

# Eigenschaftsregelung in mehrstufigen Presshärteverfahren

H. Baumann<sup>†</sup>, L. Gussek<sup>‡</sup>, J. Martschin<sup>‡</sup>, D. Ratke<sup>†</sup>, Y. Korkolis<sup>‡</sup>, T. Meurer<sup>†</sup>

<sup>†</sup>Institut für Mechanische Verfahren und Mechanik, 76131 Karlsruhe, Tel: +49(0)681/12345678,

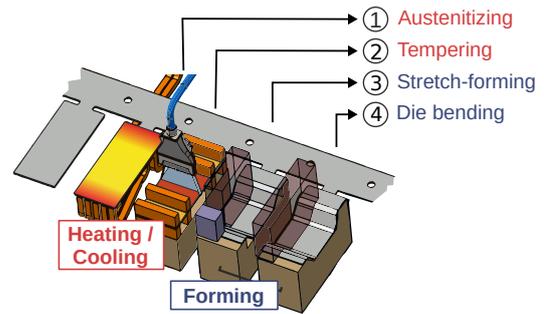
E-Mail: {henry.baumann, denis.ratke, thomas.meurer}@kit.edu

<sup>‡</sup>Institut für Umformtechnik und Leichtbau, 44227 Dortmund, Tel: ++49(0)681/12345678, E-

Mail: {lukas.gussek, juri.martschin, yannis.korkolis}@iul.tu-dortmund.de

In mehrstufigen Presshärteprozessen können Produkte mit komplexer Geometrie in hoher Stückzahl gefertigt werden, weshalb das Verfahren in vielen Industriezweigen angewendet wird. Beispiele aus der Automobilindustrie sind Getriebeteile oder Elemente des Gurt-schlusses [1]. Da die Produkteigenschaften von der thermo-mechanischen Entwicklung im Prozess abhängen sind deren Vorhersage und gezielte Einstellung eine herausfordernde Aufgabe [2]. Diese wird durch die Fehlerfortpflanzung über die Fertigungsstufen erschwert.

Betrachtet wird ein mehrstufiges Presshärteverfahren, in welchem durch Wärmebehandlung und mechanische Verformung die Eigenschaften des Werkstoffs gezielt verändert werden. Der Versuchsaufbau besteht aus einem Folgeverbundwerkzeug, welches in einer hydraulischen Servopresse mit einer Hubrate  $f_{SR}$  betrieben wird. Dabei werden zunächst einzelne Werkstücke ausgeschnitten, welche durch eine Streifenanbindung miteinander verbunden sind. Anschließend werden insgesamt vier Stufen durchlaufen, in denen der Werkstoff zunächst durch induktive Heizung auf eine Temperatur oberhalb der materialspezifischen Austenitisierungstemperatur  $T_\gamma$  gebracht wird. In der zweiten Stufe wird das Werkstück in einem Abschnitt auf die Temperatur  $T_{Heat}$  erwärmt und in einem anderen Abschnitt durch einen Luftstrom mit dem Luftdruck  $p_{Air}$  gekühlt. In der dritten Stufe folgt die erstmalige Umformung, bei welcher am freien Ende des Werkstücks eine definierte Kraft  $F_{BH}$  aufgebracht wird, während ein hutförmiges Profil in das Werkstück eingedrückt wird. In der letzten Stufe, der Gesenkbiegestufe, wird das Ende des Werkstücks umgeformt. Insgesamt ergeben sich die fünf Stellgrößen  $\mathbf{u} = [f_{SR}, T_\gamma, T_{Heat}, p_{Air}, F_{BH}]^T$ . Eine schematische Darstellung des Versuchsaufbaus zeigt Abbildung 1.



**Abbildung 1:** Schematische Prozessdarstellung des mehrstufigen Presshärtens [3].

In vorherigen Arbeiten [4, 5] wurde eine parametrische Variante der dynamischen Modalzerlegung (DMD) zur Modellierung des Prozesses verwendet, wobei auf Basis von Simulationsdaten ein lineares Modell erstellt wurde, welches die zeitliche Entwicklung der Temperatur des Werkstücks entlang der Längsachse beschreibt. In diesem Beitrag wird ein anderes Verfahren vorgestellt, welches eine Ordnungsreduktion des Finite-Elemente-Modells des Prozesses nutzt. So können die Stellgrößen als kontinuierliche Variablen behandelt werden, während bei der parametrischen DMD ein parameterspezifisches Modell für jede Stellgrößenkonfiguration erstellt werden muss. Den Eingangsvektor  $\mathbf{v}(t) \in \mathbb{R}^6$  bilden dabei die Wärmeströme der verschiedenen Flächen des Werkstücks, welche durch die Behandlung in den jeweiligen Stufe und somit durch die Stellgrößen  $\mathbf{u}$  beeinflusst werden. Mithilfe des IRKA-Modellordnungsreduktionsverfahrens ergibt sich ein reduziertes Modell.

Basierend auf dem reduzierten Modell werden optimierungsbasierte und Kalman-Filterbasierte Zustandsschätzer entworfen, um die zweidimensionale Temperaturverteilung des Werkstücks zu schätzen. Dabei werden Temperaturmessungen einer installierten Wärmebildkamera und Messungen der in die Werkzeuge eingebrachten Thermoelemente zur Beobachterkorrektur genutzt. Aus der resultierenden Temperaturhistorie können im Weiteren Eigenschaften wie die Härte oder die Blechausdünnung des Werkstücks abgeleitet werden. Dazu wurde in vorherigen Arbeiten ein Plastizitätsmodell entwickelt, welches die Umformung abbildet. Zusätzlich simuliert ein Mikrostrukturmodell die Entwicklung der Materialphasen. Da beide Modelle aufgrund ihrer Komplexität jedoch nicht für einen praktischen Einsatz geeignet sind, wurde basierend auf den Simulationsdaten jeweils ein Neuronales Netz trainiert, das die Eigenschaften zuverlässig abbilden kann [3]. Neben der Eigenschaftsschätzung ermöglichen diese Modelle eine optimierungsbasierte Trajektorienplanung, welche die Kenngrößen der Temperaturtrajektorie als auch die Niederhaltezeit und Hubrate ermittelt. Mithilfe des *Differential-Evolution*-Algorithmus erfolgt eine globale Parameteroptimierung, welche die Vorsteuerung des Prozesses bildet [6]. Die Folgeregelung wird in der Temperierstufe durch eine modellprädiktive Regelung realisiert. Die Validierung des Modells, der entworfenen Beobachter und des Reglerkonzepts erfolgt anhand des realen Prozesses.

**Danksagung:** Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – Projekt 424334660 (Tekkaya/ Meurer) im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP2183 „Eigenschaftskontrollierte Umformprozesse“.

## Literatur

- [1] K. Mori, T. Maeno, M. Tsuchiya, and T. Nanya, “Inclusion of hot stamping operations in progressive-die plate forging of tailored high strength gear part,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 90, no. 9, pp. 3585–3594, 2017.
- [2] N. Demazel, H. Laurent, J. Coër, M. Carin, P. Le Masson, J. Favero, R. Canivenc, and H. Salmon-Legagneur, “Investigation of the progressive hot die stamping of a complex boron steel part using numerical simulations and gleeble tests,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 99, no. 1, pp. 803–817, 2018.
- [3] J. Martschin, M. Wrobel, J. Grodotzki, T. Meurer, and A. E. Tekkaya, “Soft sensors for property-controlled multi-stage press hardening of 22mnb5,” *Automotive Innovation*, vol. 6, pp. 252–363, 2023.
- [4] M. Wrobel, J. Martschin, T. Meurer, E. Tekkaya, “Data-Driven Temperature Estimation for a Multi-Stage Press Hardening Process,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, pp. 4252–4257, 2023.
- [5] H. Baumann, J. Nazarenius, J. Martschin and, A.E. Tekkaya, T. Meurer, “2D Sheet Temperature Estimation for Multi-Stage Press Hardening in a Progressive Die,” *IFAC-PapersOnLine*, vol. 59, no. 1, pp. 133–138, 2025.
- [6] R. Storn, K. Price, “Differential Evolution - A Simple and Efficient Heuristic for global Optimization over Continuous Spaces,” *Journal of Global Optimization*, vol. 11, pp. 341–359, 1997.