

Analyse von Stößelverkipfung und Gestelldehnung mithilfe von Radarsensoren beim Warm Schmieden

Erfassung von Pressenverformungen mit Radarsensoren

A. Alimov, S. Härtel, M. Gardill, M. Knaack, J. Buhl

Aktuelle Trends in der Umformtechnik zeigen einen zunehmenden Automatisierungsgrad und eine steigende Anforderung an die Genauigkeit der Schmiedestücke. Während des Umformprozesses treten hohe Kräfte auf, die zu einer deutlichen Verformung der Umformmaschine führen. Dies wird in der Regel bei der Prozessauslegung nicht berücksichtigt. Dieser Beitrag widmet sich der Untersuchung des Einflusses der elastischen Verformung der energiegebundenen Umformmaschine auf Prozessparameter und Defektbildung beim Warm Schmieden.

STICHWÖRTER

Umformtechnik, Messtechnik, Betriebsdatenerfassung (BDE)

Acquisition of ram tilting and frame stretching with radar sensors during hot forging

Recent trends in metalforming show an increasing degree of automation and demand for accurate forgings. High forces occurring during the forming process lead to a significant deflection of the forming machine, which is usually not considered in process development. The paper examines how elastic deformation of the energy-bound forming machine affects process parameters and defect formation during hot forging.

1 Einleitung

1.1 Elastische Pressenverformung beim Schmieden mit energiegebundenen Umformmaschinen

Art und Spiel des Pressenstößels und des Hauptantriebes haben einen wesentlichen Einfluss auf die Qualität der Schmiedestücke [1]. Bei energiegebundenen Umformmaschinen, wie etwa Schraubspindelpressen, wird ein Teil der Schlagenergie für die elastische Verformung des Pressengestells aufgewandt [2].

Unter Belastung der Presse kann die relative Verschiebung der Wirkflächen des Werkzeugs beträchtlich sein [3]. Somit weisen Werkzeugelemente eine Fehlansrichtung auf, was sich in Nichtparallelität, Kippen und Rotation auswirkt. Zudem entstehen durch das tägliche Anfahren des Fertigungsprozesses ungleichmäßige Temperaturfelder, die weitere zeitlich veränderliche Geometrieabweichungen von Presse und Werkzeugen erzeugen. Darüber hinaus überlagern die aus dynamischen Belastungen resultierenden Schwingungen die Relativverschiebungen und Verformungen der Werkzeugarbeitsflächen, was sich sowohl in der Qualität und Maßhaltigkeit der Schmiedestücke [4] als auch in der Standzeit der Werkzeuge [5] widerspiegelt.

Die Modellierung der Presse mithilfe Feder-Masse-Dämpfer-Modellen oder der FEM (Finite-Elemente-Methode) ist eine Möglichkeit, die in der Maschinenstruktur dissipierte Energie zu quantifizieren und Umformprozesssimulationen zu verbessern [6]. Um die effektive Schlagenergie zu bestimmen, können auch spezielle physikalische Versuche mit der Presse durchgeführt werden [7]. So kann verhindert werden, dass unzureichend Ener-

gie für die plastische Umformung des Werkstücks zur Verfügung steht und Defekte auftreten.

Um die elastische Verformung der Presse bei der Modellierung des Umformprozesses zu berücksichtigen, muss ihre Steifigkeit bestimmt werden. Wesentliche Arbeiten daran wurden von Doege [8] und Mitarbeitern [9] an der Technischen Universität Hannover durchgeführt, welche in die Norm DIN 55189 „Werkzeugmaschinen. Ermittlung von Kennwerten für Pressen der Blechverarbeitung bei statischer Belastung“ mündeten. Die Norm basiert auf Versuchen, bei denen eine Presse vertikal belastet wird, sodass die Rotationssteifigkeit um die horizontalen Achsen und die vertikale Steifigkeit bestimmt werden können. Die Methode zur Bestimmung der Reaktion der Presse auf horizontale Lasten wurde von Arentoft und Wanheim entwickelt [10].

Zur Untersuchung des dynamischen Verhaltens von Umformmaschinen wurden von Behrens *et al.* eine Methode vorgeschlagen [11]. Chodnikiewicz *et al.* [12] führten eine Flexibilitätsmatrix ein, welche die Aktions- und Reaktionsvektoren genauer beschreibt. Für die Bestimmung der Verformung des Gestells muss die Änderung des Abstands zwischen bestimmten Punkten gemessen werden. Neben der direkten Messung von Punktbewegungen [10] können auch optische 3D-Tracking-Punktsysteme [6] und Laserinterferometer eingesetzt werden. Zur Messung von Geschwindigkeit und Beschleunigung werden sowohl berührende Sensoren, wie Beschleunigungssensoren und Trägheitssensoren, als auch berührungslose Sensoren auf Basis der Laser-Doppler-Anemometrie, Radar-Velocimetrie und Stereovisionstechnik eingesetzt. Berührungslose Sensoren sind besonders relevant beim Einsatz mit energiegebundenen Umformmaschinen, wie Hämmern und

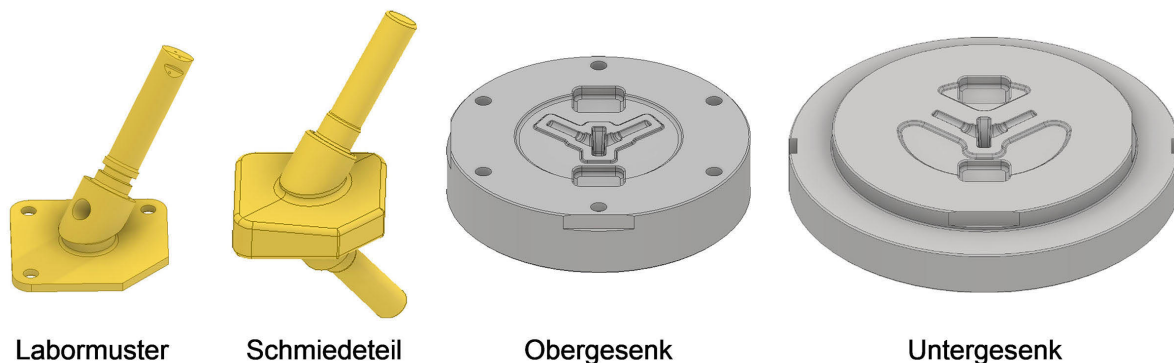


Bild 1. Labormuster „Ölversorgung“ für die Umformung und Schmiedewerkzeuge. Grafik: FHF BTU

Spindelpressen, aufgrund von Vibrationen, hohen Temperaturen im Umformbereich und dynamischen Effekten [13].

1.2 Radarmesstechnik zur Datenauswertung

Die Radarmesstechnik ist ein Verfahren zur berührungslosen, hochpräzisen Erfassung von Abstand und Geschwindigkeit sowie Azimut und Elevationswinkel von Objekten durch elektromagnetische Wellen. Getrieben durch den großen Markt und die Anforderungen aus dem Bereich der Kfz-Technologie, der damit einhergehenden rapiden Weiterentwicklung von Radarsensorik [14] und dafür notwendiger Halbleitertechnologien für Mikro- und Millimeterwellenanwendungen, verbesserter Integrationsdichte und damit Kostenreduktion sowie durch die Integration digitaler Funktionen stehen mittlerweile hochintegrierte Radar Systems on Chip (SoCs) für vielfältige Anwendungen kommerziell zur Verfügung. Dadurch erfährt die Radarsensorik vermehrt Anwendung und Forschungsinteresse in den Bereichen Medizintechnik, Robotik und industrielle Messtechnik.

Gegenüber traditionell berührenden messtechnischen Verfahren ist die Radarmesstechnik verschleißfrei, weist typischerweise einen höheren Messbereich auf und kann auch in thermisch, mechanisch oder chemisch extrem herausfordernden Umgebungen langlebig eingesetzt werden. Da Radarwellen exzellente Durchdringungseigenschaften haben, können Sensoren, zum Beispiel im Kfz-Bereich, vollständig in ein Spritzgussgehäuse integriert und so hermetisch vor der Umgebung geschützt werden. Im Vergleich zu optischen Verfahren weist Radarsensorik vor allem in harscher und/oder staubiger Umgebung erhöhte Robustheit auf [15], auch gegenüber sich ändernden Beleuchtungsbedingungen. Durch die geringeren Kosten, eine flexiblere Bauform sowie Geometrie der Messanordnung mittels Radarsensoren kann eine einfachere Integration im Vergleich zu kamerabasierten Verfahren wie in Beispiel [6] erzielt werden. Radarsensorik erfährt damit nicht nur eine Nutzung im Rahmen von Studien, sondern erlaubt eine vollständige Integration in die Prozessmesstechnik in Produktionsumgebungen.

Sensorik, die auf hohe Präzision in Bezug auf die Entfernungserfassung und Geschwindigkeitserfassung optimiert ist, kann Abstände und Abstandsänderungen in einer Größenordnung von wenigen μm messen. Sie wird zum Beispiel für berührungslose Herztonerfassung, Schichtdickenmessung oder Schwingungsanalyse verwendet. So wurde in [16] die Messung einer Schwingungsamplitude von nur 95 nm mit einem kommerziell verfügbaren Radar System on Chip der Firma Silicon Radar erzielt und in [15]

Schwingungsamplituden mit einer minimalen Amplitude von 30 nm und einer Schwingungsfrequenz bis zu 16 kHz. Eine Vielzahl integrierter Bausteine für Radarsensoren bis hin zu voll integrierten Radarsensoren steht für die Realisierung von kompakten, effizienten und hoch performanten Sensoren nun kommerziell zur Verfügung. In diesen Anwendungen werden meist Radarsensoren, die in den unlicenzierten ISM (Industrial, Scientific, Medical) Frequenzbändern bei 24 GHz, 60 GHz, oder 120 GHz arbeiten, eingesetzt.

Im speziellen Bereich der Modalanalyse sowie Maschinen- und Prozessüberwachung findet Radarsensorik Anwendung etwa im Bereich von Windkraftanlagen, Gebäuden und Strukturen sowie in der allgemeinen Überwachung von industrietechnischen Anlagen [17]. Der erfolgreiche Einsatz in der Mikrobearbeitung und Feinwerktechnik [18] wurde bereits nachgewiesen. Durch die Kombination mehrerer Radarsensoren mit 1D-Messfähigkeit (Entfernung und Entferungsänderung) wurde die direkte 3D-Bestimmung der Werkzeugposition von Industrierobotern im sub-mm-Bereich gezeigt [19]. Die ausgewählten Beispiele zeigen, dass Radarsensorik nach dem Stand der Technik unmittelbar für die hochpräzise Prozessüberwachung von Gesenkschmiedeprozessen geeignet ist.

2 Verwendete Mittel und Methoden

2.1 Experimentelle Untersuchungen

In dieser Studie wird ein Warm Schmiedeprozess eines „Oil Feed“-Labormusters aus EN AW-6060 (AlMgSi, 3.3206) Aluminiumlegierung untersucht.

Das Schmiedeteil wurde auf Basis der Geometrie des Labormusters „Ölversorgung“ gestaltet. Die Bohrungen im Flansch und in der Stange des Labormusters sowie die O-Ring-Nut wurden entfernt, um die Herstellbarkeit des Schmiedeteils zu gewährleisten. Da der Flansch des Labormusters sehr dünn ist, wurde ein verdoppeltes Schmiedestück ausgelegt. Auf dem Schmiedeteil wurden auch Seitenschrägen und Rundungen vorgesehen. **Bild 1** zeigt die Geometrien von Labormuster „Ölversorgung“, Schmiedeteil und Schmiedegesenke.

Die Schmiedeversuche wurden mit einer „SMS SPPE 6,3“ Schraubspindelpresse mit einer Nennkraft von 6,3 MN durchgeführt. Die maximale Geschwindigkeit des Stößels betrug 700 mm/s. Die maximale Schlagenergie betrug 14 kJ und konnte durch entsprechende Anpassung der Stoßgeschwindigkeit gesteuert werden. Ober- und Unterwerkzeug wurden mit einem Werkzeughalter in die Presse eingebaut und ausgerichtet. Der Werk-

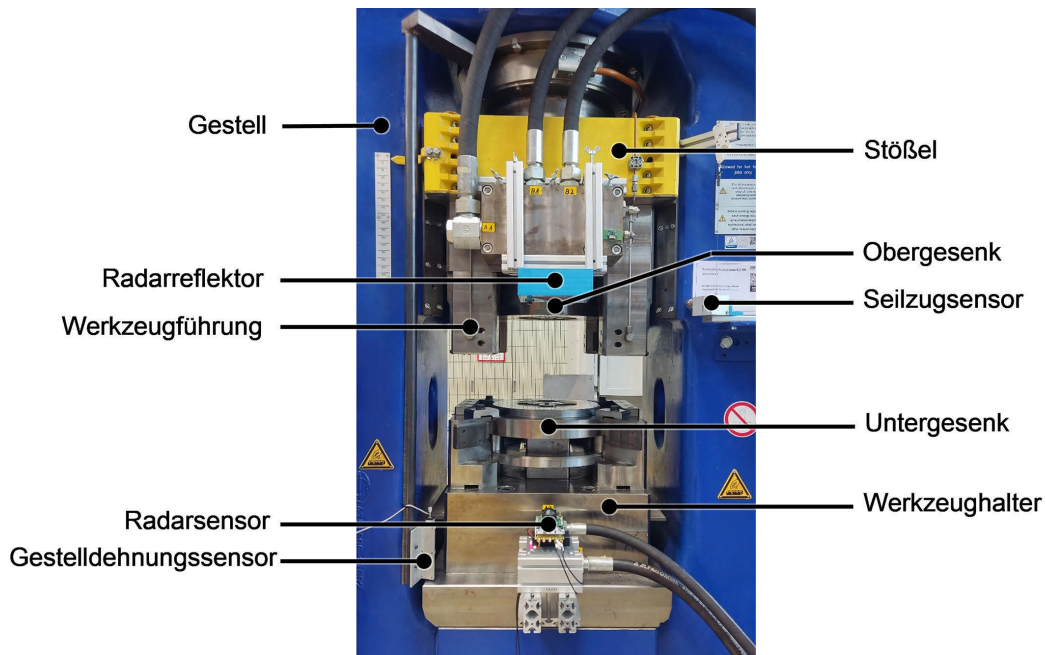


Bild 2. Eingesetzte Umformpresse mit Werkzeugen und Sensorik. Foto: FHF BTU

zeughalter wurde mit vier prismatischen Führungen versehen, um Versatz und Verdrehung beim Schmieden zu verhindern. **Bild 2** zeigt die eingesetzte Umformpresse mit Werkzeugen und Sensorik.

Die Rohlinge mit den Maßen $\text{Ø}64 \times 39$ mm wurden auf einer Drehmaschine gefertigt. Vor dem Schmieden wurden die Rohlinge mit HBN-Schmiermittel besprüht, an der Luft getrocknet, in einen Kammerofen bei 480°C gelegt und 1,5 Stunden lang beheizt. Danach wurden die Rohlinge manuell mit einer Schmiedezange aus dem Ofen genommen und in das Gesenk eingelegt. Die Schmiedeversuche wurden mit unterschiedlichen Versätzen von der Ausgangslage des Werkstücks von -20 bis $+20$ mm entlang der Y-Achse auf der Gesenkgravur durchgeführt. Das Schmieden wurde im halbautomatischen Modus mit drei Schlägen und einer Pause von 1 Sekunde zwischen den Schlägen ausgeführt. Die Presse ist mit folgender Sensorik ausgestattet:

- Zwei Dehnungsaufnehmer „SLB700A/12“ mit Messverstärker „MP55DP“ der Firma HBM (ehemals Hottinger, HBM) zur Spitzenkraftmessung;
- ein Seilzugsensor „WS1.1–250-R1K-L10“ der Firma ASM zur Messung der Stößelposition;
- ein potentiometrischer Kurzwegaufnehmer „TR-0050“ der Firma Novotechnik zur Messung der Gestelldehnung;
- drei Radarsensoren im 122-GHz-Band.

Die Radarsensorik basiert auf vollintegrierten FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave)-Radar-Frontends von Silicon Radar in Silizium-Germanium (SiGe)-Technologie. Für die Messungen wurden zwei Sensoren basierend auf dem Frontend-IC (Integrated Circuit) „TRX_120_067“ mit je einer im Package integrierten Sende- und Empfangsantenne und einem Sensor basierend auf dem Frontend-IC „TRA_120_002“ mit je einer auf dem IC integrierten Sende- und Empfangsantenne genutzt. Die Frontends wurden mit den von Silicon Radar zur Verfügung gestellten Evaluierungsplattformen „SiRadEasy r4“ betrieben. Zur Fokussierung der Richtcharakteristik der Sensoren wurden diese außerdem mit den für die Evaluationsplattformen verfügbaren

dielektrischen Linsen ausgestattet. Die verwendeten Radarsensoren sind in **Bild 3** dargestellt.

Für die Messapplikation wurden die Evaluierungsplattformen modifiziert, sodass die analogen Ausgangskanäle der Radarsensoren DC (direct current)-gekoppelt mit einem schnell abtastenden USB-Oszilloskop (PicoScope 4824A) erfasst werden konnten. Dazu wurden die 7-kHz-Hochpassfilter der ersten Verstärkerstufen in den Empfangskanälen für Inphase (I)- und Quadraturkomponente (Q) entfernt, die Signale direkt auf SMA (Sub Miniature A)-Buchsen herausgeführt und mit dem Oszilloskop verbunden. **Bild 4** zeigt das stark vereinfachte Blockschaltbild eines Radarsensors sowie ein Blockschaltbild des Gesamtaufbaus.

Die Lokaloszillatoren (LO) der Radarsensoren sind an sich als spannungsgesteuerte Oszillatoren (englisch: voltage-controlled oscillator, VCO) ausgeführt. Für den Messaufbau wurden diese aber im Dauerstrich (englisch: continuous wave, CW)-Modus betrieben, indem die Abstimmspannungen der VCOs für jeden Radarsensor auf einen festen Wert eingestellt wurden.

Um gegenseitige Interferenz zu vermeiden, wurde Radar 1 bei einer Frequenz von $f_{(c,1)} = 122$ GHz, Radar 2 bei einer Frequenz von $f_{(c,2)} = 122,5$ GHz und Radar 3 bei einer Frequenz von $f_{(c,3)} = 123$ GHz betrieben.

Gemäß dem Prinzip eines CW-Radars wurde das LO-Signal verstärkt und über die Sendeantenne (Tx) abgestrahlt. Das Sendesignal von Radar n konnte damit durch

$$s_n(t) = \cos(2\pi f_{c,n} t) \quad (1)$$

modelliert werden.

Das Signal breitet sich als elektromagnetische Welle im Raum aus, bis es auf ein Ziel trifft und dort zurückgestreut wird. Unter Annahme eines Ziels bei der Distanz d_z ergibt sich für das an der Empfangsantenne (Rx) empfangene Signal:

$$r_n(t) = \cos\left(2\pi f_{c,n} \left(t + \frac{2d_z}{c_0}\right)\right) \quad (2)$$

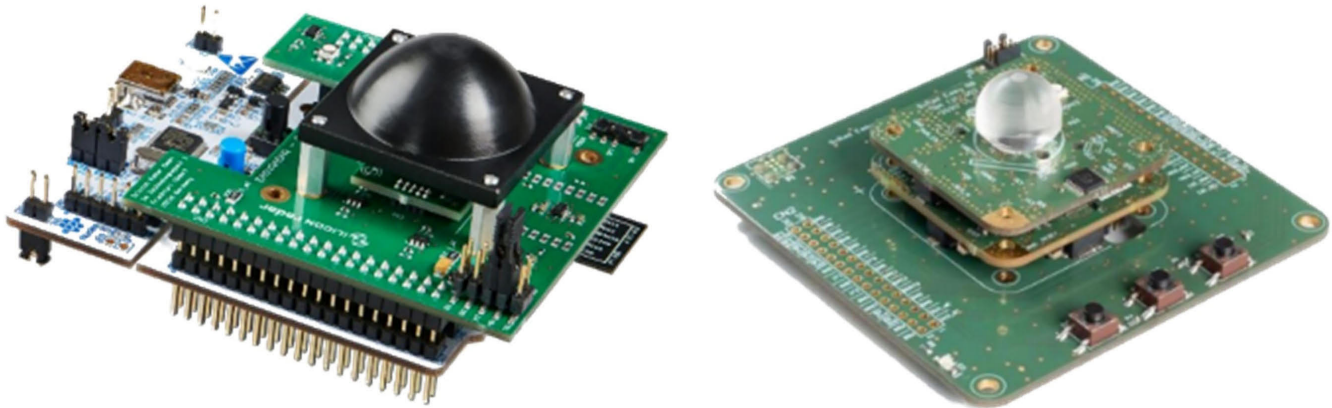


Bild 3. In der Studie verwendete Radarsensoren. Foto: *siliconradar.com*

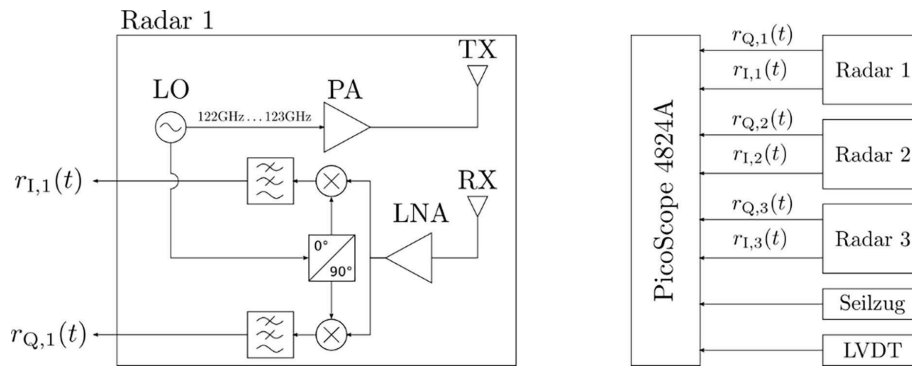


Bild 4. Vereinfachtes Blockdiagramm eines Radar-Frontends (links) und Blockschaltbild des Gesamtaufbaus (rechts). Grafik: *ESS BTU*

Dieses wird wie in Bild 3 dargestellt mit dem LO-Signal quadratur-gemischt (mit dem um 0° und 90° phasenverschobenen LO multipliziert) und anschließend durch ein Tiefpassfilter gefiltert. Die Signale im Inphase- und Quadraturkanal lassen sich dann modellieren als:

$$r_{I,n}(t) = \cos\left(2\pi f_{c,n} \frac{2 d_z}{c_0}\right), \quad r_{Q,n}(t) = \sin\left(2\pi f_{c,n} \frac{2 d_z}{c_0}\right) \quad (3)$$

Werden die beiden Kanäle als komplexes Signal gemäß

$$r_{ECB,n}(t) = r_{I,n}(t) + jr_{Q,n}(t) = \exp\left(2\pi f_{c,n} \frac{2 d_z}{c_0}\right) \quad (4)$$

interpretiert, ist ersichtlich, dass die Distanz d_z aus der Phase von $r_{ECB,n}(t)$ extrahiert werden kann. Dies ist die wesentliche Grundlage von CW-Radarverfahren, mit denen hochpräzise berührungslose Messungen durchgeführt werden können [16].

2.2 FEM-Prozesssimulation

Die Simulation des Warmschmiedeprozesses wurde mit der kommerziellen FEM-Software „QForm“ (www.qform3d.com) im allgemeinen Umformmodul durchgeführt.

Das Werkstück wurde als reinplastischer Körper definiert, die Werkzeuge als starre Körper. Es wurden gleiche Schmiedeparameter wie bei den Schmiedeversuchen für die Simulationen verwendet. Das tetraedrische vier-nodige Volumennetz besteht am Start des Schmiedens aus etwa 90 000 Elementen. Eine automatische Neuvernetzung wurde entsprechend verwendet. Thermische Effekte wurden berücksichtigt. Die Fließkurven sowie thermophysikalischen Parameter des Werkstücks und der Werkzeuge

wurden aus der QForm-Werkstoffdatenbank übernommen. Die Reibung wurde durch das Reibfaktormodell mit $m = 0,4$ abgebildet.

Die Simulationen wurden mit unterschiedlichen Versätzen von der Ausgangslage des Werkstücks von -20 bis $+20$ mm entlang der Y-Achse auf der Gesenkgravur durchgeführt. Die Lage des Rohlings beeinflusst den Metallfluss und die Bildung von Fehlern während des Schmiedens sowie die Höhe des Kippmoments, das auf die Gesenke wirkt. Jedes Werkzeug hat eine virtuelle Achse, was die Berechnung des Kippmoment ermöglicht. Bild 5 zeigt FE-Modelle der Werkzeuge und den Simulationsaufbau.

3 Ergebnisse und Diskussion

Zunächst wird hier der Einfluss der Rohlingsposition auf die Schmiedestückgeometrie betrachtet. Bild 6 zeigt die Ausgangslage des Rohlings mit außermittiger Position von -20 mm bis $+20$ mm sowie die simulierte und experimentelle Geometrie des Schmiedestücks nach dem Schmieden.

Wird das Werkstück ohne Versatz positioniert, ist die Gesenkgravur vollständig ausgefüllt und weist keine Fehler auf. Eine Verschiebung in positiver Richtung der Y-Achse erzeugt keine Defekte, führt aber zu verdicktem Grat und einer Verschiebung des Druckmittelpunkts des Werkstücks gegenüber dem Druckmittelpunkt des Gesenks. Dies führt, wie später gezeigt wird, zu einem Kippmoment auf die Gesenke. Der Versatz der Rohlingslage in der negativen Y-Achsenposition führt dazu, dass die Stangen des Schmiedestücks unterfüllt werden. Dies führt auch zu übermäßigem Grat im gegenüberliegenden Teil des Schmiedestücks.

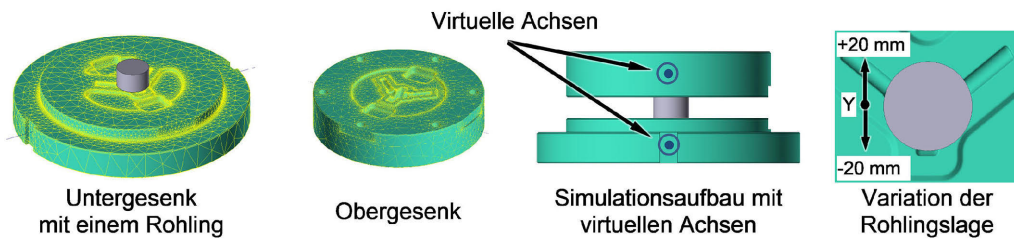


Bild 5. Finite-Elemente-Modelle der Werkzeuge und Simulationsaufbau. Grafik: FHF BTU

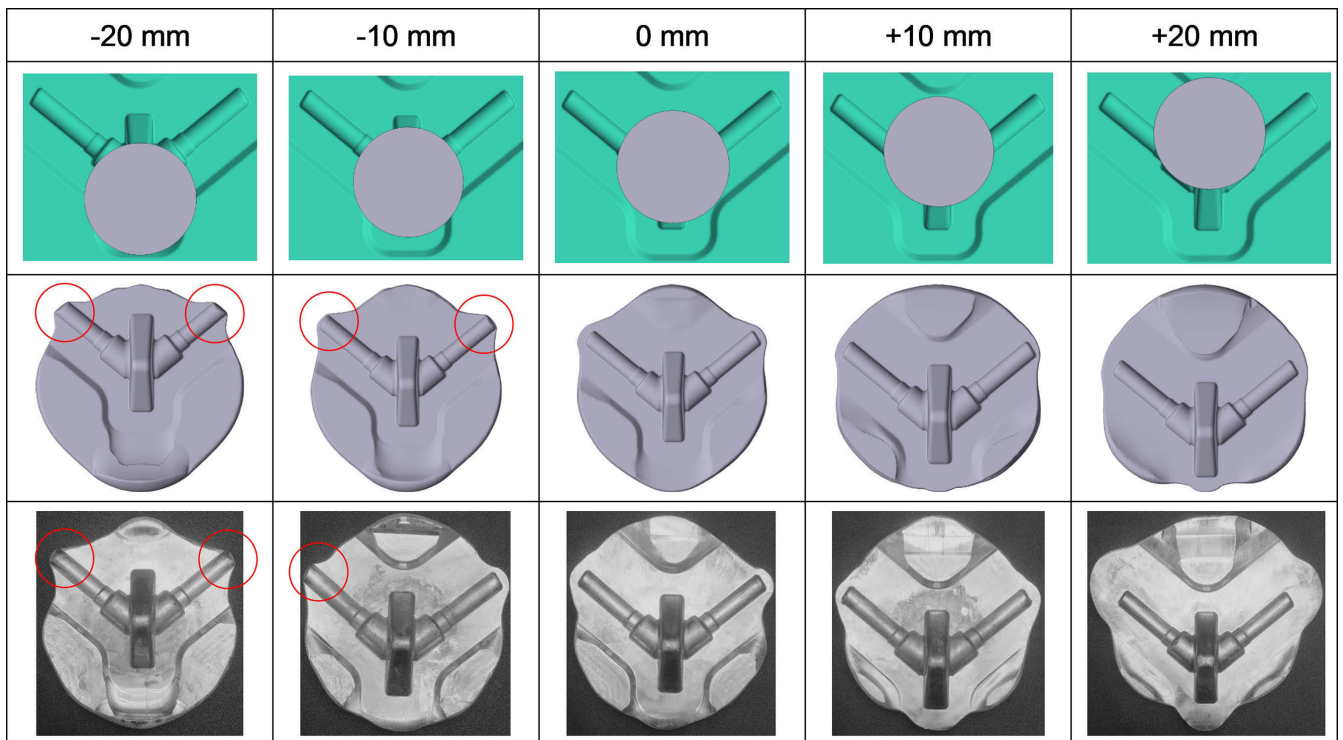


Bild 6. Einfluss der Rohlingslage auf die Schmiedestückgeometrie. Grafik: FHF BTU

Der Kraftpeak wurde für jeden Versuch mit Positionsversatz des Rohlings analysiert und in der **Tabelle** zusammengefasst.

Es zeigt sich, dass die Position des Rohlings keinen signifikanten Einfluss auf die Schmiedekraft hat und die experimentell ermittelte Kraft beim ersten Schlag durchschnittlich 1,1 MN, beim zweiten Schlag 3,9 MN und beim dritten Schlag 6,3 MN beträgt. Die berechnete Kraft betrug im Durchschnitt 1 MN, 3,7 MN beziehungsweise 6,8 MN. Der Fehler in der Kraftberechnung betrug nicht mehr als 15 %.

Jedoch hat das Kippmoment, das auf die Schmiedegesenke wirkt, eine deutliche Korrelation mit der Rohlingsposition. **Bild 7** zeigt den simulierten Verlauf des Kippmoments abhängig von der Ausgangslage des Werkstücks.

Wird das Werkstück ohne Versatz positioniert, steigt das Kippmoment während des Prägevorgangs auf bis zu 5 kNm an. Während der Gratbildung zum Ende des Schmiedevorgangs sinkt es durch die Lage des Druckmittelpunkts des Rohlings auf der Pressenachse praktisch auf Null. Dies trägt zur Bildung eines gleichmäßig dicken Grates bei und verringert Maßabweichungen, die durch die Verdrehung der Gesenkhälften zueinander verursacht werden. Bei einem Versatz des Rohlings um ± 10 mm ergibt sich ein Kippmoment von etwa 50 kNm und bei ± 20 mm bis zu

Tabelle. Kraft beim Schmieden mit drei Schlägen.

Position des Rohlings, mm	Kraft, MN					
	1. Schlag		2. Schlag		3. Schlag	
	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.	Exp.	Sim.
0	1,06	1,02	3,82	4,17	6,28	6,70
+10	1,18	1,03	3,98	3,73	6,18	6,75
+20	1,14	1,10	4,16	3,18	6,42	6,52
-10	1,20	1,03	3,94	3,53	6,30	6,78
-20	0,98	0,99	4,52	3,85	7,36	7,00

100 kNm. Obwohl sowohl der Pressenstößel als auch der Werkzeughalter mit Führungen ausgestattet sind, können erhebliche Kippmomente zu einer Relativedrehung der Werkzeughälften und zur Bildung von Schmiedefehlern führen. Außerdem führt das Kippmoment zu einem erhöhten Verschleiß der Presseführungen sowie der Spindel und der Mutter.

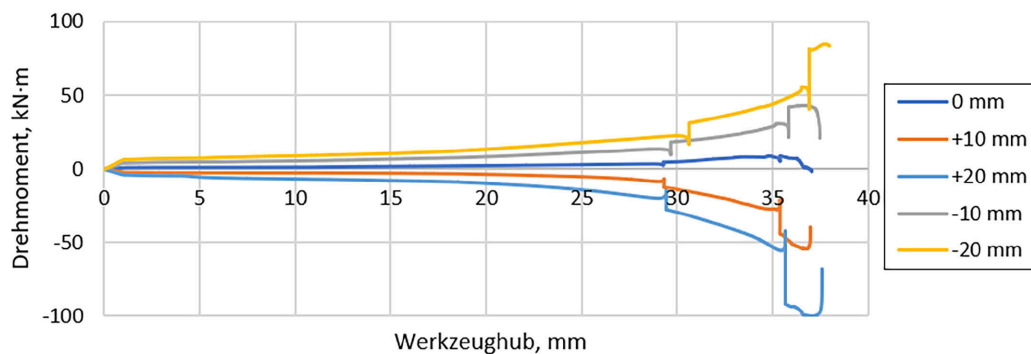


Bild 7. Kippmoment des Untergesenks beim Schmieden mit drei Schlägen. Grafik: FHF BTU

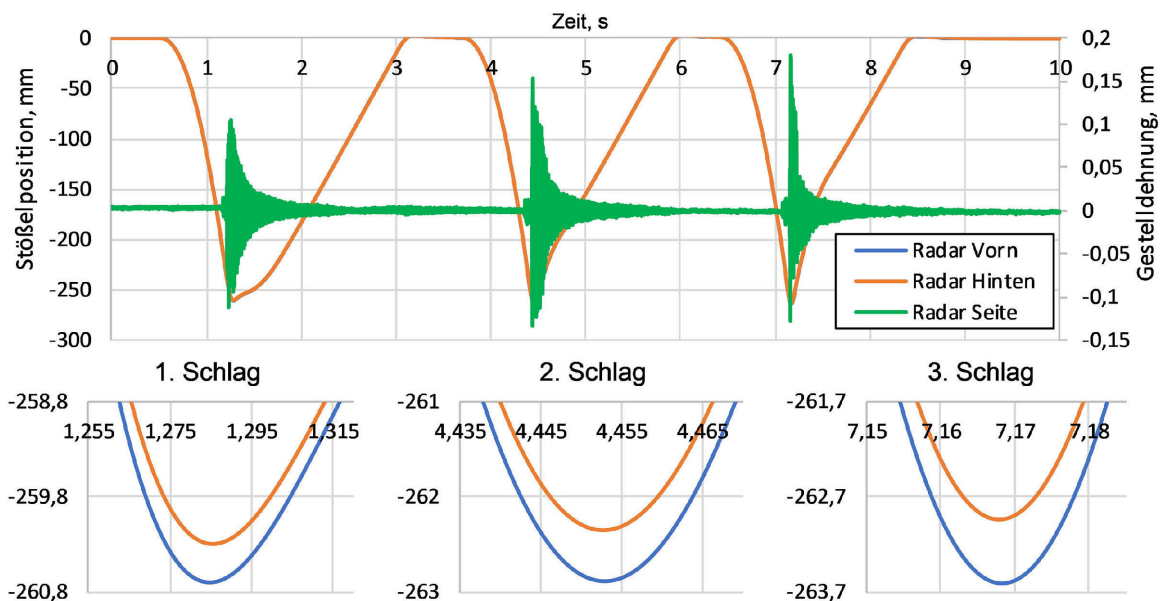


Bild 8. Stößelverkipfung und Gestelldehnung aus Radarmessungen. Grafik: FHF BTU

Die Stößelverkipfung und Gestelldehnung wurden bei der außermittigsten Ausgangsposition des Rohlings mit einem Versatz von +20 mm analysiert. **Bild 8** zeigt die Daten von Radarmessungen. Beim ersten Schlag treten Schwingungen des Gestells mit einer Amplitude von 0,1 mm auf, beim zweiten Schlag 0,15 mm und beim dritten Schlag 0,18 mm. Unter Kenntnis der Schlagkraft und unter der Annahme, dass das Gestell über den untersuchten Lastbereich eine linear elastische Feder ist, kann die Steifigkeit des Gestells mit 0,0161 mm/kN mit einer Anfangsdehnung von 0,1 mm für eine Kraft von 1 kN bestimmt werden.

Bild 8 zeigt auch, dass die Radarsensoren im unteren Totpunkt unterschiedliche Positionen der Stößelpunkte an der Vorder- und Hinterseite der Presse aufzeichnen. Die Differenz der Sensormesswerte betrug 0,378 mm für den ersten Schlag, 0,535 mm für den zweiten Schlag und 0,671 mm für den dritten Schlag. Die gemessenen Daten stimmen gut mit den Simulationsergebnissen überein, da die Stößelverkipfung mit zunehmendem Kippmoment ansteigt. **Bild 9** zeigt die entgrateten und zerteilten Schmiedestücke und das fertige Bauteil nach der Zerspanung.

4 Zusammenfassung und Ausblick

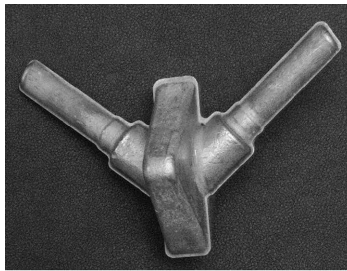
In der vorliegenden Studie wurde der Einfluss der Ausgangslage des Rohlings auf der Gravur auf die Umformprozessparame-

ter und die Fehlerbildung untersucht. Simulationen haben gezeigt, dass die außermittige Position des Werkstücks zu einem erheblichen Kippmoment führt, das auf das Gesenk wirkt. Dies kann zu geringerer Schmiedegenauigkeit, ungleichmäßiger Gratbildung und erhöhtem Verschleiß von Pressen- und Gesenkkomponenten führen. Die experimentellen Ergebnisse stimmen gut mit den Modellierungsdaten überein. Es wurde ebenfalls die Fähigkeit zur Erfassung der Stößelverkipfung und der Gestelldehnung mithilfe von Radarsensoren demonstriert.

Die Pressenkinematik wurde mit Radarsensoren untersucht, die sogar bei Hochgeschwindigkeitsprozessen wie dem Schmieden von Spindelpressen eine hohe Messqualität liefern. Ein wichtiger Faktor, der die Genauigkeit der Messungen beeinflusst, ist die Art der Befestigung der Radarsensoren und -reflektoren. Auch die Methode der Verarbeitung des Rohsignals hat großen Einfluss.

Weiterführende Untersuchungen der Umformprozesse mithilfe von Radarsensoren werden im Rahmen des DFG-Projekts „DatProForge – Datengetriebene Prozessmodellierung von Gesenkschmiedeprozessen zur Erhöhung der Produktivität mittels adaptiver Werkzeugkonstruktionsmethodik“ durchgeführt.

Das Ziel des Forschungsprojektes ist die Erarbeitung eines Grundlagenverständnisses zur Wechselwirkung von Messdatenveränderungen (Mustererkennung infolge gezielt veränderter



Schmiedeteil nach Entgraten



Schmiedeteil nach Zerteilen



Labormuster

Bild 9. Entgratete und getrennte Schmiedestücke sowie fertiges Bauteil. Foto: FHF BTU

Prozesszustände) und dem Wirkflächendesign beim Gesenk-schmieden (zum Beispiel Schrägwinkel oder Gesenkteilung) auf die Produktqualität im Dauerbetrieb. Dazu gehören eingehende Analysen der Presskinematik sowie der elastischen und thermischen Verformungen, welche beim Schmieden auftreten. Zudem werden Maßnahmen zur Verbesserung der Qualität und Genauigkeit der Schmiedestücke vorgeschlagen.

Literatur

- [1] Wagener, H.W.; Schlott, C.: Influence of die guidance systems on the angular deflection of press slide and die under eccentric loading. *Journal of Mechanical Working Technology* 20 (1989), pp. 463–475
- [2] Li, P.; Hong, G.: On the stiffness of screw presses. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 37 (1997) 1, pp. 93–100
- [3] Krušič, V.; Arentoft, M.; Mašera, S. et al.: A combined approach to determine workpiece-tool-press deflections and tool loads in multistage cold-forging. *Journal of Materials Processing Technology* 211 (2011) 1, pp. 35–42
- [4] Engel, U.; Kroiß, T.; Völkl, R.: Berechnung der Wechselwirkungen zwischen Umformmaschine und -prozess auf Basis der Integration eines Pressenmodells in die FE-Fließpresssimulation. *Proceedings of 12th Dresdner Werkzeugmaschinen-Fachseminar: Simulation von Umformprozessen unter Einbeziehung der Maschinen- und Werkzeugeinflüsse*, Dresden, 2007
- [5] Brecher, C.; Esser, M.; Witt, S.: Interaction of manufacturing process and machine tool. *CIRP Annals* 58 (2009) 2, pp. 588–607
- [6] Mull, J.; Durand, C.; Baudouin, C. et al.: Validation of a purely elastic model and a finite element model for a screw press. *Proceedings of the 22nd international esaform conference on material forming: ESAFORM 2019*, Vitoria-Gasteiz, Spain, 2019, p. 040002
- [7] Sánchez Egea, A.; Deferrari, N.; Abate, G. et al.: Short-Cut Method to Assess a Gross Available Energy in a Medium-Load Screw Friction Press. *Metals – Open Access Metallurgy Journal* 8 (2018), p. 173
- [8] Doege, E.: Static and Dynamic Stiffness of Presses and some Effects on the Accuracy of Workpieces. *CIRP Annals* 29 (1980) 1, pp. 167–171
- [9] Doege, E.; Silberbach, G.: Influence of Various Machine Tool Components on Workpiece Quality. *CIRP Annals* 39 (1990) 1, pp. 209–213
- [10] Arentoft, M.; Wanheim, T.: A new approach to determine press stiffness. *CIRP Annals* 54 (2005) 1, pp. 265–268
- [11] Behrens, B.; Brecher, C.; Hork, M. et al.: New standardized procedure for the measurement of the static and dynamic properties of forming machines. *Production Engineering* 1 (2007) 1, pp. 31–36
- [12] Chodnikiewicz, K.; Balendra, R.; Wanheim, T.: A new concept for the measurement of press stiffness. *Journal of Materials Processing Technology* 44 (1994) 3–4, pp. 293–299
- [13] Chen, R.; Li, Z.; Zhong, K. et al.: A Stereo-Vision System for Measuring the Ram Speed of Steam Hammers in an Environment with a Large Field of View and Strong Vibrations. *Sensors* 19 (2019) 5, p. 996
- [14] Waldschmidt, C.; Hasch, J.; Menzel, W.: Automotive Radar – From First Efforts to Future Systems. *IEEE Journal of Microwaves* 1 (2021) 1, pp. 135–148
- [15] Piotrowsky, L.; Pohl, N.: Spatially Resolved Fast-Time Vibrometry Using Ultrawideband FMCW Radar Systems. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 69 (2021) 1, pp. 1082–1095
- [16] Rodriguez, D.; Li, C.: Sensitivity and Distortion Analysis of a 125-GHz Interferometry Radar for Submicrometer Motion Sensing Applications. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques* 67 (2019), pp. 1–12
- [17] Zeintl, C.; Eibensteiner, F.; Langer, J.: Evaluation of FMCW Radar for Vibration Sensing in Industrial Environments. *29th International Conference Radioelektronika (RADIOELEKTRONIKA)*, Pardubice, Czech Republic, 2019, pp. 1–5
- [18] Ayhan, S.; Thomas, S.; Kong, N. et al.: Millimeter-Wave Radar Distance Measurements in Micro Machining. *2015 IEEE Topical Conference on Wireless Sensors and Sensor Networks, WISNet 2015*, San Diego, USA (2015), p. 65
- [19] Van Delden, M.; Guzy, C.; Musch, T.: Investigation on a System for Positioning of Industrial Robots Based on Ultra-Broadband Millimeter Wave FMCW Radar. *2019 IEEE Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. Singapore, 2019, pp. 744–746



Dr.-Ing. **Artem Alimov**
Foto: Autor

Prof. Dr.-Ing. **Sebastian Härtel**

Dr.-Ing. **Johannes Buhl**

Brandenburgische Technische Universität
Cottbus-Senftenberg, Fachgebiet Hybride Fertigung
Konrad-Wachsmann-Allee 17, 03046 Cottbus
Tel. +49 355 / 69-2773
alimov@b-tu.de
www.b-tu.de/fg-hybride-fertigung

Prof. Dr.-Ing. **Marcus Gardill**

Dipl.-Ing. **Marcus Knaack**

Brandenburgische Technische Universität
Cottbus-Senftenberg
Fachgebiet Elektronische Systeme und Sensorik
Siemens-Halske-Ring 14, 03046 Cottbus
Tel. +49 355 / 69-3410
gardill@b-tu.de
www.b-tu.de/fg-ess

LIZENZ



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