

## Automatisierung und Digitalisierung in Tailored-Forming-Prozessketten

# Prozessoptimierung mittels Inline-Geometriemessung

P. Kern, L. Hinz, M. Kästner, E. Reithmeier, S. Blankemeyer, C.-V. Ince, A. Raatz, B.-A. Behrens, K. Brunotte, J. Uhe

Digitalisierung und Automatisierung bieten in der Warmmassivumformung großes Potenzial, die Ausbringung effizient zu steigern, Ausschuss zu verringern und den Energiebedarf zu reduzieren. In diesem Beitrag werden am Beispiel der Tailored-Forming-Prozesskette neue Ansätze zur Inline-Geometriemessung von Werkzeugen und Bauteilen vorgestellt, aus denen einerseits Regelparameter für vor- und nachgeschaltete Prozesse und andererseits digitale Ersatzmodelle abgeleitet werden.

### STICHWÖRTER

Umformtechnik, Messtechnik, Digitalisierung

### Process optimization by inline geometry measurement - Automation and digitalization in tailored forming process chains

The digitalisation and automation of process chains offers great potential in hot forging to efficiently increase output, reduce scrap, and reduce energy input. This paper presents new approaches for inline geometry measurement of tools and components using the example of the tailored forming process chain and derives from it both control parameters for upstream and downstream processes as well as digital substitute models.

## 1 Einleitung

Um gegenwärtigen und zukünftigen Herausforderungen zur Energie- und CO<sub>2</sub>-Ersparnis sowie Leichtbau und Ressourceneffizienz bei gleichzeitig konkurrenzfähigen Produktionskosten zu begegnen, zeichnen sich moderne Produktionsprozesse durch einen hohen Automatisierungs- und Digitalisierungsgrad sowie die gesteigerte Funktionalität und Leistungsfähigkeit der hergestellten Komponenten aus. Da Monomaterialbauteile zunehmend an ihre werkstoffspezifischen Grenzen stoßen, kommt der Herstellung von hybriden Bauteilen mit lokaler Belastungsanpassung eine besondere Bedeutung zuteil [1]. Derzeit finden die Fügeprozesse zur Herstellung hybrider Massivbauteile während des Umformprozesses oder am Ende der Prozesskette statt [2]. Der grundlegende Ansatz des Tailored Formings ist die Realisierung neuartiger Prozessketten zur Herstellung belastungsangepasster hybrider Massivbauteile aus vorgefügten Halbzeugen. Durch die thermomechanische Beeinflussung der Fügezone der vorgefügten Halbzeuge während der Umformung können die Eigenschaften der Bauteile gezielt verbessert werden [3].

Die Produktivität und Wirtschaftlichkeit eines automatisierten umformtechnischen Prozesses ist maßgeblich von der Auslastung der teuersten Komponente, der Umformmaschine, und deren Ausbringung abhängig. Daher sind Stillstands- oder Wartezeiten und somit die Fertigungskosten pro Bauteil zu reduzieren [4]. Mögliche Ursachen sind Werkzeugwechsel aufgrund von Verschleiß oder Wartezeiten, die durch abweichende Durchlaufzeiten vorgelagerter Prozesse entstehen.

In modernen Produktionsprozessen können durch strukturierte Datenanalysen in Kombination mit intelligenten Echtzeit-

Überwachungssystemen datengesteuerte Entscheidungen getroffen [5] und so das Produktionsvolumen erhöht werden. In Kombination mit dem Einsatz von Sensorik und Simulationen wird eine vorausschauende Prozessplanung hinsichtlich Werkzeugverschleiß und Bauteilqualität möglich. Vor allem die Zustandsüberwachung der Werkzeuge und Bauteile ist bei vollautomatisierten Umformprozessen relevant, da Maßabweichungen des Werkzeugs direkt die Bauteilqualität beeinflussen. Dies kann vor allem bei geringen Taktzeiten dazu führen, dass viele Bauteile hergestellt werden, bevor ein Fehler erkannt wird. Während in anderen Produktionsbereichen Online-Zustandsüberwachungen bereits erfolgreich eingesetzt werden [6], haben die hohen Temperaturen in Prozessen der Warmmassivumformung dazu geführt, dass eine Zustandsüberwachung der Werkzeuge sowie die Qualitätssicherung schmiedewarmer Bauteile durch optische Inspektion eine große Herausforderung darstellen.

Im Vergleich zu konventionellen Produktionsprozessen ergeben sich durch den Einsatz vorgefügter Halbzeuge gesteigerte Anforderungen an die Flexibilisierung und Robustifizierung der Prozessketten, um deren ökologische und ökonomische Gesamtbilanz zu verbessern. Um Lösungsansätze zu entwickeln und Wechselwirkungen innerhalb der Produktionsketten zu erforschen, wird im Rahmen des Sonderforschungsbereichs (SFB) 1153 eine automatisierte, flexible Tailored-Forming-Prozesskette aufgebaut. Durch die Digitalisierung der einzelnen Prozessschritte ergeben sich eine Vielzahl an Möglichkeiten, die aufgenommenen Daten für die Anpassung und Regelung vorausgehender Prozesse sowie zur Erstellung und Verifizierung der Prozessmodelle zu nutzen.

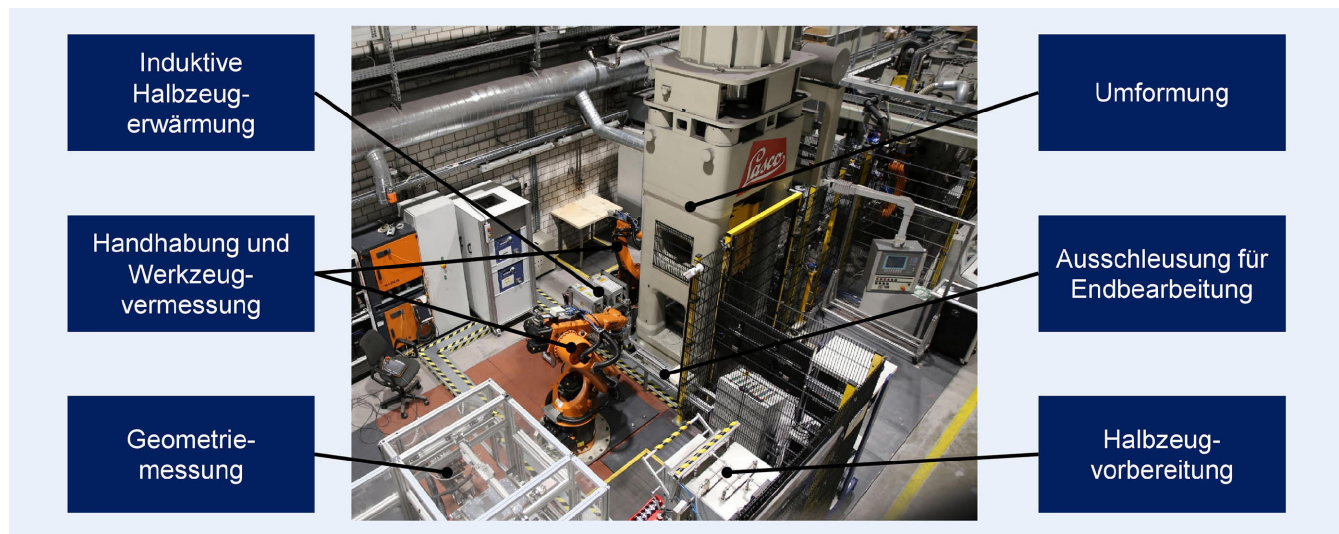


Bild 1. Komponenten der Tailored-Forming-Prozesskette. Foto: IFUM

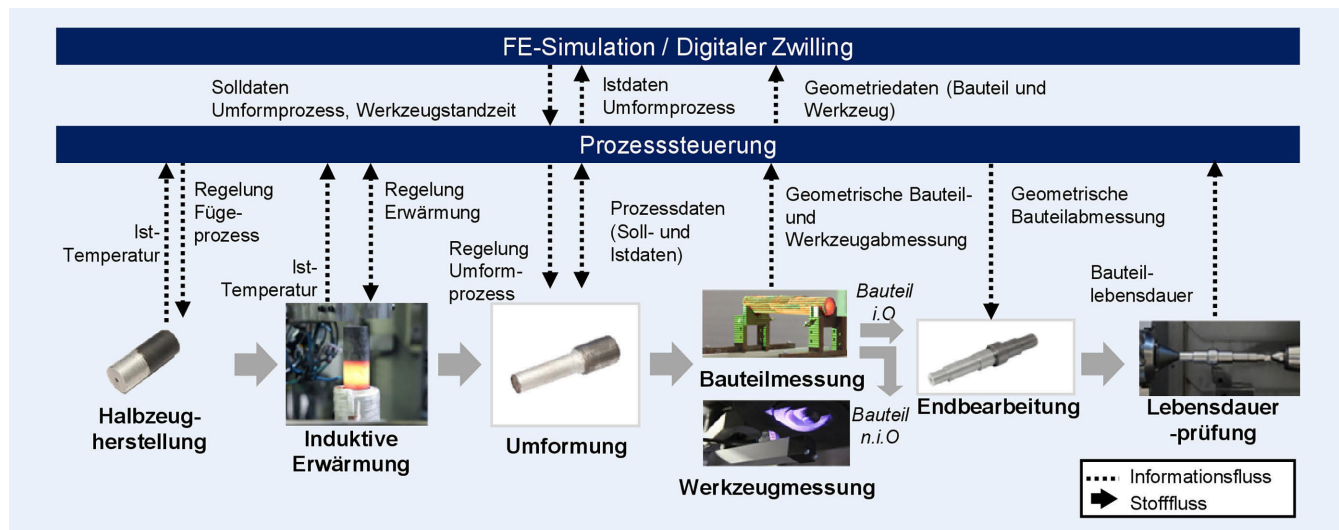


Bild 2. Informations- und Stoffflussdiagramm. Grafik: IFUM

Im Rahmen dieser Studie werden zwei Ansätze zur automatisierten Inline-Messung vorgestellt, die einerseits die Geometrie-messung schiedewarmer hybrider Bauteile und andererseits die Quantifizierung und Differenzierung des abrasiven und adhäsiven Verschleißes im Umformwerkzeug ermöglichen. Es wird aufgezeigt, wie die aufgenommenen Daten zukünftig zur Regelung und Verifizierung vorausgehender Prozessschritte und Modellierungsansätze eingesetzt werden.

## 2 Automatisierte Tailored-Forming-Prozesskette

Am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) wurde die Pressenperipherie der Spindelpresse „Lasco SPR 500“ um eine übergeordnete Steuerung erweitert. Für die Handhabung der Halbzeuge vor und nach der Umformung stehen zwei Industrieroboter „KR16 R1610“ und „KR60-3“ von Kuka zur Verfügung. Neben den Industrierobotern gehört die nachfolgend beschriebene Vakuummesskammer ebenso zur Peripherie wie eine induktive Erwärmungsstation für die bauteilspezifische

Erwärmung und Übergabepunkte für die Zu- und Abführung der Halbzeuge und Bauteile (Bild 1).

Perspektivisch soll die Zelle um einen parallelen Produktionspfad für ein weiteres Bauteil ergänzt werden, um so die Flexibilität und Produktivität zu erhöhen. Dafür ist der Einbau von zwei verschiedenen Werkzeugsystemen sowie die Erweiterung der induktiven Erwärmung vorgesehen.

In Bild 2 ist der Informations- und Stofffluss der automatisierten Prozesskette anhand einer hybriden Stahl-Aluminium-Welle dargestellt.

Die Prozesskette besteht aus einem Reibschweißprozess zum stoffschlüssigen Fügen der Werkstoffe, einer inhomogenen induktiven Erwärmung, der Umformung durch drucküberlagertes Fließpressen, der Endbearbeitung durch Wärmebehandlung und Zerspanung sowie der Bauteilprüfung. Übergeordnet befindet sich die Prozesssteuerung, in der alle relevanten Mess- und Prozessgrößen bauteilspezifisch aufgenommen, gespeichert und verarbeitet werden, um die Prozessparameter gezielt einstellen zu können. Zusätzlich wird über die Prozesssteuerung eine Schnittstelle zur Finiten-Elemente (FE)-Simulation geschaffen. Der

Handhabungsprozess ist durch flexible Greifsysteme befähigt, nicht nur die Halbzeuge innerhalb der Pressenperipherie zu bewegen, sondern zusätzlich die Messkammer mit umgeformten Teilen zu bestücken und den Werkzeugzustand vor und nach der Erwärmung zu erfassen.

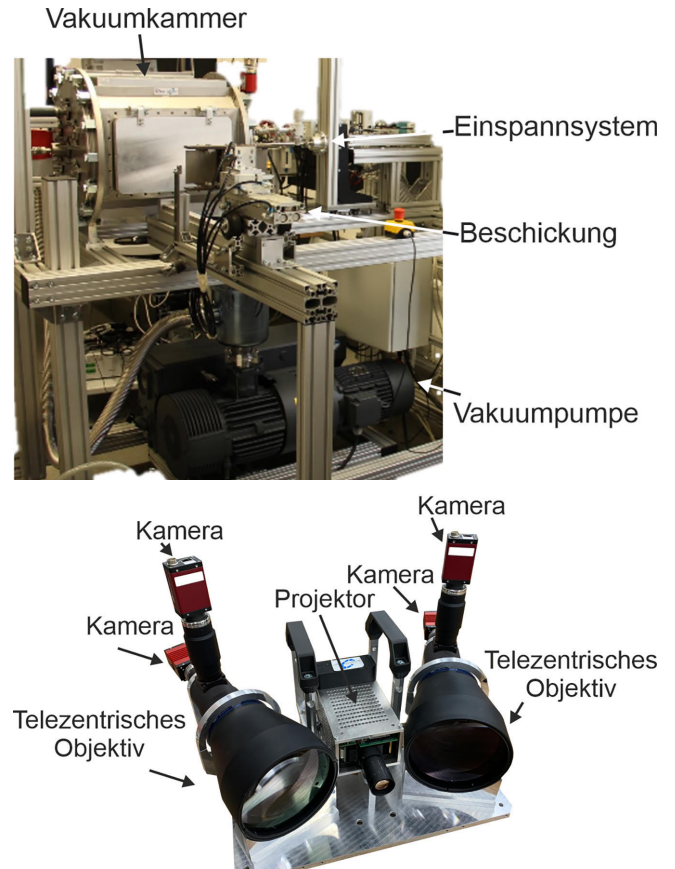
Die in-situ erfassten Geometriedaten der geschmiedeten Bauteile sowie der Zustand der Werkzeuge werden mit anderen Messgrößen und Ergebnissen aus FE-Simulationen zusammengeführt. Die Messungen des Werkzeugzustandes werden beispielsweise herangezogen, um schnellrechnende Ersatzmodelle für die Simulation des Werkzeugverschleißes während der Umformung zu entwickeln und einen digitalen Zwilling des Erwärmungs- und Umformprozesses aufzubauen. Dabei sind die In-situ-Messdaten als Eingangsdaten beziehungsweise zur Verifizierung der Verschleißberechnung mittels FEM essenziell.

Gemäß Stand der Technik erfolgt die numerische Berechnung des Werkzeugverschleißes in der Umformtechnik unter Berücksichtigung eines definierten Prozesszustandes [7]. Somit werden Schwankungen in den Prozesskenngrößen wie Temperatur, Umformweg oder Halbzeuggeometrie nicht berücksichtigt. Dadurch kann die Werkzeugstandzeit über- oder unterschätzt werden. Durch eine In-situ-Messung des Werkzeugverschleißes besteht die Möglichkeit diese Verschleißberechnung kontinuierlich zu kalibrieren. Perspektivisch erlaubt dies eine genauere Vorhersage kritischer Verschleißzustände, eine bessere Planbarkeit von Werkzeugwechseln oder in Kombination mit den Bauteilgeometrien einen steuernden Eingriff in die Gesamtprozesskette, um weiterhin qualitativ hochwertige Bauteile herstellen zu können und Ausschuss zu verhindern. Dies ist insbesondere bei hybriden Bauteilen wichtig, da Schwankungen innerhalb der einzelnen Prozessstufen die Bauteilqualität signifikant beeinflussen und über die Messung der Bauteilgeometrie nach der Umformung Rückschlüsse auf die Qualität der vorausgehenden Prozesse gezogen werden können.

Die Gesamtheit der akquirierten Daten erlaubt die Ableitung möglicher Zusammenhänge über die eine Anpassung der Prozessparameter vor- und nachgelagerter Prozesse möglich wird. So lassen sich etwa bei der Halbzeugherstellung die Abmessungen beziehungsweise Werkstoffanteile oder über die Parameter der inhomogenen induktiven Erwärmung die Fließeigenschaften der verschiedenen Werkstoffe anpassen. Während des Umformprozesses gibt es zum Beispiel über die Einstellung des Gegendrucks die Möglichkeit direkten Einfluss auf das Umformergebnis zu nehmen und für die Endbearbeitung ergibt sich die Möglichkeit bauteilspezifisch die Zerspanungsparameter aus den Geometrie- und Prozessdaten abzuleiten. Durch eine Korrelation der in der Prozesskette aufgenommenen Daten mit den Ergebnissen der Bauteilprüfung sollen Rückschlüsse über die Einflüsse der einzelnen Prozessgrößen auf die Lebensdauer ermöglicht werden.

### 3 Inline Geometriemessung und Merkmalsableitung

Zur digitalen Transformation der Tailored-Forming-Prozesskette wird gegenwärtig an zwei inline-fähigen Geometriemesssystemen geforscht. Das erste Messsystem wird zur Charakterisierung und Quantifizierung der schmiedewarmen Bauteile nach der Umformung eingesetzt, während das andere Messsystem zur frühzeitigen Erkennung von abrasivem und adhäsivem Verschleiß innerhalb des Umformwerkzeugs dient.



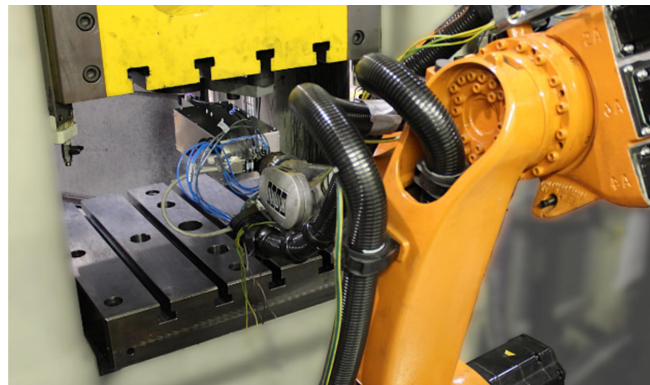
**Bild 3.** Vakuumpumpe und bi-telezentrisches Streifenprojektionssystem.  
Foto: IMR

Das Messsystem zur Geometriemessung besteht aus zwei bitelezentrischen Objektiven „TCDP23C4MC096“ von Opto Engineering und vier Kameras (zwei „MantaG-895B“, zwei „Prosilica GT 2300“ von Allied Vision Technologies GmbH) und einem Projektor („Pro 4500“ von Wintech Digital System Technology Corp.), wie **Bild 3** rechts zeigt.

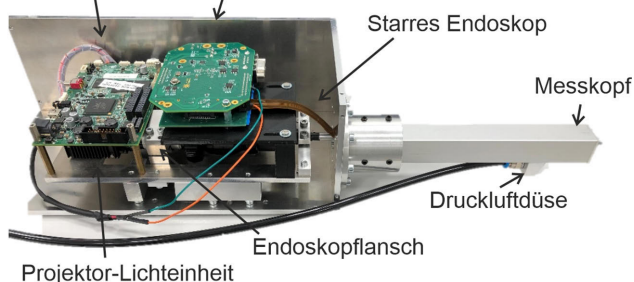
Durch die Projektion von Streifenmustern wird eine flächenhafte Geometrierekonstruktion durch paarweise stereoskopische Triangulation ermöglicht. Durch Integration eines Sichtfensters in den optischen Pfad ist dieses System für den Einsatz in einer Vakuumpumpe und für die Prozessintegration unter Umgebungsbedingungen konzipiert. Die Evakuierung der Umgebungsluft führt zu einer signifikanten Erhöhung der optischen Kooperativität, da schmiedewarme Bauteile aufgrund von Hitzeblimmern in der Umgebungsluft maßgeblich mit dem optischen Strahlengang wechselwirken und somit die Rekonstruktionsgüte beeinflussen. Über eine Beschickungsvorrichtung werden die umgeformten Bauteile in die Vakuumpumpe eingelegt und durch ein pneumatisches Einspannsystem in der Mitte des Rekonstruktionsvolumens des Messsystems positioniert. Durch die unterschiedlichen Vergrößerungen werden multiskalige 3D-Messungen des Bauteils ermöglicht.

Um das Umformwerkzeug in situ zu messen und Verschleiß zu detektieren, wurde ein miniaturisiertes Messsystem entwickelt, das auf einem starren Endoskop basiert (**Bild 4** links) und dieses zunächst an einem einfachen Demonstratorwerkzeug getestet. Dieses System ist mit einem universellen Schnellwechselsystem ausgestattet, das es ermöglicht, es direkt an einen Roboter anzu-





Projektor-Platine Framegrabber-Platine

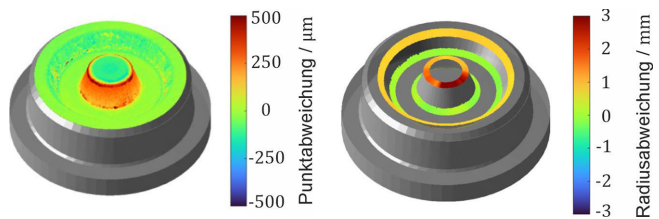


**Bild 4.** Miniaturisiertes in-situ Werkzeugmesssystem und Industrieroboter Kuka „KR16 R1610“. Foto: IMR

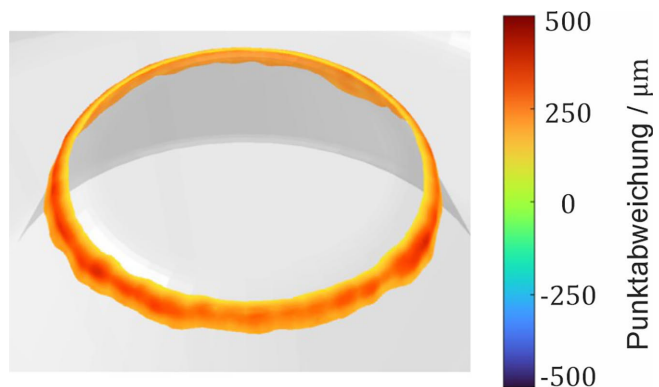
schließen und neben Daten und Strom auch Medien wie Druckluft an das Messsystem zu übertragen.

Eine speziell angefertigte Druckluftdüse entfernt Schmiedeerückstände vor der Messung und sorgt für eine kontinuierliche Kühlung des Messkopfes und der Umgebungsluft. Für hochpräzise 3D-Messungen in beengten Arbeitsbereichen wurde ein endoskopisches Streifenprojektionssystem entwickelt. Das Instrument besitzt mit einem Messfeld von 30 mm x 40 mm bei 40 mm Arbeitsabstand eine speziell für Verschleißuntersuchungen am Obergesenk angepasste Konfiguration, um gleichermaßen Kompaktheit und Navigation in beengten Bauräumen sowie die Rekonstruktion aller relevanten Bereiche des Gesenks in einer Einzelmessung zu ermöglichen. Es basiert auf einer Miniaturkamera mit einem 2-MP-Sensor vom Typ „OV2740“ des Herstellers OmniVision Technologies. Als Endoskop wird ein auf dem Hopkins-Stablinsystem basierendes Boroskop mit einem Durchmesser von 6,5 mm und einer Länge von 300 mm des Herstellers NDTec verwendet, um Messkopf und Projektor optisch zu verbinden. Bild 4 (links) zeigt die Hauptkomponenten der Kamera- und Projektionseinheit. Ein „DLP 4500 EVM“-Mikrospiegelarray von Texas Instruments Inc. erzeugt das Streifenmuster durch individuelle Verstellung einzelner Mikrospiegel. Ein C-Mount-Objektiv ( $f = 38$  mm) wird verwendet, um die Projektion in das Endoskop einzukoppeln und das strukturierte Licht auf der Messszene abzubilden. Das Endoskop hat eine Blickrichtung von  $70^\circ$  und einen Öffnungswinkel von  $80^\circ$ . Bild 4 (rechts) zeigt die Positionierung des Messinstruments in der Presse.

Beiden Messinstrumenten liegen unterschiedliche Modellansätze aufgrund der tele- beziehungsweise entozentrischen Konfiguration zugrunde, deren Parameteridentifikation im Rahmen umfangreicher Systemkalibrierungen vorgenommen wird. Für weiterführende Erklärungen sei auf [8–10] verwiesen. In [11]



**Bild 5.** Punktabweichungen am Obergesenk des Demonstratorwerkzeugs. Grafik: IMR



**Bild 6.** Segmentiertes Schadensvolumen. Grafik: IMR

finden sich Untersuchungen zur Rekonstruktionsgüte bezüglich kalibrierter Referenzkörper. Eine wesentliche Herausforderung besteht in der echtzeitfähigen Datenverarbeitung, um Einzelmessungen präzise in einem gemeinsamen Koordinatensystem, wie in [12] beschrieben, zu registrieren, redundante Geometrien zu fusionieren und aus den rekonstruierten Oberflächendaten für die Prozesssteuerung sensitive Merkmale robust und präzise abzuleiten. Bild 5 zeigt bezüglich der Verschleißmessung die auf eine Referenzgeometrie registrierte und bezüglich der Polygone in Normalenrichtung bestimmte Punktabweichung.

Auf dieser Basis kann, wie Bild 6 zeigt, über eine Schwellenwertsegmentierung (hier:  $> 350$  µm) ein vernetztes Schadensvolumen abgeleitet werden. Dies kann bezüglich Merkmalen wie Volumen, Größe oder Gestalt weiter quantifiziert werden.

Weiterhin werden geometrische Merkmale (etwa Radien und Abstände), wie Bild 7 zeigt, orts aufgelöst aus den rekonstruierten Daten abgeleitet, indem elementargeometrische Körper (wie Kugeln, Zylinder, Ebenen) numerisch eingepasst werden. Dieses Vorgehen wird ergänzend auch für die 3D-Rekonstruktionen der Vakuum-Messkammer eingesetzt, wie am Beispiel einer hybriden Welle in Bild 7 gezeigt. Dies ermöglicht die Quantifizierung von groben Formabweichungen sowie die Untersuchung von Schrumpfungen und Verzügen während des Abkühlvorgangs.

Zentrale Forschungsfragen widmen sich gegenwärtig angepassten Datenregistrierungsverfahren, welche durch multiskalige räumliche Fensterung in Kombination mit kinematischen Strukturskeletten eine präzisere Ableitung von relevanten Merkmalen von Schrumpfungen und Verzügen als mit der reinen, starren Datenregistrierung und Abweichungscharakterisierung zulassen.

Die Algorithmen zur Systemkalibrierung, Datenerfassung, Registrierung und Fusion sowie für weitere Datenverarbeitungsschritte wie Merkmalsableitung oder Abweichungsquantifizierung

sind in laufeitoptimierten, vektorisierten und teilweise vorkompilierten oder GPU (Graphics Processing Unit)-beschleunigten Bibliotheken implementiert, um eine Inline-Anwendbarkeit sicherzustellen. Als Entwicklungsumgebungen werden Python (Python Software Foundation) sowie Matlab (The MathWorks, Inc.) eingesetzt.

## 4 Zusammenfassung

Die Steigerung des Automatisierungs- und Digitalisierungsgrades sowie die zunehmende Funktionalität und gesteigerte Leistungsfähigkeit der hergestellten Komponenten sind essenziell für die Entwicklung ökologischer und ökonomischer Prozessketten. Dies gilt umso mehr, je komplexer Prozesse und Bauteile werden, da der Wert des einzelnen Bauteiles steigt und Ausschuss die Wirtschaftlichkeit stark beeinträchtigt.

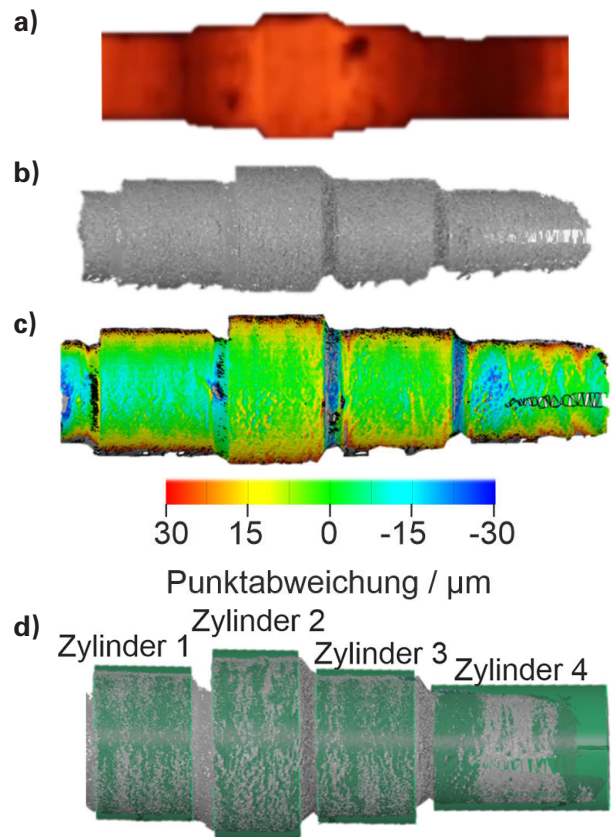
Aus diesem Grund wurde eine automatisierte Tailored-Forming-Prozesskette aufgebaut und erste Ansätze zur digitalen Transformation am Beispiel von zwei inline-fähigen Geometriemesssystemen vorgestellt. Ein Messsystem dient der Charakterisierung schmiedewarmer Bauteile nach der Umformung, während das andere System den abrasiven und adhäsiven Verschleiß im Umformwerkzeug prozessbegleitend erkennen kann. Durch angepasste Datenregistrierungsverfahren für die Bauteile und das Werkzeug ist es möglich eine präzise Analyse von vorher festgelegten geometrischen Merkmalen zu erzielen. Anhand dieser präzisen Analyse der Merkmale und Ableitung von Kennwerten ist es in Kombination mit der FE-Simulation möglich, prädiktiv die Umformung anzupassen und so die Werkzeugstandzeiten sowie die Bauteilqualität in der Warmmassivumformung zu erhöhen.

### FÖRDERHINWEIS

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) – SFB 1153 – Projektnummer 252662854 in den Teilprojekten C05 und S01.

### Literatur

- [1] Kroll, L.: Technologiefusion für multifunktionale Leichtbaustrukturen. Heidelberg: Springer-Verlag, 2019
- [2] Groche, P.; Wohletz, S.; Brenneis, M. et al.: Joining by forming – A review on joint mechanisms, applications and future trends. Journal of Materials Processing Technology 214 (2014) 10, pp. 1972–1994
- [3] Behrens, B.-A.; Uhe, J.: Introduction to tailored forming. Production Engineering 15 (2021) 2, pp. 133–136
- [4] Wiendahl, H.-P.; Hegenscheidt, M.: Produktivität komplexer Produktionsanlagen: Systematische Erhöhung durch Unterscheidung von lokalen und effektiven Stillständen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 96 (2001) 4, S. 160–163, doi.org/10.3139/104.100400
- [5] Volk, W.: Auf dem Weg zur intelligenten Fabrik. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 118 (2023) 5, S. 281–281, doi.org/10.1515/zwf-2023-2007
- [6] Denkena, B.; Klemme, H.; Stieh, T.: Überwachung von Werkzeugverschleiß: Maschinenübergreifende Nutzung von Prozessdaten mithilfe von Maschinellem Lernen. Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 118 (2023) 5, S. 298–301, doi.org/10.1515/zwf-2023-1059
- [7] Behrens, B.-A.; Brunotte, K.; Wester, H. et al.: Hardness Assessment Considering Nitrided Layers Based on Tempering Tests for Numerical Wear Prediction for Forging Processes. Materials 15 (2022) 20, 7105, doi.org/10.3390/ma15207105



**Bild 7** 3D-Rekonstruktion einer schmiedewarmen Welle und Abweichungsanalyse: a) Kamerabild, b) Rekonstruierte Punktwolke, c) Punktabweichung zu CAD-Geometrie, d) Zylinderfit. Grafik: IMR

- [8] Beermann, R.; Quentin, L.; Kästner, M. et al.: Calibration routine for a telecentric stereo vision system considering affine mirror ambiguity. Optical Engineering 59 (2020) 5, 054104 doi.org/10.1117/1.OE.59.5.054104
- [9] Beermann, R.; Bossemeyer, H.; Diekmann, R. et al.: Model-based calibration routine for a triangulation sensor for inner radius measurements of cylindrical components. Proceedings SPIE 11352 Optics and Photonics for Advanced Dimensional Metrology (2020), 113520S, doi.org/10.1117/12.2552729
- [10] Middendorf, P.; Blümel, R.; Hinz, L. et al.: Pose Estimation and Damage Characterization of Turbine Blades during Inspection Cycles and component-protective Disassembly Processes. Sensors 22 (2022) 14, #5191, doi.org/10.3390/s22145191
- [11] Hinz, L.; Metzner, S.; Müller, P. et al.: Fringe Projection Profilometry in Production Metrology: A Multi-Scale Comparison in Sheet-Bulk Metal Forming. Sensors 21 (2020) 7, #2389, doi.org/10.3390/s21072389
- [12] Hinz, L.: In-situ 3D endoscopy based on fiber-optic fringe projection profilometry in production metrology. Dissertation, Gottfried Wilhelm Hannover Leibniz Universität, 2022, doi.org/https://doi.org/10.15488/12757




**Pascal Kern**, M.Sc.   
Foto: IMR

Dr.-Ing. **Lennart Hinz**

Dr.-Ing. Dipl.-Phys. **Markus Kästner**

Prof. Dr.-Ing. **Eduard Reithmeier**   
 Leibniz Universität Hannover  
 Institut für Mess- und Regelungstechnik (IMR)  
 An der Universität 1, 30823 Garbsen  
 Tel. +49 511 / 762-13353  
[kern@imr.uni-hannover.de](mailto:kern@imr.uni-hannover.de)  
[www.imr.uni-hannover.de](http://www.imr.uni-hannover.de)

**Sebastian Blankemeyer**, M.Sc.  
**Caner Veli Ince**, M.Sc.   
 Prof. Dr.-Ing. **Annika Raatz**   
 Leibniz Universität Hannover  
 Institut für Montagetechnik (match)  
 An der Universität 2, 30823 Garbsen  
 Tel. +49 511 / 762-18249  
[blankemeyer@match.uni-hannover.de](mailto:blankemeyer@match.uni-hannover.de)  
[www.match.uni-hannover.de](http://www.match.uni-hannover.de)

Prof. Dr.-Ing. **Bernd-Arno Behrens**   
 Dr.-Ing. **Kai Brunotte**   
 Dr.-Ing. **Johanna Uhe**   
 Leibniz Universität Hannover  
 Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)  
 An der Universität 2, 30823 Garbsen  
 Tel. +49 511 / 762-2427  
[uhe@ifum.uni-hannover.de](mailto:uhe@ifum.uni-hannover.de)  
[www.ifum.uni-hannover.de](http://www.ifum.uni-hannover.de)

## LIZENZ



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