

Auslegung alternativer Schmiedeprozessketten mit Hilfe genetischer Algorithmen

Bernd-Arno Behrens¹, Berend Denkena²,
Matthias Dannenberg^{1*}, Alexander Georgiadis^{2*}

¹ Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Leibniz Universität Hannover

An der Universität 2

30823 Garbsen, GERMANY

² Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW)

Leibniz Universität Hannover

An der Universität 2

30823 Garbsen, GERMANY

*Korrespondenzautoren:

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) M. Dannenberg
dannenberg@ifum.uni-hannover.de

M. Sc. Wirtsch.-Ing. A. Georgiadis
georgiadis@ifw.uni-hannover.de

Im Rahmen des Artikels wird eine Methode zur ganzheitlichen Optimierung von Prozessketten auf Basis von genetischen Algorithmen vorgestellt, welche die integrative Betrachtung der Prozessketten einer Schmiedewerkzeug- und Schmiedebauteilfertigung ermöglicht. Dabei werden die Herausforderungen der Auslegung und Optimierung fertigungstechnischer Prozessketten sowie die grundlegende Funktionsweise des genetischen Algorithmus dargelegt. Anschließend wird die Durchführung einer Analyse zum Einfluss neuer Prozesse auf spezifische Zielgrößen und ihre Ergebnisse beschrieben. Auf dieser Basis erfolgt abschließend die exemplarische Darstellung eines Prozessmodells, das vom genetischen Algorithmus zur Ermittlung der wirtschaftlich optimalen Lösung verwendet wird.

Schlüsselwörter: Prozessketten, Warmmassivumformung, Genetische Algorithmen, Simulation

Einleitung

Die Herstellung von Schmiedebauteilen erfolgt in der Regel durch mehrstufige Umformprozesse, die durch zusätzliche fertigungstechnische Prozesse, wie z. B. das Trennen und die mechanische Nachbearbeitung des Bauteils, eine Prozesskette ergeben. Bei der Optimierung von Prozessketten steht die Erhöhung der Wirtschaftlichkeit im Vordergrund. Diese wird durch die vom Prozessplaner ausgewählten Prozesse und deren Parameter entscheidend beeinflusst. Daher wurde in Zusammenarbeit der Forschungsinstitute IFUM und IFW eine Methode zur Optimierung von Prozessketten entwickelt, welche die integrative Betrachtung der Prozessketten der Schmiedewerkzeug- sowie der Schmiedebauteilfertigung ermöglicht. Dabei konnte der hohe Auslegungsaufwand konventioneller Simulationsverfahren (z. B. FEM-Analysen) durch Verwendung generischer Prozessmodelle und durch Optimierung mittels genetischer Algorithmen signifikant reduziert werden. Dieser Artikel beschreibt die entwickelte Methode und stellt den aktuellen Stand ihrer Weiterentwicklung vor. Ziel der Weiterentwicklung ist es, zusätzliche Fertigungsalternativen innerhalb des Planungsprozesses systematisch bei der Optimierung berücksichtigen zu können. Auf diese Weise wird eine integrierte und schnelle Bewertung von Prozesskettenalternativen ermöglicht.

Auslegung und Optimierung fertigungstechnischer Prozessketten

Die ganzheitliche Planung und Auslegung neuer bzw. die Optimierung bestehender fertigungstechnischer Prozessketten rückt zunehmend in den Fokus wissenschaftlicher Untersuchungen und erfordert eine Betrachtungsweise über die Analyse einzelner Fertigungsprozesse hinaus (siehe [1], [2], [3], [4], [5], [6]). Dabei spielt auch die Bewertung alternativer Prozessketten eine wichtige Rolle. Im Rahmen des in diesem Artikel vorgestellten Projektes wird daher die in [7] entwickelte Methode auf Basis genetischer Algorithmen erweitert. Mit Hilfe der Methode konnte sowohl eine Reduzierung der Herstellkosten des Bauteils um 12 Prozent bei einer gleichzeitigen Verringerung des Auslegungsaufwandes gegenüber einer konventionell ausgelegten

Prozesskette erreicht werden. Im Rahmen der Erweiterung werden zukünftig alternative Prozesse zur Auslegung und Optimierung fertigungstechnischer Prozessketten berücksichtigt. Dies geschieht unter Einbeziehung eines Referenzszenarios, bei dem eine Lagerbuchse schmiedetechnisch gefertigt wird. Die Prozesskette zur Herstellung der Lagerbuchse setzt sich aus den Verfahren Trennen, Erwärmen, Schmieden, Härten und Feinbearbeiten zusammen. Zur Herstellung der Lagerbuchse können dabei unterschiedliche Verfahrensalternativen zum Einsatz kommen. Beispielsweise kann das Rohteil mit Hilfe einer induktiven Erwärmungsanlage oder eines widerstandsbeheizten Ofens auf die erforderliche Umformtemperatur gebracht werden. Aufgrund dieser betrachteten verschiedenen Verfahren ergeben sich verschiedene alternative fertigungstechnische Prozessketten. Für eine ganzheitliche Auslegung wird neben der Prozesskette zur Herstellung von Schmiedebauteilen, die Prozesskette zur Herstellung der zugehörigen Schmiedegesenke (mehrstufiger Schmiedeprozess) mit in die Prozesskettenauslegung einbezogen. Zur Herstellung der Gesenke werden die Prozesse Drehen und Bohren, Erodieren, Vergüten sowie das abschließende Hartfeinbearbeiten in Form von Schleif- bzw. Drehprozessen eingesetzt (siehe Abbildung 1). Bisher wurde zunächst eine starre Prozesskette ohne Prozessalternativen betrachtet. Aus diesem Grund werden derzeit die bislang starren Prozessketten der Bauteilherstellung und Schmiedegesenkfertigung um die in Abbildung 1 dargestellten Prozessalternativen ergänzt. Somit wird die Flexibilität bei der Auslegung fertigungstechnischer Prozessketten erhöht und dem Prozessplaner die Möglichkeit gegeben optimal aufeinander abgestimmte Prozesskettenalternativen zu vergleichen. Um dies zu erreichen, müssen zunächst die innerhalb der Prozesse und Prozessketten sowie zwischen den Prozessketten vorliegenden Einflüsse durch die jeweiligen Prozessparameter auf die Zielgrößen analysiert werden. Diese verhalten sich häufig konträr zueinander. Einerseits bewirkt beispielsweise die Erhöhung der Erwärmungstemperatur des Bauteils einen Anstieg der Erwärmungsdauer, andererseits wird durch die Temperaturerhöhung die Fließspannung des Bauteils bei der nachfolgenden Umformung reduziert. Dies wirkt sich auf den Werkzeugverschleiß und den Energiebedarf für den Umformprozess aus.

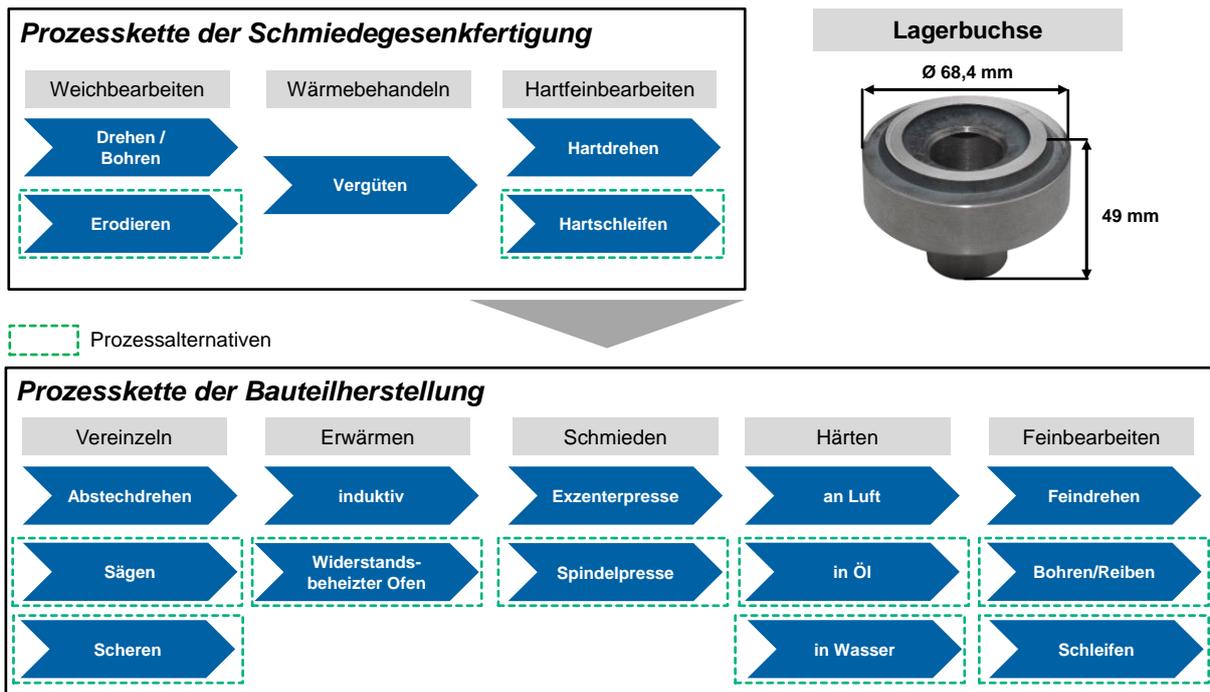


Abbildung 1: Referenzprozesskette mit Prozessalternativen

Derartige Zielkonflikte erschweren das Auffinden der optimalen Prozessparameter für die beiden Prozessketten und deren Alternativen erheblich. An dieser Stelle greift der genetische Algorithmus als Lösungsinstrument, mit Hilfe dessen eine möglichst optimale Parameterkombination für die beiden betrachteten Prozessketten gefunden werden soll.

Der genetische Algorithmus ist ein heuristisches Verfahren zur Lösung komplexer Optimierungsprobleme [8]. Die grundlegende Idee ist es, zufällige Anfangslösungen (Startpopulation) solange zu verändern und neu zu kombinieren bis eine hinreichend gute Lösung für das Problem erreicht wurde. In diesem Zuge werden biologische Evolutionsprozesse und genetische Mechanismen, wie Mutation (Generierung neuer Lösungen) oder Kreuzung (Kombination alter Lösungen), nachgeahmt, um systematisch Lösungen zu erzeugen [9]. In einer Fitnessfunktion werden diese Lösungen, auch Individuen genannt, anschließend hinsichtlich ihrer Güte bewertet. Hierbei kann das Bewertungsoptimum, in Abhängigkeit der jeweiligen Fitnessfunktion, durch ein Maximum oder ein Minimum, wie z. B. die Minimierung der Herstellkosten oder der Fertigungszeit, charakterisiert sein [10]. Im vorliegenden Fall der Schmiedegesenk- und Bauteilfertigung wird der genetische Algorithmus verwendet, um die Parameter

der einzelnen Prozesse (z. B. Scheren A: Vorschub 0,1 mm vs. Scheren C: Vorschub: 0,2 mm oder Erwärmen A: Bauteiltemperatur 930 °C vs. Erwärmen C: Bauteiltemperatur 1230 °C, siehe Abbildung 2) systematisch gegenüberzustellen und zu bewerten. Die Grundlage für die Generierung der Fitnesswerte liefern hierbei Prozessmodelle, deren Aufbau in Abschnitt 4 näher beschrieben wird. Der Ablauf eines genetischen Algorithmus wird nachfolgend erläutert.

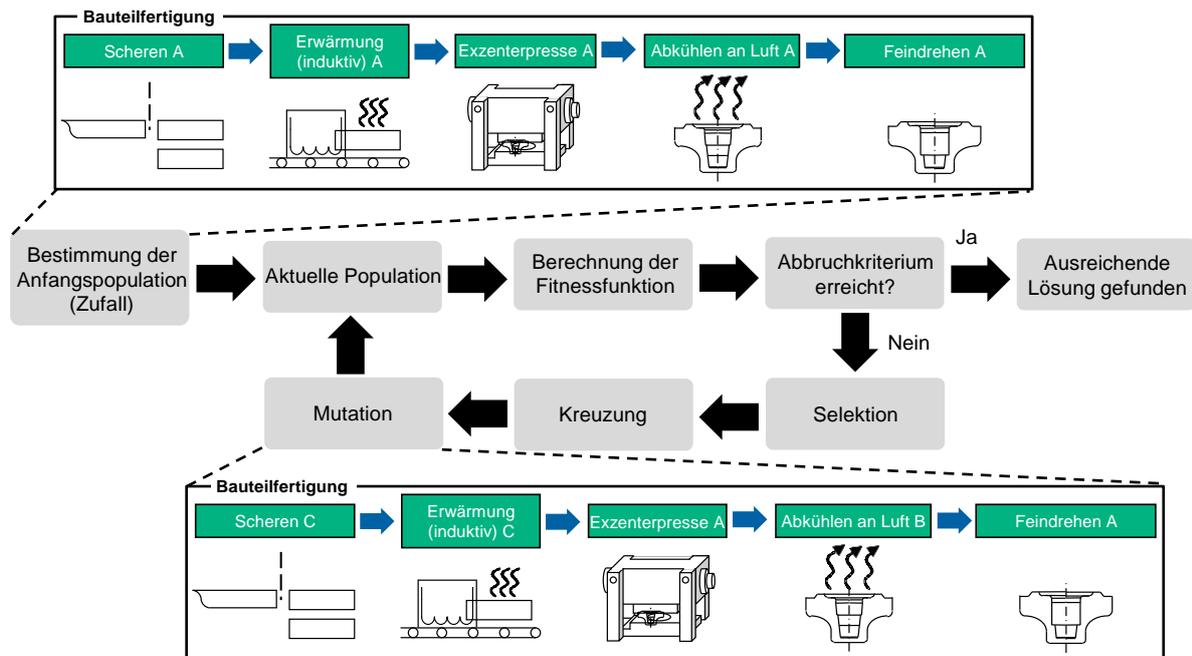


Abbildung 2: Schematischer Ablauf eines genetischen Algorithmus

Die Optimierung startet mit einer Startpopulation der zu variierenden Parameter. Hierbei wird eine vorher definierte Anzahl an Wertepaarungen stochastisch erzeugt. Anschließend erfolgt die Bewertung der generierten Paarungen anhand einer Fitnessfunktion (z. B. bezüglich der Zielgrößen Stückkosten, Stückzeiten, Bauteilqualität). In der Regel stellt die Startpopulation noch keine ausreichend gute Lösung dar, sodass der Generationszyklus des Algorithmus wie nachfolgend geschildert startet.

In einem ersten Schritt werden mit Hilfe von Selektionsmechanismen zwei Individuen ausgewählt und im anschließenden Schritt unter Verwendung der genetischen Operatoren „Kreuzung“ und „Mutation“ neue Paarungen generiert. Beide finden mit vorher festgelegten Wahrscheinlichkeiten statt. Die Kreuzung kann als Hauptoperator betrachtet werden, um neue verbesserte Lösungen zu erhalten. Dies liegt darin be-

gründet, dass die in der jeweiligen Kombination vorhandenen Prozesse und Parameterwerte zufällig miteinander vertauscht werden. Die nachgelagerte Mutation dient als Hintergrundoperator und soll verhindern, dass mit dem Algorithmus ausschließlich lokale Optima identifiziert werden [11]. Sofern nach der Bewertung anhand der Fitnessfunktion keine ausreichend gute Lösung erzielt oder ein Abbruchkriterium (z. B. max. Populationsgröße, Mindestverbesserung innerhalb von 10 Generationen) erreicht wurde, startet der Generationszyklus erneut.

Einflussanalyse zwischen Zielgrößen und fertigungstechnischen Prozessen

Als Zielgrößen wurden die Stückkosten, die Bauteilqualität sowie die Stückzeit ausgewählt. Die Stückkostenanteile Energie- und Werkzeugverschleißkosten können durch die Wahl der variablen Prozessparameter innerhalb der Fertigungsprozesse beeinflusst werden. Andere im Prozess entstehende Kostenanteile an den Stückkosten, wie beispielsweise Instandhaltungs- oder Raumkosten, werden im Zuge der Optimierung nicht verändert und gehen daher als Konstanten in die Bestimmung der Stückkosten ein. Die Qualität des Bauteils wird durch die Oberflächengüte und Härte berücksichtigt. Diese Qualitätskriterien sind innerhalb eines definierten und technologisch sinnvollen Bereichs zu erzielen. Eine weitere Zielgröße, die es im Rahmen des Projektes zu optimieren gilt ist die Stückzeit der gesamten Prozesskette (Bauteil- und Werkzeugherstellung). Die Stückzeit setzt sich aus verschiedenen Zeitanteilen zusammen. Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes liegt der Fokus auf dem Zeitanteil der Hauptnutzungszeit, da diese direkt durch die an der Maschine einzustellenden Parameter (z. B. Anzahl der Hübe einer Kurbelpresse) beeinflusst werden kann. Weitere Zeitanteile, wie beispielsweise die Rüstzeit, werden analog den Stückkosten als konstante Parameter in der Berechnung der Stückzeit berücksichtigt.

Anhand der zuvor erläuterten Zielgrößen wird nachfolgend analysiert, welchen Einfluss die einzelnen Prozesse (z. B. Härten mit den Abkühlmedien Luft, Öl und Wasser) der beiden Prozessketten auf die genannten Zielgrößen besitzen. Die Prozesse üben, je nach Ausprägung, einen unterschiedlich starken Einfluss auf die einzelnen Zielgrößen aus, die es im Rahmen der nachfolgenden Optimierung zu berücksichtigen gilt. Mit Hilfe der Einflussanalyse auf Basis von Experteninterviews und Literaturquellen wurde der Einfluss der einzelnen fertigungstechnischen Prozesse auf die

Zielgrößen analysiert und qualitativ bewertet. Das Ergebnis der Einflussanalyse ist in Abbildung 3 dargestellt.

Zielgrößen	Schmiedewerkzeug					Bauteil												
	Grobearbeiten		Wärme- behandeln	Feinbearbeiten		Vereinzeln			Erwärmen		Schmieden		Härten			Endbearbeiten		
	Drehen / Bohren	Erodieren	Vergüten	Drehen	Schleifen	Abstechdrehen	Sägen	Scheren	Induktiv	Widerstands- beheizt	Kurbelpresse	Spindelpresse	Luft	Öl	Wasser	Drehen	Bohren / Reiben	Schleifen
Energieverbrauch bzw. -kosten der gesamten Prozesskette	●	●	●	▶	▶	○	○	○	●	●	●	●	[-]	○	○	●	▶	●
Werkzeugverschleißkosten des Schmiedegesenks	○	○	●	▶	▶	○	○	○	▶	●	●	●	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Oberflächenrauheit des Schmiedebauteils	[-]	[-]	[-]	○	○	[-]	[-]	[-]	○	○	▶	▶	○	○	○	●	●	●
Härte des Schmiedebauteils	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	●	●	●	○	○	○
Stückzeit der gesamten Prozesskette	●	▶	●	▶	▶	▶	▶	○	▶	●	●	●	●	●	●	▶	○	▶

Legende: ● hoher ▶ mittlerer ○ geringer [-] kein Einfluss

Abbildung 3: Einflussanalyse zwischen Zielgrößen und fertigungstechnischen Prozessen der alternativen Prozessketten

Auf Basis der Ergebnisse der Einflussanalyse erfolgt anschließend die Priorisierung der zu optimierenden Fertigungsprozesse der einzelnen Prozessketten sowie der Zielgrößen. Zudem kann durch diese Vorgehensweise der Komplexitätsgrad des Optimierungsproblems bei steigender Anzahl an Prozesskettenalternativen reduziert werden.

Beschreibung von mathematischen Prozessmodellen

Eine wesentliche Herausforderung bei der Entwicklung des genetischen Algorithmus stellt die Formulierung der Fitnessfunktion und der enthaltenen Prozessmodelle dar [12]. Basierend auf den aufgestellten Modellen werden die Parameterkombinationen der einzelnen Prozesse durch die Fitnessfunktion bewertet und anschließend optimiert. Die Beschreibung der Fitnessfunktion muss daher sehr detailliert und konsistent erfolgen. Im vorliegenden Projekt wurden deshalb basierend auf Literaturangaben und eigenen Untersuchungen (z. B. für die widerstandsbeheizte Erwärmung)

Prozessmodelle in der Software Microsoft (MS) Excel® modelliert. Dies sollte zum einen die einfache Weiterverarbeitung der Daten (z. B. durch MS Access® oder MATLAB®) sicherstellen. Zum anderen ermöglicht die mathematische Beschreibung in MS Excel® die Plausibilitätsprüfung aller Berechnungsergebnisse der Prozessmodelle. Dadurch konnten Fehler in den Prozessmodellen schnell lokalisiert und behoben werden. In Abbildung 4 ist ein exemplarischer Ausschnitt des Prozessmodells zur Berechnung der Hauptzeit für das Bohren dargestellt.

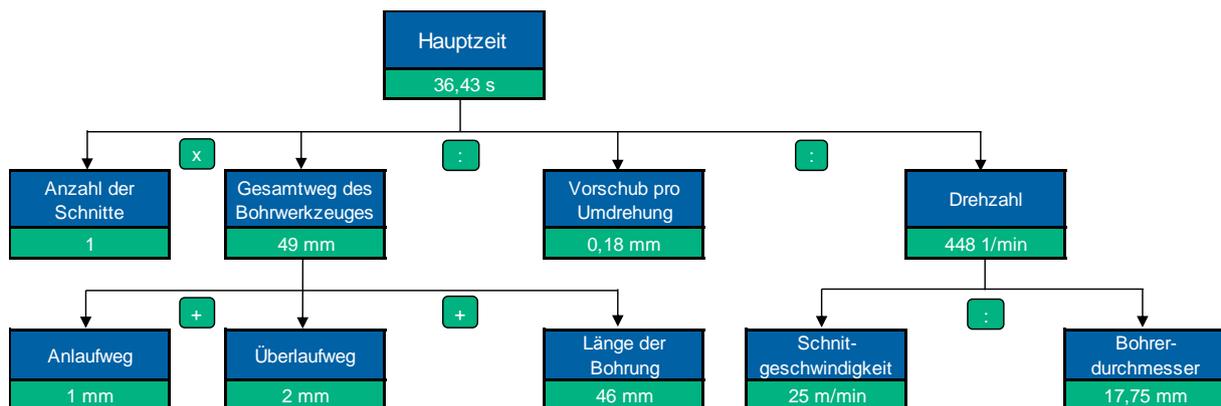


Abbildung 4: Prozessmodell zur Berechnung der Hauptzeit für das Bohren

Aufgrund der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen vor- und nachgelagerten Prozessen einer Prozesskette ist der Vorgang der mathematischen Beschreibung häufig sehr komplex und aufwendig. Beispielsweise wird beim Erwärmen des Rohteils dessen Temperatur variiert und folglich die benötigte Umformkraft im nachfolgenden Schmiedeprozess sowie der Verschleiß des Schmiedegesenks. Dies beeinflusst sowohl die Energiekosten als auch die Hauptzeit der beiden Prozesse. Folglich hat die Wahl der Erwärmungstemperatur des Bauteils Auswirkungen auf die Zielgrößen Stückkosten und Stückzeit. Derartige Wirkzusammenhänge können nicht immer absolut beschrieben werden. Zu diesem Zweck wurden im Projekt qualitative Zusammenhänge hergeleitet und in die Prozessmodelle implementiert. Mittels umfassender, prozessübergreifender Plausibilitätsanalysen konnten diese Größen validiert werden.

Zusammenfassung und Ausblick

Für eine ganzheitliche Planung und Auslegung neuer bzw. die Optimierung bestehender fertigungstechnischer Prozessketten ist eine Betrachtungsweise über die Analyse und Optimierung einzelner Fertigungsprozesse hinaus erforderlich. Am IFUM und IFW wird gegenwärtig eine rechnergestützte Methode zur prozesskettenübergreifenden Optimierung von Prozesskettenalternativen mit Hilfe eines genetischen Algorithmus entwickelt. Dazu wurde zunächst eine Einflussanalyse durchgeführt, um den Einfluss der alternativen Prozesse auf die Zielgrößen zu ermitteln. Auf Basis dieser Ergebnisse wurden die Prozessmodelle zur Generierung alternativer Prozessketten aufgestellt und verifiziert. Zukünftige Arbeiten werden sich mit der Adaption des bisher verwendeten genetischen Algorithmus befassen, um so eine schnelle und integrierte Prozesskettenplanung und -auslegung für unterschiedliche fertigungstechnische Prozessketten für den Bereich Gesenkschmieden zu ermöglichen. Des Weiteren werden die neuen alternativen Prozessmodelle in einen bestehenden Softwareprototyp implementiert.

Danksagung

Der vorgestellte Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojektes „Integrative Prozesskettenplanung und -auslegung umformtechnisch gefertigter Bauteile auf Basis genetischer Algorithmen“, Projektnummern BE 1691/92-2 und DE 447/68-2 am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) und dem Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) der Leibniz Universität Hannover. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

Literatur

- [1] Brandes, A.: Positionierung technologischer Schnittstellen – Beitrag zur ganzheitlichen Auslegung fertigungstechnischer Prozessketten. Dissertation, Leibniz Universität Hannover, 2008
- [2] Hielscher, T.: Qualitätsmanagement in fertigungstechnischen Prozessketten: Vorgehensweise zur fehlerbasierten Optimierung der gefertigten Bauteilqualität, Dissertation, Universität Kaiserslautern, 2008
- [3] Becker, H.-H.: Zerspanen im modernen Produktionsprozess, Dortmund,

Zerspanen im modernen Produktionsprozess, Fachgespräch zwischen Industrie und Hochschule, Dortmund, 26.-27. Feb, 2008

- [4] Abele, E., Schrems, S.: Ressourcenorientierte Bewertung alternativer Prozessketten. Herausforderungen und Möglichkeiten zur Prozesskettenbewertung im Produktionsplanungsprozess, ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, Band 105, Heft 6, S. 542-546, 2010
- [5] Göschel, A., Sterzing, A.; Schönherr, J.: Systembetrachtungen von Prozessketten der Blechwarmumformung in Hinblick auf Energie- und Ressourceneffizienz, 1. Internationales Kolloquium des Spitzentechnologieclusters eniPROD, Chemnitz, S. 747-766, 2010
- [6] Schmitt, R.; Frischemeier, S.: Effizienzsteigerung durch Prozesskettenoptimierung. Ein ganzheitlicher Ansatz für die Verbesserung des Ressourceneinsatzes in der Produktion, Industrie Management, Band 26, Heft 4, Qualitätsmanagement, S. 57-60, 2010
- [7] Dannenberg, M.; Charlin, F.: Auslegung schmiedetechnischer Prozessketten - Ein neuer Ansatz zur Modellierung und softwaregestützten Optimierung von Produktionsprozessketten, Schmiede-Journal, Heft 03, S. 34-37, 2012
- [8] Holland, J. H.: A new kind of turnpike theorem, Bulletin of the American Mathematical Society, Jahrgang 75, Heft 6, S. 1311-1317, 1969
- [9] Haupt, R. L.; Haupt, S. E.: Practical Genetic Algorithms, Hoboken, John Wiley & Sons, 2004
- [10] Schöneburg, E.; Heinzmann, F.; Feddersen, S.: Genetische Algorithmen und Evolutionsstrategien. Eine Einführung in Theorie und Praxis der simulierten Evolution, Bonn, Addison-Wesley, 1994
- [11] Nissen, V.: Einführung in Evolutionäre Algorithmen: Optimierung nach dem Vorbild der Evolution, Braunschweig und Wiesbaden, Vieweg, 1997
- [12] Denkena, B.; Behrens, B.-A.; Charlin, F.; Dannenberg, M.: Evolutionäre Optimierung einer Schmiedeprozesskette, wt Werkstattstechnik online, Jahrgang 100, Heft 10, Düsseldorf, Springer-VDI, 2010

Autoren

Prof. Dr.-Ing. Bernd-Arno Behrens studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) in Hannover. Nach einer leitenden Tätigkeit bei der Salzgitter AG wurde er im Oktober 2003 als Leiter des IFUM an die Leibniz Universität Hannover berufen.

Prof. Dr.-Ing. Berend Denkena studierte Maschinenbau an der Universität Hannover und promovierte am Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen (IFW) in Hannover. Nach einer leitenden Tätigkeit bei der Gildemeister Drehmaschinen GmbH ist er seit 2001 geschäftsführender Leiter des IFW an der Leibniz Universität Hannover.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. (FH) Matthias Dannenberg studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit den Vertiefungsrichtungen technischer Vertrieb sowie Organisations- und Prozessmanagement an der Fachhochschule Hannover. Seit 2010 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Massivumformung am IFUM.

M. Sc. Alexander Georgiadis studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit den Schwerpunkten Produktionstechnik und Produktionswirtschaft an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2011 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Fertigungsstrukturen und -abläufe am IFW.