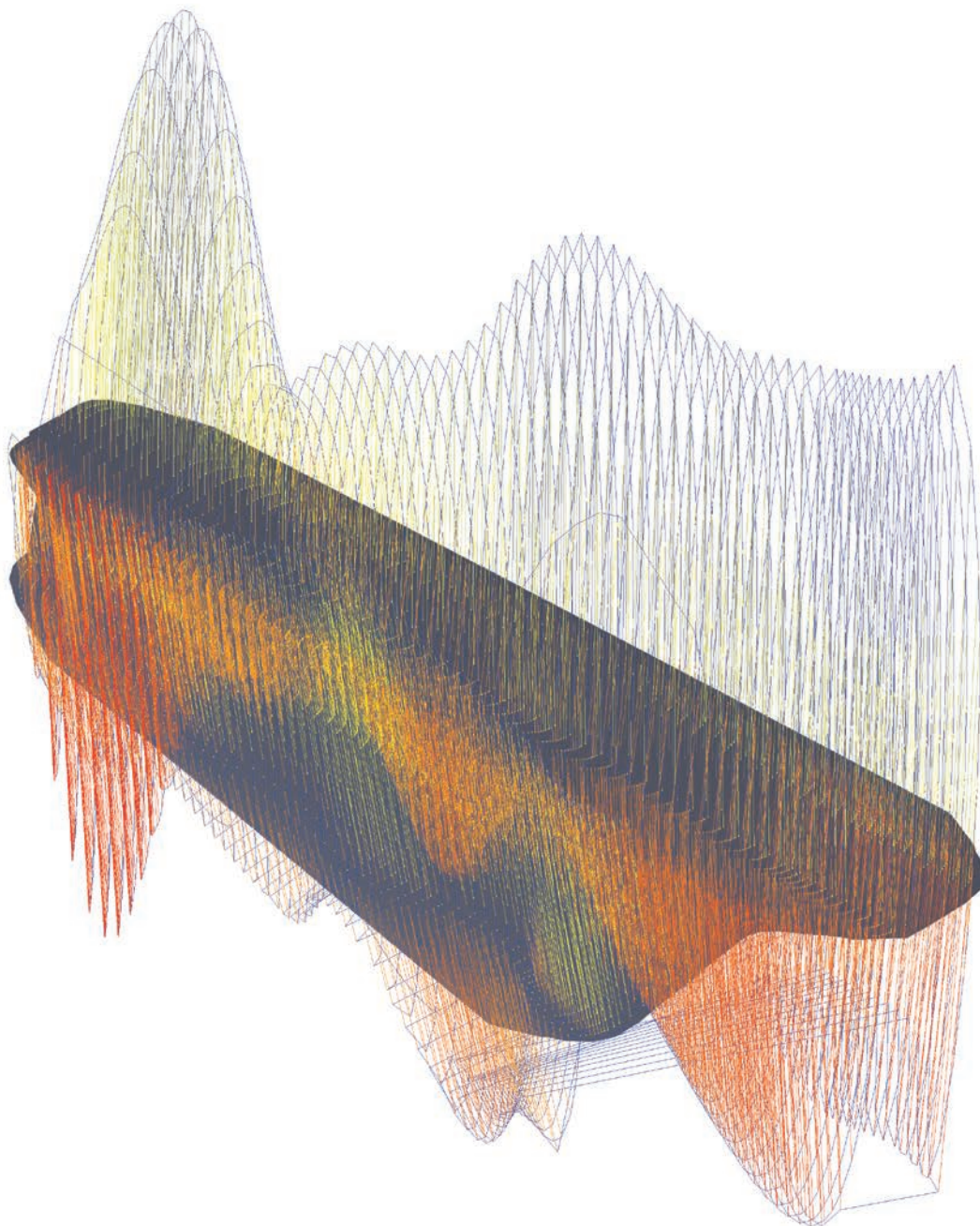


Geometriebasierte prozessbegleitende Abweichungskompensation

Aufgrund der Vielzahl komplex wechselwirkender Einflussgrößen bei der Massivumformung erfolgt die Werkzeugauslegung und -konstruktion oft in mehreren, auch manuellen und erfahrungsbasierten Schritten. Durch den vorgeschlagenen prozessintegrierten und rein geometriebasierten Ansatz ist es möglich, die Werkzeugauslegung und -konstruktion zu systematisieren und zu automatisieren.



AUTOREN



**Matthias Eder,
M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München



**Christoph Hartmann,
M.Sc.**

ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München



**Prof. Dr.-Ing.
Wolfram Volk**

ist Ordinarius des Lehrstuhls für Umformtechnik und Gießereiwesen der Technischen Universität München

Die Auslegung und Konstruktion von Gesenken für die Massivumformung stellt sich als Aufgabe von besonderer Komplexität dar. Die Wechselwirkungen des thermo-elastisch-plastischen Materialverhaltens während der Deformation sowie des Werkzeug-Werkstück-Systemverhaltens erlauben in vielen Fällen keine ausreichend präzise numerische Abbildung des Prozesses und somit eine nur unzureichend robuste und stabile Detektion von Prozessfenstern. Dies bedingt einen erhöhten Bedarf an prototypischen Werkzeugen und einen gesteigerten Kontrollaufwand im Prozess. Die digitale beziehungsweise numerische Unterstützung der Auslegungs- und Konstruktionsprozesse in der Massivumformung findet derzeit in keiner ganzheitlichen Umgebung statt, sondern gliedert sich in eine konstruktive sowie eine simulative Seite. Die auf Simulationsergebnissen basierende, geometrische Werkzeuganpassung beinhaltet derzeit aufgrund dieser Trennung aufwendige manuelle Rekonstruktionsprozesse zwischen diskreten Ergebnis- und Messdaten sowie parametrischen CAD-Daten. Daraus resultiert, dass die Auslegung neuer Massivumformprozesse gegenwärtig mitunter zu einem wesentlichen Anteil manuell und im Trial-and-Error-Verfahren erfolgt, was lange Entwicklungszeiten verbunden mit hohen Kosten nach sich zieht.

PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Aufgrund der hohen Komplexität sind bei der Auslegung der Prozesse häufig mehrere Iterationen notwendig, um Abweichungen am Bauteil zu kompensieren [1]. Drei Kernaspekte sind für die Effektivität und Effizienz einer Abweichungskompensation von entscheidender Bedeutung:

- Separierung von deterministischen und stochastischen Abweichungen
- datenbasierte Systematik bei der Modifikation der Werkzeuggeometrie
- Überführung diskreter Werkzeuggeometrie in parametrisierte Konstruktionsdaten

Die Modifikation der Werkzeuggeometrie basiert derzeit auf unterschiedlichen Herangehensweisen, die sich zumeist auf Erfahrungswissen des Unternehmens beziehungsweise jedes

einzelnen Handelnden stützen. Eine grundlegende Herausforderung ist die Analyse eines Bauteils mit Maßabweichungen und die punktweise Eins-zu-Eins-Zuordnung zwischen Werkzeuggeometrie und gefertigtem Bauteil. Sämtliche existierende Ansätze arbeiten dabei ohne einen systematischen und eindeutigen mathematischen Zusammenhang zwischen materiellen Punkten des Werkzeugs und entsprechenden Punkten auf dem Bauteil. Die auftretenden Abweichungen am Bauteil werden in der jeweiligen Iteration folglich in nicht eindeutiger unsystematischer Weise in eine Modifikation des Werkzeugs übersetzt. Selbiger Aspekt bedingt ebenfalls, dass eine Überführung der diskreten Werkzeuggeometriedaten, abgeleitet aus diskreten Bauteildaten (Simulationsergebnis oder Realmessung), in eine parametrisierte Konstruktion nur schwer möglich ist.

Ziel einer durch den Industrieverband Massivumformung e. V. finanzierten Vorstudie war es, einen allgemeingültigen systematischen Ansatz aufzuzeigen, welcher sowohl die komplexen Wechselwirkungen im Prozess als auch die Problematik der Geometrierückführung in den parametrisierten Raum berücksichtigt.

LÖSUNGSANSATZ UND VORGEHENSWEISE

Der erarbeitete alternative Modellierungsansatz rekrutiert sich aus einer ausschließlich geometrischen Herangehensweise, welche die Basis der Allgemeingültigkeit bildet. Kernelemente bilden einerseits die Möglichkeit der eindeutigen Zuordnung diskreter Daten auf parametrisierte Beschreibungen von Werkzeug und Bauteil auf Basis einer Kontrollpunktdarstellung sowie andererseits daraus abgeleitet eine systematische Vorgehensweise bei der Kompensation, wie sie schematisch in Bild 1 dargestellt ist [2, 3]. Hierfür werden in der Konstruktion für das Bauteil im CAD-Umfeld sogenannte Kontrollpunkte auf der Sollgeometrie definiert. Identische materielle Punkte werden ebenfalls im CAD-Umfeld auf der Werkzeugoberfläche identifiziert, wodurch sich Paare von Kontrollpunkten auf Bauteil und Werkzeug ergeben. Die Kontrollpunkte dienen als Stützelemente für eine äquivalent parametrisierte Flächenrepräsentation des Bauteils und des Werkzeugs, die eine ein-

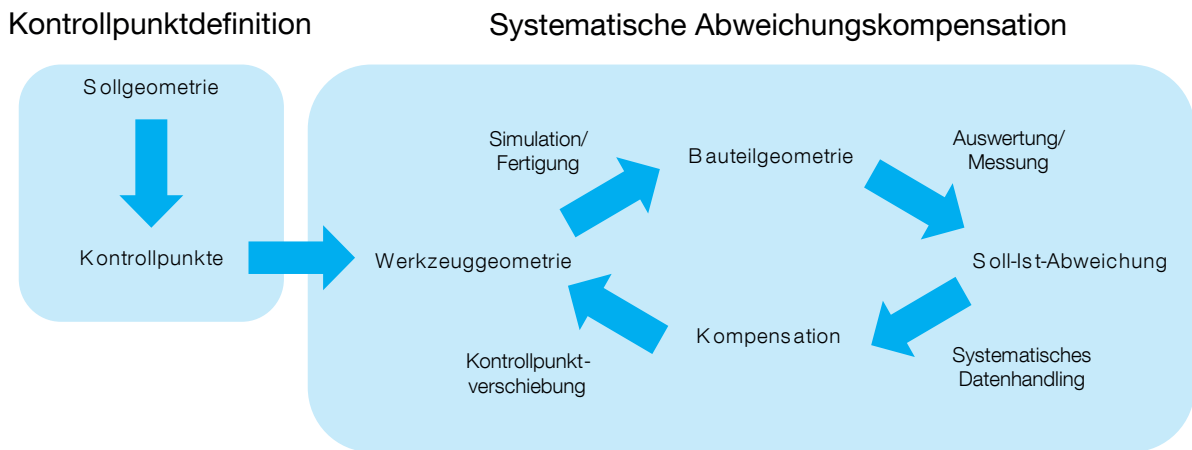


Bild 1: Schematische Darstellung des Ansatzes zur geometriebasierten prozessintegrierten Abweichungskompensation auf Basis vordefinierter Kontrollpunkte

deutige Zuordnung materieller Punkte zulässt. Durch eine Verschiebung der Kontrollpunkte im Raum kann ein sogenanntes „Shape-Morphing“ der Bauteil- beziehungsweise der Werkzeuggeometrie erreicht werden, welches zwischen diskreten und parametrisierten Daten übersetzt. Eine Punkt-zu-Punkt-Zuordnung der Kontrollpunktpaare ist aufgrund der parametrisierten Beschreibung auch stets nach dem „Shape-Morphing“ möglich, weshalb gezielte Verschiebungen der Kontrollpunkte Kompensationsvorschriften für das parametrisierte CAD-Werkzeug darstellen können. Grundsätzlich gibt es für die Definition der Kontrollpunkte zwei Möglichkeiten:

- systematische Festlegung
- Adaption vorhandener Messpunkte

Anzahl und Ort der Kontrollpunkte richten sich bei der systematischen Festlegung nach den zulässigen Toleranzfeldern aus der Auslegung und Konstruktion des Bauteils. Die Kontrollpunktdefinition beinhaltet die Definition der Referenzlage zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit der Vermessungen und legt diejenigen Bereiche der Bauteilgeometrie fest, welche zur Beurteilung des Bauteils hinsichtlich der Maßhaltigkeit kritisch sind. Die geforderten Toleranzen an den kritischen Bauteilbereichen müssen in der Kontrollpunktdefinition auflösbar sein und begrenzen somit die minimale Anzahl der benötigten Kontrollpunkte.

Die zweite Möglichkeit der Kontrollpunktdefinition lässt es zu, das Verfahren auch in bestehende Prozesse zu integrieren, indem bestehende Messpunkte auf dem Bauteil als Kontrollpunkte definiert werden. Die Qualität der Flächenrepräsentation ist hierbei zu prüfen und gegebenenfalls durch Hinzunahme weiterer Kontrollpunkte zu steigern.

Basierend auf der Kontrollpunktdefinition können sowohl Bauteil- als auch Werkzeuggeometrie systematisch verarbeitet werden. Die lokale Abweichungsinformation am jeweiligen Kontrollpunkt stellt die Basis für die Abweichungskompensation dar. Durch die Äquivalenz der materiellen Punkte auf Werkzeug und Bauteil kann eine lokal detektierte Abweichung direkt einem Ort auf der Werkzeugoberfläche zugeordnet und dort geeignet kompensiert werden. Die aktuelle Bauteilgeometrie wird an den Kontrollpunkten mit der Soll-Geometrie verglichen, um die dortigen Abweichungen zu ermitteln. Die Werkzeuggeometrie wird schließlich entsprechend der Maßabweichungen über eine Abbildungsvorschrift modifiziert. Da Geometrieanpassungen am Werkzeug im nächsten Fertigungsschritt wiederum den Umformprozess beeinflussen, kann gegebenenfalls ein iteratives Vorgehen notwendig sein [1]. Die Konturabweichungsinformation kann dabei aus sämtlichen kontinuierlichen oder diskreten Bauteildaten ermittelt werden. In der Regel kommen an dieser Stelle taktile oder 3D-Messdaten sowie Simulationsergebnisse zum Einsatz. Die Abbildungsvorschrift ist durch Invertierung der Maßabweichungen umgesetzt worden, was dem intuitiven Vorgehen entspricht, nach welchem die Bauteilabweichungen an jeweils zugehörigen materiellen Punkt des Werkzeugs in entgegengesetzter Richtung kompensiert werden müssen.

UNTERSUCHUNGSERGEBNISSE

Oben dargestellte Vorgehensweise zur Abweichungskompensation von Massivumformteilen wurde an Demonstratorbauteilen unterschiedlicher Charakteristik erprobt. Die bereits industriell gefertigten Bauteile weisen vor einer betriebsinternen manuellen Optimierung systematische, das heißt deterministische Konturabweichungen auf. Für die betrachteten Bauteile

sind Datensätze unterschiedlicher Form aus den einzelnen Iterationsschritten in der Prozessauslegung bereitgestellt worden. CAD-Daten des Bauteils und des Werkzeugs sowie entsprechende Konstruktionszeichnungen, 3D-Messdaten der Bauteile und der Werkzeuge sowie taktile Abweichungsanalysen sind in die numerische Abweichungskompensation eingegangen.

Bild 2 zeigt die zur Erprobung der Abweichungskompensation verwendeten Bauteile. Dabei handelt es sich um ein halbwarm umgeformtes Pressteil für eine Antriebswelle (①, oben links), eine Turbinenschaufel (②, oben Mitte) sowie ein Zahnrad eines Differentialgetriebes (③, oben rechts). Der bezüglich Abweichungen relevante Durchmesser bei Bauteil ① ist blau ge-

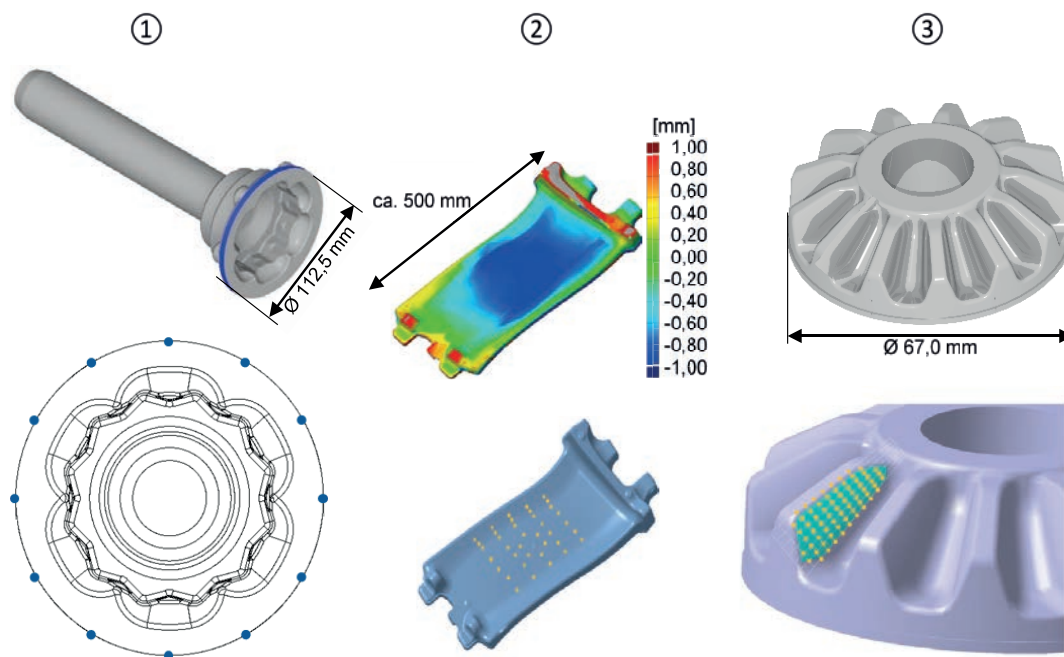


Bild 2: Real gefertigte Bauteile zur Erprobung der Abweichungskompensation (oben). Daraus abgeleitete Geometriebeschreibung auf Basis von Kontrollpunkten (unten) vordefinierter Kontrollpunkte

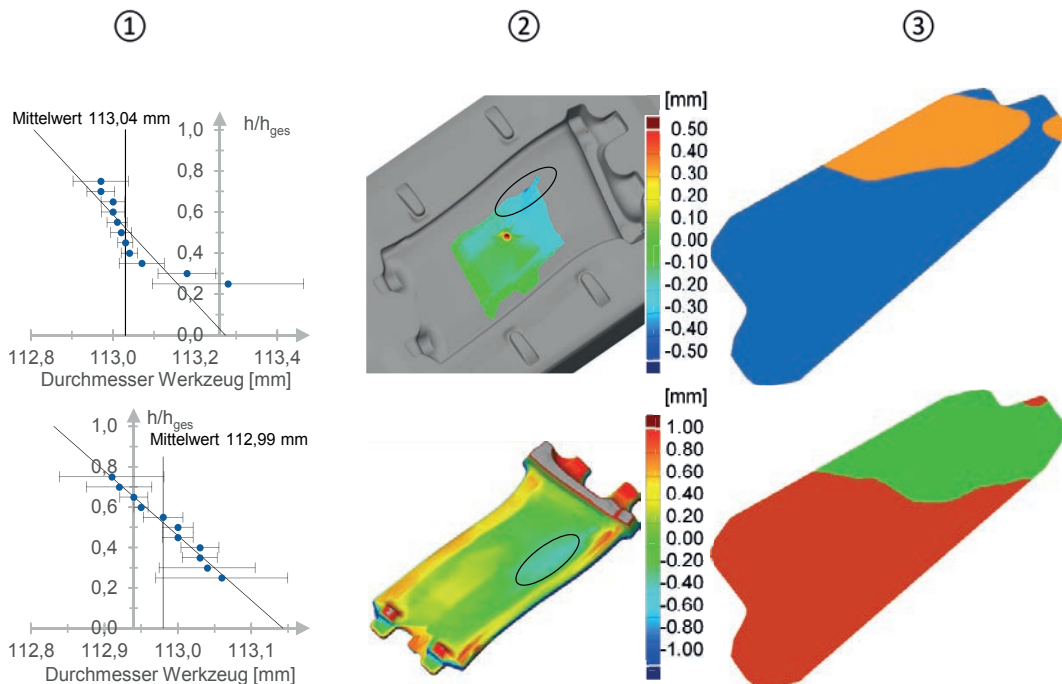


Bild 3: Ergebnisse der Abweichungskompensation

Bilder: Autoren

kennzeichnet. Dieser wurde entsprechend einer vorhandenen Messstrategie mit zwölf gleichverteilten Kontrollpunkten über den Durchmesser parametrisiert, wodurch die Geometriemodellierung von 3D auf 2D reduziert wurde (Bild 2, unten links). Bei Bauteil ② gilt als abweichender Bauteilbereich die zentrale Freiformfläche der Schaufel. Die Kontrollpunkte wurden in diesem Fall systematisch entsprechend der Toleranzanforderungen definiert, woraus eine Flächenbeschreibung mit 38 Kontrollpunkten resultierte (Bild 2, unten Mitte). Die zu kompensierenden Zahnflanken ③ wurden gemäß der verwendeten Messstrategie mittels 66 Kontrollpunkten parametrisiert (Bild 3, unten rechts).

Bild 3, oben links zeigt für Bauteil ① das Ergebnis der numerischen Abweichungskompensation in der ersten Iteration. Der Schnittpunkt von Abszisse mit Ordinate gibt den zur Fertigung der Bauteilgeometrie verwendeten Durchmesser im Werkzeug an. Die Punkte kennzeichnen den Kompensationsvorschlag auf Basis des numerischen Kompensationsmodells über verschiedene Bereiche der relevanten Abmessung. Zudem sind der Mittelwert, die Standardabweichungen und eine Ausgleichsgerade grafisch dargestellt. In Bild 3, unten links ist das Ergebnis der Numerischen Abweichungskompensation für das unternehmensseitig aktualisierte Werkzeug für Bauteil ① dargestellt. In beiden Iterationsschritten resultiert, basierend auf der numerischen Abweichungskompensation, eine konische Werkzeuggeometrie mit reproduziertem Mittelwert. Somit ist es neben der reinen Skalierung der Werkzeuggeometrie möglich, zusätzlich Freiheitsgrade für die Kompensation zu erlauben.

In Bild 3, oben Mitte ist für Bauteil ② der Vergleich zwischen dem unternehmensseitigen Kompensationsvorschlag und dem Vorschlag aus dem entwickelten numerischen Verfahren gezeigt. Markiert ist dabei der Bereich, der hinsichtlich der syste-

matischen Kompensation stärker kompensiert worden wäre. Der äquivalente Bereich ist ebenfalls im unternehmensseitig gefertigten Bauteil aus Iteration zwei gekennzeichnet (Bild 3, unten Mitte). Dieser Bereich zeigt auch nach Kompensation Maßabweichungen am Bauteil. Es ist dort folglich in zu geringem Maße kompensiert worden. Die Beobachtungen lassen vermuten, dass mit der berechneten Kompensation ebenfalls bereits nach einer einzigen Iteration ein Gutteil hergestellt werden kann.

Bei Bauteil ③ wurde die numerische Kompensation für Toleranzanforderungen im μm -Bereich angewendet. Bild 3, oben rechts zeigt den Vergleich der unternehmensseitigen Kompensation mit der systematischen. Im Vergleich zum Bauteil, das mit dem unternehmensseitig kompensierten Werkzeug hergestellt wurde, führen blaue Bereiche zu positiven Abweichungen, orange Bereiche würden zu negativen Abweichungen. In Bild 3, unten rechts sind die Abweichungen des gefertigten Bauteils zur Soll-Geometrie dargestellt. Grüne Bereiche verdeutlichen Abweichungen in positive Normalenrichtung, rote Bereiche in negative Normalenrichtung. Ein Vergleich von Bild 3, oben und unten rechts lässt die Vermutung zu, dass mithilfe der numerischen Kompensationsstrategie die Flanke des Zahnrads in einer Iteration zu einem Bauteil mit geringeren Abweichungen führen würde.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Aus der Anwendung der entwickelten numerischen Kompensation resultieren für sämtliche Beispielbauteile vielversprechende Ergebnisse. Die Analyse des Pressteils für eine Antriebswelle zeigte, dass über die reine Skalierung geometrischer Merkmale hinaus zusätzliche Freiheitsgrade gezielt in die Kompensationsstrategie aufgenommen werden können, zum Beispiel eine konische statt zylindrische Form der Werkzeuggeometrie.

Bei der Anwendung der Methode auf die Freiformfläche einer Schaufelgeometrie wird eine systematische Kontrollpunktdefinition angewendet und 3D-Messdaten zur Ermittlung der Kompensation herangezogen. Eine Anwendbarkeit der Methode bei deterministischen Abweichungen auch im μm -Bereich wird anhand eines Zahnrads dargestellt. In allen Beispielen zeigt sich, dass eine lineare Kompensation mit direkter Invertierung bereits nach einer Iteration gute Ergebnisse liefert.

Der vorgestellte Ansatz zur geometriebasierten prozessbegleitenden Abweichungskompensation besitzt aufgrund der alternativen Modellierungsmethodik eine Reihe von neuen Potenzialen. Die vorgestellte geometrische Beschreibung ist konsistent im gesamten Entwicklungsprozess einsetzbar, wodurch eine holistische Datenbasis umgesetzt werden kann. Basierend auf der Kopplung der Kontrollpunkte auf Bauteil und Werkzeug ist eine systematische Abweichungskompensation möglich, welche sich prinzipiell auch auf andere Fertigungsverfahren übertragen lässt.

Weitere Ergebnisse sollen durch Untersuchungen der Sinnhaftigkeit einer kontrollpunktspezifisch variablen Invertierung ermittelt werden. Dabei können geometrische, beispielsweise krümmungsabhängige oder materialspezifische Einflüsse analysiert werden. Ein nicht konstanter Kompensationsfaktor deutet dabei auf ein geometrisch nicht lineares Verhalten hin, wodurch eine nicht lineare Anwendung der Kompensationsstrategie notwendig würde. Des Weiteren sollten die Potenziale der

kontrollpunktbasierten Flächenrepräsentation eruiert werden. Dabei sollte eine automatisierte Kontrollpunktdefinition mit einer minimalen Anzahl benötigter Kontrollpunkte angestrebt werden, wobei beispielsweise eine Bauteilbeschreibung auf Basis von T-Splines zielführend sein kann.



Die Autoren bedanken sich bei allen Mitgliedern der Patengruppe der Vorstudie für die zahlreichen Diskussionen, die tatkräftige Unterstützung und das Engagement.



[1] Ponthot, J.-P.; Kleinermann, J.-P.; A cascade optimization methodology for automatic parameter identification and shape/process optimization in metal forming simulation, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 195, (2006), pp. 5472 – 5508

[2] Braibant, V; Fleury, C; Shape Optimal Design Using B-Splines, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.* 44, (1984), pp. 247 – 267

[3] Fourment, L; Chenot, J.L.; Optimal Design for Non-Steady-State Metal Forming Processes – I. Shape Optimization Method, *Int. J. Numer. Methods Eng.* 39, (1996). pp. 33 – 50