

Schenke, Christer, Dipl.-Ing.

Penter, Lars, Dr.-Ing.

Schwarzenberger, Michael, Dr. rer. nat.

Wiemer, Hajo, Dr.-Ing.

Ihlenfeldt, Steffen, Prof. Dr.-Ing.

Technologieregelung bildet die Basis für einen robusten Kartontiefziehprozess

1 Einleitung

Karton ist ein aus nachwachsenden Rohstoffen hergestelltes Halbzeug, biologisch abbaubar und mit sehr guter Wiederverwertbarkeit. Damit stellt Karton eine zukunftssträchtige Grundlage für die Herstellung von Verpackungen für die Lebensmittel- und Konsumgüterproduktion dar. Schon heute werden in vielen Verpackungslösungen Kunststoffe durch naturfaserbasierte Halbzeuge ersetzt, um von den genannten Vorteilen zu profitieren. Um die Verbreitung dieses Naturstoffes weiter zu unterstützen, werden intelligente und effektive Herstellungsverfahren benötigt, die eine Massenfertigung von Packmitteln in hoher Qualität ermöglichen.

Ein Beispiel für ein solches Verfahren ist das Tiefziehen von Karton. Wissenschaftlich weitestgehend durchdrungen [1], fehlt es heute an den Fertigungsanlagen, die in der Lage sind, mit den herausfordernden Eigenschaften umzugehen die das Material mit sich bringt. Karton als Fasermaterial weist ein richtungsabhängiges Umformverhalten auf und ist stark hygroskopisch, was zu einer Anpassung des Feuchtegehalts im Material an die Umgebungsbedingungen führt. Der Feuchtegehalt wiederum bestimmt das Fließverhalten des Kartons und damit die notwendigen Fertigungsparameter zur Herstellung eines Umformteils mit der gewünschten Ziehtiefe und Oberflächenqualität. Aufgrund einer Hysterese zwischen Wasseraufnahme und -abgabe kann aber aus den Umgebungsbedingungen nicht abgeleitet werden, in welchem Zustand sich der Karton gerade befindet. Daher ist es notwendig, vor Prozessbeginn den Materialzustand zu erfassen und in die Wahl der Fertigungsparameter einfließen zu lassen.

Das Forschungsvorhaben „intelligente Konsumgüterproduktion“ an der TU Dresden hat sich zum Ziel gesetzt, eine Demonstratoranlage zur Herstellung versiegelter Becher aus Karton zu entwickeln [5]. Aus der Zusammenarbeit zwischen der Professur für Verarbeitungsmaschinen / Verarbeitungstechnik, zuständig für die Prozessgestaltung und die Bewertung technologischer Zusammenhänge sowie der Bauteilqualität und dem Institut für Werkzeugmaschinen und Steuerungstechnik, das sich mit der Anlagentechnik und der Entwicklung einer

prozessdatenbasierten Regelung der Fertigungsmittel - der Technologieregelung – auseinandersetzt wird ein intelligentes sich selbst optimierendes Fertigungssystem entstehen. Als plakatives Beispiel für eine in sehr großen Stückzahlen hergestellte Verpackung wurde ein Joghurtbecher ausgewählt. Neben dem Umformvorgang besteht dabei eine weitere Herausforderung im gasdichten Verschluss des Bechers.

2 Anlagenkonzept und Prozesskette

Die zu entwickelnde Anlage wird aus drei Fertigungsmodulen bestehen und alle notwendigen Prozessschritte durchführen, um aus dem als Rollenmaterial vorliegenden Halbzeug einen verschlossenen Becher aus Karton herzustellen (**Bild 1**).

Aus der Bahn wird zunächst ein Zuschnitt erstellt, dieser Zuschnitt wird in einer Presse umgeformt, der entstandene Becher anschließend durch einen Heißpressprozess versiegelt und abschließend der Flansch beschnitten. Die Fertigungsmodule verfügen jeweils über eine Presse zum Aufbringen der Prozesskraft und ein Werkzeug zum Durchführung des Prozesses. Der Zuschnitt und das Tiefziehen werden dabei jeweils auf einem Modul durchgeführt, für das Versiegeln und den Randbeschnitt kommt ein weiteres Modul mit Folgeverbundwerkzeug zum Einsatz.

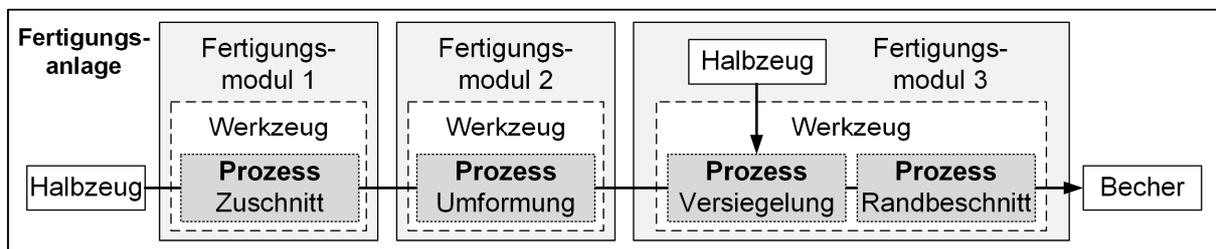


Bild 1: Konzept der Fertigungsanlage

Die Module der Anlage werden in die Lage versetzt, in Abhängigkeit vom Materialzustand und den Umgebungsbedingungen die Fertigungsparameter selbstständig auszuwählen und anhand des Fertigungsergebnisses deren Güte zu bewerten. Dieser stetige Lernprozess wird dabei einerseits die Wirkzusammenhänge zwischen Prozessen und Fertigungsmitteln aufzeigen und andererseits das Fertigungsergebnis sukzessive verbessern, so dass die Prozesskette auch bei schwankenden Umgebungsbedingungen und Materialeigenschaften sicher durchgeführt werden kann.

Neben den bereits beschriebenen Herausforderungen beim Umformen des Kartons bestehen auch zwischen den Prozessschritten Abhängigkeiten. Da Karton kein ausgeprägtes Fließverhalten aufweist, legt sich das überschüssige Material beim Ziehen des Bechers in Falten. Diese Falten werden in die Zarge des Ziehwerkzeuges eingezogen und dort verpresst,

wodurch einerseits die Formstabilität des Bechers erreicht und andererseits seine Oberflächenbeschaffenheit definiert wird.

Neben den Eigenschaften des Bechers ist die Faltenverteilung aber auch für den Folgeprozess, das Versiegeln des Bechers, von großer Bedeutung. Je besser die Faltenverteilung beim Umformvorgang eingestellt werden kann, desto besser lässt er sich beim anschließenden Siegelvorgang der Becher verschließen. Ein wesentliches Ziel beim Umformprozess ist es daher, die Falten so klein wie möglich zu halten und diese homogen über dem Flansch zu verteilen. Um dieses Ziel zu erreichen, ist es notwendig, die Wirkzusammenhänge zwischen den Einstellparametern und dem Material zu kennen und daraus die richtigen Schlussfolgerungen für den aktuellen Zustand des Gesamtsystems aus Material, Werkzeug und Maschine zu ziehen.

3 Anlagenübergreifende Datenerfassung und –verarbeitung

Die Ermittlung der Wirkzusammenhänge in der Fertigungsanlage erfordert zunächst die Kenntnis der Zielgrößen der einzelnen Prozesse und aller darauf einwirkenden Einflussparameter. Alle für den Fertigungsprozess und die Qualitätskontrolle notwendigen Parameter müssen während der Herstellprozesse bzw. Versuche erfasst werden und fließen als Daten in einem Technologiendatenmanagementsystem (TDM) zusammen. Das TDM integriert die Daten, die häufig aus unterschiedlichen Quellen (wie z.B. der Steuerung, verschiedenen Messgeräten zur Qualitätsbestimmung oder auch Qualitätsbewertungen durch den Anlagenbediener) kommen, und stellt deren Analysefähigkeit her. Grundlage für die Strukturierung der Daten ist ein grafisches Prozessmodell. Ein Beispiel dafür ist im **Bild 2** dargestellt. Im Prozessmodell werden die Daten den Parametern der Anlagenkomponenten sowie des Werkstücks eindeutig zugeordnet [7]. Mit der Analysefunktionalität des TDM lassen sich unterschiedliche Fragen an das Fertigungssystem beantworten. Mit der Sichtweise auf die Anlage mit deren Komponenten können Zustände angezeigt sowie deren Entwicklung analysiert werden. Mit Sicht auf die Parameter der Becher kann die Entwicklung der hergestellten Qualität analysiert werden. Durch Verknüpfung beider Datenbereiche ist die Berechnung von Parameterwechselwirkungen, wie die Zusammenhänge zwischen Prozesseinstellparameter, Störgrößen und Qualitätsparametern, möglich. Für eine systematische und dennoch effiziente Untersuchung der Parameterwechselwirkungen werden die TDM-Funktionen zur statistischen Versuchsplanung [8] verwendet. Mit den Versuchsreihen werden Korrelationsmodelle für den Fertigungsprozess berechnet, die für zielgerichtete Prozessanpassung bei Parameterschwankungen bspw. der Papierqualität eingesetzt werden können. Werden diese Korrelationsmodelle in die Steuerung integriert, wird eine Prozessregelung möglich [6].

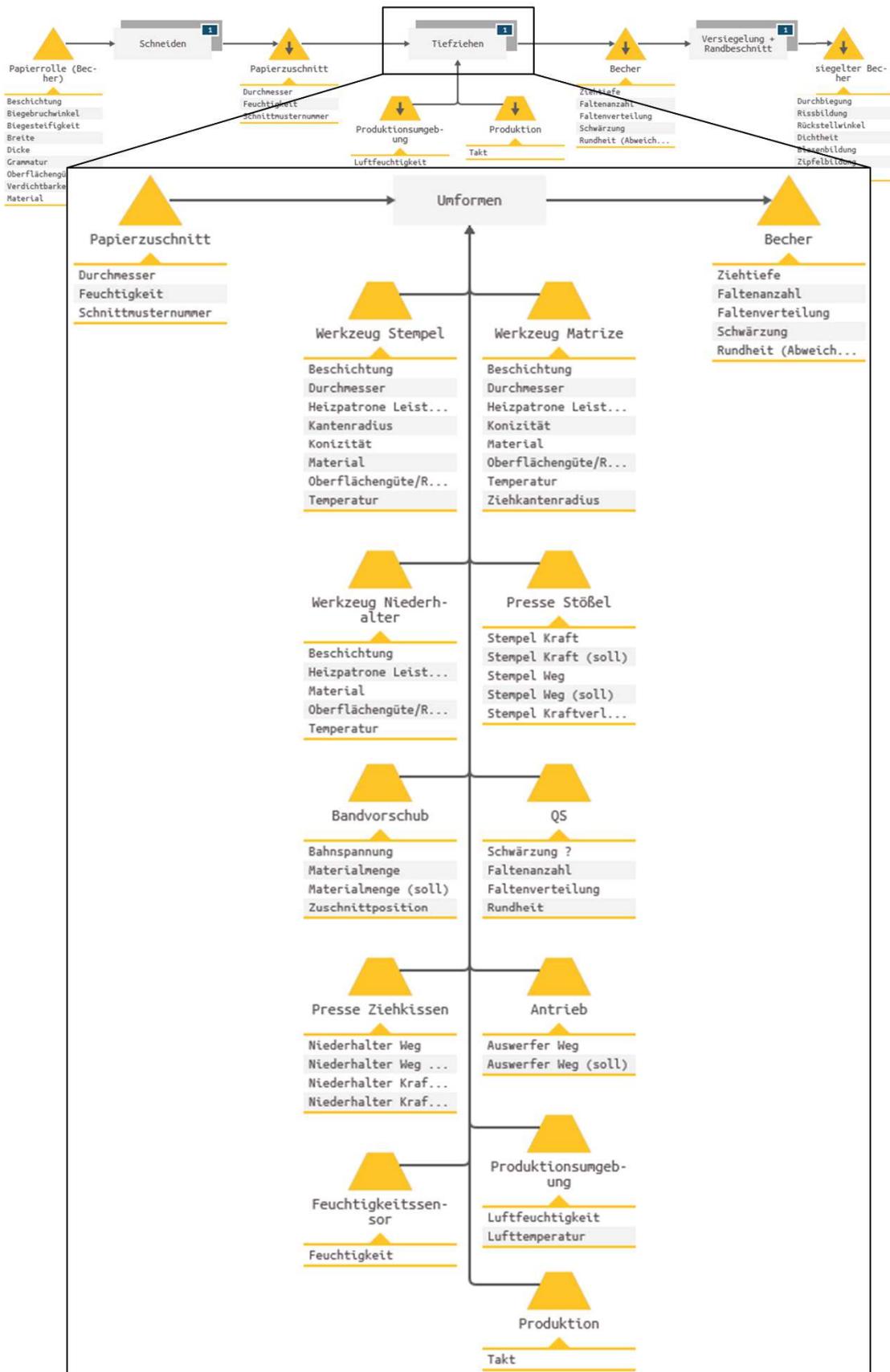


Bild 2: Modell zur Erfassung der Fertigungsdaten im Technologiedatenmanagementsystem „Detact“

4 FE-Modell des Kartonumformprozesses

Die numerische Berechnung des Kartontiefziehprozesses erfolgte mit Hilfe des FE-Solver LS-DYNA. Die Durchführung einer Sensitivitätsanalyse zur Ermittlung der Empfindlichkeit einzelner Kennwerte auf Schwankungen der Eingangsparameter erfordert eine große Anzahl an virtuellen Experimenten und setzt ein recheneffizientes Simulationsmodell voraus. Aufgrund der Orthotropie des Kartonwerkstoffes muss zur korrekten Abbildung des Tiefziehens eines rotationssymmetrischen Kartonbechers wenigstens ein Viertelmodell des Prozesses eingesetzt werden (**Bild 3 a**). Die Reibungsverhältnisse zwischen Kartonwerkstoff und metallischen Werkzeugoberflächen sind abhängig von einer Vielzahl von Einflussgrößen wie z.B. der Kontakttemperatur, der Relativgeschwindigkeit, der Anzahl durchgeführter Hübe und der Oberflächenbeschaffenheit des Tiefziehwerkzeuges [2]. Im hier genutzten Prozessmodell wurden Messwerte von Lenske et al [2] zur Abbildung der Temperaturabhängigkeit der Gleitreibungszahl μ_G verwendet (**Bild 3 b**). Der Wert von μ_G nimmt signifikant mit steigender Kontakttemperatur ab. Des Weiteren floss die Temperaturabhängigkeit der mechanischen Eigenschaften des Kartonwerkstoffes in die Prozessmodellierung ein (**Bild 3 c**). Der Einfluss der Feuchtigkeit auf das mechanische Verhalten des Kartons ist signifikant [3], wurde aber im vorliegenden Prozessmodell noch nicht berücksichtigt und stellt Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten dar.

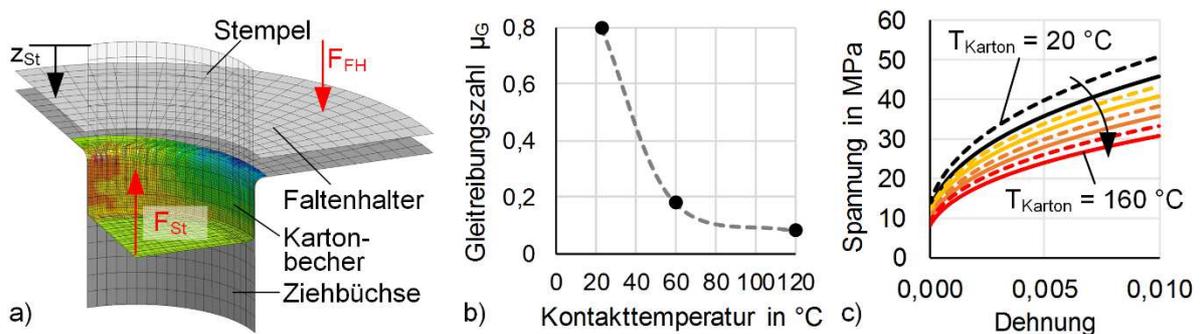


Bild 3: a) FE-Prozessmodell; b) Abhängigkeit der Gleitreibungszahl (Karton/Edelstahl) von der Kontakttemperatur; c) Abhängigkeit der Fließspannung von der Kartontemperatur

Das erörterte FE-Prozessmodell wurde im Anschluss für eine erste, explorative Einflussanalyse eingesetzt. Dabei wurden die Empfindlichkeiten der Kennwerte: maximale Stempelkraft $F_{St,max}$, Flanscheinzug, maximale Bauteiltemperatur $T_{BT,max}$ und maximale

Bauteilausdünnung auf Änderungen der Werkzeugtemperatur T_{WZ} und der Faltenhalterkraft F_{FH} bewertet (**Bild 4**).

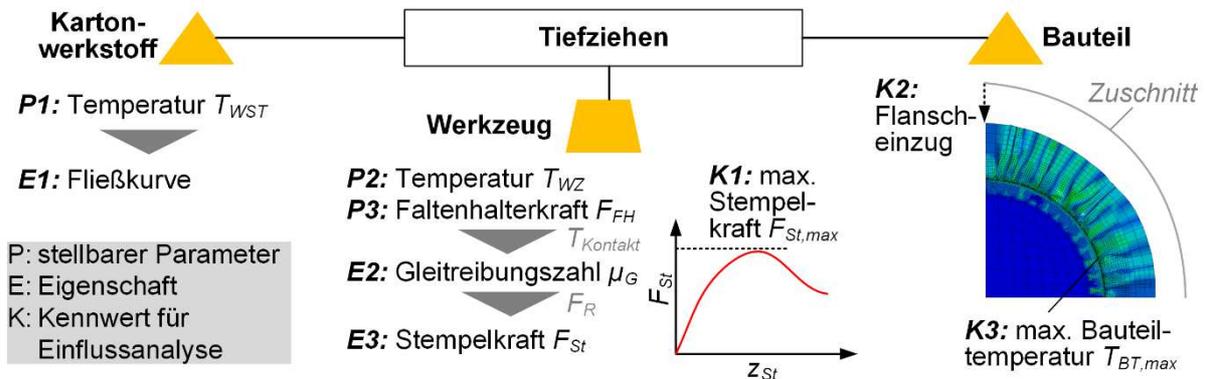


Bild 4: Parameter-Eigenschafts-Korrelationsmethode zur Bewertung des Einflusses möglicher Stellparameter auf qualitätsbestimmende Prozess- und Bauteilkennwerte

Weitere wichtige Kenngrößen für die Qualität des Kartonbechers stellen die Anzahl und die Verteilung der Falten am Flanschbereich des Bauteils dar. Mit Hilfe des Simulationsmodells kann der Einfluss der Faltenhalterkraft auf diese Kennwerte berechnet werden (**Bild 5**). Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Anzahl der Falten durch die Erhöhung der Faltenhalterkraft deutlich gesteigert und deren individuelle Höhe reduziert werden kann (**Bild 5** links und Mitte). Derzeit wird an einer Vorgehensweise zur automatischen Auswertung dieser Kennwerte geforscht, um diese für Sensitivitätsanalysen und weiteren Methoden des Maschinellen Lernens verfügbar zu machen. Die berechneten Stempelkraftverläufe für die Faltenhalterkräfte von 2 kN und 4 kN (**Bild 5** rechts) spiegeln die gemessenen Kraftverläufe in [1] qualitativ wieder.

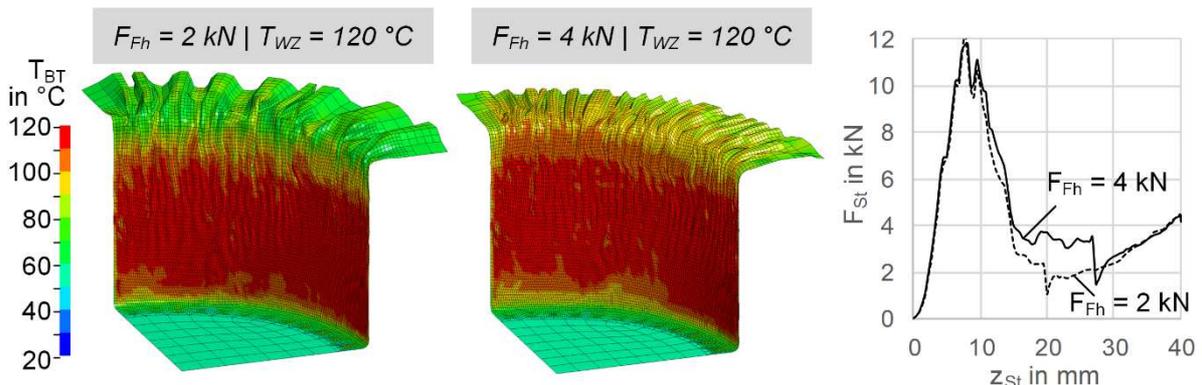


Bild 5: links und Mitte: Einfluss der Faltenhalterkraft und der Werkzeugtemperatur auf die Faltenbildung im Flanschbereich; recht: Einfluss der Faltenhalterkraft auf die resultierende Stempelkraft

5 Wirkzusammenhänge und Methoden zur Technologieregelung

Für ein sich selbst optimierendes Fertigungssystem werden datengetriebene Modelle benötigt, auf deren Grundlage eine prozessdatenbasierte Regelung entwickelt werden kann. Anhand des in Abschnitt 4 beschriebenen FE Modells wurde ein solches Modell für den Prozessschritt der Kartonumformung entwickelt. Dabei wurden 225 Simulationen mittels eines raumfüllenden Versuchsplanes [4] für die Untersuchung der Wirkzusammenhänge berechnet. Variiert wurden die Werkzeugtemperatur in einem Fenster von 80 °C – 200 °C, die Kartontemperatur von 18 °C – 30 °C und der Faltenhalterkraft in einem Bereich von 1 kN – 10 kN.

Die Wirkzusammenhänge zwischen diesen Eingangsgrößen und verschiedenen Messgrößen an der Anlage und dem Bauteil können in einem Streudiagramm (**Bild 6**) dargestellt werden.

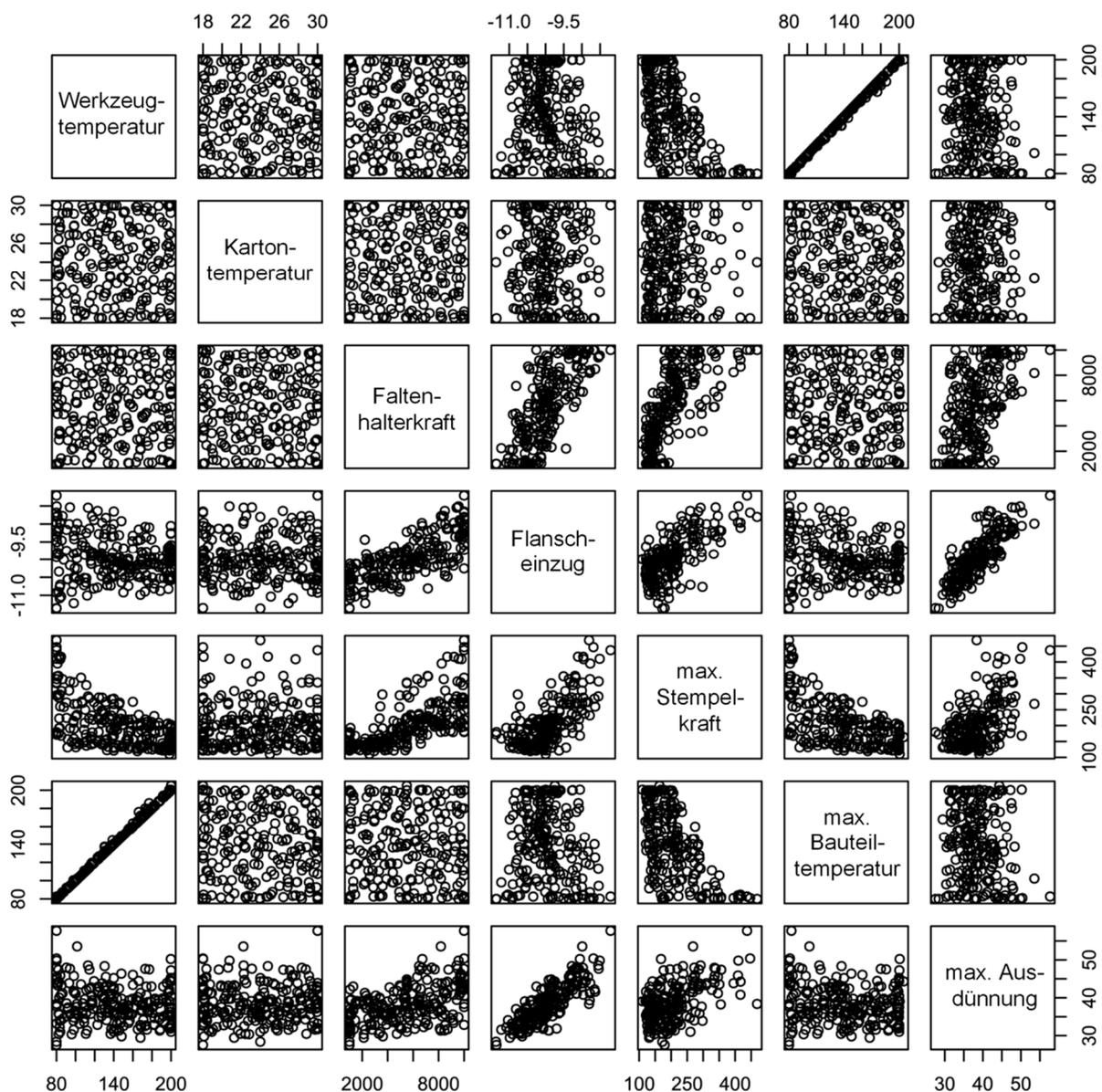


Bild 6: Streudiagramm der Wirkzusammenhänge des FE-Prozessmodells zum Tiefziehen von Karton

Die Auswertung des Diagramms zeigt, dass die Prozessparameter Werkzeugtemperatur und Faltenhalterkraft sowie die Eingangsgröße der Kartontemperatur in keinem Zusammenhang zueinander stehen und über den gesamten Parameterraum verteilt sind. Es lässt sich eine eindeutige lineare Abhängigkeit der maximalen Bauteiltemperatur von der Werkzeugtemperatur erkennen. Das bedeutet, dass die Bauteiltemperatur direkt über die Werkzeugtemperatur geregelt werden kann. Zudem wird deutlich, dass die Kartontemperatur, also die Ausgangstemperatur des Halbzeuges, im vorliegenden Modell keinen wesentlichen Einfluss auf die Bauteiltemperatur hat.

Für die Einstellgrößen Werkzeugtemperatur und Faltenhalterkraft sind Einflüsse auf die Zielparameter der Stempelkraft, dem Flanscheinzug und die max. Ausdünnung vorhanden.

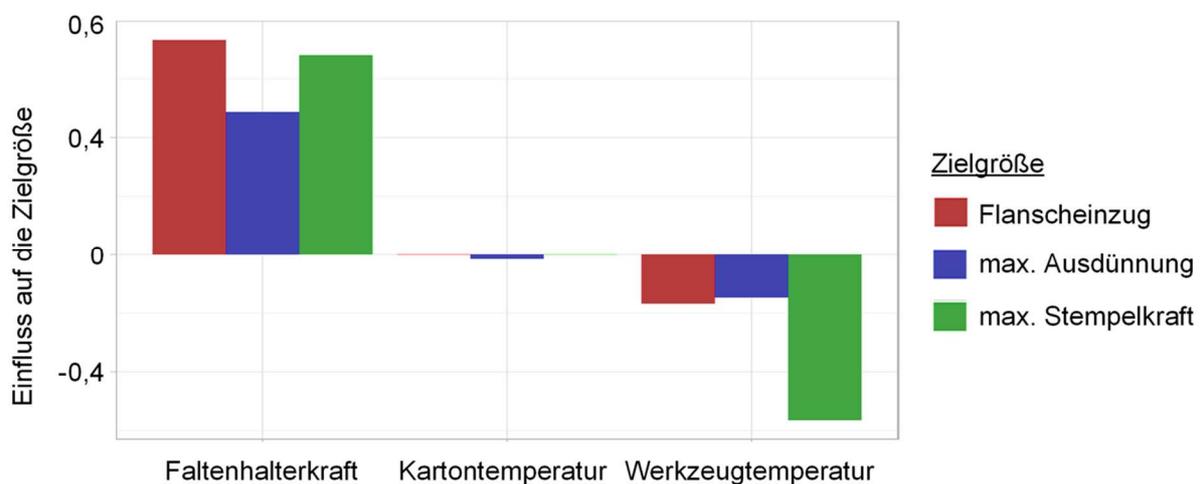


Bild 7: Sensitivitätsanalyse der Modelldaten

Die Sensitivitätsanalyse in **Bild 7** bestätigt, dass die Kartontemperatur keinen signifikanten Einfluss auf den simulierten Umformprozess hat. Die größte Wirkung auf die Zielparameter hat die Faltenhalterkraft. Der Einfluss der Werkzeugtemperatur ist demgegenüber weniger stark und ist von negativer Ausprägung, d.h. eine höhere Werkzeugtemperatur führt zu einem geringeren Wert der Zielgrößen. Am Stärksten ist dieser Effekt auf die maximale Stempelkraft aufgrund der Temperaturabhängigkeit der Gleitreibungszahl und der Fließspannung.

Basierend auf den Ergebnissen der Sensitivitätsanalysen beschränkt sich die Modellierung der Zielparameter auf die Einstellgrößen Werkzeugtemperatur T_{WZ} und Faltenhalterkraft F_{FH} . Im Folgenden wird beispielhaft die Modellierung für die Zielgröße Flanscheinzug mit Hilfe eines quadratischen Regressionsmodells vorgestellt. Der Flanscheinzug D_{FE} kann nach iterativer Vereinfachung und Ausschluss nicht-signifikanter Einflussgrößen durch die folgende Gleichung beschrieben werden.

$$D_{FE} = -11,73 + 0,007341 * T_{WZ} + 0,0003470 * F_{FH} - 1,802 * 10^{-6} * T_{WZ} * F_{FH} + 5,8231 * 10^{-9} * (F_{FH})^2$$

Die Gleichung beschreibt die Auswirkungen der Faltenhalterkraft und der Werkzeugtemperatur auf den Flanscheinzug der sich durch die in **Bild 8** links gezeigte Fläche darstellen lässt .

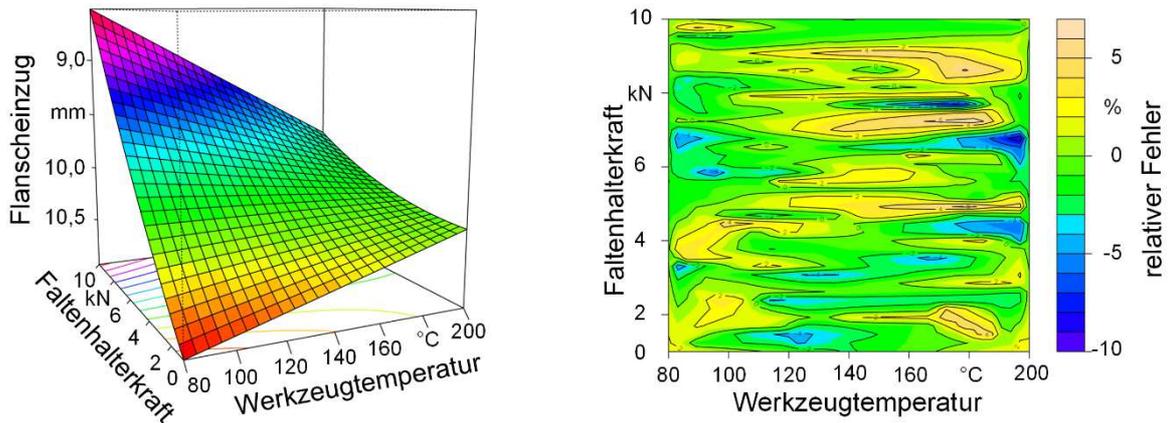


Bild 8: Flanscheinzug in Abhängigkeit von Faltenhalterkraft und Werkzeugtemperatur; links: Modell; rechts: relativer Fehler des Modells

Die Auswertung der Gleichung ergibt, dass die Faltenhalterkraft einen nichtlinearen, quadratischen Einfluss auf den Flanscheinzug hat. Des Weiteren gibt es einen Wechselwirkungseffekt zwischen Werkzeugtemperatur und Faltenhalterkraft, der den direkten Einfluss der Faltenhalterkraft auf den Flanscheinzug bei hohen Werkzeugtemperaturen verringert. Dies ermöglicht eine stärkere Variation der Faltenhalterkraft bei geringer Veränderung des Flanscheinzugs. Dadurch vergrößert sich bei höherer Werkzeugtemperatur das Prozessfenster zur Optimierung der Faltenanzahl und Faltenverteilung. Dieses mathematische Modell kann aufgrund seiner Vorhersagequalität mit absoluten Abweichungen von weniger als 10% (**Bild 8** rechts) zur Prozessoptimierung und somit zur Technologieregelung verwendet werden. Durch die explizite Beschreibung der Wirkzusammenhänge können bei abweichenden Prozessergebnissen mit Hilfe des Gradientenverfahrens die Einstellparameter so angepasst werden, dass die Kennwerte des Umformprozesses wieder im vorhergesehenen Bereich liegen. Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten ist die Erweiterung der datenbasierten Prozessmodellierung auf die ganze Prozesskette. Dies umfasst sowohl tieferegehende Maschinelle Lernalgorithmen wie die „Support Vector Machine Regressions“ oder die Methode der Entscheidungsbäume zur Analyse und zur Beschreibung der komplexen Wirkzusammenhänge, als auch darauf aufbauende mehrdimensionalen Optimierungsverfahren zur Prozessoptimierung und Steuerung.

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben Nr. 18259 BR - "Intelligente Konsumgüterproduktion" der Industrievereinigung für Lebensmitteltechnologie und Verpackungen e.V, Giggerhauser Str. 35, 85354 Freising wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Literatur

- [1] HAUPTMANN, M.: *Die gezielte Prozessführung und Möglichkeiten zur Prozessüberwachung beim mehrdimensionalen Umformen von Karton durch Ziehen*, TU Dresden, Diss., 2010
- [2] LENSKE, A.; MÜLLER, T.; PENTER, L.; SCHNEIDER, M.; HAUPTMANN, M. ; MAJSCHAK, J.-P.: Evaluating the factors influencing the friction behavior of paperboard during the deep drawing process. In: *BioResources* 12 (2017), Nr. 4, S. 8340–8353
- [3] SALMEN, L.: *Temperature and water induced softening behaviour of wood fiber based materials*. Stockholm, KTH The Royal Institute of Technology, Diss., 1982
- [4] SANTER, T. J.; WILLIAMS, B. J.; NOTZ, W. I.: *The design and analysis of computer experiments*. Springer Science & Business Media, 2013
- [5] SCHENKE, C.; FINGER, P.; IHLENFELDT, S.: Intelligente Konsumgüterproduktion - Modulares, vernetztes Fertigungssystem zur Herstellung nachhaltiger Packmittel aus Karton. In: *ZWF - Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* (2017), Nr. 6, S. 425–429
- [6] WIEMER, H.; HELLMICH, A.; IHLENFELDT, S.: A holistic approach for developing and commissioning data driven CPPS functionality in manufacturing systems. In: *5th International Conference on Advanced Manufacturing Engineering and Technologies, NEWTECH 2017. Proceedings*, 257-265
- [7] WIEMER, H.; MÜLLER, T.; HAUPTMANN, M.; MAJSCHAK, J.-P.: Effiziente Entwicklung komplexer Umformprozesse faserbasierter Materialien durch Methoden des Technologiedatenmanagements. In: *Tagungsband zur 8. wissenschaftlichen Fachtagung Verarbeitungsmaschinen und Verpackungstechnik (VVD)*, 2015, S. 301–320
- [8] WIEMER, H.; SCHWARZENBERGER, M.; DIETZ, G.; JUHRISCH, M.; IHLENFELDT, S.: A holistic and DoE-based approach to developing and putting into operation complex manufacturing process chains of composite components. In: *1st Cirp Conference on Composite Materials Parts Manufacturing" Available online at www.sciencedirect.com*, 2017, S. 147–152