

Stadienplanung effizient und digitalisiert durchführen auf Basis der CAD-Geometrie des Schmiedeteils

Die Reduzierung der Planungs- und Entwicklungszeit für effiziente Stadienfolgen beim Genskschmieden bietet für Unternehmen der Schmiedebranche ein hohes Potenzial, um auf die Herausforderungen im Wettbewerb zu reagieren und konkurrenzfähig zu bleiben. Die Digitalisierung von Entwicklungsprozessen eröffnet den Unternehmen innovative Unterstützungsmöglichkeiten.

AUTOREN

**Yorck Hedicke-Claus, M. Sc.**

ist Abteilungsleiter Prozesstechnik
am IPH-Institut für Integrierte Produktion
Hannover gGmbH

**Dr.-Ing. Malte Stonis**

ist Koordinierender Geschäftsführer
am IPH – Institut für Integrierte Produktion
Hannover gGmbH

**Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens**

ist geschäftsführender Gesellschafter
am IPH-Institut für Integrierte Produktion
Hannover gGmbH und leitet das Institut
für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)
der Leibniz Universität Hannover

Die schnelle und effiziente Auslegung von Stadienfolgen gewinnt für die Unternehmen der Schmiedebbranche aufgrund immer komplexerer Schmiedeteile zunehmend an Bedeutung [1]. Außerdem entstehen durch die Entwicklung der Elektromobilität neue Bauteilgeometrien, für die es bisher wenig Referenzprozesse gibt und die daher ebenfalls eine Herausforderung darstellen. Eines der gängigsten Hilfsmittel zur Auslegung von Stadienfolgen sind FEM-Simulationen. Diese bieten die Möglichkeit, relevante Parameter zur Überprüfung der Qualität der Stadienfolge wie beispielsweise die Formfüllung oder das Auftreten von Falten zu analysieren. Zwischen Simulationsrichtung und Auslegungsrichtung besteht jedoch eine Gegenläufigkeit. Der Konstrukteur geht bei der Auslegung der Stadienfolge rückwärtsgerichtet vom Schmiedeteil bis zum Halbzeug vor. Die FEM-Simulation muss vorwärtsgerichtet vom Halbzeug hin zum Schmiedeteil durchgeführt werden. Aus dieser Gegenläufigkeit von Auslegungs- und Simulationsrichtung entsteht ein zeitaufwendiger, iterativer Prozess zur Auslegung von Stadienfolgen mittels FEM-Simulationen [2,3]. Mit Hilfsmitteln für eine schnelle und effiziente Auslegung von Stadienfolgen können klein- und mittelständische Unternehmen (KMU) schnell auf Auftragsanfragen reagieren und unter Einsatz reduzierter Kapazitäten effiziente Stadienfolgen für Aufträge mit geringen Losgrößen auslegen und ihre Wettbewerbsfähigkeit steigern.

Eine neue Methode, die im Rahmen des Forschungsprojekts „Effiziente Stadienplanung“ entwickelt wurde, ermöglicht es, in kurzer Zeit und ohne umfangreiches Erfahrungswissen eine mehrstufige Stadienfolge für Schmiedeteile auf Basis der Bauteilgeometrie zu generieren. Das Institut für Integrierte Produktion Hannover (IPH) hat in der Zusammenarbeit mit mehreren Unternehmen aus der Schmiedebbranche einen Softwaredemonstrator entwickelt, in dem die Methode zur effizienten Stadienplanung implementiert ist.

STRATEGIE UND FUNKTIONSWEISE DER METHODE

In Zusammenarbeit mit den Unternehmen des Projektaussschusses (PA) wurden zunächst Anforderungen an die Stadienplanung für verschiedene Bauteilklassen definiert. Die Einteilung der Schmiedeteile orientierte sich an der Formenordnung nach SPIES (Langteile, Gedrungene Formen, Scheibenformen) [4]. Definierte Anforderungen in Abhängigkeit der Formklasse sind zum Beispiel die Hauptachse zur Bestimmung der Massenverteilung oder ob das Bauteil gebogen ist und daher in der Stadienfolge eine Biegeoperation durchgeführt werden muss. Auf Grundlage der abgeleiteten Anforderungen wurde dann die Methode zur effizienten Stadienplanung entwickelt. Diese basiert auf der Bestimmung der Massenverteilung um die Schwerpunktlinie von Schmiedeteilen. Über eine schrittweise Annäherung und Verschiebung von Massenverteilung und Querschnittskonturen an die Halbzeuggeometrie lassen sich die einzelnen Zwischenformen der Stadienfolge generieren.

Im ersten Schritt wird das Schmiedeteil als STL-Datei in die Methode zur effizienten Stadienplanung eingeladen. Anschließend wird eine Schnittachse festgelegt, um das Schmiedeteil in Schnittebenen einzuteilen. Bei einem Langteil wie einem Pleuel oder einer Kurbelwelle ist die Schnittachse die Längsachse. Aus den einzelnen Schnittebenen werden geometrische Kennwerte wie Schwerpunkt und Flächeninhalt des jeweiligen Querschnitts berechnet und die Massenverteilung um die Schwerpunktlinie des Schmiedeteils abgeleitet. Bild 1 zeigt die Schnittebenenendarstellung sowie die berechnete Massenverteilung um die Schwerpunktlinie beispielhaft für eine zweizylindrige Kurbelwelle. Innerhalb der Methode lässt sich schrittweise, entsprechend den eingegebenen Umformfaktoren in den einzelnen Stufen, die Querschnittskontur des Schmiedeteils der Querschnittskontur des Halbzeugs annähern. Es ist ein Querschnitt der Kurbelwelle sowie der Zielquerschnitt des Halbzeugs zu sehen. Die Pfeile stellen schematisch die Quer-

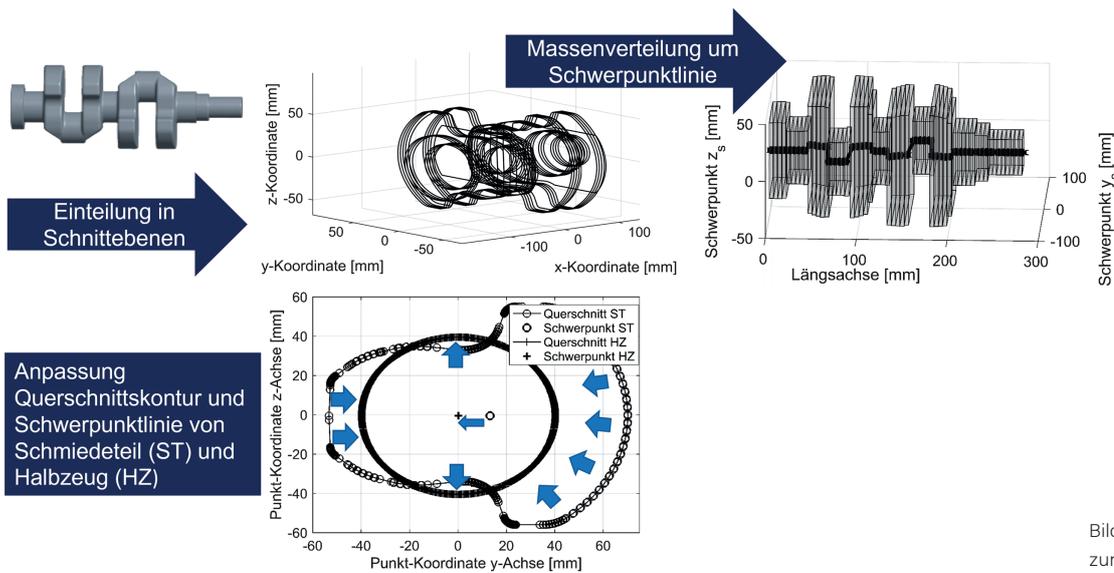


Bild 1: Funktionsprinzip der Methode zur effizienten Stadienplanung

schnittsanpassung durch die Methode dar. Neben der Querschnittskontur wird auch die Schwerpunktlinie des Schmiedeteils sukzessive der des Halbzeugs angepasst. Nach jedem Iterationsschritt erfolgt der Export der generierten Zwischenformen, bis die Halbzeuggeometrie erreicht ist.

Für jeden Querschnitt wird die Querschnittskontur in Form eines Polygonzugs erfasst. Anhand der Querschnittskontur wird auch ein adaptiver Gratanteil berechnet [5]. Diese Informationen stellt die Methode in wenigen Minuten zur Verfügung. Durch die Eingabe weiterer Input-Parameter wie etwa des Halbzeugdurchmessers, der Umformfaktoren oder der Stufenzahl ist die Methode in der Lage, eine rückwärtsgerichtete Stadien-

planung durchzuführen. Tabelle 1 führt die Eingangsparameter der Methode auf und gibt zudem eine Übersicht, ob der Parameter manuell eingegeben werden muss oder automatisiert bestimmt werden kann.

VERKÜRZUNG DES AUSLEGUNGSPROZESSES VON STADIENFOLGEN

Nach Eingabe der Eingangsparameter erhält der Konstrukteur geometrische Informationen (Volumen, maximale Abmessungen, Massenverteilung, Schwerpunktlinie) über das Schmiedeteil und kann die Generierung der Zwischenformen durch die Methode starten. Je nach gewählten Parametern wird die Stadienfolge in weniger als einer Stunde generiert.

Parameter		Manuelle Eingabe		Automatische Berechnung
Gratanteil	✓	Prozentualer Gratanteil	✓	Berechnung in Abhängigkeit der Querschnittsgeometrien
Halbzeugdurchmesser	✓	Eingabe des Durchmessers. Ausgabe der Halbzeuglänge. Volumen Halbzeug = Volumen Schmiedeteil + Gratanteil. Es kann zwischen runden und viereckigem Halbzeug gewählt werden	✗	Nur Ausgabe von: kleinster, mittlerer und maximaler Querschnitt des Schmiedeteils als Hilfestellung
Stufenzahl	✓	Stufenzahl kann flexibel angegeben werden	✓	Automatikmodus kalkuliert Stufenzahl in Abhängigkeit der Komplexität
Umformung in Stufen	✓	Angabe wie viel der gesamten Umformung prozentual in einer Stufe erfolgen soll (Bsp. Kalibrierschlag ca. 10 %)	✓	Automatikmodus kalkuliert Umformung in Abhängigkeit der Komplexität und Stufenzahl
Schnittachse	✓	Es kann zwischen den drei Hauptachsen (x,y,z) als Schnittachse gewählt werden	✗	
Schnittanzahl	✓	Je höher die Schnittanzahl desto genauer ist die Berechnung der Massenverteilung, aber die Rechenzeit steigt	✗	
Rotationsymmetrisches Bauteil	✓	Sonderfall, der vom Anwender ausgewählt werden muss	✗	

Tabelle 1: Eingabeparameter für die Methode zur effizienten Stadienplanung

Die Ergebnisse werden als STL-Datei und als CSV-Datei exportiert. Die CSV-Dateien enthalten die Koordinaten der einzelnen Querschnittskonturen, sodass der Konstrukteur direkt mit der Feinauslegung der Stadienfolge beginnen kann. Dazu lädt er die Querschnittskonturen der einzelnen Zwischenformen in ein CAD-Programm und kann die Kontur anschließend über Splines beschreiben und gegebenenfalls anpassen. Dabei können zum Beispiel Aushebeschrägen hinzugefügt werden. Die STL-Dateien können genutzt werden, um im CAD-Programm eine Konvertierung in Volumenkörper durchzuführen und direkt mit der Konstruktion von Werkzeugen zu beginnen. Erste FEM-Simulationen zur Überprüfung der Formfüllung lassen sich dadurch sehr schnell durchführen, da der Konstrukteur auch für neue Schmiedeteile in weniger als einer

Stunde einen Vorschlag für eine potenzielle Stadienfolge hat. Den Ablauf zur Planung einer Stadienfolge unter Einsatz der Methode zur effizienten Stadienplanung zeigt Bild 2.

Die Methode zur effizienten Stadienplanung benötigt keine Referenzprozesse. Gerade bei Schmiedeteilen, die neu sind oder für die noch keine Referenzprozesse im Unternehmen vorliegen, profitiert der Konstrukteur von der hohen Zeiterparnis.

VALIDIERUNG DER ENTWICKELTEN METHODE ZUR EFFIZIENTEN STADIENPLANUNG

Zur Validierung wurde die Methode auf ein breites Bauteilspektrum angewendet, darunter Turbinenschaufeln, Kurbelwellen,

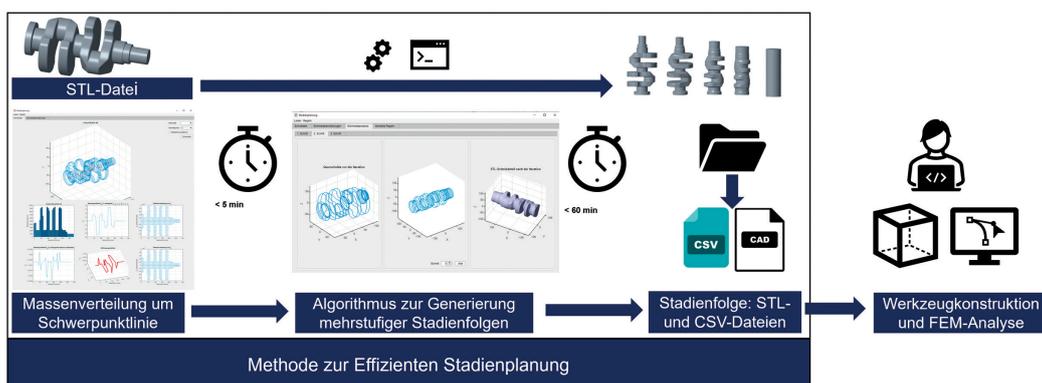


Bild 2: Auslegung einer Stadienfolge bei Nutzung der Methode zur effizienten Stadienplanung

verschiedene Pleuel, mehrere Quer- und Traglenkergeometrien sowie Zahnräder, aber auch rotationsymmetrische Geometrien und stehend geschmiedete Bauteile wie zum Beispiel Flanschwellen. Die generierten Stadienfolgen wurden anschließend bewertet. Außerdem wurden FEM-Simulationen durchgeführt und die Stadienfolgen auf Qualitätskriterien (Faltenfreiheit, Formfüllung) überprüft. Die betrachteten Prozesse wurden in der FEM-Software FORGE NXT 3.0 nachgebildet.

Die für die Validierung verwendeten Bauteile entstammten zum größten Teil dem Produktportfolio der Unternehmen des PA. Die Ergebnisse wurden in Absprache mit den betreffenden Herstellern bewertet und weitere Parameter (Durchmesser der Halbzeuge, der kalkulierte Gratanteil sowie die Stufenzahl) der Stadienfolgen mit den industriellen Beispielen verglichen. Die Ergebnisse zeigen, dass die generierten Stadienfolgen sehr gute Näherungslösungen für die Auslegung sind. Dagegen ergibt der Vergleich des mit der Methode kalkulierten Gratanteils mit dem Gratanteil der industriell ausgelegten Stadienfolgen größere Abweichungen: Als ein Hauptgrund für die Abweichung stellte sich heraus, dass die Methode bei der Berechnung des Gratanteils kein Material für das Materialhandling berücksichtigt. Die Analyse der FEM-Simulationen zeigte, dass bei den verschiedenen Zwischenformen nahezu keine Falten aufgetreten sind.

Bild 3 stellt die Stadienfolgen für ein Pleuel und eine zweizylindrige Kurbelwelle dar. In beiden Fällen wurde die Stadienfolge mit dem Gratanteil ausgelegt, den die Methode kalkuliert

hatte. Für die Kurbelwelle berechnete die Methode zur effizienten Stadienplanung einen Gratanteil von zirka 20 Prozent. Die Analyse mittels FEM-Simulation im selben Bild zeigt, dass damit keine Formfüllung erreicht wurde. Die Betrachtung des Formfüllungsverhaltens verdeutlicht, dass insbesondere in den Bereichen der Kurbelwangen keine Formfüllung auftritt. Der Konstrukteur kann durch die manuelle Eingabe des Gratanteils in der Methode entsprechende Anpassungen vornehmen, um Formfüllung zu gewährleisten.

Darüber hinaus sind neben der Konstruktion und Auslegung des Schmiedegesenks inklusive der Gratbahn gegebenenfalls auch potenzielle Gratsperren ein Einflussparameter, mit dem der Konstrukteur Formfüllung erreichen kann. Für das Pleuel konnte mit einem Gratanteil von etwa 15 Prozent Formfüllung erreicht werden.

ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Die im Projekt erzielten Ergebnisse zeigen, dass die entwickelte Methode zur effizienten Stadienplanung auf Basis der CAD-Geometrie eines Schmiedeteils eine mehrstufige Stadienfolge generieren kann. Die Stadienfolge kann in Form von STL-Dateien exportiert werden und liefert damit die Grundlage, um sehr schnell erste FEM-Simulationen durchzuführen und so Qualitätskriterien von Stadienfolgen wie Faltenbildung oder Formfüllung zu untersuchen. Der Konstrukteur einer Stadienfolge erhält durch die Methode insbesondere für Schmiedeteile ohne bisherige Referenzprozesse ein wertvolles Unterstützungstool. Das rückwärtsgerichtete Vorgehen der Methode und die

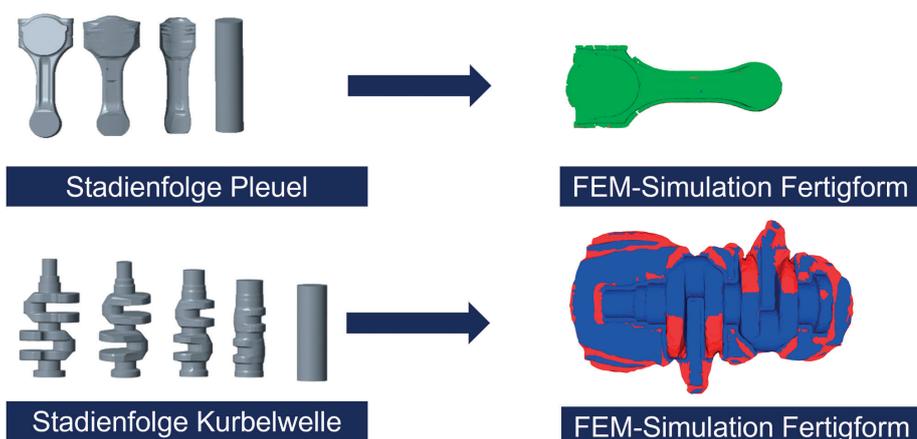


Bild 3: Generierte Stadienfolgen für ein Pleuel (oben) und eine Kurbelwelle (unten) sowie die FEM-Ergebnisse der jeweiligen Fertigform zur Formfüllung über die Kontaktanalyse (rot = keine Formfüllung),
Bilder: Autoren

schnelle Ausgabe von ersten Näherungslösungen von Stadienfolgen kann künftig auch bei der Angebotskalkulation eine Unterstützung darstellen.

Perspektivisch ergeben sich weitere Forschungsfragen, die untersucht und in die Methode mit eingebunden werden können. Hierzu zählen die automatisierte Bestimmung der Teilungsebene auf Basis der Schmiedeteilgeometrie sowie die Berücksichtigung von schmiedetechnischen Konstruktionscharakteristika bei der Generierung der Zwischenformen – ebenso die Frage, welche weiteren Umformverfahren in die Methode und die darin entwickelten Algorithmen eingebunden werden können. Ein sinnvoller Schritt ist hier die Betrachtung von Umformverfahren, die im Rahmen einer Stadienfolge häufig zur Massenvorverteilung eingesetzt werden, beispielsweise das Querkeil- oder das Reckwalzen.



Das IGF-Vorhaben 19752 N der Forschungsvereinigung Forschungsgesellschaft Stahlverformung e.V. (FSV) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Langfassung des Abschlussberichts kann bei der FSV, Goldene Pforte 1, 58093 Hagen, angefordert werden.



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

IGF
Industrielle
Gemeinschaftsforschung



[1] Herbertz, R.; Hermanns, H.; Labs, R.: IMU – Massivumformung kurz und bündig, 2013. Online: https://www.massivumformung.de/fileadmin/user_upload/8_Karriere/IMU_Fachbuch_2013.pdf, Zugriff am 10.07.2021

[2] Behrens, B.-A.; Nickel, R.; Müller, S.: Flashless precision forging of a two-cylinder-crankshaft. *Production Engineering*, 3(4–5), 2009, pp. 381–389

[3] Doege, E.; Behrens, B.-A.: *Handbuch Umformtechnik. Grundlagen, Technologien, Maschinen*, Heidelberg: Springer-Verlag (VDI-Buch), 2016

[4] Spies, K.: Eine Formordnung für Gesenkschmiedestücke, *Werkstatttechnik und Maschinenbau*, Bd. 4, S. 201–206, 1957

[5] Knust, J.; Stonis, M.; Behrens, B.-A.: Preform optimization for hot forging processes using an adaptive amount of flash based on the cross-section shape complexity. *Production Engineering* 10, 6, 2016, pp. 587–698