

Transparenzsteigerung beim Hohlprägewalzen von metallischer Bipolarplatten

Prozessüberwachung mittels maschineninhärenter Sensoren

M. Wagner, M. Alaluss, J. Langheinrich, F. Reuther, R. Kurth, S. Ihlenfeldt

ZUSAMMENFASSUNG Die Überwachung von Umformprozessen sowie des Maschinenverhaltens ist ein wesentlicher Enabler für gesteigerte Agilität und Effizienz in der Umformtechnik. Bei der Überwachung von Walzprozessen zur Herstellung von metallischen Bipolarplatten besteht die Anforderung einer genauen, sensitiven und kontinuierlichen Messung bei gleichzeitig mechanisch robuster Sensorintegration. In diesem Beitrag wird ein Konzept zur inlinefähigen Prozessüberwachung für das Hohlprägewalzen mittels maschineninhärenter Sensoren vorgestellt.

STICHWÖRTER

Bipolarplatte, FEM, Hohlprägewalzen

Transparency improvement in hollow embossing rolling of metallic bipolar plates – Process monitoring by using machine-inherent sensors

ABSTRACT The monitoring of forming processes and machine behavior is an essential enabler for increased agility and efficiency in forming technology. Here, the monitoring of rolling processes to produce metallic bipolar plates requires precise, sensitive, and continuous measurement combined with mechanically robust sensor integration. This paper presents a new concept for inline capable process monitoring by means of machine-inherent sensors.

1 Einleitung und Motivation

Eine saubere und nachhaltige Energiebereitstellung stellt die Nutzung von Brennstoffzellen auf Basis von grünem Wasserstoff dar [1]. Metallische Bipolarplatten als Schlüsselkomponente von wasserstoffbetriebenen Brennstoffzellen werden durch komplexe sowie dünnwandige Kanalstrukturen charakterisiert [2]. Hierbei, rücken die metallischen Bipolarplatten zunehmend im Fokus der Forschung aufgrund verschiedener Vorteile bzgl. der Herstellbarkeit, Herstellungskosten und der Eigenschaften (unter anderem Stabilität, minimale Blechdicke, vielfältige Beschichtungsmöglichkeiten). Ein Ansatz zur Herstellung dieser Komponenten ist der Einsatz von Umformverfahren wie dem Hohlprägen [3] und der Hochdruckblechumformung [4], die als diskontinuierliche Prozesse in Bezug auf Materialzufuhr und Pressenkinematik charakterisiert werden. Diese Fertigungsverfahren sind zwar bekannt und die erforderliche Maschinentechnik ist etabliert, jedoch sind diese hinsichtlich Genauigkeit, Produktionsrate und Wirtschaftlichkeit limitiert [5]. Eine vielversprechende Umformtechnologie ist das Hohlprägewalzen von metallischen Bipolarhalbplatten (BPHP) für Brennstoffzellenstacks oder von artverwandten Produkten wie Kanalplatten für Wärmetauscher und Elektrodenplatten von Akkumulatoren, mit dem die Produktionsrate deutlich gesteigert und gleichzeitig qualitativ hochwertige Bauteile geliefert werden können [2, 6]. Dabei stellen die Entwicklung der

Prozesstechnologie [7] sowie die dazugehörige Maschinen- [8] und Überwachungstechnik Gegenstand von Forschungsaktivitäten dar.

Weiterhin stellt Bild 1b ein am Fraunhofer-Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU entwickeltes und umgesetztes Anlagensystem zum Hohlprägewalzen von metallischen BPHP bestehend aus einem Zuführwalzgerüst, ein Umformwalzgerüst und ein Wegführwalzgerüst dar. Zunächst wird zwischen Zuführwalzgerüst und Arbeitswalzgerüst mithilfe eines Bremsmomentes eine Bandspannung für den nachfolgenden Umformvorgang aufgebaut. Hierbei befinden sich auf den Umformwalzwerkzeugen die abzubildenden BPHP-Strukturen, wobei eine Walze als Patrize und die andere als Matrize ausgelegt ist. Treffen diese strukturierten Bereiche aufeinander, wird der Blechstreifen zwischen den Umformwalzwerkzeugen inkrementell umgeformt, wie in Bild 1a schematisch dargestellt. Durch die Rotation der Werkzeuge kommt es zu einer translatorischen Transportwirkung des Materials. Nach der inkrementellen Umformphase folgt eine dritte Walzstufe, die ein sicheres Wegführen des umgeformten Blechstreifens, hin zu nachgelagerten Prozessen, sicherstellt.

Hinsichtlich des Walzens dünnwandiger Kanalstrukturen wird vor allem die Ausdünnung und Ausformung des Blechstreifen in der Umformzone, sowie die Ebenheit der Bauteile als eine wesentliche Herausforderung identifiziert [7]. Ein Prozessparameter, welcher großen Einfluss auf diese Qualitätsmerkmale hat,

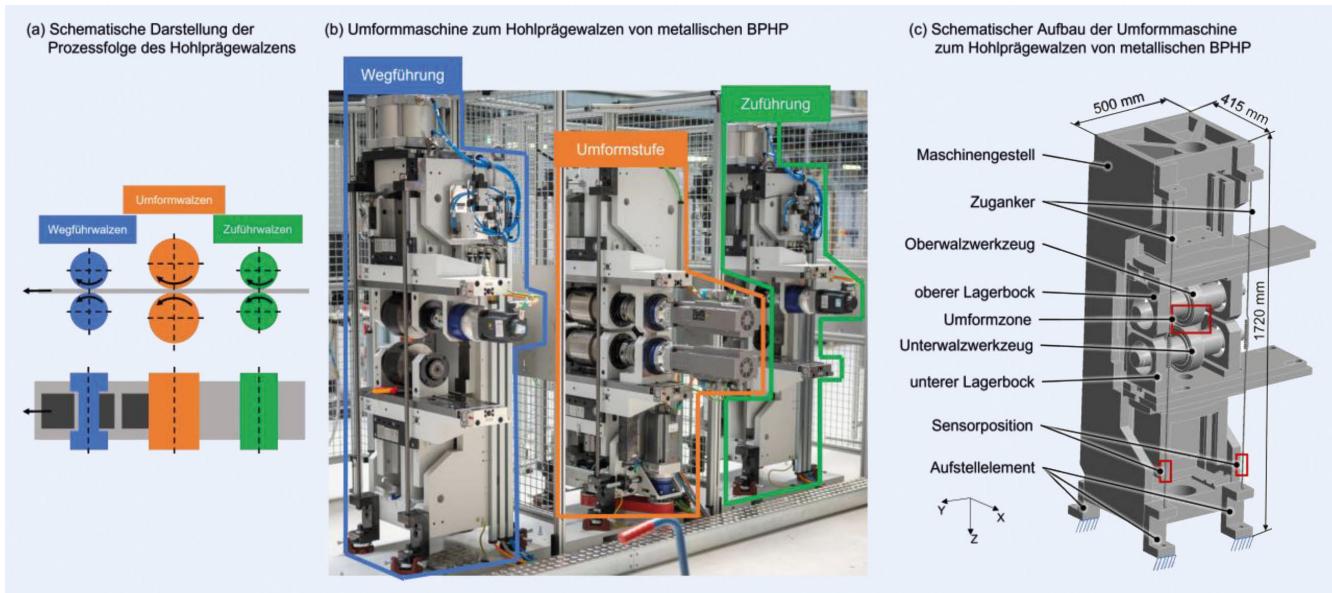


Bild 1. Umformmaschine zum Hohlprägewalzen von metallischen BPHP. Grafik: Fraunhofer IWU

ist die Druckverteilung in der Umformzone. Darüber hinaus zeigen Untersuchungen [7], dass aufgrund des schmalen Prozessfensters kleinste maschinen-, prozess- sowie werkzeugbedingte Abweichungen die Prozessstabilität und damit verbunden die Qualität der resultierenden BPHP beeinflussen. Dies kann zu Problemen bei den nachgelagerten Prozessen (unter anderem Fügen der BPHP und Stapeln sowie Verspannen der Brennstoffzellen), zu einem verminderten Wirkungsgrad oder zum Versagen des Brennstoffzellenstacks führen. Eine hohe Maß- und Formgenauigkeit ist demzufolge für die Funktionsfähigkeit sowie der Qualität der Bipolarplatte und Brennstoffzelle von entscheidender Bedeutung. Eine Nacharbeit fehlerhafter Brennstoffzellenstacks ist aufgrund der komplexen Demontage und anschließende Neumontage technisch kaum umsetzbar und wirtschaftlich nicht rentabel.

Um den Ausschuss und damit die Fehlerkosten auch bei hohen Ausbringraten gering zu halten, ist eine kontinuierliche Überwachung während des Umformprozesses zielführend. Hierbei wird in verschiedene Messverfahren unterteilt, zu nennen sind: End-of-Line- (Prüfung am Ende der Fertigungsline), Online-Überwachungsmethoden (Prüfung an einem Abzweig des Fertigungsprozesses) und Inline-Überwachungsmethoden (Prüfung innerhalb des Fertigungsprozesses). Die visuelle Sichtprüfung, welche vorwiegend als End-of-Line- oder Online-Überwachungslösung mittels optischer Verfahren [9, 10] beziehungsweise kamerabasierter erfolgt, stellt hohe Anforderungen in Bezug der Ausleuchtung, Verschattung, Reflexion sowie Sauberkeit im produktionstechnischen Umfeld, wodurch eine robuste und wirtschaftliche Vollprüfung mit vertretbarem Aufwand problematisch ist.

Ferner wird mittels Lasermesstechnik Banddicke und -geschwindigkeiten während des Walzprozesses messtechnisch erfasst [11]. Überdies beschreibt [12] eine Messmethodik zur Kraftüberwachung mittels im Kraftfluss angebrachter Kraftmesssensoren beziehungsweise indirekt über Druckmessungen bei hydraulischen oder pneumatischen Zustellachsen. Eine weitere Möglichkeit besteht in der Nutzung von Lichtbandmikrometern zur Walzspaltüberwachung, die am Randbereich der Umformwalzen angebracht werden [13]. Der tatsächlich resultierende

Walzspalt in der Umformzone ist mit dem beschriebenen Messsystemen kaum erfass- und überwachbar.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die dargestellten Methoden des Standes der Technik und Forschungsansätze zur Prozess- und Zustandsüberwachung oftmals nur eine Erfassung von globalen beziehungsweise beschränkt lokalen Kenngrößen erlauben beziehungsweise nur eine grobe Näherung darstellen. Aufgrund der hohen Genauigkeitsanforderungen des Hohlprägewalzen von metallischen BPHP ist eine qualifizierte Prozessüberwachung mit den beschriebenen Methoden und Ansätzen nicht umsetzbar, da diese Messmethoden für eine Inline-Überwachung nicht geeignet sind. In diesem Beitrag wird ein Konzept zur Inline-Überwachung des Hohlprägewalzens von metallischen BPHP basierend auf maschineninhärenten Sensoren vorgestellt. Die Herausforderung besteht in dem derzeit ungelösten Zielkonflikt aus „wirkstellennahe“ Messung (hohe Messgenauigkeit und Sensitivität) bei gleichzeitig mechanisch robuster Sensorintegration.

2 Identifizierung von Sensorstellen und Sensorintegration

Die Identifizierung der Sensorstellen erfolgt durch die Finite-Elemente-Methode (FEM) in Ansys Workbench. Hierfür wurde eine elastische Simulation des Umformwalzgerüsts und der Umformwerkzeuge aufgebaut. Im ersten Schritt wurde dazu das Modell mit Volumenelementen vernetzt (vgl. Bild 2 a). Das resultierende Netz besteht aus 145 476 Elementen und 265 460 Knoten. Als Material für die elastische Simulation wurde Stahl mit einem E-Modul von 210 000 N/mm² und eine Querkontraktionszahl von 0,3 angenommen.

Im Bereich der Umformzone (vgl. Bild 2 b und c) wurde für die Simulation eine symmetrisch-gleichverteilte Last in mehreren Lastschritten auf das Unter- und Oberwalzwerkzeug aufgebracht.

Der Kraftverlauf von 5 kN bis 25 kN ist durch eine Schrittweite von 5 kN gekennzeichnet, wobei die obere Grenze der zulässigen Nennkraft der Anlage entspricht. Die geringeren Lasten können zur Identifikation des Verhaltens unterhalb der Nennkraft verwendet werden. An den Zugankern der Anlage wurde

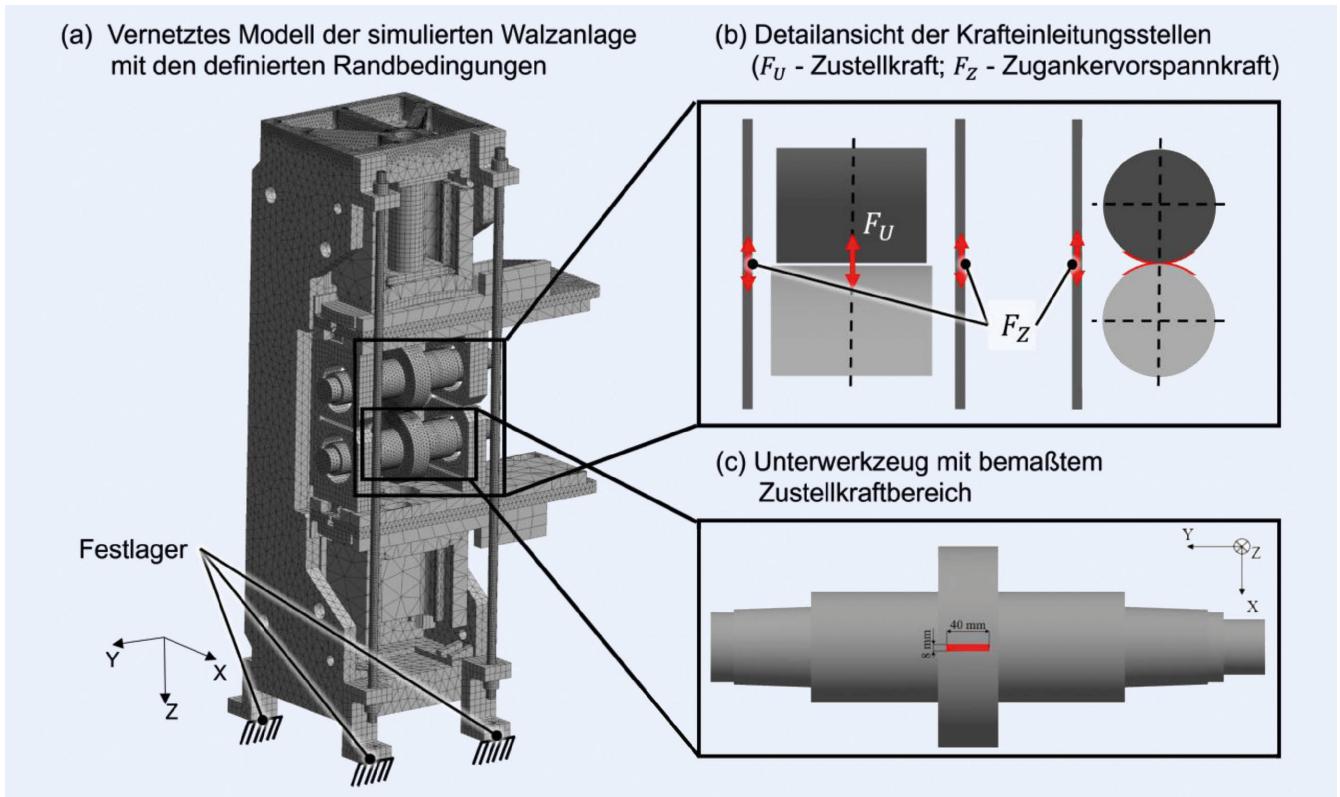


Bild 2. Simulationsmodell mit definierten Randbedingungen. *Grafik: Fraunhofer IWU*

eine Vorspannkraft von 2,5 kN pro Zuganker definiert. An der Unterseite der vier Aufstellelemente wurde eine Festlagerung definiert. Lagerungen wurden ihrer Steifigkeit entsprechend anhand der Herstellerangaben definiert. Der Kugelgewindetrieb (Zustellung der Walzanlage in der Z-Achse), welcher die Prozesskraft am unteren Maschinenschlitten aufbringt, wurde ähnlich den Wellenlagerungen durch eine Kontaktrandbedingung ersetzt. Die sich aus der Berechnung resultierenden Dehnungen werden zur Identifizierung geeigneter Sensorstellen genutzt. Geeignete Sensorstellen werden durch eine Systemantwort beschrieben, die mit bekannten Messprinzipien sicher und robust bestimmt werden kann.

Wie in **Bild 3 a** veranschaulicht, stellen sich im Bereich des Maschinengestells Dehnungen um $\pm 20 \mu\text{m}/\text{m}$ ein. Lokale Hotspots oder sensitivere Bereiche sind nicht zu erkennen. Für die Zuganker der Walzanlage ergeben sich Dehnungen bis $49 \mu\text{m}/\text{m}$ (vgl. Bild 3 b und c). Anhand dieser Ergebnisse wurden für eine erste Sensorierung die Zuganker als geeignete Messstelle für dehnungsbasierte Sensoren gewählt. Durch den linearen Verlauf ergeben sich hieraus circa $2 \mu\text{m}/\text{m}$ pro kN Umformkraft, welche messtechnisch sicher erfasst werden können.

3 Experimentelle Analysen – Sensorkonzept, Kalibrierung, Überwachung

Für die Inline-Prozessüberwachung bietet sich, wie simulativ nachgewiesen, die Betrachtung der im Kraftfluss liegenden Komponenten an. Für die in Bild 1 dargestellte Umformmaschine erfolgt die Fokussierung auf die beiden Zuganker. Hierbei wird eine Detektion des elastischen Verformungszustandes angestrebt.

Für eine hinreichend gute Auflösung der später eingesetzten Algorithmen bietet sich aus der Simulation heraus die Applikation mehrerer Dehnungsmessstreifen (DMS) an, welche im Gegensatz zu beispielsweise piezo-elektrischen Dehnungsaufnehmern auch für die Aufnahme quasi-statischer Belastungen sehr gut geeignet sind. Je nach angestrebtem Detaillierungsgrad der Inline-Überwachung ist eine entsprechende Anzahl von Sensoren an der Umformmaschine vorzusehen. So ist für eine reine Umformkraftüberwachung bereits ein einzelner Sensor ausreichend, wohingegen für die Detektion der Verkippung der Umformwalzen mindestens vier Sensoren notwendig sind. Die Anzahl und Position der zu applizierenden DMS ist von entscheidender Bedeutung für die Genauigkeit und Sensitivität der Messung. Hierbei gilt es folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- Sensitivität hinsichtlich des Betrages der Umformkraft,
- Sensitivität hinsichtlich des Einflusses der Verkippung der Umformwalzen zueinander,
- Messbereich aufgrund der zu erwartenden Prozessbelastungen sowie
- mechanisch robuste Integration.

Demzufolge ist darauf zu achten, dass die DMS zum einen in Bereichen angebracht sind, in denen sie durch den Maschinenbetrieb nicht beschädigt werden können und zum anderen trotzdem in Bereichen sind, welche aufgrund der eingebrachten Belastung Dehnungen aufweisen, welche sich mit hinreichender Genauigkeit messtechnisch erfassen lassen. Des Weiteren sind die Messstellen derart auszuwählen, dass sich zum einen mit hoher Sicherheit die Umformkraft ermitteln lässt, sich gleichzeitig aber auch die möglichen Variationen im Hohlprägewalzprozess mit einem hinreichend großen Anteil definiert und reproduzierbar im Sensorsignal widerspiegeln.

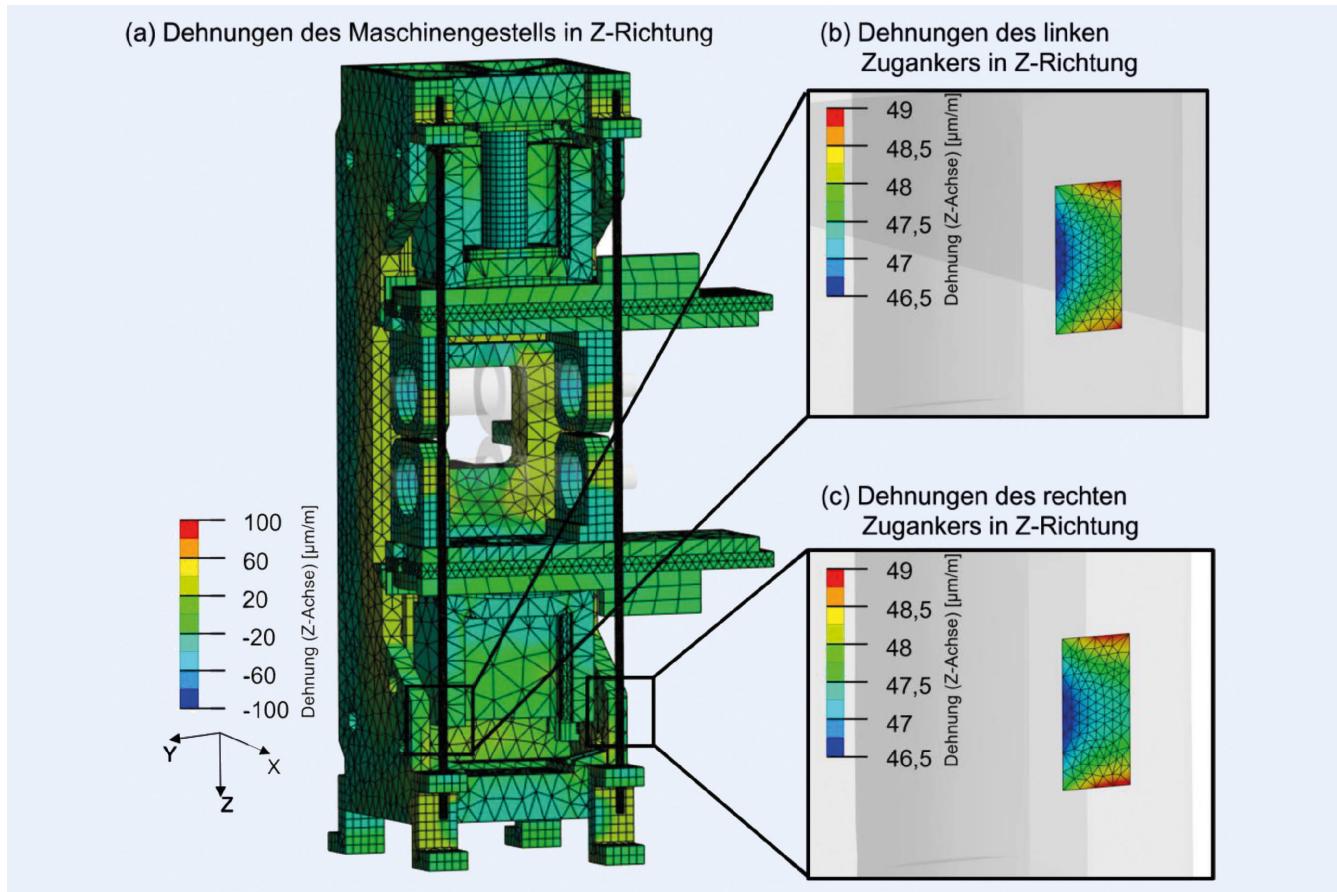


Bild 3. Simulierte Dehnungen (ϵ) bei $F_u = 25$ kN global für das Gesamtmodell und lokal im Bereich der Zuganker. Grafik: Fraunhofer IWU

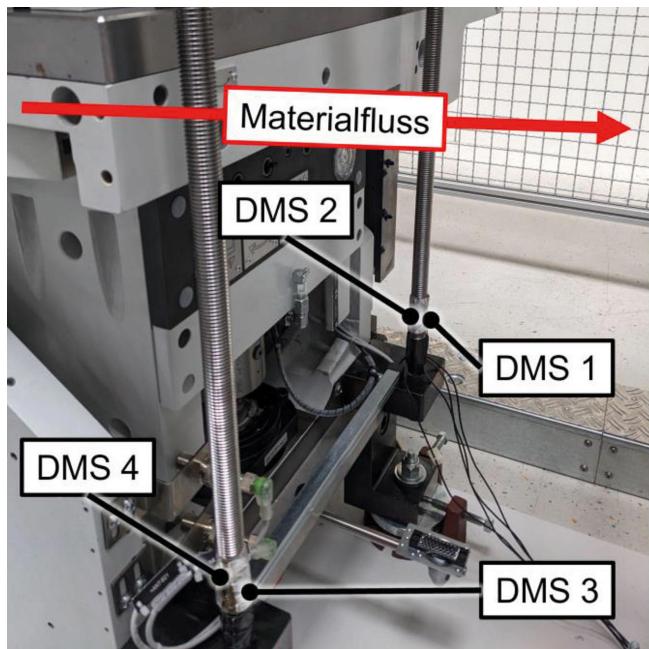


Bild 4. Sensorskonzept mit integrierten DMS am Zuganker zur Kalibrierung. Grafik: Fraunhofer IWU

Aufgrund von Fertigungs- und Montagetoleranzen besteht die Möglichkeit, dass das elastische Systemverhalten nicht bei jeder Umformmaschine identisch ist. Zudem bedingt die manuelle Applikation von DMS geringfügige Abweichungen hinsichtlich der Übertragung des Bauteil- in das Materialverhalten, folglich ist die Kalibrierung der applizierten DMS notwendig.

In Bild 4 ist der Konzeptaufbau mit vier an den beiden Zugankern integrierten DMS dargestellt. Die Kalibrierung erfolgt durch eine statisch-zentrische Krafteinleitung [0; 25 kN]. Die Ergebnisse sind in Bild 5 für DMS 1 bis DMS 4 grafisch dargestellt.

Bild 5 zeigt hierbei lineare Regressionen für den Umformkraft-Dehnung-Verlauf ausgehend aus den gemessenen DMS-Signaländerungen. Es ist somit möglich, aus den zu einem Zeitpunkt gemessenen Dehnungen direkt auf die resultierende Umformkraft rückzuschließen. Aus den ermittelten Messwerten und den korrespondierenden aufgebrachten Lasten werden Kalibrierfaktoren für die einzelnen DMS abgeleitet. Zudem zeigen die Ergebnisse aus den experimentellen Untersuchungen eine gute Übereinstimmung mit den Werten aus den simulativen Untersuchungen, wodurch das aufgebaute strukturmechanische Simulationsmodell experimentell validiert wird. Mögliche Ursachen für die verbleibende Abweichungen bestehen in der Ungenauigkeit des verwendeten Referenzkraftmesssystems, speziell in kleinen Kraftbereichen, geometrischen Abweichungen und statistischen Messfehlern.

Weiterhin stellt Bild 6 zwei verschiedene BPHP-Geometrien den resultierenden Prozesskraftverlauf basierend auf die appli-

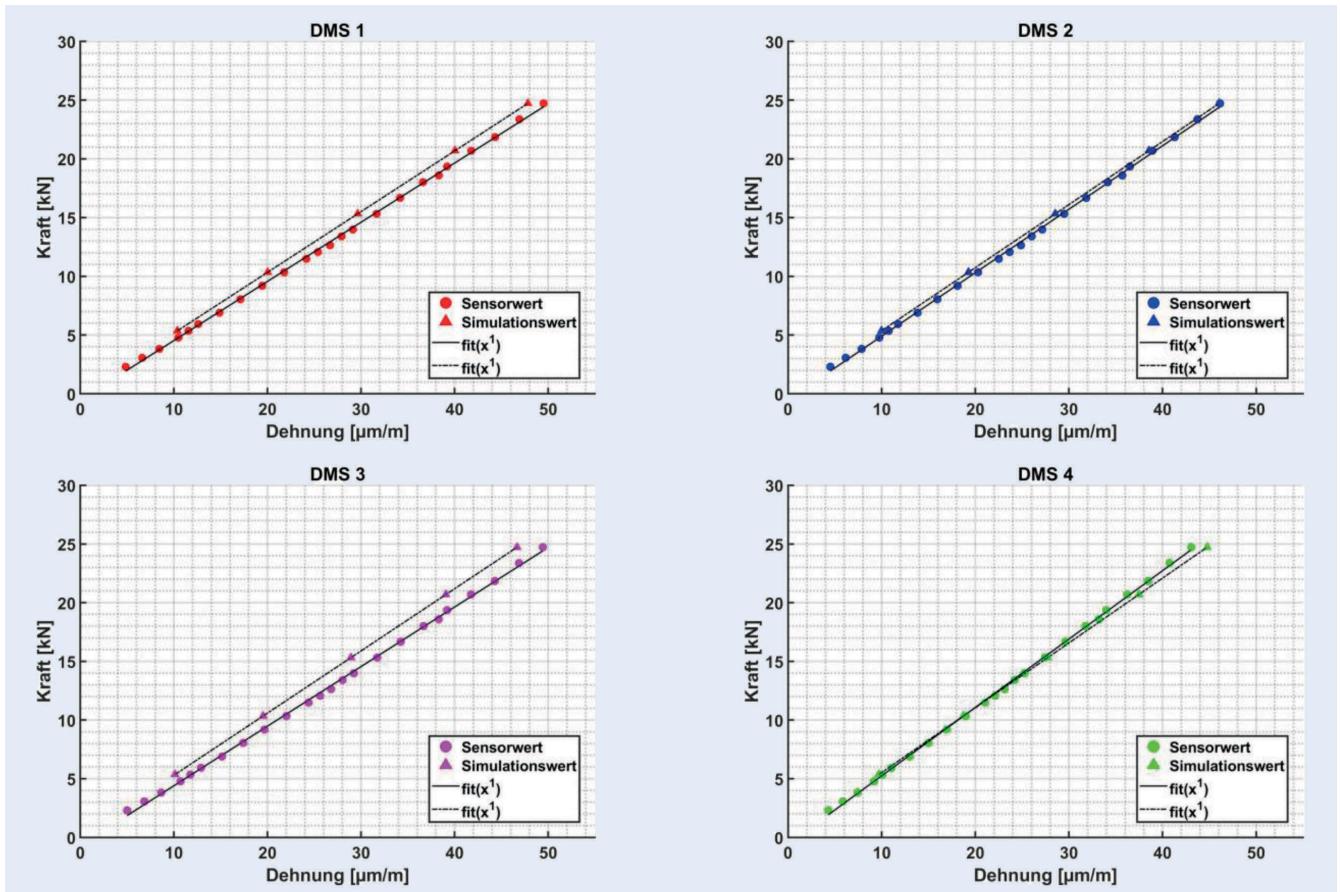


Bild 5. Regressionsmodelle der Umformkraft für die applizierten DMS am Zuganker der Umformmaschine basierend auf simulative und experimentelle Untersuchungen. *Grafik: Fraunhofer IWU*

zierten sowie kalibrierten DMS während des Hohlprägewalzens von zwei unterschiedlichen BPHP-Geometrien dar. Hierbei spiegeln sich einzelne Merkmale der BPHP-Geometrie in den resultierenden Prozesskraftverlauf wider. Bereiche, die durch einen großen lokalen Umformgrad (bezogen auf den Linien-Charakter der Umformung) gekennzeichnet sind, wie zum Beispiel Bereiche mit langen Querkanälen (blaumarkerter Bereich) und Bereiche mit vielen Längskanälen (schwarzmarkerter Bereich), zeigen sich durch entsprechende Maxima im Sensorsignal.

Die hohe Sensitivität zeigt sich nicht nur bzgl. verschiedener BPHP-Geometrien, sondern auch in Bezug auf den einzelnen Geometriemerkmalen und bietet großes Potenzial für eine Inline-Prozessüberwachung. Insbesondere geometrische Abweichungen vom Walzwerkzeug (beispielsweise Verschleiß) beziehungsweise Umformmaschine die zu fehlerbehafteten Bauteilen führen, zeigen sich in Abweichungen vom idealen Referenzsignal und können demzufolge erkannt werden.

4 Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Beitrag wurde das Konzept der Überwachung des Hohlprägewalzens von metallischen BPHP basierend auf maschinennahen Sensoren vorgestellt, experimentell verifiziert und die Ergebnisse diskutiert. Die Nutzung des elastischen Maschinenverhaltens und dessen Reaktion als Messprinzip bietet großes Potenzial für eine robuste und sensitive Inline-Überwachung des

Hohlprägewalzens von metallischen BPHP, wie die Messergebnisse gezeigt haben. Durch eine Erweiterung der Sensorstellen, zum Beispiel auf Bereiche des Maschinengestells oder der Umformwerkzeuge, könnte eine noch lokale und damit detailliertere Prozessgrößenerfassung ermöglicht werden.

In zukünftigen Forschungsarbeiten gilt es dieses Konzept durch weitere Versuche und Variierung von Technologieparametern zu verifizieren. Weiterhin sollte die Fähigkeit des Sensorkonzeptes zur Erfassung von dynamischen Prozessänderungen sowie zu Verkippung der Walzen durch Einbringung von exzentrischen Belastungen untersucht werden.

FÖRDERHINWEIS

Diese Forschungsarbeit wurde von der Fraunhofer-Gesellschaft im Rahmen des Fraunhofer-Projekts „HOKOME – Entwicklung hochproduktiver und kosteneffizienter R2R-Fertigungsmethoden für Komponenten von Brennstoffzellenstacks“ und des Projekts „H2GO – Nationaler Aktionsplan Brennstoffzellen-Produktion“, gefördert durch das Bundesministerium für Digitales und Verkehr.

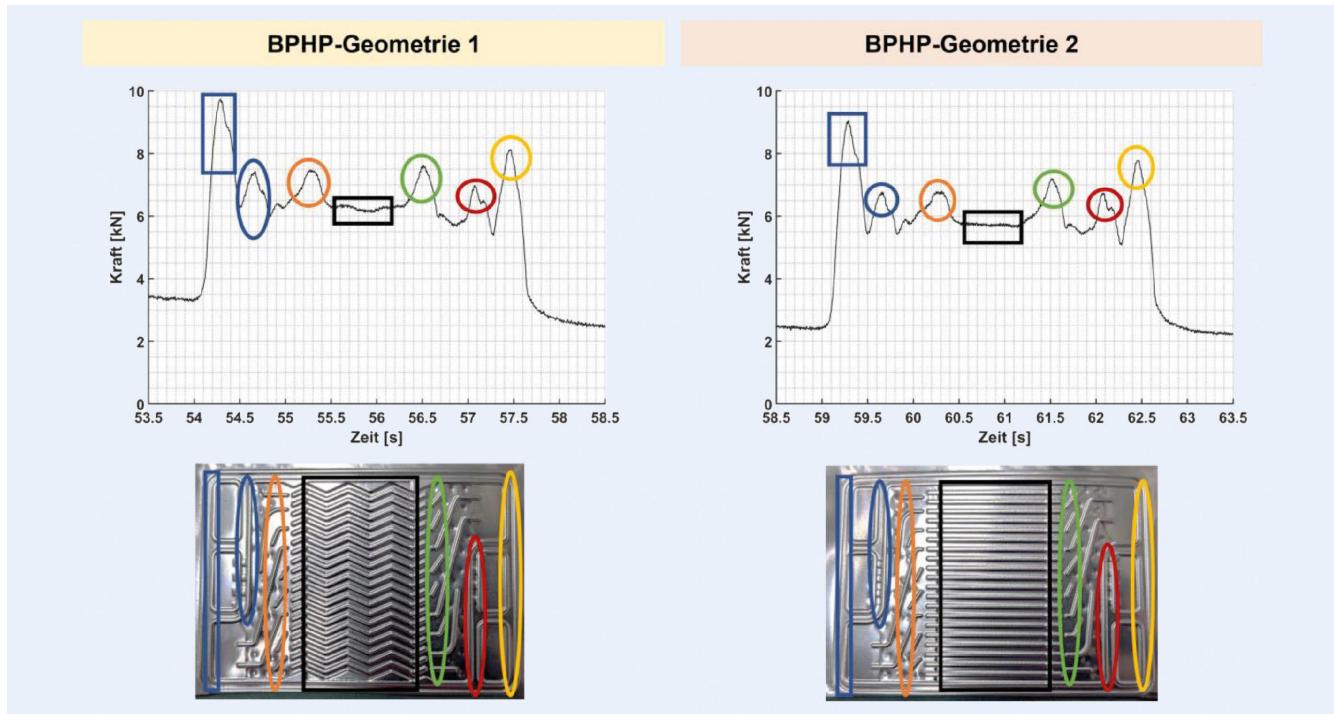


Bild 6. Kraftverlauf während des Hohlprägewalzens von BPHP. *Grafik: Fraunhofer IWU*

L i t e r a t u r

- [1] Bundesministerium für Bildung und Forschung: Nationale Wasserstoffstrategie: Grüner Wasserstoff als Energieträger der Zukunft. Internet: https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/nationale-wasserstoffstrategie/nationale-wasserstoffstrategie_node.html, Zugriff am: 15.01.2024
- [2] Porstmann, S. et al.: Comprehensive Comparison of State-of-the-Art Manufacturing Methods for Fuel Cell Bipolar Plates Including Anticipated Future Industry Trends, *Journal of Manufacturing Processes*, 60 (2020), S.366–383
- [3] Liu, Y. et al.: Fabrication of Metallic Bipolar Plate for Proton Exchange Membrane Fuel Cells by Rubber Pad Forming, *J. Power Sources*, 195 (2010), S. 3529–3535
- [4] Mohammadtabar, N. et al.: Feasibility Study of a Double-Step Hydro-forming Process for Fabrication of Fuel Cell Bipolar Plates with Slotted Interdigitated Serpentine Flow Field, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 85 (2016), S. 765–777
- [5] Porstmann, S. et al.: Analysis of Manufacturing Processes for Metallic and Composite Bipolar Plates, (FC³) Fuel Cell Conference Chemnitz, (2019), S. 25–39
- [6] Polster, S. et al.: FOSTA Projekt Bipolarplatten: Verfahrensvergleich zur Formgebung metallischer Bipolarplatten – Hohlprägen vs. Hohlprägewalzen. Internet: <https://hzwo.eu/project/fosta-bipolarplatten-praegen/>, Zugriff am: 05.06.2023
- [7] Bauer, A. et al.: Manufacturing of Metallic Bipolar Plate Channels by Rolling, *J. Manuf. Mater. Process.*, 3 (2019) 48
- [8] Wagner, M. et al.: Characterization of the machine behaviour during hollow embossing rolling of metallic bipolar half plates, *Journal of Machine Engineering*, Vol. 23, (2023)
- [9] Carl Zeiss GOM Metrology GmbH (Hrsg.): Ein kleiner Scanner, der Großes möglich macht. Internet: <https://www.gom.com/de-de/produkte/3d-scanning/gom-scan-1>. Zugriff am: 31.10.2023
- [10] Micro-Epsilon Messtechnik GmbH & Co. KG (Hrsg.): 3D-Sensoren zur Geometrie-, Form- und Oberflächenprüfung von matten Objekten. Internet: https://www.micro-epsilon.de/2D_3D/3D-sensors/surfaceCON-TROL. Zugriff am: 15.01.2024
- [11] Polytec GmbH (Hrsg.): Kombinierte Geschwindigkeits- und Dickenmessung im Walzwerk. Internet: https://www.polytec.com/fileadmin/websitem/velocimetry/pdf/OM_AN_LSV_S_004_Masseflussregelung_D_42411.pdf. Zugriff am: 15.01.2024
- [12] BLH / Nobel Weighing Systems: Walzkraftmessung – RFS-4. Internet: <https://xdevs.com/doc/VPG/pw-docs/41024.pdf>. Zugriff am: 31.10.2023
- [13] Keyence Deutschland GmbH (Hrsg.): Messung von Walzspalt, Rundlauf und Blechdicke. Internet: <https://www.keyence.de/ss/products/measure/sealing/examples/film-sheet.jsp>. Zugriff am: 15.01.2024



M a r t i n W a g n e r , M . E n g .
Foto: Autor

M o h a n e d A l a l u s s , M . S c .

J o h a n n L a n g h e i n r i c h

F r a n z R e u t h e r , M . S c .

R o b i n K u r t h , M . S c .

**P r o f . D r . - I n g .
S t e f f e n I h l e n f e l d t**

Fraunhofer- Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik IWU
Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz
Tel. +49 371 / 5397-1580
martin.wagner@iwu.fraunhofer.de
www.iwu.fraunhofer.de

L I Z E N Z



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