qualität der hergestellten Werkstücke muss individuell den einzelnen Bauteilen zuordnungsfähig quantifiziert werden. Die angedachten Qualitätsgrößen basieren auf rekonstruierten Oberflächengeometrien des ganzen Bauteils oder Teilen davon. Spätestens für den Betrieb des Einrichtassistenten ist deren Messung innerhalb der Zeit eines Produktionszyklus beziehungs-

weise eines Stößelhubes erforderlich. Ähnlich Bild 3 ist geplant, in unmittelbarer Nähe zur letzten Umformstufe des Werkzeugsatzes eine Messstufe oder einen Messplatz zu realisieren.

Das Bauteil wird dabei im Messbereich eines Linienscanners gedreht oder linear bewegt, wobei nach geeigneten Bewegungsschritten jeweils eine Konturlinie aufgenommen wird. Im Vorfeld der Sensorauswahl wurden daher Linienscanner des geplanten Herstellers und Typs mittels eines Testaufbaus erprobt (Bild 5).

Die Sensoren müssen nicht nur laut Katalog hinreichende Anforderungen an die Auflösung, Datenrate und Reproduzierbarkeit zur Messung der Bauteilgeometrie erfüllen – sie müssen auch bei den Umgebungsbedingungen in der Presse geeignete Messwerte liefern. Diese Tests dienen neben der Fehlerabschätzung

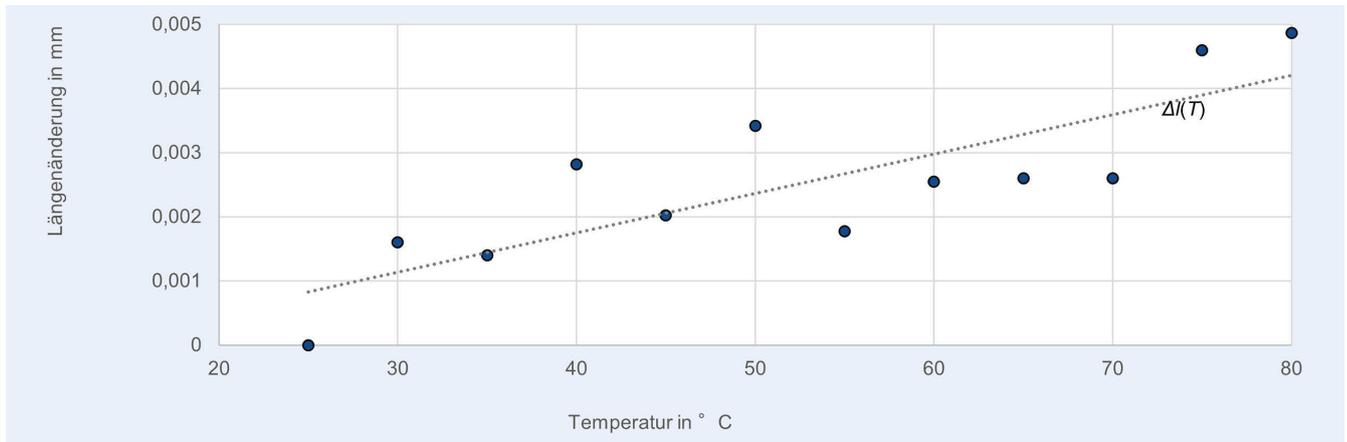


Bild 6. Gemessene Längenänderung eines Musterbauteils in Abhängigkeit der Temperatur. Grafik: IFUM

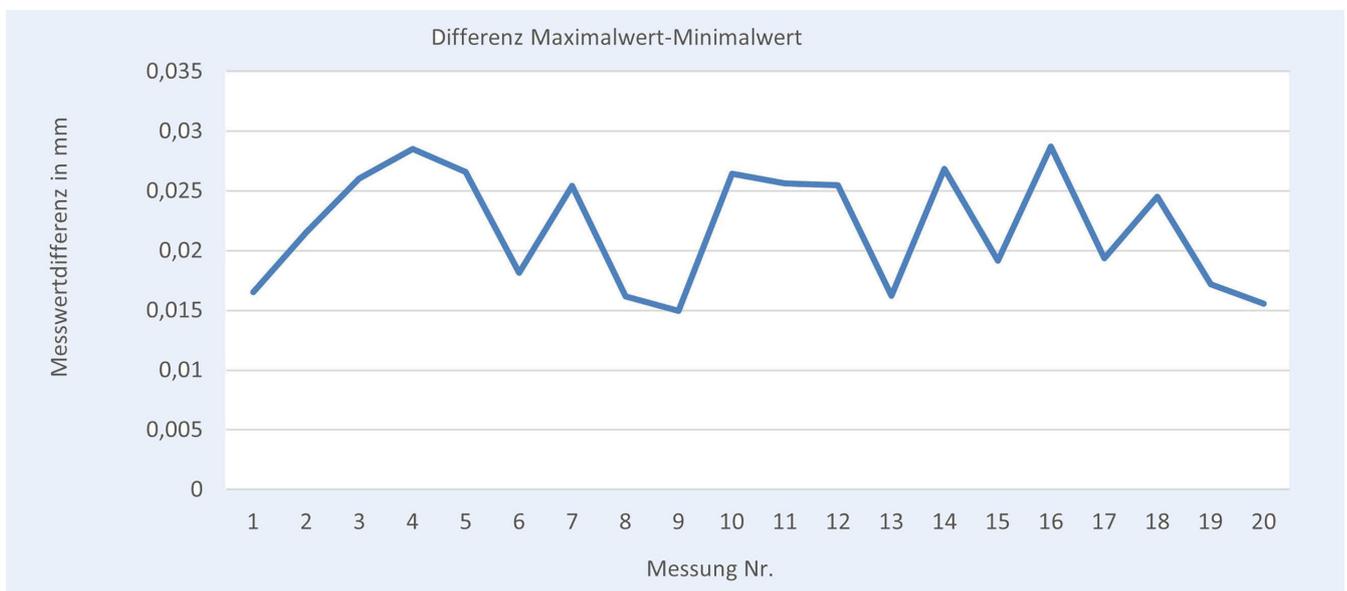


Bild 7. Differenzen maximaler und minimaler Messwerte je Versuch. Grafik: IFUM

auch der Definition von Anforderungen an Maßnahmen gegen negative Einflüsse auf die Messungen. Die angedachten Sensoren erlauben die Messung von Längenänderungen im einstelligen μm -Bereich, wie die exemplarische Messung der Längenänderung eines circa 25 mm langen Bauteils in Abhängigkeit der Temperatur zeigen (**Bild 6**). Die Abweichung von den Erwartungswerten lag dabei unter $2 \mu\text{m}$.

Zum Nachweis der Funktion der Sensorik unter schwingender Belastung wurde der Testaufbau gezielt in einem Schwingprüfstand Beschleunigungsamplituden von 5 g bei Frequenzen von circa 150 Hz ausgesetzt. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass diese Bedingungen im Einbauraum der für das Vorhaben geplanten Maschine auftreten können. **Bild 7** zeigt die maximalen Längendifferenzen, welche innerhalb der jeweils acht Sekunden langen Messzeitintervalle an einem rund 15 mm langen Probenkörper aufgetreten sind. Wie ersichtlich, ist mit Schwankungen von bis zu knapp $30 \mu\text{m}$ zu rechnen.

Somit müssen Maßnahmen am Messort getroffen werden, um den Einfluss der Schwingungen zu reduzieren, etwa in Form einer geeigneten Entkopplung des Messsystems von der Anregungsquelle beziehungsweise einer Dämpfung.

4 Zusammenfassung

Die Herstellung und Aufrechterhaltung stabiler Prozessbedingungen bei der Fertigung auf Stufenpressen ist aufgrund komplexer interner Wechselwirkungen mit nicht vollständig identifizierten Wirkzusammenhängen derzeit nur mit großem Einrichtaufwand und unter Einbeziehung impliziten Wissen erreichbar. Treten in einer Stufe Änderungen der Prozessparameter auf, die etwa zu veränderten Prozesskräften führen, beeinflusst dies den Prozessablauf in anderen Stufen, was die Wiederherstellung der Gutteilproduktion je nach Komplexität des Werkzeugsatzes zu einem langwierigen Vorgang macht.

Bei dem hier vorgestellten Vorhaben im Rahmen des Schwerpunktprogramms 2422 der DFG „Datengetriebene Prozessmodellierung in der Umformtechnik“ wird unter Einsatz von KI-basierten Methoden ein tiefergehendes Verständnis der Zusammenhänge von Prozesseinflussgrößen auf Stufenpressen sowie die Identifikation signifikanter Einflussgrößen bezüglich der Bauteilqualität angestrebt. Dafür werden zunächst ein Demonstratorbauteil sowie geeignete geometrische Qualitätsgrößen definiert und ein mehrstufiger Umformprozess entwickelt.

Mittels Gegenüberstellung der gemessenen und bestmöglich erreichbaren Qualitätsgrößen wird der Prozess hinsichtlich seiner Güte quantifiziert.

Zur Modellierung der Systemzusammenhänge wird ein Ansatz aus zwei ineinandergreifenden KI-Modellen erarbeitet, welche zunächst die systeminhärenten Wechselwirkungen identifizieren und zudem die geometrischen Qualitätsmerkmale, in Abhängigkeit der Systemkonfiguration, präzisieren. Auf Basis nichtlinearer Optimierungsverfahren, welche das zweistufige KI-Modell durchlaufen, wird eine Handlungsempfehlung für eine optimale Maschineneinrichtung zur Wiedererlangung der Gutteilproduktion, abgeleitet. Eine erfolgreiche Bearbeitung des Vorhabens vorausgesetzt, können solche Handlungsempfehlungen zu einer erheblichen Verkürzung von Wiedereinrichtvorgängen an Stufenpressen und einer entsprechenden Produktivitätssteigerung führen.

FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projektnummer 520239583 – KR3718/11-1 und HI 2498/1-1 im SPP2422.

Literatur

- [1] Nägeli Swiss AG: Tiefziehen – Effiziente Teileherstellung im Folgeverbund-Streifen. Stand: 2023. Internet. www.naegeli.ch/de/umformtechnik/tiefziehen. Zugriff am 20.09.2023
- [2] Platarg Ltd.: UK Based Global Suppliers. Company Brochure. Internet: www.pharosgroup.co.uk/wp-content/uploads/2021/12/Pharos-Platarg-Company-Product-Brochure-v2-FINAL.pdf. Zugriff am 20.09.2023
- [3] Dietrich, J.: Werkstück- bzw. Werkstoffzuführungssystem. Praxis der Umformtechnik. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2018
- [4] Herlan, T.: Optimaler Energieeinsatz bei der Fertigung durch Massivumformung. Dissertation, Universität Stuttgart, 1989
- [5] Endelt, B.; Nielsen, K. B.; Danckert, J.: Adaptive shimming control for the ultimate deep drawing process. Proceedings of the IDDRG 2008 International Conference, Olofström, Schweden, 2008, pp. 569–580
- [6] Krimm, R.: Berechnung der lastabhängigen Maschinenauffederung zur Verkürzung der Anlaufzeit neuer Transferwerkzeugsätze, Dissertation, Universität Hannover, 2006
- [7] Krimm, R.: Einfluss der mechanischen Bearbeitung von Tiefziehwerkzeugen auf Messgrößen an der Einarbeitungspressen. Internet: umformtechnik.net/Whitepaper/Einfluss-der-mechanischen-Bearbeitung-von-Tiefziehwerkzeugen-auf-Messgroessen-an-der-Einarbeitungspressen. Zugriff am 28.09.2023
- [8] Behrens, B.-A.; Doege, E.; Krimm, R.: System zur Verkürzung des Rüstvorganges auf Transferpressen. EFB Abschlussbericht 281. Hannover: Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V., 2004
- [9] Gräbener, L.: Umformwerkzeuge schneller einarbeiten. WB Werkzeug und Betrieb 132 (1999) 10, S. 46–48
- [10] Doege, E.; Derenthal, M.-J.; Straßer, D.: Zusammenwirken von Maschine und Werkzeug – Instabilitäten bei Pressen für den Karosseriebau, Tagungsband zur EFB-Tagung 23, 2003, S. 6.1–6.18
- [11] DGUV Berufsgenossenschaft Holz und Metall (Hrsg.): DGUV Information 209–008: Presseneinrichter. Mainz: DGUV 2013
- [12] Humpert, R.: Stufenbezogene Überwachung der absoluten Kräfte an Pressen zur Kaltmassivumformung. Draht und Kabel Panorama 9 (1992) 2/3, S. 66–67
- [13] Wagener, H.-W.; Korf, S.: On-Line-Messungen an einem Mehrstufen-Werkzeug der Kaltmassivumformung. Stahl (1994) 6, S. 50–52
- [14] Zhang, H. G.; Dean, T. A.: Computer Modelling of Tool Loads and Press/Tool Deflections in Multistage Forging. International Journal of Tools and Manufacturing 35 (1995) 1, pp. 61–69
- [15] Neugebauer, R.; Thamm, U.: Maßnahmenkatalog für den Wiederanlauf von Pressen. Blech Rohre und Profile 43 (1996) 4, S. 178–183



Dr.-Ing. **Richard Krimm** 
Foto: IFUM

Jeremias Scheu

Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik
und Umformmaschinen (IFUM)
An der Universität 2, 30823 Garbsen
Tel. +49 511 / 762-3679
krimm@ifum.uni-hannover.de
www.ifum.uni-hannover.de



Dr.-Ing. **Lennart Hinz** 
Foto: IMR

Malte Nagel

Leibniz Universität Hannover
Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR)
An der Universität 1, 30823 Garbsen
Tel. +49 511 / 762-3235
lennart.hinz@imr.uni-hannover.de
www.imr.uni-hannover.de

LIZENZ



Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons
Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)