

Carbon Footprint Tool zur Messung und Erfassung von Halbzeug- und Werkzeugtemperaturen

Big Data in der Massivumformung

E. Ortlieb, F. Müller, S. Peddinghaus, J. Peddinghaus, H. Wester, M. Rothgänger, H. Monke, J. Raible, M. Huber, K. Brunotte

Die Erfassung von Daten während des Schmiedeprozesses ist derzeit eine große Herausforderung. Daher wird in diesem Beitrag ein universell einsetzbares System zur Messung und Erfassung von Halbzeug- und Werkzeugtemperaturen, Schmiedekräften und dem Stempelhub vorgestellt. Anhand eines exemplarischen Demonstratorprozesses wird aufgezeigt, wie 10 kHz hochauflösend aufgezeichnete Daten eines einzelnen Hubs sowie einer ganzen Schmiedeserie für weitere Analysen genutzt werden können.

Data acquisition in industrial forging conditions

The acquisition of data during the hot forging process is currently a major challenge. Therefore, this paper presents a universally applicable system for measuring and recording the temperatures of the billet and dies, forging forces and stroke paths. Using an exemplary demonstrator process, it is shown how 10 kHz of recorded data of a single stroke as well as of a whole forging series can be used for further analyses.

STICHWÖRTER

Umformtechnik, Messtechnik, Schmieden

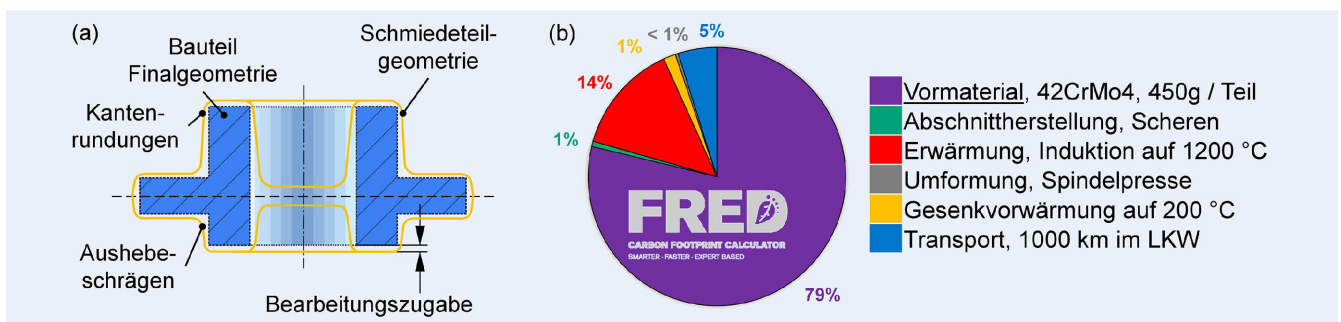


Bild 1. Schmiedeteilmerkmale für eine robuste Prozessgestaltung (a); Verteilung der CO₂-Emissionen einer einzelnen Schmiedestufe eines Demonstratorbauteils (b). Grafik: IFUM Hannover

1 Einführung

Schmiedeprozesse sind gekennzeichnet durch hohe Temperaturen und Umformkräfte [1, 2]. Diese treten nicht nur zyklisch mit jedem Hub auf, sondern unterliegen auch starken Schwankungen [3] über die Prozesszeit. Diese Schwankungen führen zu Unsicherheiten in Bezug auf Prozessstabilität und resultierende Bauteilqualität sowie die Lebensdauer der Werkzeuge. Zur Sicherstellung der Bauteilqualität in der Serienfertigung werden daher bereits bei der Prozessauslegung Massenzugaben für das Halbzeug hinzugefügt, siehe **Bild 1** (a).

Dies ermöglicht eine Anpassung der Endbearbeitung des endgültigen Bauteils, sodass kleinere Bauteilfehler, wie Unterfüllungen oder Verzüge, nicht zwingend zu Ausschussteilen führen. Mit dem im Rahmen der „NOCARBforging2050“-Initiative entwickelten Carbon Footprint Tool „Fred“ [4] können die CO₂-Emis-

sionen des Herstellungsprozesses von Halbzeugen und der vom Halbzeug ausgehenden weiteren Verarbeitungsschritte berechnet werden. Die für die Berechnungen erforderlichen Kennzahlen wurden von Anwendern aus der Industrie zusammengestellt und nach DIN EN ISO 14067 [5] dokumentiert. **Bild 1** (b) verdeutlicht, dass der größte Teil der Emissionen aus der Herstellung des Rohmaterials selbst und der zur Umformung notwendigen Erwärmung resultiert. Da diese in direktem Zusammenhang mit der verwendeten Masse des Halbzeugs stehen, haben überschüssige Materialzugaben sowie Ausschussbauteile einen signifikanten Einfluss auf die CO₂-Emissionen eines Schmiedeprozesses.

Zur Prozessauslegung und -analyse haben sich Finite-Elemente (FE)-Simulationen als effizientes Werkzeug etabliert. Dieser Ansatz hat jedoch das grundsätzliche Problem, dass eine genaue Kenntnis der vorhandenen Zustände (wie Bauteiltemperaturen) und entsprechendes Domänenwissen vorausgesetzt wird. Dabei

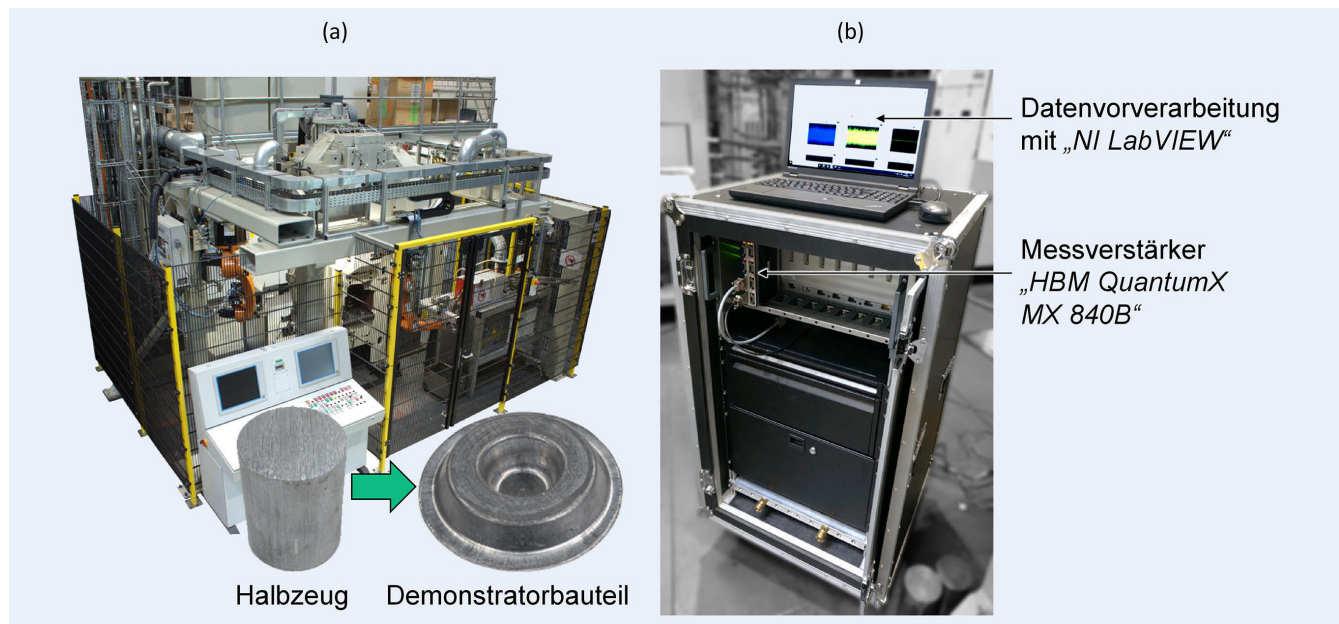


Bild 2. Vollautomatische Schmiedepresse und Demonstratorbauteil (a); mobiles Messgerät (b). Foto: IFUM Hannover

sind die einzelnen Wechselwirkungen der Prozessparameter jedoch kaum überschaubar und zum Teil sogar unerforscht. Ein weiteres Problem ist, dass häufig nur ein spezifischer Prozesszustand aus der Menge möglicher Prozesszustände abgebildet wird [6]. Eine Lösung dieser Problematik liegt in der Messung und Erfassung von Prozessgrößen. Dies ist in der Schmiedindustrie aus zahlreichen Gründen derzeit nicht Stand der Technik. Obwohl eine Vielzahl von Sensoren für zahlreiche Messgrößen verfügbar ist, erfordern die hohen thermomechanischen Belastungen, die schlechte Zugänglichkeit relevanter Stellen und die hohen Temperaturen beim Schmieden ein hohes Maß an Robustheit, was entweder zu hohen Kosten oder zu Einschränkungen der Messfähigkeit führt. Ein weiteres Problem ist, dass wissenschaftliche oder industrielle Anwendungsfälle bisher sehr begrenzt sind [7] und nur wenige Beispiele dokumentiert sind, die den Nutzen einer solchen Investition belegen [8].

In Anlehnung an die Grundsatzdiskussion über bestehende Modellierungsgrenzen bei Umformprozessen von Volk *et al.* [9] wurde ein flexibles Messsystem konzipiert und aufgebaut, mit dem Prozessdaten in einem industriellen Schmiedeprozess erfasst werden können. Hauptziel des Messsystems ist die Erfassung von Prozessgrößen, die gut mit den Eingangsgrößen beziehungsweise Ergebnissen einer FE-Simulation korreliert werden können. Exemplarisch wurden hier die Werkzeugtemperatur, die Halbzeugtemperatur, die Umformkraft und der Hub als erste Referenz und experimentell messbare Prozessgrößen gewählt. Anschließend wird eine exemplarische Schmiedeserie über einen längeren Zeitraum messtechnisch überwacht, sodass nach einem initialen Feature Engineering erste Rückschlüsse auf die Aussagekraft des zugehörigen FE-Modells des Schmiedeprozesses aufgezeigt werden können. Eine Analyse der Messdaten verdeutlicht, dass eine kritische Analyse und Interpretation von erfassten Messdaten von zentraler Bedeutung ist, bevor diese in den Rahmen datengetriebener Modelle überführt werden.

2 Methodik

2.1 Anforderungen an die Datenmessung und Umfang der Studie

Nach Volk *et al.* [9] und Liewald *et al.* [6] liegen eine Reihe von Anforderungen an die Datenerfassung für die datenbasierte Prozessmodellierung vor. So müssen die Daten selbst eine hohe Qualität aufweisen, um eine hohe Modellgenauigkeit erreichen zu können [10]. Im Hinblick auf die vorgesehene Anwendung in Umformprozessen sollen Zeitreihen verwendet werden. Diese sind in der Regel anspruchsvoller in Bezug auf das Feature Engineering, da sie eine Segmentierung von sich wiederholenden Ereignissen, in diesem Fall den einzelnen Hieben, erfordern [11]. Um dies im Rahmen dieser Arbeit zu gewährleisten, ist nicht nur die Messbarkeit der jeweiligen Daten selbst relevant, sondern auch die Sicherstellung der zeitlichen Synchronisation [6] zwischen den einzelnen Messkanälen.

Der Einsatz von verschiedenen Sensoren in einem Serienschmiedeprozess sowie die Analyse von Prozessdaten hinsichtlich auftretender Schwankungen erfolgte an einer vollautomatisierten Schmiedeanlage mit einer „Eumuco SP30a“ Presse. Hierfür wurde ein exemplarischer Schmiedeprozess gewählt, der die Bedingungen einer industriellen Fertigung nachbildet. Für den Demonstratorprozess wurden zylindrische Halbzeuge aus dem Werkstoff EN AW6082 mit einem Durchmesser von 30 mm und einer Höhe von 40 mm verwendet. Da für den Prozess eine Einlegetemperatur von 500 °C angestrebt wurde, wurden die Regelgrenzen der induktiven Erwärmung auf 450 °C bis 550 °C festgelegt. Der Hub wurde so gewählt, dass eine Gratdicke von circa 1,7 mm an den gefertigten Bauteilen vorliegt. Mit dieser Prozesskonfiguration wurde eine Serie von 1000 Bauteilen hergestellt. **Bild 2 (a)** zeigt die Presse und das Demonstratorbauteil.

2.2 Allgemeiner Aufbau des Messsystems

Für das Messsystem existieren neben den grundlegenden Anforderungen an die Datenqualität auch entscheidende Anforder-

rungen an die Einsetzbarkeit. Das Messsystem soll für verschiedene Sensortypen anwendbar sein und es sollen offene und universelle Datenschnittstellen verwendet werden, um eine langfristige Nutzbarkeit zu gewährleisten. Diese Anforderungen wurden durch einen universellen Messverstärker („QuantumX MX840B“ von HBM) und die Software „Labview“ von NI erfüllt. Darauf aufbauend wurde die Datenerfassung inklusive einer inline Visualisierung der Daten mit Labview umgesetzt. Dies ermöglichte die generelle Einstellung zum Beispiel von Abstraten oder Messzeiten und Plausibilitätskontrollen während der Messung.

In dieser Arbeit wurden der Hub, die Umformkraft, die Halbzeugtemperatur und die Werkzeugtemperatur als globale, experimentell messbare Prozessgrößen ausgewählt. Diese sind eine erste Referenz von Prozessgrößen, deren Einfluss auf die resultierende Bauteilqualität sowie den Werkzeugverschleiß in zukünftigen Arbeiten untersucht werden soll. Der Hub wurde in dieser Arbeit über einen Seilzugsensor aufgenommen (**Tabelle**).

Messungen des Hubs in der Ruheposition zeigten Schwankungen im Bereich von 0,05 mm. Da eine taktile Messung im Prozess aufgrund der Handhabung nicht möglich ist, werden zur Messung der Einlegetemperatur spezielle Pyrometer eingesetzt, die durch eine zusätzliche Kühlung in einer thermisch anspruchsvollen Umgebung verwendet werden können.

2.3 FE-Modell des untersuchten Demonstratorprozesses

Parallel zum Aufbau des Messsystems wurde der Demonstratorprozess mit der FE-Anwendung „Forge NxT 3.0 numerisch abgebildet. Das FE-Modell diente im weiteren Verlauf der Studie dazu, den Einfluss von Prozessschwankungen auf die Vorhersagegenauigkeit von numerischen Simulationen zu quantifizieren. Wie **Bild 3** zeigt, wurde die Rotationssymmetrie des Aufbaus genutzt, um das FE-Modell auf ein $\frac{1}{4}$ -3D-Segment zu reduzieren und so eine effiziente Berechnung zu ermöglichen. Die Werkzeuge sind als elastisch beziehungsweise plastisch verformbare Komponenten mit Wärmeleitung definiert. Die Pressenkinematik wurde entsprechend des Zeit-Weg-Verlaufs der realen Presse vorgegeben.

Die Halbzeugtemperatur wurde entsprechend des realen Prozesses auf den angestrebten Wert von 500 °C festgelegt. In der Serienfertigung wurden die Werkzeuge sowohl durch die Wärme des Bauteils als auch die Prozesskräfte zunächst erwärmt, bis sie einen stationären thermischen Zustand erreichten. Für den stationären Prozesszustand wurde eine Werkzeuggrundtemperatur von 300 °C ermittelt, welche als Randbedingung für die Simulation angenommen wurde. Für die Reibungsmodellierung wurde ein kombiniertes Reibfaktormodell ($\mu = 0,15$ und $m = 0,3$) verwendet. Für die Materialdaten wurden Vorarbeiten von *Behrens et al.* [12] zur Modellierung des temperatur- und dehnratenabhängigen Fließverhaltens von EN AW-6082 verwendet. Für die Werkzeuge und das Werkstück wurden Netzgrößen von 2,56 mm beziehungsweise 0,5 mm gewählt. Für das Werkstück wurde als Neuvernetzungskriterium eine Deformation von 3 als Grenzwert gewählt.

3 Ergebnisse

3.1 Prozessdatenakquise im Serienbetrieb und Datensegmentierung

In dieser Studie wurde mit dem vorgestellten Messsystem eine Schmiedeserie über 1000 Zyklen aufgezeichnet. **Bild 4** zeigt

Tabelle. Im Rahmen der Studie eingesetzte Sensoren.

Messgröße	Typ	Sensor
Hub	Seilzugsensor	SX50 von Waycon
Umformkraft	Dehnungsmessstreifen	Sondergefertigte DMS Wägezelle
Halbzeugtemperatur	Pyrometer	CTLM-3HSF100-C3 von Micro Epsilon
Werkzeugtemperatur	Thermoelement	Generischer Typ K

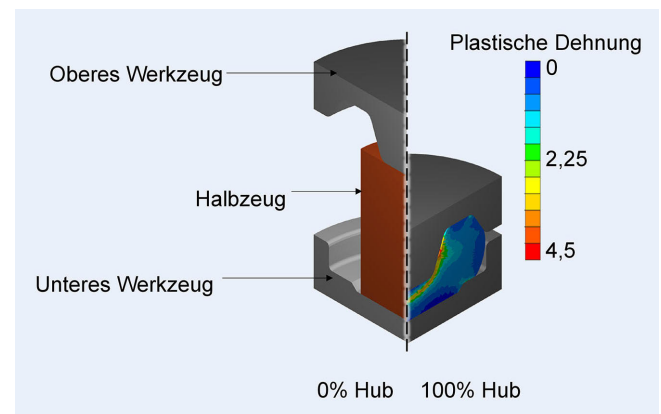


Bild 3. FE (Finite Elemente)-Modell des Demonstratorprozesses.

Grafik: IFUM Hannover

einen beispielhaften Ausschnitt der gemessenen Signale des Stößelhubes und der darunterliegenden zeitsynchronen Umformkraft.

Das Messsystem war in der Lage, hochauflösend mit einer Rate von 10 kHz aufzuzeichnen. Dies erlaubte nicht nur die Prozessreihe als Ganzes zu betrachten, sondern auch Segmente jedes einzelnen Hubs hochauflösend zu analysieren. Aufgrund der aus der Auflösung resultierenden hohen Datenmenge war für die weitere Auswertung eine Reduktion der Daten zwingend erforderlich. Für die Verarbeitung der Daten wurde ein Matlab-Skript erstellt. Die Identifizierung relevanter Zeitabschnitte und die Segmentierung der Datensätze erfolgt über den Hub. Dafür wurde ein Schwellwert definiert, welcher knapp über 0 mm liegt. Zeitabschnitte, in denen der Schwellwert unterschritten wurde, wurden als Warteposition des Pressenstößels definiert. In diesen wurde die Auflösung der Daten deutlich reduziert, da keine relevanten Informationen zu erwarten waren. Darauf aufbauend wurden die Daten in die einzelnen Hübe segmentiert. Hierfür wurde, wenn das aktuelle Hubsignal den definierten Schwellwert aussteigend von der Warteposition überschreitet, der Beginn des folgenden Abschnitts definiert. Der Abschnitt wurde als beendet angenommen, wenn das Hubsignal wieder den Schwellwert erreichte. Mit dieser Methode wurden alle Zeitreihen segmentiert und jedes Segment wurde als ein einzelner Schmiedehub definiert.

3.2 Feature Engineering und dessen Relevanz für die numerische Prozessmodellierung

Nach der skriptbasierten Frequenzreduktion der Datensignale und der anschließenden Segmentierung wurde ein Feature Engineering durchgeführt, um die Variationen der einzelnen Eingangsdaten im Verlauf der Schmiedeserie aufzuzeigen. Zur

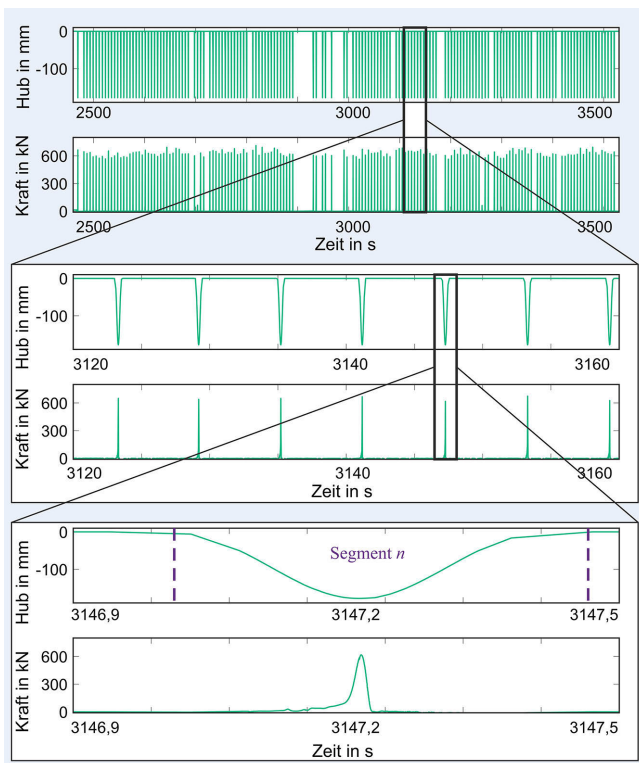


Bild 4. Hochauflösende Datenerfassung und Messsignalsegmentierung auf Basis des Hubs. Grafik: IFUM Hannover

Untersuchung des Pressenhubs wurde zunächst in jedem Hubsegment mithilfe von Matlab der untere Totpunkt (UT) bestimmt. Dieser ist charakterisiert durch den Minimalwert im jeweiligen Hubsignal (Bild 4). Anschließend wurde die Abweichung des UTs jedes Hubs von der Referenz, welche durch den ersten Hub definiert ist, berechnet (Bild 5 (a)). Die Einlegetemperatur wurde aus dem kontinuierlichen Messsignal des Pyrometers zu dem Zeitpunkt ermittelt, in dem der Pressenstößel die Warteposition verlässt. Dieser Zeitpunkt ist erreicht, wenn das Messsignal des Hubs beginnt, vom Wartezustand (Hub = 0 mm) abzuweichen (Bild 5 (b)).

Nach Übertragung der Werte der extrahierten Merkmale in ein Histogramm (Bild 5 (c) und (d)) wird deutlich, dass beide Signale nahezu normalverteilt sind. Insbesondere die Verteilung der Starttemperatur verdeutlicht den Nutzen einer Prozessdaten-

messung für Beurteilung der Prozessstabilität sowie Definition von Randbedingungen von FE-Simulationen.

Die Halbzeugtemperatur lag im Mittel um circa 60°C niedriger als ursprünglich für die numerische Prozessberechnung entsprechend der initialen Prozessdefinition angenommen. Dies ist zum einen darauf zurückzuführen, dass die Regelung der Halbzeugtemperatur direkt an der induktiven Erwärmung erfolgte. Die Messung der Halbzeugtemperatur im Rahmen der Prozessdatenakquise erfolgte jedoch nach dem Transfer ins Werkzeug, um möglichst prozessrelevante Temperaturen zu ermitteln. Des Weiteren war über den Verlauf der Schmiedeserie eine starke Streuung von mehr als 150°C zu beobachten. Dabei ist zu berücksichtigen, dass der Emissionsgrad von Aluminium sehr gering ist und somit selbst kleine Schwankungen in der Messung einen großen Einfluss auf das Messergebnis haben [13]. Zur Analyse des Einflusses schwankender Prozessbedingungen wurde der Kraft-Weg-Verlauf unter Variation der Halbzeugtemperatur und des Hubs mit dem vorgestellten FE-Modell ermittelt. Aus den Histogrammen in Bild 5 (c) und (d) wurden die Grenzen eines Vertrauensintervalls von circa 90 % für die obere und untere Prozessgrenze sowie ein durchschnittlicher Prozesszustand ermittelt.

Die Randbedingungen der Simulationen sind in Bild 5 (a) dargestellt, während Bild 5 (b) den Vergleich der Kraft-Weg-Verläufe zeigt. Da die Änderungen in der Umformkraft vor allem zu Prozessende mit Ausbildung des Grats zu beobachten sind, wird lediglich ein ausgewählter Bereich kurz vor Erreichen des UTs dargestellt. Die Ergebnisse zeigen, dass eine Veränderung der Halbzeugtemperatur und des Hubs zu einer signifikanten Erhöhung der Umformkraft von bis zu 80 % im Vergleich zur Simulation mit den initialen Prozessrandbedingungen führen. Zudem zeigt Bild 6, dass verglichen mit dem Prozesszustand basierend auf den Durchschnittswerten von Halbzeugtemperatur und Hub die untere und obere Prozessgrenze zu Veränderungen der maximalen Umformkraft von circa $\pm 60\%$ führen.

Die Ergebnisse verdeutlichen somit, dass eine gemeinsame statistische Merkmalsauswertung in der Lage ist, die domänenwissenschaftliche Definition der Randbedingungen im Rahmen einer FE-Simulation zu verbessern.

3.3 Identifikation von Korrelationen aus Prozessdaten

Aufbauend auf den Ergebnissen wurde eine Analyse von Merkmalsinteraktionen durchgeführt. In Bild 7 ist eine kombinierte Darstellung der maximalen Umformkraft in Abhängigkeit

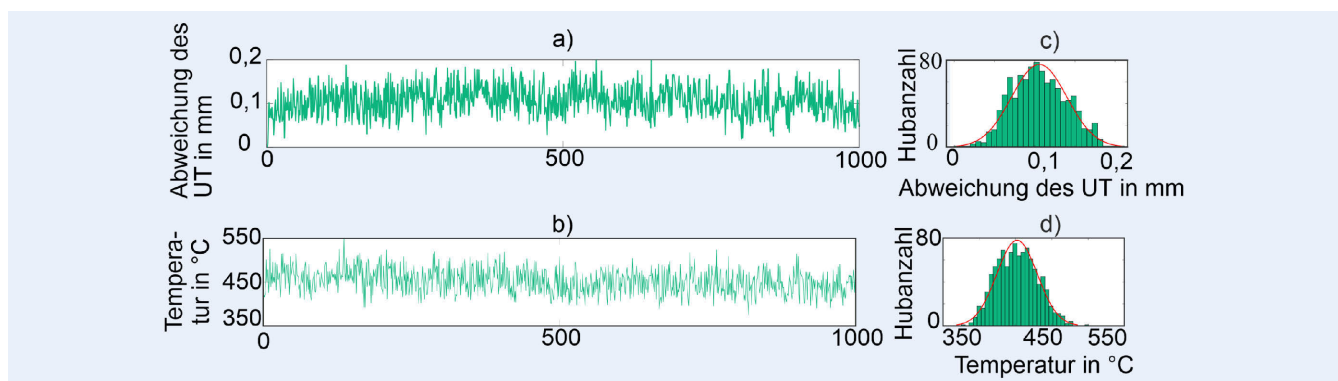


Bild 5. Merkmalsverteilung über die Anzahl der Hübe für die Abweichung im unteren Totpunkt (UT) (a), die Halbzeugtemperatur (b) sowie die Histogramme der Abweichung im UT (c) und der Temperatur (d). Grafik: IFUM Hannover

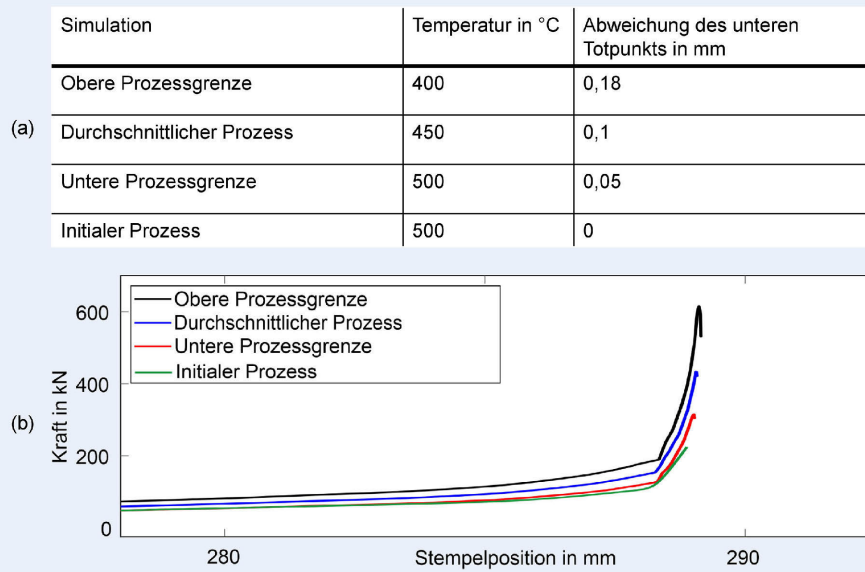


Bild 6. Aus experimentellen Messungen ermittelte Randbedingungen für die numerische Simulationen (a); Auswirkung schwankender Prozesseingangsdaten auf die numerisch vorhergesagte Umformkraft kurz vor dem UT (b). *Grafik: IFUM Hannover*

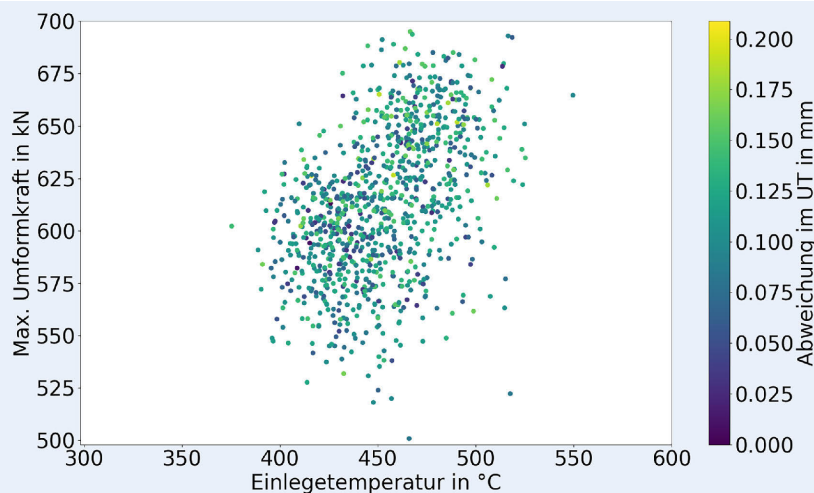


Bild 7. Verteilung der maximalen Umformkraft in Abhängigkeit der Halbzeugtemperatur und der Abweichung im UT im Serienschmiedeprozess. *Grafik: IFUM Hannover*

von der jeweiligen Halbzeugtemperatur und der Abweichung im UT für alle betrachteten Schmiedezyklen visualisiert.

Während nach derzeitigem Kenntnisstand eine Abnahme der Umformkraft mit steigender Werkstücktemperatur zu erwarten ist [14], zeigt Bild 7 ein widersprüchliches Ergebnis. Eine steigende Umformtemperatur scheint in einer Erhöhung der Umformkraft zu resultieren. Abweichungen im UT besitzen zunächst keinen eindeutigen Einfluss. Dabei ist jedoch die starke Streuung der Temperaturmessdaten mit zu beachten. Die Ergebnisse verdeutlichen somit die Relevanz einer kritischen Analyse sowie Interpretation der Messdaten in Bezug auf die Ableitung von Korrelationen sowie die Anwendung für Big-Data-Anwendungen.

4 Fazit

Schmiedeprozesse werden signifikant durch Schwankungen der Randbedingungen beeinflusst, die sich beispielsweise in

erheblichen Variationen der Standzeit der Schmiedegesenke äußern. Auch werden erhöhte Halbzeugmassen eingesetzt, um Ausschuss aufgrund auftretender Prozessschwankungen zu vermeiden. Bisher konnten die Auswirkungen dieser Schwankungen und vor allem die daraus resultierenden Wechselwirkungen nicht zufriedenstellend durch Fachwissen erklärt werden. Daher wurde in dieser Studie ein robustes und flexibles Messsystem entwickelt, mit dem Prozessdaten in Serienschmiedeprozessen erfasst werden können.

Mittels eines geeigneten Feature Engineering konnten deutliche Schwankungen in den Prozessgrößen Halbzeugtemperatur und Hub identifiziert werden. Die numerische Simulation zeigte, dass eine Berücksichtigung dieser Schwankungen bereits zu einer signifikanten Veränderung der vorausgesagten maximalen Umformkraft von bis zu $\pm 60\%$ bezogen auf den durchschnittlichen Prozesszustand führt. Durch den Vergleich der gemessenen Prozessgrößen miteinander konnten keine eindeutigen Korrelationen

festgestellt werden. Dies ist unter anderem auf die Qualität der Messdaten und die Wahl der Messtechnik zurückzuführen.

Die vorliegende Studie betont die essenzielle Bedeutung einer kritischen Analyse und Deutung von Messdaten. Diese Aspekte sollen gezielt für künftige Forschungsarbeiten optimiert und erweitert werden. Des Weiteren sollen weitere Prozessgrößen gemessen und in die Analyse mitaufgenommen werden. Aufgrund der resultierenden hohen Dimensionalität der Daten beziehungsweise der zugrunde liegenden Wechselwirkungen sollen diese in zukünftigen Arbeiten anhand von maschinell trainierten Datenmodellen identifiziert und erklärt werden. Des Weiteren soll betrachtet werden, inwiefern auch die numerische Simulation entsprechende Wechselwirkungen durch geeignete Modelle abbilden kann. Das durch die Datenmodelle neu erschlossene Domänenwissen soll genutzt werden, um Schmiedeprozesse robuster gegenüber Schwankungen von Prozessparametern zu gestalten. Dies ermöglicht letztendlich eine Reduzierung der eingesetzten Halbzeugmasse und somit eine deutliche Steigerung der ökonomischen und ökologischen Effizienz.

FÖRDERHINWEIS

Die Autoren bedanken sich für die Unterstützung der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts 520195047 für diese Forschungsarbeit.

Literatur

- [1] Müller, F.; Malik, I.; Wester, H. et al.: Experimental Characterisation of Tool Hardness Evolution Under Consideration of Process Relevant Cyclic Thermal and Mechanical Loading During Industrial Forging. In: Behrens, B. A.; Brosius, A.; Hintze, W. et al. (eds.): Production at the Leading Edge of Technology. WGP 2020. Lecture Notes in Production Engineering Heidelberg: Springer-Verlag, S. 3–12
- [2] Rahn, R.; Schruff, I.: The Selection of Tool Steels for Hot-Stamping Tools with Respect to Increased Loads. 5th International Conference CHS: Hot Sheet Metal Forming of High-Performance Steel. Toronto, Canada 2015, pp. 659–668
- [3] Jarfors, A. E. W.; Castagne, S. J.; Danno, A. et al.: Tool wear and life span variations in cold forming operations and their implications in microforming. *Technologies* 5 (2017) 3, pp. 227–7080
- [4] Raedt, H.-W.: Forging and the Climate Path – Routes to CO2-free Components. *ATZ worldwide* 124 (2022) 2–3, pp. 26–31
- [5] DIN EN ISO 14067:2019–02: Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung (ISO_14067:2018); Deutsche und Englische Fassung EN_ISO_14067:2018. Berlin: Beuth Verlag
- [6] Liewald, M.; Bergs, T.; Groche, P. et al.: Perspectives on data-driven models and its potentials in metal forming and blanking technologies. *Production Engineering* 16 (2022), pp. 607–625
- [7] Yin, S.; Kaynak, O.: Big Data for Modern Industry: Challenges and Trends [Point of View]. *Proceedings of the IEEE* 103 (2015) 2, pp. 143–146
- [8] Xu, K.; Li, Y.; Liu, C. et al.: Advanced Data Collection and Analysis in Data-Driven Manufacturing Process. *Chinese Journal of Mechanical Engineering* 33 (2020) 43
- [9] Volk, W.; Groche, P.; Brosius, A. et al.: Models and modelling for process limits in metal forming. *CIRP Annals – Manufacturing Technology* 68 (2019) 2, pp. 775–798
- [10] Kilkenny, M. F.; Robinson, K. M.: Data quality: “Garbage in – garbage out”. *Health Information Management Journal* 47 (2018) 3, pp. 103–105
- [11] Keogh, E.; Chu, S.; Hart, D. et al.: Segmenting Time Series: A Survey and Novel Approach. *Data Mining in Time Series Databases* 57 (2004), pp. 1–21
- [12] Behrens, B.-A.; Maier, H. J.; Klose, C. et al.: Characterization and Modeling of Intermetallic Phase Formation during the Joining of Aluminum and Steel in Analogy to Co-Extrusion. *Metals* 10 (2020) 12, pp. 1582
- [13] Bartl, J.; Baranek, M.: Emissivity of aluminium and its importance for radiometric measurement. *Measurement science review* 4 (2004) 3, pp. 31–36
- [14] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik*. Heidelberg: Springer-Verlag 2016



Eduard Ortlieb, M. Sc.

Foto: IFUM Hannover

Felix Müller, M. Sc.

Simon Peddinghaus, M. Sc.

Julius Peddinghaus, M. Sc.

Hendrik Wester, M. Sc.

Marcel Rothgänger, M. Sc.

Dr.-Ing. **Kai Brunotte**

Leibniz Universität Hannover
Institut für Umformtechnik
und Umformmaschinen (IFUM)
An der Universität 2, 30823 Garbsen
ortlieb@ifum.uni-hannover.de
www.ifum.uni-hannover.de

Prof. Dr.-Ing. **Marco Huber**

Universität Stuttgart, Institut für industrielle Fertigung
und Fabrikbetrieb IFF
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.iff.uni-stuttgart.de

Helena Monke, M. Sc.

Julian Raible, M. Sc.

Prof. Dr.-Ing. **Marco Huber**

Fraunhofer-Institut für Produktionstechnik
und Automatisierung IPA
Nobelstr. 12, 70569 Stuttgart
www.ipa.fraunhofer.de

LIZENZ



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