



Gezielte Nutzung umformtechnisch induzierter Eigenspannungen in metallischen Bauteilen

Wolfram Volk · Ines Gilch · Anian Nürnberger · Stefanie Prauser¹ · Jens Stahl

Angenommen: 26. April 2021 / Online publiziert: 26. Mai 2021
© Der/die Autor(en) 2021

1 Zusammenfassung

Der Eigenspannungszustand ist in vielen Fällen eine wesentliche Ursache für unerwartetes Versagen von umformtechnisch hergestellten Bauteilen im Betrieb.

Die Überlagerung von Spannungszuständen in Folge der Betriebslasten mit dem Eigenspannungszustand im Bauteil ist mit den bisher verfügbaren Prognosemethoden nicht hinreichend genau abbildbar, so dass typischerweise versucht wird, den Eigenspannungszustand z. B. durch eine Wärmebehandlung zu minimieren.

Allerdings haben Eigenspannungen per se auch das Potenzial, die mechanischen Eigenschaften von umformtechnisch hergestellten Bauteilen zu verbessern. Dieses bisher ungenutzte Potenzial ist das übergreifende Ziel des DFG-Schwerpunktprogramms 2013, aus dem heraus die vorliegende Sonderheft entstanden ist.

2 Einleitung

Jedes durch Umformen hergestellte Bauteil weist einen durch die Fertigung bedingten Eigenspannungszustand auf. Laut Definition werden mechanische Spannungen als Eigenspannungen bezeichnet, wenn im Bauteil ein Temperaturgleichgewicht besteht und keine äußeren Kräfte oder Momente einwirken. Umformprozesse induzieren typischerweise Kräfte, die zu einer plastischen Verformung des Bauteils führen [1]. Nach dem Entlasten bzw. Öffnen der Werkzeuge verformt sich das Werkstück so lange, bis es im mechanischen Gleichgewicht ist und somit die Eigen-

spannungen in ihrem Endzustand vorliegen. Dies bedeutet, dass Zug- und Druckeigenspannungen immer gleichzeitig vorhanden sind und sich in Summe über das ganze Bauteil aufheben. Bei der Kaltumformung, insbesondere beim Biegen oder bei komplexen Tiefziehoperationen, können Eigenspannungen nahe der Streckgrenze des Bauteils auftreten. Neben den mechanisch induzierten Eigenspannungen liegen insbesondere nach der Warmumformung auch thermisch induzierte Eigenspannungen vor, die durch plastische Verformungen beim Abkühlen entstehen. Der Eigenspannungszustand hat einen entscheidenden Einfluss auf die Betriebseigenschaften der durch Umformprozesse hergestellten Teile. Es ist bekannt, dass oberflächennahe Zugeigenspannungen im Allgemeinen zu einer erheblichen Minderung der Dauerfestigkeit führen. Dazu entgegengesetzt führen Druckeigenspannungen an der Bauteiloberfläche zu einer Verbesserung der Dauerfestigkeit [2].

In einigen spezifischen Fertigungsverfahren werden bereits gezielt Druckeigenspannungen in das Bauteil eingebracht, um Eigenschaftsverbesserungen zu erreichen. Das Festwalzen von Pkw-Kurbelwellen und das induktive Oberflächenhärten von Pkw- und Lkw-Kurbelwellen ist industriell etabliert und führt zu einer deutlichen Erhöhung der Lebensdauer von zyklisch belasteten Bauteilen [3].

Beim Shot Peening wird die Oberfläche von Bauteilen durch den Aufprall von Metallkugeln plastisch verformt und verdichtet, wodurch oberflächennahe Druckeigenspannungen entstehen. Eine erhöhte Oberflächenhärte und verbesserte Dauerfestigkeit sind die Folge [4].

Bei der Autofrettage werden druckbelastete Rohrleitungen oder hohle Bauteile durch einen hohen Innendruck plastisch geweitet. Nach der Entlastung treten an der Innenseite des Rohres oder Bauteils die gewünschten Druckeigenspannungen auf, welche insbesondere bei hohen und pulsierenden Innendrücken die Dauerfestigkeit und Rissbeständigkeit verbessern [5].

Dagegen haben Zugeigenspannungen bei Umformwendungen oft negative Einflüsse auf die Kantenrissempfindlichkeit und Maßhaltigkeit [1], die Dauerfestigkeit oder

✉ Stefanie Prauser
stefanie.prauser@utg.de

¹ Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen, Technische Universität München, Walther-Meißner-Str. 4, 85748 Garching b. München, Deutschland

die Korrosionsneigung [2]. Hinzu kommt, dass die numerische Vorhersage von Eigenspannungen bisher nur sehr eingeschränkt möglich ist und etablierte experimentelle Methoden recht aufwändig sind. Darüber hinaus haben Änderungen oder Variationen der Prozess- und Materialparameter einen erheblichen Einfluss auf die Absolutwerte der Eigenspannungen [6].

In der Industrie werden die im Bauteil vorliegenden Eigenspannungen aus den genannten Gründen durch eine der Umformung nachgeschaltete Wärmebehandlung reduziert. Dabei sinkt durch die steigende Temperatur die Streckgrenze von Metallen deutlich ab und die Eigenspannungen führen zu plastischen Verformungen. Nach der Abkühlung bleibt im Bauteil ein erheblich verringerter Eigenspannungszustand zurück, jedoch ist ein Verzug des Bauteils möglich. Es gibt bereits viele Entwicklungsansätze, die auf den reinen Abbau von Eigenspannungen im Fertigungsverfahren abzielen, um auf eine anschließende Wärmebehandlung verzichten zu können.

Die bewusste Einstellung oberflächennaher Druckeigenspannungen zur Eigenschaftsverbesserung durch den eigentlichen Umformprozess ist bisher weder in der Blechnoch in der Massivumformung realisiert worden. Ein wichtiger Grund dafür ist die fehlende Kenntnis über den Zusammenhang zwischen den Fertigungsparametern und dem auftretenden Eigenspannungszustand. Darüber hinaus sind die etablierten Methoden zur Ermittlung von Eigenspannungen (z. B. Bohrlochmethode oder Röntgendiffraktometrie) bei den meisten Prozessen mit komplexen Bauteilgeometrien nur bedingt einsetzbar, da z. B. die Zugänglichkeit zur Messstelle nicht gegeben ist oder die erreichbaren Eindringtiefen zu gering sind. In der Folge ergeben sich erhebliche Ungenauigkeiten in den numerischen Simulationen zur Vorhersage von Eigenspannungen. Bestehende Methoden zur Abschätzung der Ermüdungsfestigkeit führen typischerweise zu Ergebnissen mit vergleichsweise hoher Streuung [7].

In den letzten Jahren wurden relevante Fortschritte im allgemeinen Verständnis zur Entstehung von Eigenspannungen sowie zu ihrem qualitativen und quantitativen Einfluss und der verbleibenden stochastischen Streuung für einfache Prüfgeometrien erzielt. Dies ist auf deutlich verbesserte Mess- und Analysemethoden wie die Röntgendiffraktometrie, Neutronendiffraktometrie oder Synchrotron-Röntgendiffraktometrie zurückzuführen [8]. Mit diesen Mess- und Analysemethoden können Zug- und Druckeigenspannungen lokal wesentlich besser aufgelöst werden. Die Anwendung dieser neuen Messmethoden in industriell relevanten Prozessketten sowie für komplexe Bauteilgeometrien fehlt jedoch noch. Darüber hinaus stellen die in Umformteilen auftretenden Effekte von Textur und Mehrphasigkeit eine große Herausforderung dar, deren Einflüsse weder bei der Simulation noch bei der Messung und Auswertung zufriedenstellend berücksichtigt werden.

Neben dem grundsätzlichen Verständnis von Ursache und Wirkung wurden auch die Werkstoffmodelle und numerischen Lösungsverfahren in Richtung eines ganzheitlichen Werkstoffverständnisses deutlich verbessert, sodass sich die Vorhersagefähigkeit der Simulationsverfahren in Bezug auf Eigenspannungen sehr positiv entwickelt hat. Durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit in den Bereichen Fertigungstechnik, Werkstofftechnik, Mechanik und Betriebsfestigkeit kann nun das bisher ungenutzte Potenzial der umformungsbedingten Eigenspannungen zur Eigenschaftsverbesserung der Bauteile genutzt werden.

3 Das DFG Schwerpunktprogramm 2013

Das SPP2013 ist ein von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) seit 2017 gefördertes Schwerpunktprogramm, um die wissenschaftlichen Grundlagen zur gezielten Nutzung umformtechnisch induzierter Eigenspannungen in metallischen Bauteilen zu erarbeiten. Koordinator des SPP2013 ist Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk, Leiter des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen (*utg*) der Technischen Universität München. In diesem Schwerpunktprogramm werden 12 interdisziplinäre Projekte mit 28 beteiligten Instituten an 15 Standorten, verteilt über ganz Deutschland, gefördert.

In der ersten Projektphase von 2017 bis 2019 konnte gezeigt werden, dass Eigenspannungszustände reproduzierbar mithilfe umformender Fertigungsverfahren eingestellt werden können. Ebenso gelang der Aufbau geeigneter Simulationsmodelle und die Herstellung von repräsentativen Bauteilen. Damit ist der Nachweis erbracht, dass Eigenspannungszustände in umgeformten Bauteilen hinreichend stabil sind und somit entsprechend dem Projektziel genutzt werden können.

In der zweiten Projektphase von 2019 bis 2021, wurden die tatsächlich erzielbaren Eigenschaftsverbesserungen für die verschiedenen Fertigungsverfahren quantifiziert und die zugehörigen Simulationsmodelle sowie Messmethoden validiert.

Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen konzentrieren sich die Arbeiten der dritten Phase von 2021 bis 2023 auf die Auslegung, Gestaltung und Optimierung der notwendigen Prozesse, der Anlagen und der Werkzeuge zur Verbesserung der Eigenschaften des produzierten Bauteils. Dazu zählt auch der Nachweis der Eigenspannungsstabilität unter gegebenen Einsatzrandbedingungen.

4 Interdisziplinärer Austausch

Zur erfolgreichen Erforschung der komplexen Thematik ist eine interdisziplinäre Zusammenarbeit der Bereiche

Produktionstechnik, Mechanik, Simulation, Werkstoffe, Betriebsfestigkeit, Mess- und Prüftechnik unabdingbar. Diese projektübergreifende Zusammenarbeit wird in vier moderierten Fachkreisen realisiert.

Da die Produktionstechnik in diesem Forschungsverbund eine herausgehobene Rolle spielt, wurde eine Aufteilung der Projekte in die Fachkreise dünnwandige und dickwandige Bauteile für Blech- und Massivumformung vorgenommen. Daneben engagiert sich jedes Projekt in den begleitenden Fachkreisen Mechanik und Simulation oder Werkstoffe, Betriebsfestigkeit, Mess- und Prüftechnik.

Eigenspannungsbestimmungen für dünnwandige Bauteile mit komplexen Geometrien stehen im **Fachkreis Produktionstechnik dünnwandig** im Vordergrund. Sie stellen eine besondere Herausforderung an Messverfahren und Materialmodelle dar. Aktuelle Arbeiten des Fachkreises befassen sich mit dem Einfluss der Materialmodellierung auf die Ergebnisgüte der numerischen Eigenspannungsprognose dünnwandiger Bauteile.

Materialdaten zur Werkstoffcharakterisierung werden durch einen fachkreisübergreifenden Benchmark gewonnen. Auf dieser Basis wird insbesondere der Einfluss des materialspezifischen Elastizitäts- und Verfestigungsverhaltens auf die Eigenspannungsprognose der unterschiedlichen numerischen Prozessmodelle analysiert und quantifiziert. Im Hinblick auf den qualitativen und quantitativen Verlauf der Eigenspannungen in den Bauteilen soll ein Verständnis für die erreichbare Bauteilgestaltfestigkeit und eine effiziente Prozessauslegung geschaffen werden.

Der **Fachkreis Produktionstechnik dickwandig** untersucht Massivumformverfahren, bei denen während der Herstellung von Bauteilen Eigenspannungen durch einen dreidimensionalen Spannungs- und Dehnungszustand entstehen. Aufgrund der ungleichmäßigen plastischen Dehnungsverteilung der mittels Massivumformprozessen hergestellten Bauteile ist eine Vorhersage der Eigenspannungen hierbei nur bedingt möglich. Darüber hinaus sind auch die Auswirkungen der Arten von Eigenspannungen auf die Leistungsfähigkeit komplex beanspruchter Bauteile noch nicht vollständig geklärt.

Über Ringversuche mit verschiedenen Werkstoffen konnten bereits viele Aspekte analysiert werden, von der Sicherstellung eines zuverlässigen und standardisierten Ausgangszustandes der Proben bis hin zur abschließenden Messung der Eigenspannungen an den umgeformten Bauteilen. Die im Rahmen der Fachkreisarbeit entwickelten Strategien zur gezielten Einstellung von Eigenspannungen während der Massivumformprozesse wurden bereits publiziert [9]. Ein weiterer Schwerpunkt des Fachkreises beschäftigt sich intensiv mit dem Thema des Abbaus von Eigenspannungen durch thermische Lasten. Im Besonderen sollen die Grenzen der thermischen Stabilität an unter-

schiedlichen Materialien und Umformverfahren untersucht und beschrieben werden.

Die computergestützten mechanischen Analysen ermöglichen heute in den verschiedensten fertigungstechnischen Disziplinen durch numerische Simulationen ein erhöhtes Prozessverständnis, welches sowohl zur Neuentwicklung als auch zur Verbesserung und Optimierung bestehender Produkte und Fertigungsverfahren führt. Dabei hat die Leistungszunahme der Rechnerarchitekturen in den letzten zehn Jahren zu einer Steigerung der Genauigkeit und Komplexität bei der Modellierung und Simulation selbst mehrstufiger Fertigungsprozesse geführt.

Eine gesteigerte Komplexität liegt auch bei der Behandlung der in diesem Kontext betrachteten Eigenspannungszustände vor. Um diese Effekte für die Eigenschaftsverbesserung von umformtechnisch hergestellten Bauteilen zu nutzen, ist eine ganzheitliche Analyse und Berechnung der Eigenspannungen aufgrund der skalenergreifenden Zusammenhänge erforderlich.

Die grundlegende Aufgabe des **Fachkreises Mechanik und Simulation** besteht in der intensiven Vernetzung der Projektgruppen im SPP2013, welche mithilfe der Mechanik und Simulation die gezielte Einbringung und Nutzung von Eigenspannungen numerisch abbilden und analysieren [10].

Um die verschiedenen Simulationsansätze vergleichen und mit experimentellen Daten validieren zu können, wurden unter der Führung des Fachkreises die drei folgenden Benchmarks initiiert:

a) **Die Zyklische Biegung eines Balkens im Vier-Punkt-Biegeversuch:**

Die Biegeproben werden initial plastisch verformt, um Eigenspannungen zu induzieren, und anschließend werden die Proben zyklisch belastet. Der Biegebalken stellt eine einfache Probe mit bekanntem Eigenspannungszustand dar und eignet sich daher sehr gut für grundlegende Untersuchungen und Benchmarks. Indem die zyklisch belasteten Biegebalken im Laufe ihrer Lebensdauer regelmäßig hinsichtlich ihrer Eigenspannungen vermessen werden, können Rückschlüsse auf die Eigenspannungsstabilität gezogen werden. Eigenspannungsstabilität ist eins der zentralen Themen der dritten Förderperiode und entscheidend für die Dauerhaftigkeit der durch die Eigenspannungen herbeigeführten Eigenschaftsverbesserungen aller Projekte im SPP.

b) **Untersuchungen zum Einfluss der Textur bei der numerischen Analyse umformtechnisch hergestellter dünnwandiger Blechbauteile:**

Der Benchmark bietet die Möglichkeit des Vergleichs verschiedener numerischer Simulationsansätze bei der Umformung dünnwandiger Blechbauteile mit dem Ziel, Materialmodelle mit implementierter Textur und Materialmodelle ohne Berücksichtigung der Textur gegen-

überzustellen. Die Teilnehmer untersuchen mit ihren numerischen Methoden das Biegen eines Blechstreifens bzw. Tiefziehen eines Rundnapfes ausgehend von einem schwach texturierten Blechwerkstoff. Je nach vorhandenen Modellen wird die Textur in der Simulation berücksichtigt oder vernachlässigt. Parallel zu den numerischen Untersuchungen werden Experimente durchgeführt, sodass messtechnisch ermittelte und berechnete Eigenspannungs- und Texturzustände abgeglichen und validiert werden können. Der Benchmark soll zu einer Aussage über die Relevanz der Texturberücksichtigung innerhalb der Umformsimulation führen.

c) **Berücksichtigung von kristallographischen Texturen bei der Eigenspannungsanalyse und der numerischen Simulation anhand eines überelastisch beanspruchten Torsionsstabs:**

Im Hinblick auf die Eigenspannungsanalytik sollen anhand von definiert überelastisch beanspruchten Torsionsstäben Mess- und Auswerterroutinen erarbeitet werden, die eine zuverlässige Eigenspannungsanalyse an stark texturierten Probenzuständen erlauben. Das interessante dabei ist v. a. der Beanspruchungszustand, der einen Schubspannungszustand induziert, der zudem infolge der überelastischen Torsionsbeanspruchung einen charakteristischen Verlauf über den Probenquerschnitt, d. h. in die Tiefe aufweist.

Die experimentellen und numerischen Ergebnisse der drei Benchmarks werden mit Abschluss der 3. Förderperiode über Veröffentlichungen in Fachjournals allgemein zugänglich gemacht (Abb. 1).

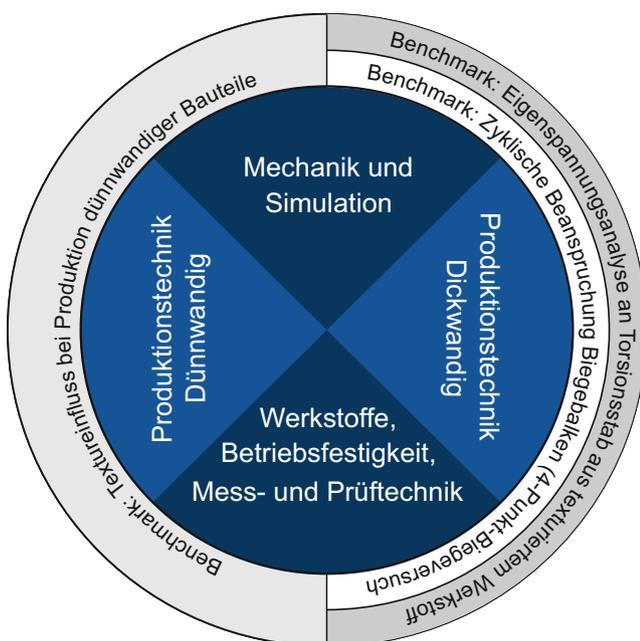


Abb. 1 Vernetzung der Fachkreise mit den Benchmarks

Die geeigneten Mess- und Auswertestrategien für die z.T. komplexen Fragestellungen zu diskutieren und letztlich bereitzustellen, ist Aufgabe des **Fachkreises Werkstoffe, Betriebsfestigkeit, Mess- und Prüftechnik**. Zudem steht im Fokus unterschiedliche Messmethoden für die jeweilige Anwendung zu ertüchtigen. Dazu wurde eingangs ein Ringversuch durchgeführt, bei dem an einem definierten – zunächst einphasigen – Werkstoff mit unterschiedlichen Messmethoden die durch Kugelstrahlen induzierte Eigenspannungsverteilung bestimmt wurde. Darüber hinaus wurde in bi-/trilateralen Kooperationen durch Abgleich verschiedener Messtechniken die Kalibrierung der weniger gut etablierten Verfahren angestrebt. Durch den gemeinsam erarbeiteten Erkenntnisgewinn wird dabei das Grundverständnis zur Entstehung, Ermittlung und Bewertung von Eigenspannungen nachhaltig verbessert.

5 Ausblick

Im Schwerpunktprogramm SPP2013 werden die grundlegenden Voraussetzungen für die gezielte Nutzung umformtechnisch induzierter Eigenspannungen aus verschiedenen Blickwinkeln untersucht. Nach Abschluss der Projekte soll eine Übertragung der Erkenntnisse auf reale Bauteile und in industrielle Fertigungsprozesse möglich sein und damit einen Beitrag zu einer nachhaltigeren Produktion und langlebigeren Produkten liefern.

Danksagung Wir bedanken uns bei Dominik Brands, Alessandro Franceschi, Jens Gibmeier, Peter Groche, Markus Kästner, Fabian Maaß, Martha Seiler, A. Erman Tekkaya, Simon Vogt für ihre Unterstützung.

Funding Open Access funding enabled and organized by Projekt DEAL.

Open Access Dieser Artikel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Artikel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Weitere Details zur Lizenz entnehmen Sie bitte der Lizenzinformation auf <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>.

Literatur

1. Kalpakjian S, Schmid SR, Musa H (2010) Manufacturing engineering and technology, 6. Aufl. Prentice Hall, Singapore
2. Okorokov V, Morgantini M, Gorash Y, Comlekci T, Mackenzie D, van Rijswijk R (2018) Corrosion fatigue of low carbon steel under compressive residual stress field. *Proc Eng* 213:674–681. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2018.02.063>
3. Sollich A, Wohlfahrt H (1996) Optimization of the fatigue strength of heat treated steels as a consequence of an optimum state of the surface and of subsurface layers after shot peening. Sixth International Conference on Shot Peening, S 251–262
4. Klotz T, Delbergue D, Bocher P, Lvesque M, Brochu M (2018) Surface characteristics and fatigue behavior of shot peened Inconel 718. *Int J Fatigue* 110:10–21. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.01.005>
5. Brünnet H, Lyubenova N, Müller M, Hoffmann JE, Bähre D (2014) Verification and application of a new 3D finite element approach to model the residual stress depth profile after autofrettage and consecutive reaming. *Proc CIRP* 13:72–77. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.013>
6. Merklein M, Andreas K, Engel U (2011) Influence of machining process on residual stresses in the surface of cemented carbides. *Proc Eng* 19:252–257. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2011.11.108>
7. Nikkel K (2013) Lebensdauerabschätzung für Bauteile aus umgeformten Feinblechen in Abhängigkeit vom Simulationsaufwand. Doctoral thesis. TU, Claustal
8. Zhang J, Zheng L, Guo X, Ji V, Klošek V (2014) Residual stresses comparison determined by short-wavelength X-ray diffraction and neutron diffraction for 7075 aluminum alloy. *J Nondestruct Eval* 33(1):82–92. <https://doi.org/10.1007/s10921-013-0205-9>
9. Franceschi A, Stahl J, Kock C, Selbmann R, Ortman-Ishkina S, Jobst A, Merklein M, Kuhfuß B, Bergmann M, Behrens BA, Volk W, Groche P (2021) Strategies for residual stress adjustment in bulk metal forming. *Arch Appl Mech*. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01903-7>
10. Maassen SF, Erdle H, Pulvermacher S, Brands D, Böhlke T, Gibeimer J, Schröder J (2021) Numerical characterization of residual stresses in a four-point-bending experiment of textured duplex stainless steel. *Arch Appl Mech*. <https://doi.org/10.1007/s00419-021-01931-3>