

Inverse 3D-Materialflusssimulation zur Zwischenformauslegung für das Gesenkschmieden

Bernd-Arno Behrens, Franz-Erich Wolter, Philipp Blanke, Adrian Santangelo*

Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM)

Leibniz Universität Hannover

An der Universität 2

30823 Garbsen, GERMANY

*santangelo@ifum.uni-hannover.de

Die Bestimmung der Vorform- und Zwischenformgeometrien nimmt bei der Auslegung der Stadienfolge für das Gesenkschmieden eine zentrale Stellung ein. Sie erfolgt bislang iterativ und zum größten Teil wissensbasiert. In diesem Beitrag wird ein Ansatz vorgestellt, mit dem das Ziel verfolgt wird, durch die zeitlich rückwärtsschreitende Betrachtung des Schmiedeprozesses die Einlegegeometrie der jeweiligen Vorstufe zu berechnen. Es wird hierfür ein Materialflussmodell angewendet, welches auf der Ermittlung des geometrischen Widerstandes im Schmiedeteil basiert und schnelle Rechenzeiten ermöglicht.

Keywords: Gesenkschmieden, Stadienfolge, Zwischenform, Simulation

Einleitung

Das Gesenkschmieden ist ein Druckumformverfahren, welches besonders für die Fertigung von mechanisch hoch belastbaren Bauteilen Anwendung findet. Die Herstellung von Gesenkschmiedestücken erfolgt allgemein durch eine mehrstufige Umformung in verschiedenen Gravuren, der sogenannten Stadienfolge. Es gilt grundsätzlich, dass mit dem Komplexitätsgrad der zu fertigenden Endgeometrie auch die Anzahl der dazu erforderlichen Umformstufen steigt. Die Entwicklung der Stadienfolge nimmt sowohl hinsichtlich der späteren Bauteilqualität als auch der Wirtschaftlichkeit des Produktionsprozesses eine zentrale Stellung ein. Dabei ist die Auslegung der Stadien immer noch in hohem Maße von den Erfahrungen des Konstrukteurs abhängig. Vor allem die Auslegung komplexer Geometrien macht eine Überprüfung der Entwürfe notwendig, bevor kostenintensive Testläufe unternommen werden. Kommerzielle FE-Systeme bieten heutzutage die Möglichkeit den dreidimensionalen Werkstofffluss mit hoher Genauigkeit zu berechnen und verfügen über diverse Analysefunktionen. Abhängig vom Genauigkeitsgrad müssen dabei Rechenzeiten von mehreren Stunden bis hin zu Tagen in Kauf genommen werden. In der Regel entspricht das Simulationsergebnis eines ersten Entwurfs nicht den Vorstellungen des Konstrukteurs, was sich beispielsweise in einer Unterfüllung des Gesenks, erhöhtem Kraftbedarf, Werkzeugbruch oder Faltenbildung äußern kann. Es muss dann eine Simulation mit geänderten Ausgangsbedingungen neu gestartet werden, wie in Abbildung 1 veranschaulicht wird.

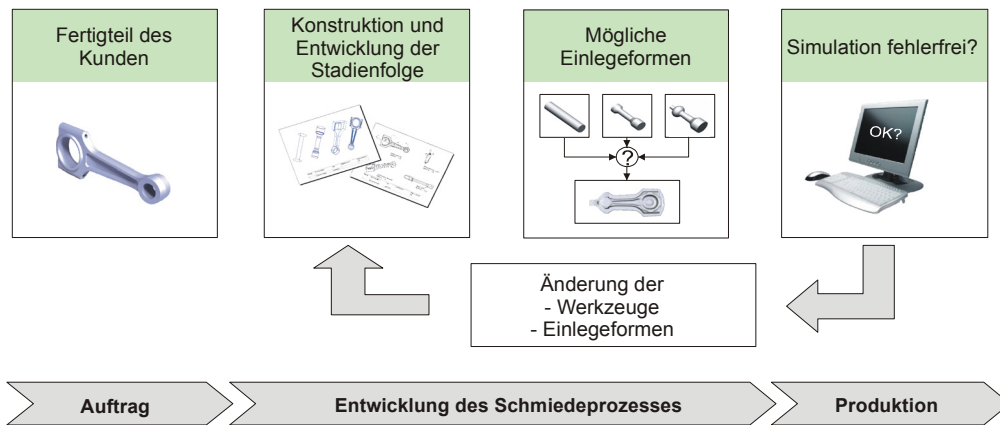


Abbildung 1: Entwicklungsschleife für die Auslegung von Stadienfolgen

Insbesondere bei komplexen Bauteilen, für die noch keine Erfahrungswerte existieren, können die Entwicklungszeiten durch das Zunehmen erforderlicher Iterationsschritte beträchtlich steigen. Das Ändern der Werkzeuggeometrie der jeweiligen Stufe oder das Hinzufügen einer zusätzlichen Prozessstufe sind Möglichkeiten das gewünschte Schmiedeergebnis zu erzielen. Im ersteren Fall müsste von der jeweiligen Umformstufe aus die komplette Stadienfolge neu durchlaufen werden, was die Entwicklungszeit beträchtlich verlängern würde, letzterer Fall würde zu erhöhtem Produktionsaufwand führen. Eine wirtschaftlichere Möglichkeit ist das hinsichtlich des Werkstoffflusses optimale Umgestalten der Werkstückvorform für die jeweilige Umformstufe. Das Ziel einer optimalen Vorformauslegung ist es, den Werkstoff derart zu steuern, dass ein fehlerfreies Schmiedeteil unter möglichst geringem Materialeinsatz und kurzen Fließwegen entsteht [1]. Hierfür wäre eine Simulation, die ausgehend von einer Fertigteilgeometrie die Entstehung der Vorformstufen rückwärtsschreitend in nur einem Schritt innerhalb weniger Minuten berechnen kann, ein bedeutendes Werkzeug für die rechnergestützte Auslegung des Schmiedeprozesses (siehe Abbildung 2).

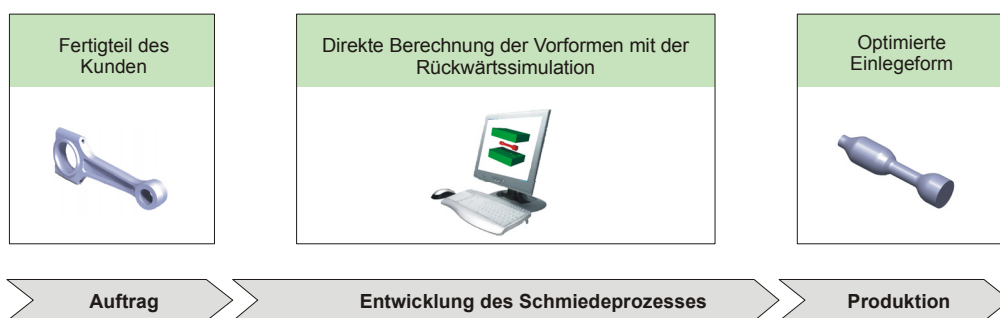


Abbildung 2: Entwicklungsabfolge für die Auslegung von Stadienfolgen mittels Rückwärtssimulation

Es würden so Erstentwürfe für die Gestaltung der Zwischenstufen kurzfristig bereitgestellt, womit eine deutliche Reduzierung der Simulationsvarianten für die Feinauslegung mit der FEM erreicht werden kann. Unter der Voraussetzung einer ausreichend sicheren Voraussage des Werkstoffflusses, wird durch das „schnelle“ Simulieren der Aufwand für eine erste Auslegung der Umformstufen vermindert und somit die erforderliche Zeitspanne für die Entwicklung verkürzt.

Werkstoffflussmodell nach dem Prinzip des geringsten Zwanges

Von der Annahme ausgehend, dass bei der Warmformgebung der größte Einfluss auf die Werkstoffbewegung durch die Geometrie des Werkzeugs gegeben ist, entwickelte Mathieu eine neue Methode zur Simulation des Werkstoffflusses für rotationssymmetrische Teile [2]. Nach diesem Modell findet die Materialbewegung im Mittel auf sogenannten Verdrängungsbahnen statt, welche den Weg des geringsten Zwanges repräsentieren und dadurch charakterisiert sind, dass sie vorwiegend parallel zu den Längsachsen der Haupt- und Nebenformelemente eines Schmiedeteils verlaufen (siehe Abbildung 3). Der entscheidende Vorteil dieses Ansatzes liegt in der vergleichsweise kurzen Berechnungszeit. Unter der Voraussetzung, dass die Werkzeugform den größten Einfluss auf die Materialbewegung hat, ist die Intensität des Materialflusses entlang der Verdrängungsbahnen abhängig von der Summe ihrer geometrischen Widerstände. Die Konstruktion einer angenäherten Verdrängungsbahn kann in der Schnittebene vereinfacht mittels eines Kreises erfolgen, der seinen Radius innerhalb der Gravur lokal so verändert, dass er jeweils die maximale Größe einnimmt. Der geometrische Widerstand wird in Abhängigkeit von der Radienänderung, die sich durch Anpassung des Kreises (Dehnen bzw. Zusammenziehen) an die örtlichen Gravurabmessungen ergibt, des Lagewinkels sowie des zurückgelegten Weges berechnet. Die Aufteilung des verdrängten Volumens bei der Umformung erfolgt in umgekehrt proportionalem Verhältnis zu den berechneten Widerständen an den Anlagerungsorten bzw. Endpunkten der Bahnketten. Hierbei gilt zu beachten, dass das Werkstückvolumen bei der Umformung konstant bleibt.

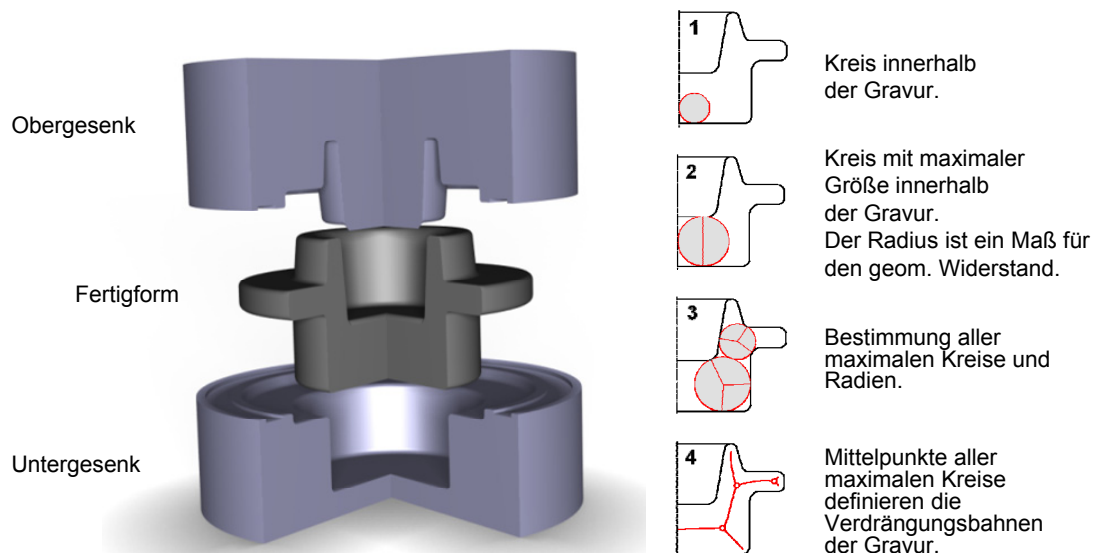


Abbildung 3: Modell zur Bestimmung von Verdrängungsbahnen

Eine Möglichkeit zur zeiteffizienten Berechnung der Verdrängungsbahnen stellt die Mediale Achsen Transformation dar. Ihre Generierung wird im Folgenden beschrieben.

Mediale Achse Transformation

Für die Beschreibung der oben genannten Längsachsen der Haupt- und Nebenformelemente gibt es in der Geometrie mit der sogenannten Medialen Achse bereits ein wohlbekanntes Modell. Die Mediale Achse Transformation (MAT) wurde erstmals von Blum 1967 zur Beschreibung biologischer Formen vorgestellt [3]. Sie stellt eine effiziente Methode dar, Geometrien zu analysieren und darzustellen, siehe [4, 5]. Im Folgenden wird ein dreidimensionaler Referenzkörper M im dreidimensionalen Euklidischen Raum und dessen Oberfläche δR betrachtet. Um die MAT zu definieren, wird auch der Begriff der maximalen Kugel benutzt:

Eine Kugel K , die in M liegt, heißt *maximal in M* , wenn es keine andere Kugel in M gibt, die K enthält.

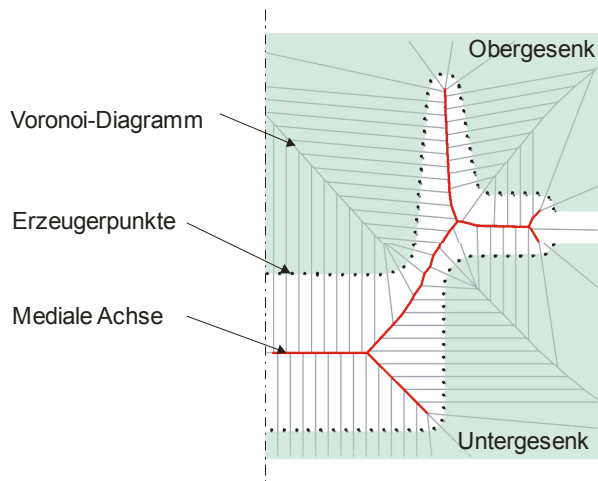
Man kann zeigen, dass eine maximale Kugel die Oberfläche von M in mindestens zwei Punkten berührt. Damit wird weiter definiert:

Die Mediale Achse (MA) von M ist die Menge aller Mittelpunkte maximaler Kugeln in M . Die Radiusfunktion weist jedem Punkt der Medialen Achse den Radius der entsprechenden Kugel bezüglich M zu.

Im Dreidimensionalen wird die Mediale Achse eines Körpers M auch als Mediale Fläche bezeichnet, wobei dies leicht irreführend ist, da die Mediale Achse von R im Allgemeinen aus mehreren Flächenstücken (*Blättern*) besteht, die in Kurvenstücken (*Nähten*) verbunden sind. Weiterhin sei hier darauf hingewiesen, dass Blum in seiner Arbeit die Mediale Achse sowohl für das Innere, als auch für das Äußere von R definierte. Hierzu muss die Definition nur auf maximale Kugeln erweitert werden, die außerhalb von M liegen. In dem hier vorgestellten Simulationsmodell wird nur die innere Mediale Achse betrachtet.

Die Mediale Achse wird genutzt, um die Längsachsen der Haupt- und Nebenformelemente zu beschreiben, also der Formelemente in den Gravuren von Ober- und Untergesenk. Es werden die Oberflächen der beiden Gravuren als Rand des Gesenkwischenraums betrachtet und zu diesem die MA berechnet. Die Berechnung der MA ist allerdings aufgrund ihrer Komplexität bis heute nicht befriedigend gelöst. Eine Möglichkeit für die Approximation der MA sind Voronoi-Diagramme (siehe Abbildung 4).

Ein Teil des Voronoi-Diagramms konvergiert mit zunehmender Dichte von Punkten auf der Oberfläche von M gegen die Mediale Achse. Daher werden die Oberflächen der Gesenke als Dreiecksnetze dargestellt. Die Eckpunkte der Dreiecke dienen als Eingabe für die Berechnung des dreidimensionalen Voronoi-Diagramms. Nach einer Filterung des Diagramms erhält man eine Approximation der Medialen Achse in einer Graphenstruktur. Die Knoten des Graphen sind Punkte, die auf der Medialen Achse liegen, sie enthalten außerdem die Distanz zum Rand (Radius der maximalen Kugel).



Sei eine Menge von Referenzpunkten (Orten) P_1, \dots, P_n gegeben. Die Menge aller Punkte, die näher an P_i liegen, als an allen anderen Orten heißt Voronoi-Region von P_i . Die Ränder aller Voronoi-Regionen bilden das Voronoi-Diagramm von P_1, \dots, P_n . Die Mediale Achse wird durch eine Untermenge des Voronoi-Diagramms approximiert.

Abbildung 4: Ermittlung der Medialen Achse mit dem Voronoi-Diagramm

Simulationsprogramm

Basierend auf dem Prinzip des geringsten Zwanges entwickelte Wienströer erstmals ein rückwärtsgerichtetes Simulationssystem [6]. Dieses Simulationssystem ist bislang auf zweidimensionale Schnittebenen begrenzt und kann den Werkstofffluss zwischen diesen Ebenen nicht abbilden. Daher ist es zunächst nur für rotationssymmetrische Bauteile gültig. Weiterführende Arbeiten für die Anwendung bei komplexeren Geometrien sind somit erforderlich und Gegenstand der hier vorgestellten Forschungsarbeiten.

Für die rückwärtsgerichtete Simulation wird der beim Schmieden sonst kontinuierliche Verlauf zeitlich diskretisiert und invers betrachtet. In dem Simulationsprogramm umfasst eine diskrete Umformstufe vier fundamentale Berechnungsschritte (siehe Abbildung 5): Im ersten Schritt werden die Verdrängungsbahnen mit Hilfe der Mediale Achse Transformation ermittelt. Zur Bestimmung des lokalen Materialabnahmevolumens an den freien Werkstoffenden werden im zweiten Schritt die Pfade des Werkstoffflusses als Graph interpretiert und eine Bilanzierung der geometrischen Widerstände vorgenommen. Durch systematisches Durchlaufen der Pfade wird jedem Endpunkt ein Widerstandsintegral zugeordnet. Im nächsten Schritt findet die Materialabnahme entsprechend einem zuvor definierten Gesamtanteil an den freien Werkstofffronten statt. Die Größe der Volumenabnahme an den Abnahmepunkten steht in umgekehrt proportionalem Verhältnis zu den berechneten Widerstandsintegralen. Zuletzt wird unter der Annahme von Volumenkonstanz der zuvor abgenommene Betrag an die Kontaktbereiche mit dem Gesenk angelagert und das Werkzeug aufwärts bewegt. Diese Routine wird bis zu der Hubhöhe durchlaufen, für die eine Zwischenform bestimmt werden soll.

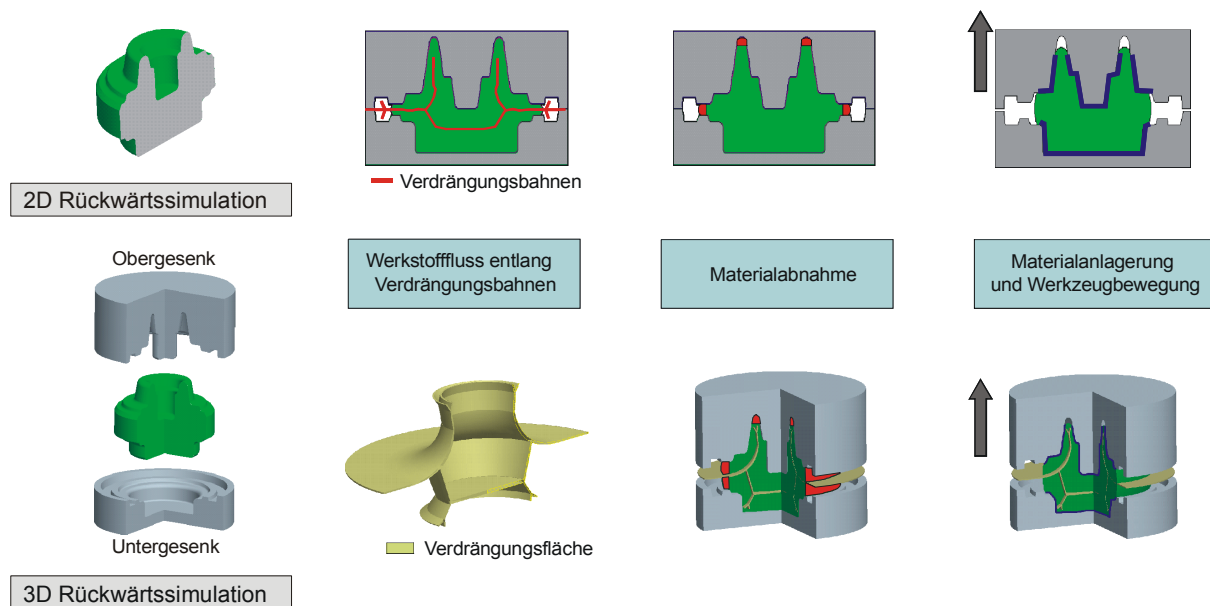


Abbildung 5: Prozess der Rückwärtssimulation

Die Medialen Achsen bzw. Verdrängungsbahnen können in der Schnittebene als binärer Baum interpretiert werden, bei dem die Materialflussrichtung gegeben ist. Bei der Betrachtung eines dreidimensionalen Objektes steigt der Komplexitätsgrad: Die Verdrängungsbahnen werden zu Verdrängungsflächen, mit der Folge, dass der Freiheitsgrad für den Materialfluss steigt. Um die Menge und Richtung der Materialbewegung zu berechnen, werden die Verdrängungsflächen als Graph vernetzt. Für die in der Graphenstruktur verbundenen geometrischen Widerstände wird mit Hilfe eines Suchalgorithmus, der die kürzesten Pfade von jedem Widerstandselement zu den Endpunktwiderständen identifiziert und summiert, eine Bilanzierung und Gewichtung für die Abnahmestellen vorgenommen. Ein Weg ist in diesem Fall der kürzeste, falls sein Gewicht im Vergleich mit allen anderen möglichen Wegen minimal ist. Ein effizienter Algorithmus für die Suche der kürzesten Pfade in dicht besetzten Graphen ist beispielsweise der wohlbekannte Dijkstra-Algorithmus [7].

Die Kantengewichtung erfolgt entsprechend den Widerstandswerten ihrer zugehörigen Knoten. Das zu bestimmende Materialabnahmenvolumen an dem jeweiligen Abnahmeort ist umgekehrt proportional zu seinem berechneten Endpunktwiderstand. Es wird somit das Prinzip des geringsten Zwanges verfolgt und auf Verdrängungsflächen angewandt. Durch dieses Vorgehen wird der Materialfluss bestimmt, der den geringsten Arbeitseintrag erfordert, und die daraus resultierende Vorformgeometrie berechnet.

Der geometrische Widerstand eines Medialen Punktes wird aus dem jeweiligen Umformgrad eines Volumenelementes abgeleitet. Eine Veranschaulichung der zugrundegelegten Berechnungsmethode ist Abbildung 6 zu entnehmen. Der Zusammenhang von Orthogonalität zwischen Werkzeugkontur und Radiusvektor der Medialen Achse erlauben die Berechnung des geometrischen Widerstands eines Elements.

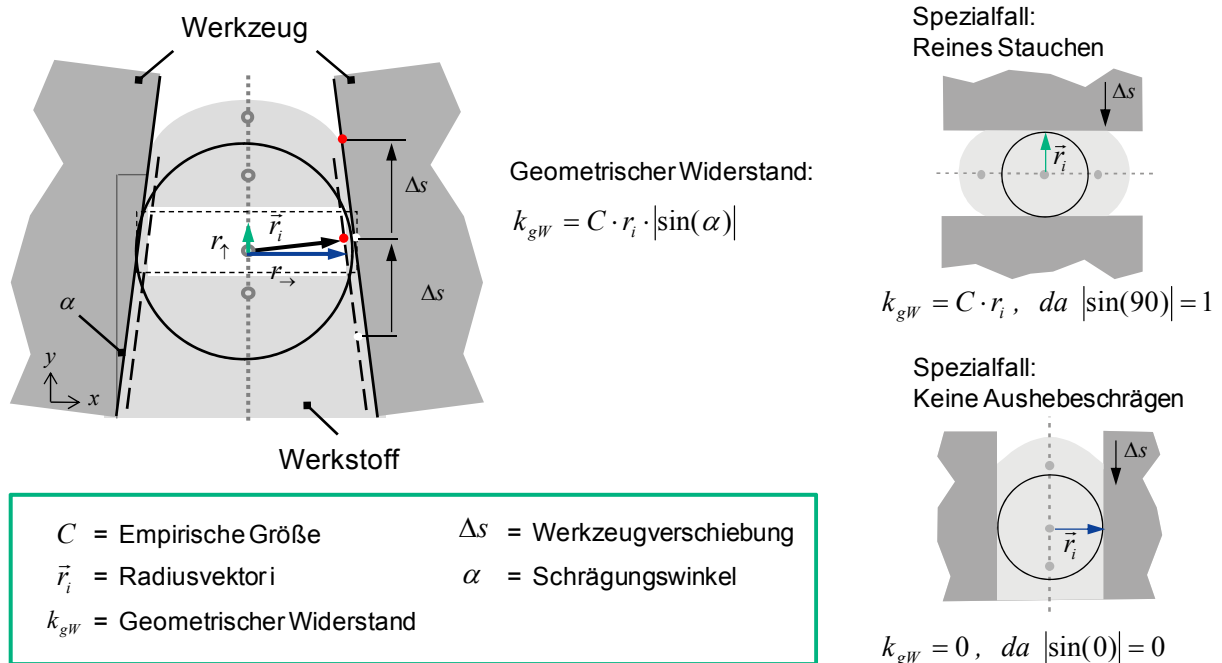


Abbildung 6: Geometrische Widerstandsberechnung eines Elements

Der geometrische Widerstand ist neben der Größe des Radiusvektors von dem Schrägungswinkel abhängig. Zur Verdeutlichung werden die Spezialfälle Steigen und Stauchen in einer Schnittebene betrachtet. Im Falle des reinen Stauchens ist die Sinusfunktion von α maximal, während sie bei der zur Werkzeugbewegung parallelen Ausrichtung der Gesenkgravur minimal wird und unter Annahme von Reibungsfreiheit keine Umformung stattfindet.

Zur Erhöhung der Genauigkeit für kritische Gravurbereiche, wie z. B. enge Rippen und Stege, ist vorgesehen, den geometrischen Umformwiderstand durch eine empirische Funktion C zu ergänzen, welche dem lokalen Eindringverhalten des Werkstoffs für eine konstante Temperatur und einem gegebenen Reibungszustand entspricht.

Zusammenfassung und Ausblick

Es wurde eine neuartige Methode zur Auslegung von Zwischenformen für das Gesenkschmieden vorgestellt, welche auf der rückwärtsgerichteten Betrachtung des Umformprozesses basiert. Grundlage bilden sogenannte Mediale Achsen und die darauf aufbauende Berechnung geometrischer Widerstände auf den selbigen. Eine Herausforderung und aktueller Forschungsschwerpunkt stellt die Übertragung des bestehenden 2D-Ansatzes auf Volumenkörper dar. Die derzeitigen Forschungsarbeiten konzentrieren sich daher auf die Entwicklung leistungsfähiger Algorithmen für die Berechnung der Medialen Achse im Gesenk sowie die Widerstandsberechnung mittels Graphen-Algorithmen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt in der Untersuchung und Ermittlung einer empirischen Größe C , die die Einflussgrößen Temperatur und Reibung für kritische Gravurbereiche berücksichtigt und durch FE-Simulationen erfolgt.

Die Umsetzung des Programmsystems für komplexe Schmiedegeometrien könnte den Auslegungsprozess von Zwischenformen für das Gesenkschmieden in Zukunft entscheidend verkürzen. Voraussetzung hierfür ist das Erzielen einer ausreichenden Genauigkeit der Simulationsergebnisse unter der Prämisse kurzer Berechnungszeiten, die einen konstruktionsbegleitenden Einsatz erlauben.

Danksagung

Der vorgestellte Bericht entstand im Rahmen des Forschungsprojektes “Schnelle inverse Materialflusssimulation für die Massivumformung mittels der dreidimensionalen Mediale Achse Transformation“ am Institut für Umformtechnik und Umformmaschinen (IFUM) und dem Institut für Mensch-Maschine-Kommunikation FG Graphische Datenverarbeitung (GDV) der Leibniz Universität Hannover. Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgesellschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung dieses Projektes.

Literatur

- [1] ALTAN, Taylan ; NGAILE, Gracious ; SHEN, Gangshu: *Cold and hot forging : Fundamentals and applications*. Materials Park, OH : ASM International, 2004.
- [2] MATHIEU, Hubertus: *Ein Beitrag zur Auslegung von Stadienfolgen beim Gesenkschmieden mit Grat*. Univ., Diss., 1990. Düsseldorf : VDI-Verl., 1991 (IFUM-Produktionstechnik Nr. 213).
- [3] BLUM, Harry ; WATHEN-DUNN, Weiant: *A Transformation for Extracting New Descriptors of Shape*. In: *Models for the Perception of Speech and Visual Form* (1967), S. 362–380.
- [4] WOLTER, Franz-Erich: *Cut Locus & Medial Axis in Global Shape Interrogation & Representation*, MIT Design Laboratory Memorandum 92-2 and MIT National Sea Grant Library Report, 1992
- [5] WOLTER, Franz-Erich; FRIESE, Karl-Ingo: *Local and Global Geometric Methods for Analysis Interrogation, Reconstruction, Modification and Design of Shape*, in Proc. CGI 2000, S. 137-151, IEEE Computer Society, 2000.
- [6] WIENSTRÖER, Martin: *Prozesssimulation der Stadienfolge beim Schmieden mittels Rückwärtssimulation*, Dissertation Universität Hannover, 2004
- [7] DIJKSTRA, E. W.: *A note on two problems in connexion with graphs*. In: *Numerische Mathematik* 1 (1959), Nr. 1, S. 269–271

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.

Dr. Franz-Erich Wolter ist Professor für Graphische Datenverarbeitung und Research Affiliate des Department of Mechanical Engineering am Massachusetts Institute of Technology (MIT). Er gilt als Pionier auf dem Gebiet der Berechnung von geodätischen Voronoi-Diagrammen und Medialen Achsen auf Freiformflächen.

Dipl.-Math. Philipp Blanke studierte Mathematik mit der Studienrichtung Informatik an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2005 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachgebiet Graphische Datenverarbeitung am Institut für Mensch-Maschine-Kommunikation.

Dipl.-Wirtsch.-Ing. Adrian Santangelo studierte Wirtschaftsingenieurwesen mit der Vertiefungsrichtung Produktionstechnik an der Leibniz Universität Hannover. Seit 2010 ist er wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Abteilung CA-Techniken am IFUM.