

Merkmalsgetriebene Prozessauslegung für das Gesenkschmieden

Die erfolgreiche Auslegung des Gesenkschmiedeprozesses ist eine anspruchsvolle Tätigkeit. Das liegt darin begründet, dass eine große Menge unterschiedlicher Einstellungsmöglichkeiten und Randbedingungen zu beachten sind, die sich teilweise untereinander beeinflussen. Hier wird ein neuer Ansatz vorgestellt, der auf der Untersuchung von Querschnittsflächen des Fertigteils basiert. Deren Eigenschaften sollen hinsichtlich typischer Prozessmerkmale untersucht werden.

To successfully design the process of forging is an ambitious task. This is due to the amount of parameters and basic conditions which interact in interdependency. In the following work a new approach is introduced based on parameters taken from cross section areas of the virtual representation of the forging part. These parameters are investigated to derive characteristic indications as an additional help to design a well suited-process route.

Aufgrund der großen Anzahl an Einflussmöglichkeiten und den zwischen ihnen herrschenden Interdependenzen ist die Auslegung des Gesenkschmiedeprozesses eine Herausforderung. Ausgehend von vorgegebenen Randbedingungen und der Endform des Werkstücks ist eine möglichst optimale Prozessroute zu entwickeln. Im Allgemeinen stellen die Ausgestaltung der Gratbahn für die Endform sowie Anzahl und Geometrien der Zwischenformen, die das Werkstück vor der Endformung einnimmt, die beiden wichtigsten beeinflussbaren Merkmale dar. Beides wiederum wirkt sich direkt auf den notwendigen Materialüberschuss und die Gesenkbelastung aus.

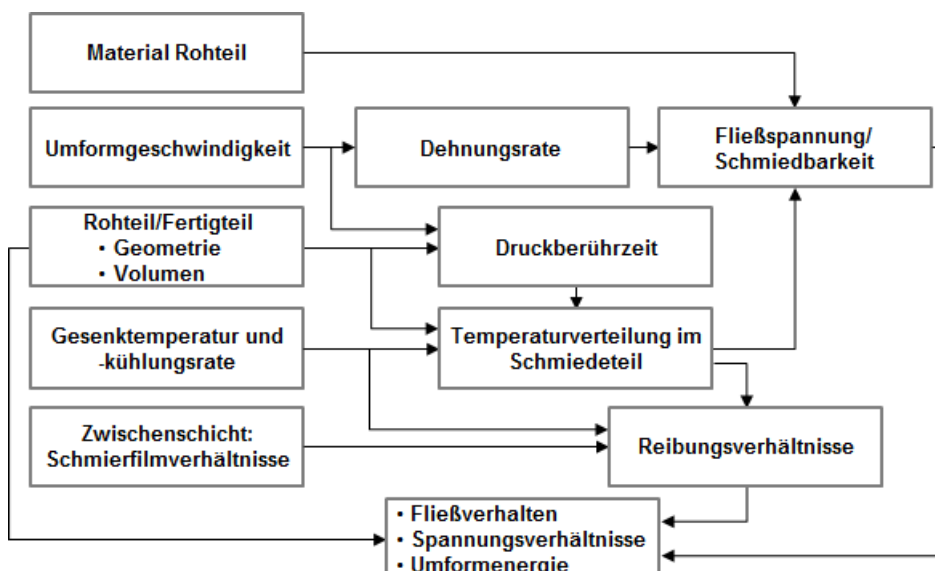


Abbildung 1 Abhängigkeiten wichtiger Prozessparameter beim Gesenkschmieden voneinander (nach [ALT83])

Die Schwierigkeiten bei der Auslegung ergeben sich durch unterschiedliche Eigenarten, von denen drei wichtige hier kurz vorgestellt werden: Zunächst muss der Prozess invers ausgelegt werden, weil dem Konstrukteur in aller Regel das Fertigungsziel, also die Endform des Werkstückes, als Ausgangspunkt für die Auslegung des Prozesses vorliegt. Daneben beeinflussen sich die Ausprägungen der unterschiedlichen Ausgestaltungsmerkmale gegenseitig (vergl. Abbildung 1), weshalb die Auslegung meist ein sich mehrere Male wiederholender Prozess ist. Darüber hinaus stehen die zu optimierenden Randbedingungen und Ziele zueinander im Widerspruch.

Die beiden letztgenannten Punkte hängen zusammen. Beispielhaft dafür sei auf den zumeist notwendigen Überschuss an Einsatzmasse hingewiesen, mit dessen Hilfe Formfüllung sichergestellt wird. Gleichzeitig steigen damit aber auch die Kosten für Erwärmung und für die Einsatzmasse, wobei diese mitunter einen Anteil von über 70 % der Herstellungskosten ausmacht. Weiterhin kann durch eine Erhöhung des Gratanteils (und damit der Einsatzmasse) zwar lokal in der Gesenkgeometrie die Belastung verringert werden, wodurch wiederum der Verschleiß reduziert und auf diesem Wege die Standmenge erhöht werden kann. Zugleich steigt jedoch die notwendige Gesamtumformkraft und damit einhergehend sowohl die Belastung an anderer Stelle als auch die von der jeweiligen Maschine zur Verfügung zu stellende Energie.

Auslegung von Gesenkschmiedeprozessen

Generell ist bei der Auslegung zwischen dem Bauteil und dessen Abbildung in den entsprechenden Werkzeugkavitäten zu unterscheiden. Die umformgerechte Ausgestaltung eines funktionstragenden Bauteils (Fertigform), also die fertigungs-, fließ- und bearbeitungsgerechte Konstruktion, ist weitestgehend bekannt. Die zu einer Fertigform führende Fertigungsroute, also die Ausprägungen der beeinflussenden Merkmale wie Anzahl und jeweilige Geometrie der Zwischenformen sowie Gratbahncharakteristik, ist nach wie vor Gegenstand vielfältiger Untersuchungen, obwohl dies in der Vergangenheit schon Inhalt zahlreicher Forschungsverfahren war. Erfahrungswissen spielt bei der Auslegung nach wie vor eine große Rolle, so dass darauf in der Norm „Gesenkschmiedeteile aus Stahl“ [DIN07] sogar explizit verwiesen wird. Generell kann angemerkt werden, dass die zu diesem Thema veröffentlichten Beiträge derart zahlreich sind, dass nur ein kleiner Ausschnitt an dieser Stelle wiedergegeben werden kann.

Für die Auslegung stehen dem Konstrukteur unterschiedliche Hilfsmittel zur Verfügung. Drei dieser Hilfsmittel werden hier vorgestellt: die Finite-Elemente-Methode (FEM) einerseits und die Massenvorverteilung sowie die Nutzung von Zwischenformen zur Geometrievorbildung andererseits. Diese Auswahl beruht auf der Tatsache, dass sie die wohl bekanntesten und meist genutzten Hilfsmittel darstellen. Die dabei vorgenommene Einteilung hängt von der folgenden Überlegung ab: Die beiden letztgenannten Hilfsmittel beruhen auf einer ganzheitlichen Betrachtung des Werkstückes (genauer: jeweils eines speziellen Merkmals des gesamten Bauteils, nämlich der

Massenverteilung, bzw. der Endgeometrie). Demgegenüber wird bei der Nutzung von Finiten Elementen die virtuelle Ausgangsform des Werkstück in kleine Abschnitte (eben die namensgebenden Finiten Elemente) unterteilt, so dass für diese kleinen Abschnitte die partiellen Differentialgleichungen, die die plastische Formänderung beschreiben, mit guter Näherung berechnet werden können. Es werden also kleine, miteinander zusammenhängende Teile des Werkstücks betrachtet.

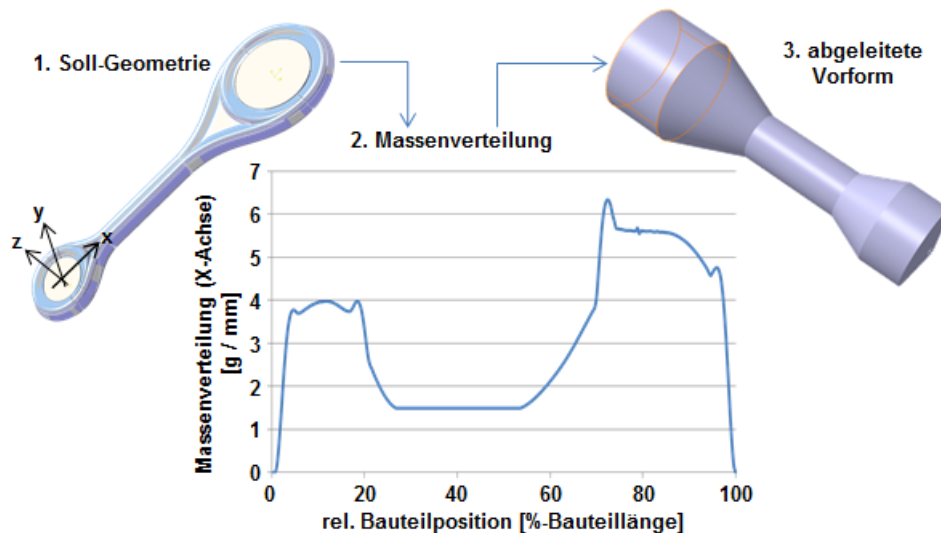


Abbildung 2 CAD-Repräsentation einer Fertigform und Hilfsmittel Massenverteilungsschaubild

Dabei ist zu beachten, dass sich diese Hilfsmittel nicht konkurrierend gegenüberstellen, sondern einander sinnvoll ergänzen, wie im Folgenden dargelegt wird. Die Darstellung der Massenverteilung mithilfe eines Schaubildes (vergl. Abbildung 2) wird genutzt, um die im Stangenabschnitt noch über die Länge gleichmäßig verteilte Masse grob vorzuverteilen, bspw. mittels Reckwalzen. Mithilfe dieser ersten Formgebung kann die Fertigform über eine weitere Zwischenform (entsprechend einem bekannten Regelwerk [LAN58]) angenähert werden. Dieses Vorgehen dient dem Ziel, ein möglichst günstiges Verhältnis von Einsatz- zu Fertigteilmasse zu erhalten, ohne dass Schmiedefehler auftreten. Zur Umgehung von zeit- und kostenintensiven Probe-schmiedungen können die gefundenen Ergebnisse von Massenvorverteilung und Zwischenformgeometrie als Eingangsgrößen für die FE-Simulation dienen. Diese drei Hilfsmittel ergänzen einander also, indem die für diese Hilfsmittel genutzten Daten einerseits auf dem zu erzielenden Prozessergebnis (Massenvorverteilung und Zwischenformgeometrie) und andererseits auf dem Prozessausgangspunkt (FE-Simulation) beruhen.

Zur Auslegung von Prozessen sind in der Vergangenheit umfangreiche Untersuchungen unternommen worden. Lange hat sich dabei schon sehr ausführlich mit der Massenvorverteilung, der Querschnittsvorbildung und weiteren grundlegenden Parametern der Prozessauslegung beschäftigt [LAN58]. Diese Ausführungen hat Vieregge durch eine sehr tiefgreifende und umfassende Analyse hinsichtlich der

Gratbildung und dessen Einfluss auf die Formfüllung sowie auf den Gesenkinnen- druck erweitert und auf diesem Wege eine von der Geometrie der Fertigform abhängige Formel für das sogenannte Gratbahnverhältnis (Quotient aus Breite b und Dicke s der Gratbahn) definiert [VIE70]. Eine ebenda generierte Idee wurde von Klawitter umgesetzt [KLA05]: Die Gratbahngeometrie wird für ein Bauteil nicht global, sondern segmentweise (entsprechend unterschiedlichen Bauteilbereichen) definiert, um Überschussmaterial zu minimieren. Als Hilfsmittel dient eine Simulation, bei der eine sog. „unendliche“ Gratbahn definiert ist (in der Breite nicht begrenzte Gratbahn) und mit einem ausreichenden Materialüberschuss gearbeitet wird. Aus dem Ergebnis der Simulation wird auf Bereiche zurückgeschlossen, an denen der durch die Gratbahn- geometrie sich einstellende Fließwiderstand erhöht werden muss, um eine bessere (frühere) Formfüllung zu erreichen: Ausgehend von der sich ausbildenden Gratbahn werden also unterschiedliche Gratbahnverhältnisse entlang den Bauteilbereichen ausgebildet.

Mathieu greift die Hinweise in [LAN58] auf und ergänzt sie, zudem verarbeitet er sie in einem wissensbasiertem System [MAT91]. Dazu erstellte er eine Werkstofffluss- simulation, die auf dem Prinzip des niedrigsten Zwanges basiert (vergl. dazu [STO68]) und mit deren Hilfe die Auslegung überprüft werden kann. Dieses Prinzip wird über sog. Verdrängungsbahnen innerhalb der Fertigeometrie realisiert. Diese Bahnen werden mit Hilfe von Mittelpunkten von Kugeln gebildet: Dabei müssen diese Mittel- punkte so gelegt werden, dass bei größtmöglichem Radius die Kugeloberfläche an möglichst vielen Stellen die Werkzeugkavität berührt, im Anschluss daran werden diese Mittelpunkte zu den Verdrängungsbahnen miteinander verbunden. Hintergrund dieses Vorgehens ist, dass die so gefundenen Bahnen für den Materialfluss den ge- ringst möglichen Widerstand (breiteste Verdrängungsbahn) aufweisen.

Dieses Prinzip des niedrigsten Zwanges hat Wienströer für eine zeitliche inverse Si- mulation für rotationssymmetrische Bauteile umgesetzt [WIE04]. Ausgehend von ei- ner Fertigform werden simulativ Zwischenformen abgeleitet, indem über den vorher eingeführten Verdrängungsbahnen ein sog. geometrischer Widerstand definiert wird, der mit Hilfe von unterschiedlichen Parametern wie dem Winkel zwischen Werk- stofffluss und Werkzeugbewegung (also über die reine Geometrie der Bahn hinaus- gehend) berechnet wird. Mit Hilfe von Inkrementen, die den Weg des Werkzeuges widerspiegeln, werden Materialvolumina zwischen Werkzeug und Werkstückober- fläche berechnet, die mit Material aufgefüllt werden müssen. Dieses Material wird von „freien“ Rändern des Werkstücks (Rändern ohne Werkzeugberührung) transfe- riert. Eine Weiterentwicklung der Rückwärtssimulation für beliebige Gesenkschmie- deprozesse zeigt die Schwierigkeiten auf, die sich bei dieser zeitlich inversen Simula- tion ergeben [BEH13], [SAN13].

Für die Ableitung von Zwischenformen hat Spies eine sehr ausführliche praktische Untersuchungen (auch unter Berücksichtigung verschieden angetriebener Umform- maschinen) durchgeführt und ein Regelwerk abgeleitet [SPI59]. Sedighi nutzt einen

weiteren Ansatz, um die Zwischen- oder Ausgangsform zu modifizieren [SED08]. Dafür werden ausgewählte Querschnittsflächen im Fertigteil nach der Simulation hinsichtlich der ausgebildeten Querschnittsfläche inklusive Gratanteil analysiert. Darauf aufbauend wird die Vorform entsprechend modifiziert, indem die Breite der entsprechenden Querschnittsfläche in Richtung der Fläche, an der sich die Gratbahn befindet, mittels eines Korrekturfaktors reduziert wird. Das geschieht so lange, bis sich keine Formfüllung mehr einstellt. Als Kontrollkriterium dient dabei der Verlauf der Umformkraft über dem Umformweg. Dieser erfährt eine jähe Steigungsänderung bei Beginn der Gratausbildung, und diese soll so nahe wie möglich an das Ende der Abwärtsbewegung (Umformweg) des Werkzeuges gelegt werden.

Eine ähnliche Herangehensweise nutzt Hatzenbichler [HAT08]. Im Rahmen von FE-Simulationen betrachtet er die Materialflusswege von Elementen, die als Agenten dienen. Von besonderem Interesse sind dabei diejenigen Agenten, die an Stellen von früh oder besonders stark ausgebildetem Grat ihren Endpunkt finden. Dort, wo diese sich in der Ausgangsgeometrie befinden, wird von dieser Geometrie Material entsprechend dem sich am Ende der Simulation ausgebildeten Grat entfernt, um den entsprechenden Gratanteil zu verringern. Eine für rotationssymmetrische Fertigformen genutzte Herangehensweise nutzt Cai [CAI11]: Er untersucht, inwiefern sich Äquipotenziallinien eines elektrischen Feldes zur Ableitung von Vorformen nutzen lassen. Es wird dabei bspw. dasjenige elektrische Feld betrachtet, das sich zwischen dem Rohteil als Anode und der Fertigform als Katode einstellt. Die sich dahinter verborgene Idee gründet auf der Tatsache, dass elektrische Felder entsprechend der niedrigsten dafür einzusetzenden Energie ausgebildet werden und sich damit ähnlich verhalten wie Materialverdrängungsbahnen beim Umformen, die nach dem Prinzip des niedrigsten Zwang berechnet werden können.

Bedarf

Trotz dieser Hilfsmittel und Untersuchungen besteht noch Bedarf an weiterer Unterstützung bei der Prozessauslegung. Das ist an unterschiedlichen Umständen ersichtlich. So sind die vorab beschriebenen Vorgehen häufig mit sehr vielen und durchaus zeitaufwändigen Wiederholungen verbunden. Dazu kommt, dass die oben vorgestellten Hilfsmittel (Modelle) jeweils eine Vereinfachung darstellen, so dass Einflüsse, die sich aus den vorab erwähnten gegenseitigen Abhängigkeiten ergeben, nicht erfasst werden können. Zudem erlauben sie aus sich selbst heraus nur selten eine Aussage dahingehend, ob bei einem eingestellten Parametersatz (vergl. Abbildung 1) eine optimale Lösung gefunden ist. Bei dieser Überlegung spielt das Problem eine Rolle, welche Lösung einer möglichen Lösungsmenge als optimal anzusehen ist, da sich mögliche Ziele in einem Konflikt zueinander befinden (vergl. Einleitung). Erschwerend kommt hinzu, dass eine ausreichend komplette Untersuchung aufgrund Zeitmangels häufig gar nicht in Frage kommt. In diesem Falle wird unter der zumeist un-

umgehbarer Prämisse, die Endform sicher füllen zu müssen, ein wenig oder gar nicht optimiertes Übermaß an Materialüberschuss billigend in Kauf genommen.

Der Umstand, dass weitere Ansätze wie Rückwärtssimulation oder Methoden der Künstlichen Intelligenz recht kontinuierlich untersucht und auch veröffentlicht werden, stellt ein weiteres Anzeichen für die Tatsache dar, dass das Thema noch nicht ausreichend oder befriedigend bearbeitet ist. Im folgenden Abschnitt wird deswegen ein neuartiger Ansatz vorgestellt, um Bauteile zu analysieren und darauf aufbauend auf die Auslegung des Prozesses zurückzuschließen.

Ansatz

Um den Ansatz zu erklären, ist zunächst ein charakteristische Merkmal des Gesenk-schmiedeprozesses hervorzuheben: Während im Rohteil sowohl die Einsatzmasse als auch die Querschnittsfläche konstant verteilt sind, ändern sich diese Werte im Bauteilverlauf des Fertigteils. Dieser Eigenart wird mit den beiden oben genannten Hilfsmitteln „Massenverteilung“ und „Geometrieerbildung“, also der „Zwischenform“, Tribut gezollt. Für deren Auslegung existieren allgemeine Hinweise. Ein auf konkreten, bspw. bauteilindividuellen, Werten beruhendes Regelwerk für diese Tatsache ist allerdings nicht bekannt: Diesem Mangel soll mit dem hier vorzustellenden Ansatz begegnet werden.

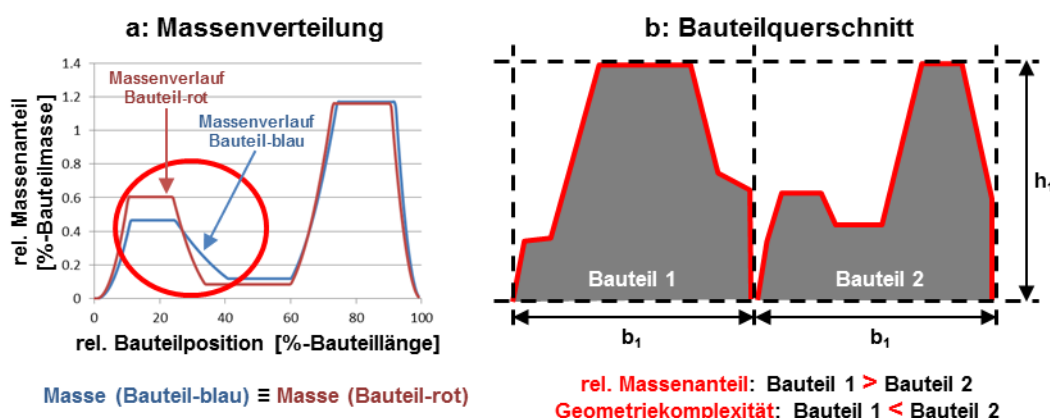


Abbildung 3 Aspekt der Massenänderungsrate im Bauteilverlauf (a) und der Geometriekomplexität des Bauteilquerschnitts (b)

Neben der Berücksichtigung der absoluten Massenverteilung im Fertigteil ist zu beachten, dass die Änderungsrate des relativen Massenanteils entlang des Bauteilverlaufs einen erheblichen Einfluss auf den Prozess aufweist: An Stellen mit hohen Massenänderungsraten ist davon auszugehen, dass in Bezug auf den Materialfluss während des Prozesses hohe Geschwindigkeiten oder hohe Geschwindigkeitsgradienten vorliegen (vergl. dazu die unterschiedlichen Massenänderungsraten in (Abbildung 3, a – roter Kreis). Diese Tatsache stellt natürlich eine hohe Belastung sowohl für das Gesenk als auch für das Einsatzmaterial an dieser Stelle dar.

Der zweite vorgenannte Aspekt, der mit der Massenumverteilung während des Prozesse teilweise korreliert, ist die definierte Querschnittsänderung des Werkstücks während des Prozessverlaufs: Die geometrisch primitive Ausgangsform (Vierkant oder Zylinder) wird in eine komplexere Form überführt. Dabei ist zu berücksichtigen, dass eine größere Komplexität der Querschnittsfläche nicht gleichzeitig mit einer größeren Masse an dieser Stelle gleichzusetzen ist (Abbildung 3, b). Dass trotzdem ein erheblicher Einfluss vorliegen kann, ist daran ersichtlich, dass mit steigender Querschnittskomplexität die Formänderung an dieser Stelle im Werkstück ansteigen muss. Ein weiterer Gesichtspunkt bei Vorliegen dieser Situation (keine oder geringe Massenänderung bei hoher Änderung der Querschnittsflächenkomplexität) besteht in der Notwendigkeit, an einer solchen Stelle den Gesenkinnendruck zu erhöhen, um Formfüllung zu erreichen. (Dazu sei angemerkt, dass vor dem Hintergrund von Masseneinsparung und Funktionsintegration heutzutage Bauteilgeometrien eher komplexer als einfacher werden.)

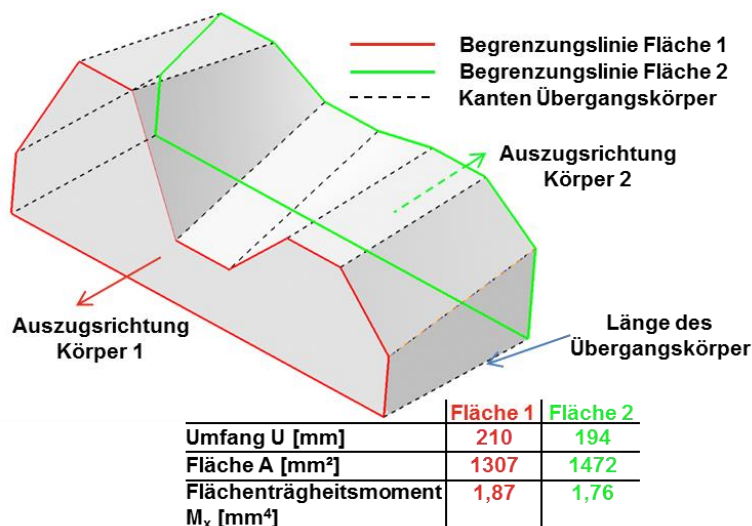


Abbildung 4 Übergang von Bauteilquerschnitten unterschiedlicher Flächenkomplexität

Parallel zur Massenverteilung ist festzuhalten, dass auch die Änderung der Querschnittsfläche, also die Erhöhung ihrer Komplexität, zwei Aspekte aufweist. Zum einen liegt eine absolute Komplexitätsänderung vom Rohteil zum fertigen Bauteil vor, zum anderen kann die Querschnittsfläche an sich und damit deren Komplexität entlang des Bauteilverlaufs (Fertigform) variieren (vergl. Abbildung 4). In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass die „Geschwindigkeit“ des Übergangs von einer Querschnittfläche zur anderen („Länge des Übergangskörpers“, Abbildung 4) auch eine wichtige Kenngröße darstellt.

Dies überträgt sich – gleichfalls wie bei der Masse – auch auf den Prozessverlauf. Bisher existiert kein Ansatz, diese Komplexität zu messen und hinsichtlich ihrer Bedeutung für die Prozessauslegung zu bewerten. (Lediglich die dreistufige Berücksichtigung der Feingliedrigkeit in der Norm „Gesekschmiedeteile aus Stahl“ [DIN07] stellt einen vagen Ansatz in diese Richtung dar.) Deswegen existieren auch keine

Angaben über die Auswirkungen der Korrelation von Bauteilmasse und Geometrie-komplexität auf den Prozess.

Um den vorgenannten Aspekten zur Massenverteilung und Geometrie-komplexität Rechnung zu tragen, wird eine Methodik erstellt, mit deren Hilfe sich diese Einflüsse untersuchen lassen. Dafür sind Daten zur Fertigteilgeometrie und zum Prozessergebnis (bspw. Formfüllung und Gratausbildung) notwendig, um solche eventuell bestehenden Zusammenhänge auswerten zu können.

Da die Geometrie-komplexität einer Fläche nicht definiert ist, werden unterschiedliche Werte zur Charakterisierung von Flächen wie das Flächenträgheitsmoment, der Flächeninhalt sowie der jeweilige Umfang untersucht. Diese Werte werden einzeln und in unterschiedlichen Kombinationen (z. B. Kennwert „Umfang/Flächeninhalt“) hinsichtlich einer möglichen Korrelation zum Prozessergebnis untersucht. In diesem Zusammenhang ist anzumerken, dass eine reine Vergrößerung der Fläche lediglich einer Veränderung der Masse an dieser Stelle gleichkommt und dementsprechend nur eine Veränderung der Massenverteilung im Bauteilverlauf darstellt.

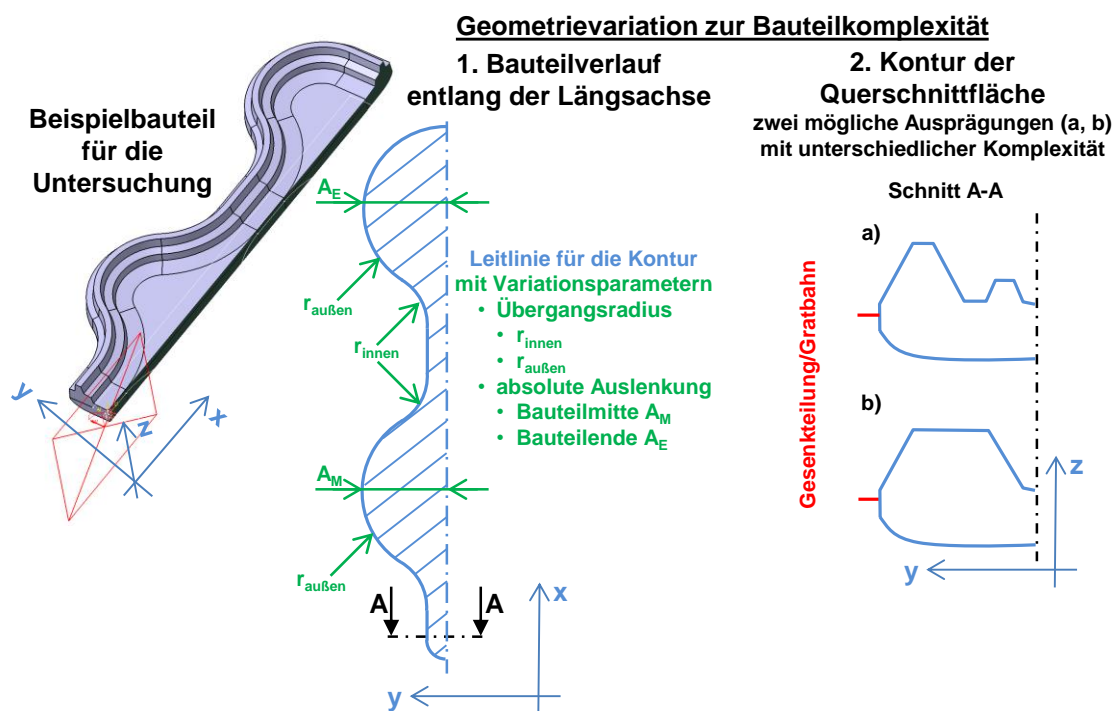


Abbildung 5 Untersuchungsmerkmale zur Geometrie-komplexität bei Bauteilen

Für die angestrebte Untersuchung werden zwei einfache Merkmale, die sich auf die Bauteilkomplexität auswirken, berücksichtigt, wobei das Bauteil zur Vereinfachung achsensymmetrisch aufgebaut ist. Zum einen existiert die Auslenkung von der Bauteilmitte, also die Verteilung der Masse über den Querschnitt (vergl. Abbildung 5, „Bauteilverlauf“). Eine solche Auslenkung wiederum zerfällt in drei unterschiedliche Unterpunkte, die berücksichtigt werden müssen. Zunächst ist das absolute Maß an Auslenkung wichtig (bspw. absolute Auslenkung „ A_E “, siehe Abbildung 5), daneben

aber natürlich auch die „Geschwindigkeit“, mit der diese Auslenkung stattfindet (dy/dx im Bauteilverlauf), die von den entsprechenden Radien (r_{innen} , $r_{\text{außen}}$) und den von ihnen aufgespannten Winkeln abhängt. Als dritter Unterpunkt ist zu beachten, ob sich die Auslenkung in der Bauteilmitte oder an einem Ende befindet, da sich dadurch ein Unterschied in den beeinflussbaren Freiheitsgraden (z. B. Gratbildung und Fließrichtung) ergeben. Neben der Auslenkung ist zum zweiten die eigentliche Kontur der Querschnittsfläche in die Analyse einzubeziehen (vergl. Abbildung 5, „Kontur der Querschnittsfläche“). Bei diesem Aspekt ist ein Übergang zwischen unterschiedlichen Querschnitten einzubeziehen. Zunächst soll die Kröpfung, also die Auslenkung der Mittenachse selbst um einen bestimmten Winkel, unberücksichtigt bleiben.

Vorgehen

Um Daten für die Massenverteilung und die Geometriekomplexität der Fertigteilgeometrie zu erheben, wird das CAD-Modell einer Fertigform sukzessive und mit jeweils identischem Abstand geschnitten (vergl. Abbildung 6, Schritt 2). Nach jedem Schnitt werden Daten über die jeweilige Schnittfläche, die verbleibende Bauteilmasse sowie die Schnittposition erhoben (vergl. Abbildung 6, Schritt 3) und anschließend in eine Tabelle (MS-Excel) ausgelesen. Diese Analyse wird automatisch in allen drei Ausdehnungsrichtungen des Bauteils durchgeführt.

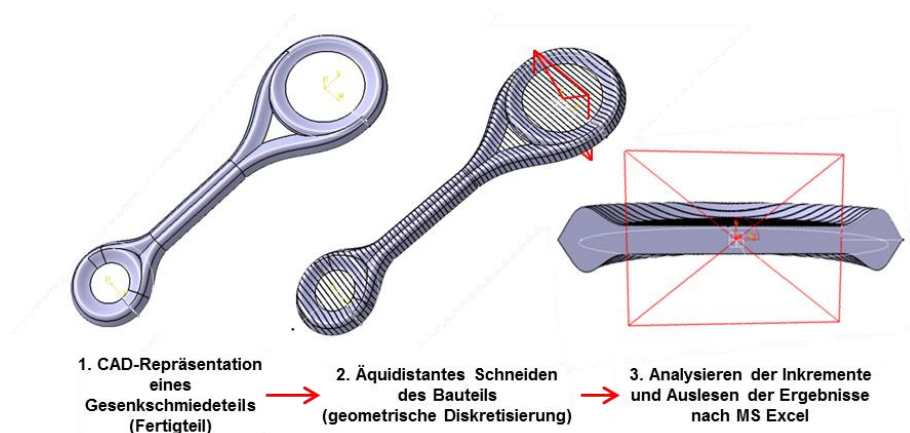


Abbildung 6 Ansatz zur Prozessauslegung von Langteilen

Die notwendigen Erhebungen hinsichtlich eines vermuteten Einflusses auf das Prozessergebnis (wie Gratbildung) werden zunächst auf Simulationsergebnissen beruhen. In einem ersten Schritt wird für eine einfache Endformgeometrie (Fertigform, bspw. wie in Abbildung 6) die Korrelation von Gratbildung und den erhobenen Kennwerten berechnet. Als zweiter Schritt wird die Robustheit dieser Methodik durch Variation der Eingangswerte für die Simulation überprüft. Zu diesen Variationen gehören die Absolutmaße der Fertigform (Geometrie entsprechend den in Abbildung 5 vorgestellten Merkmalen, z. B. Skalierungseinflüsse), eine Änderung des Werkstoffs (Fließbedingungen) und eine Berücksichtigung unterschiedlicher Vorformen, die auf

die gleiche Weise analysiert werden können wie die Endformgeometrie. Die Validierung an einem realen Industrieteil als dritter Schritt steht am Ende einer solchen Untersuchung.

Ausblick

Neben einer validierten Vorgehensweise scheint natürlich sinnvoll, ein möglichst allgemeingültiges Regelwerk abzuleiten, mit dessen Hilfe die Auslegung für konkrete Geometrien abgebildet oder unter Einbeziehung von Randbedingungen (wie Werkzeugbelastung oder Materialpreis) optimiert werden kann. Weiterhin ist denkbar, dass bei einer erfolgreichen Einführung der Methodik die Möglichkeit besteht, sinnvolle Ausgangsgeometrien für einen Versuchsplan im Rahmen einer Prozessauslegung mit Hilfe der Finite Element-Simulation zu generieren, um notwendige Iterationen zu minimieren.

Generell ist denkbar, eine solche Vorgehensweise auch auf andere Fertigungsprozesse zu übertragen: Bei Tiefziehvorgängen, die auch auf globale Weise ausgelegt werden, ließe sich auf gleiche Art und Weise die vom Bauteil aufgespannte Fläche bemessen und hinsichtlich Niederhalterkraft oder Platinenzuschnitt auswerten.

Literaturverzeichnis

- [ALT83] Altan, T.; Oh, S.-I.; Gegel, H. L.: Metal forming. Fundamentals and applications. American Society for Metals, Metals Park, OH, 1983.
- [BEH13] Behrens, B.-A. et al.: Verkürzte Prozessauslegung für das Gesenkschmieden. In ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb, 2013, 108; S. 837–840.
- [CAI11] Cai, J.; Li, F.; Liu, T.: A new approach of preform design based on 3D electrostatic field simulation and geometric transformation. In The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2011, 56; S. 579–588.
- [DIN07] DIN - Deutsches Institut für Normung e. V.: Gesenkschmiedeteile aus Stahl - Maßtoleranzen - Teil 1: Warm hergestellt in Hämmern und Senkrecht-Pressen. Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007.
- [HAT08] Hatzenbichler, T.; Buchmayr, B.: Vorformoptimierung für das Gesenkschmieden mittels numerischer Simulation. In BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, 2008, 153; S. 413–417.
- [KLA05] Klawitter, G.: Werkstoffflusssteuerung beim Gesenkschmieden durch eine im Gesenkumlauf variierende Gratbahngeometrie. PZH Produktionstechn. Zentrum, Garbsen, 2005.
- [LAN58] Lange, K.: Gesenkschmieden von Stahl. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 1958.
- [MAT91] Mathieu, H.: Ein Beitrag zur Auslegung von Stadienfolgen beim Gesenkschmieden mit Grat. VDI-Verl., Düsseldorf, 1991.
- [SAN13] Santangelo, A. et al.: Fast 3D inverse simulation of hot forging processes via Medial Axis Transformation: an approach for preform estimation in hot die forging. In Production Engineering, 2013, 7; S. 409–416.
- [SED08] Sedighi, M.; Tokmechi, S.: A new approach to preform design in forging process of complex parts: JOURNAL OF MATERIALS PROCESSING TECHNOLOGY, 2008; S. 314–324.
- [SPI59] Spies, K.: Die Zwischenformen beim Gesenkschmieden und ihre Herstellung durch Formwalzen. VS Verlag für Sozialwissenschaften, Wiesbaden, 1959.
- [STO68] Storožev, M. V.; Popov, E. A.: Grundlagen der Umformtechnik. Verl. Technik, 1968, Berlin, 1968.
- [VIE70] Vieregge, K.: Ein Beitrag zur Gestaltung des Gratspalts beim Gesenkschmieden. Westdt. Verlag, Köln, 1970.
- [WIE04] Wienströer, M.: Prozesssimulation der Stadienfolge beim Schmieden mittels Rückwärtssimulation, elektr. Ressource, TIB Universität Hannover, 2004.