

Simulative Betrachtung von Prozessketten in der Fertigung



Im Produktentstehungsprozess kommen simulationsgestützte Analysen zur Auslegung von Bauteilen und Produktionsanlagen, Werkzeugen und Prozessen zum Einsatz. Auch wenn die heute möglichen Simulationstechniken mittlerweile die Betrachtung der gesamten Prozesskette für alle Produktionsschritte ermöglichen, wird dies in der Industrie nur äußerst selten angewendet. Im Folgenden wird das Potenzial der Prozesskettenmodellierung exemplarisch vorgestellt.

AUTOREN



Eric Segebade, M.Sc.

ist akademischer Mitarbeiter im Team Zerspanung des Forschungsbereichs Fertigungs- und Werkstofftechnik am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)



Dipl.-Ing. Michael Gerstenmeyer

ist Teamleiter Zerspanung des Forschungsbereichs Fertigungs- und Werkstofftechnik am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)



Dr.-Ing. Frederik Zanger

ist Oberingenieur im Forschungsbereich Fertigungs- und Werkstofftechnik am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)



Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

ist Institutsleiter des Forschungsbereichs Fertigungs- und Werkstofftechnik am wbk Institut für Produktionstechnik und Mitglied der Kollegialen Institutsleitung des Forschungsbereichs Werkstoffkunde am Institut für angewandte Materialien des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT)

Bei der Herstellung metallischer Bauteile kann die Prozesskette aus einer Vielzahl von Prozessen, beginnend zum Beispiel beim Umformen bis hin zum Surface Finishing von Funktionsflächen, bestehen. Dabei können sich die Bauteilzustände durch hohe mechanische und thermische Belastungen in den jeweiligen Prozessschritten maßgeblich ändern und die folgenden Prozessschritte hinsichtlich ihrer resultierenden Bauteilzustände nachhaltig beeinflussen. Diese Änderungen wirken sich insbesondere auf Randzonenzustände wie Eigenspannungen oder Verfestigungen und Phasenanteile und -verteilungen oder Änderung des Gefüges aus. Mit Hilfe neuer Kenntnisse über die Wechselwirkungen zwischen Prozessen und Bauteilen können bereits mittels der FEM-Simulation die Eigenschaften von Bauteilen zunächst vorausgesagt und später im Prozess gezielt eingestellt werden. Hierbei stehen besonders die genannten Charakteristika der Bauteilrandzonen, wie Eigenspannungsverteilungen im Fokus. Diese üben einen großen Einfluss auf die Eigenschaften bei schwingender oder tribologischer Beanspruchung aus. Die definierte Erzeugung von Bauteilrandzonen, aber auch die schädigungsarme Bearbeitung spielen dabei eine große Rolle.

Sowohl in der industriellen Anwendung als auch in aktuellen Forschungsvorhaben haben sich in den Prozessschritten vom Gießen bis hin zum Surface Finishing von Funktionsflächen jeweils spezielle FEM-Simulationen etabliert. Industriell weit verbreitet ist unter anderen die Umformsimulation mit anschließender Wärmebehandlung beziehungsweise die Simulation von mechanischen Fügeverbindungen. Hier werden Gesenke, Matrizen oder Tiefziehwerkzeuge hinsichtlich der optimalen Materialausnutzung, Faltenbildung oder auch des Werkzeugverschleißes bereits detailliert simulativ untersucht. Die Zerspanung oder auch mechanische Oberflächenbehandlung, die sich im Vergleich zur

Umformtechnik durch hohe Scherverformungen bei Dehnraten bis zu Größenordnungen um 10^6 1/s auszeichnen und in aller Regel als letzte Schritte einer Prozesskette die finalen Oberflächenzustände erzeugen, werden dagegen im Wesentlichen forschungsseitig auf einem hohen Detaillierungsgrad mittels FEM-Simulationen untersucht. Hierbei stehen die resultierenden Bauteilrandzonenzustände nach der Zerspanung im Fokus, was sich unter dem Begriff „Surface Engineering“ zusammenfassen lässt. So kann es beispielsweise bei der Zerspanung höherfester Stahlwerkstoffe prozess- und parameterbedingt zur Phasenumwandlung, das heißt Ausbildung von martensitischen Bauteilrandschichten kommen. Diese Randschichten zeichnen sich durch eine hohe Härte, Sprödigkeit und Rissanfälligkeit aus. Simulativ wurde am Beispiel 42CrMo4 gezeigt, dass eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit bei gleicher Zustellung zu martensitischen Randschichten führt [1].

Auch das angewandte Kühlkonzept kann simulativ bewertet werden. So führt beispielsweise der Einsatz von Minimalmengenschmierung zu geringeren Temperaturen und wirkt sich auf die sich ausbildende Randzone aus [2]. Mit einem definierten Einsatz von Kühlkonzepten kann die Phasenumwandlung in den Randzonen im Vergleich zur Trockenbearbeitung vermieden werden, indem die Prozesstemperatur unterhalb der Umwandlungstemperatur gehalten wird [3]. Eine weitere Zielgröße ist die Bildung einer reibungsarmen und verschleißresistenten, teils nanokristallinen Mikrostruktur in der Randschicht nach der Zerspanung oder auch mechanischen Oberflächenbehandlung. Die simulative Analyse dieser Prozesse hat gezeigt, dass die Ausprägung nanokristalliner Randschichten neben den Prozessparametern wie Vorschub und Drehzahl auch von der Schneidkantenmikrogeometrie abhängt [4-5].

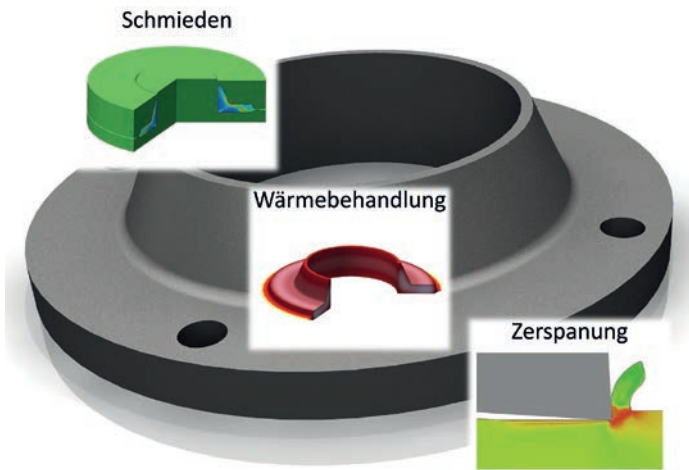


Bild 1: Modellierung der Prozessschritte für die Flanschfertigung

Der derzeitige Trend der ganzheitlichen Betrachtung der Prozesskette eines Bauteils rückt insbesondere bei der Fertigung komplexer Bauteile zunehmend in den Vordergrund. Dies wurde beispielsweise am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) im Rahmen des von der DFG geförderten Graduiertenkollegs 1483 betrachtet, das bereits im Jahr 2009 begann [6]. Sowohl die Umformung in Kombination mit der Wärmebehandlung als auch die Zerspanung beziehungsweise mechanische Oberflächenbehandlung haben oftmals gemein, dass bei der Prozesssimulation von idealisierten Randbedingungen ausgegangen wird. Die sich aus der gesamten Prozesskette ergebende Bauteilhistorie wird dabei in der Regel nicht berücksichtigt.

So ausgelegte Bauteile zielen meist auf wenige Prozessschritte wie beispielsweise Schmieden und Wärmebehandlung ab. Nachfolgende Bearbeitungsschritte finden dabei kaum Beachtung. Insbesondere die Zerspanbarkeit sowie der Spanfluss stellen bei den für das Schmieden optimierten Werkstoffen eine Herausforderung in der Zerspanung dar. Einige dieser Werkstoffe gelten in diesem Kontext als schwer zerspanbar und stellen hohe Ansprüche an die Werkzeuge und Prozessführung. Die ganzheitliche Auslegung von schmiedbaren und zerspanbaren Werkstoffen kann durch Prozesskettensimulationen erheblich erleichtert werden. In der folgenden exemplarisch dargestellten, simulativ durchgeführten Prozesskette, bestehend aus Massivumformung, anschließender Wärmebehandlung sowie einer spannenden Endbearbeitung von Funktionsflächen, wird der Einfluss der Bauteilhistorie eindrücklich dargestellt.

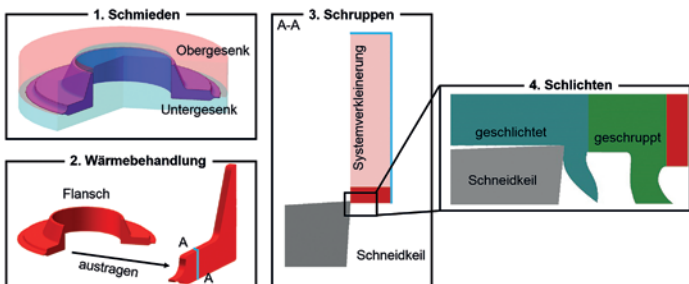


Bild 2: Simulativ betrachtete Prozesskette bestehend aus Schmieden, Wärmebehandlung, Schruppen und Schlichten

SIMULATIONS-AUFBAU UND RANDBEDINGUNGEN

Grundlage der Simulation einer Prozesskette ist der Ergebnisübertrag zwischen den einzelnen simulierten Prozessschritten. Dies ist derzeit mit mehreren kommerziell erhältlichen Softwarepaketen möglich. Für die hier vorgestellte, ausschließlich simulativ betrachtete Prozesskette, wurde die Software Simufact Forming mit dem primären Ziel verwendet, das Potenzial der Darstellung von Prozessketten in Simulationen aufzuzeigen. Zu diesem Zweck wurde an die Simulation des Gesenkschmiedens eines Flansches aus dem Vergütungsstahl 42CrMo4 mit 30 cm Durchmesser eine zweistufige Wärmebehandlung, bestehend aus Härten in Öl und Anlassen, angeschlossen (Bild 1). Die Wärmebehandlung erfolgte direkt aus der Schmiedewärme. Darauf folgend wurde die spannende Endbearbeitung in zwei Schritten bestehend aus Schruppen (hohe Schnittgeschwindigkeit und Zustellung, großer Kantenradius) und Schlichten (niedrigere Geschwindigkeit und Zustellung, kleiner Kantenradius) unter Berücksichtigung der vorangegangenen Ergebnisse simuliert.

Als Ergebnisgröße wurde die resultierende Eigenspannung in tangentialer Richtung gewählt. Die Prozesskette ist schematisch in Bild 2 dargestellt. Als Vergleichsgröße dient eine jeweils identische Simulation ohne Berücksichtigung der Bauteilhistorie. Alle Simulationen wurden in 2D durchgeführt, wobei für den Schritt von Wärmebehandlung zu Zerspanung eine Änderung der Betrachtungsebene realisiert wurde, indem das Bauteil tangential ausgetragen und dann erneut auf Ebene in Austragungsrichtung vereinfacht wurde. Die weiteren Randbedingungen wie Materialmodell, Reibung und Wärmeübergänge wurden für das Gesenkschmieden und Wärmebehandeln der Programmdatei entnommen: mittlere Schmiermittelmenge beim Schmieden, Abkühlen in Öl (45 °C) und an Luft (20 °C) mit temperaturabhängigen Wärmeübergangskoeffizienten. Die Zerspanungssimulationen wurden analog zu den in [4] veröffentlichten Arbeiten modelliert.

ERGEBNISSE UND BEWERTUNG

Die den Simulationen entnommenen Tangentialspannungen sind für sämtliche Prozesskettenschritte in Bild 3 gezeigt. Es ist durchweg eine deutliche Abweichung zwischen der einzelnen Prozesssimulation (schwarz) und der verketteten Prozesssimulation (blau) zu sehen. Für die gezielte Auslegung der Randschichteneigenschaften, also das Surface Engineering von Funktionsflächen ganzer Bauteile, ist es also von entscheidender Bedeutung, die gesamte Prozesskette zu berücksichtigen.

Die hier beispielhaft simulierte Prozesskette beinhaltet zum jetzigen Zeitpunkt noch eine Reihe von Vereinfachungen, welche für die tatsächliche Betrachtung einer solchen Prozesskette nicht getroffen oder berücksichtigt werden sollten. Der notwendige Skalenwechsel zwischen Wärmebehandlungssimulation und Zerspanung ist signifikant hinsichtlich der Randbedingungen des Bauteils, welche die Ergebnisse beeinflussen können. Zudem führt die Vereinfachung zum 2D-Fall zu weiteren Unsicherheiten bezüglich der Realsituation und verhindert die Betrachtung des gesamten Bauteils sowie des Realprozesses Drehen. Die Vereinfachung zum 2D-Fall in der Zerspanungssimulation ist nur dann valide, wenn bereits Analogieversuche mit Drehversuchen korreliert wurden, um die Ergebnisse der 2D-Simulation

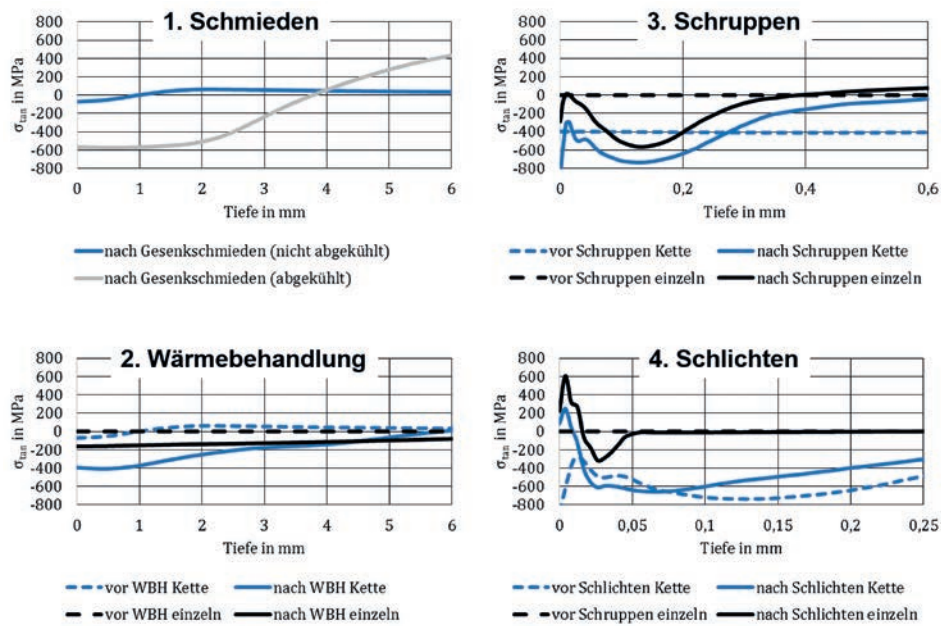


Bild 3: Tangentiale Spannungen für jeden Prozessschritt, aufgetragen auf die Bauteiltiefe Bilder: Autoren

besser einordnen zu können. Je nachdem, wie routiniert solche Simulationen durchgeführt werden – und welche Hardware zur Verfügung steht – stellt dies eine Zeit- und Kostenersparnis gegenüber einer ausreichend fein aufgelösten 3D-Simulation der Drehbearbeitung des Flansches dar.

ZUSAMMENFASSUNG

In vielen Forschungseinrichtungen wie auch in vielen Unternehmen betrachten Prozessingenieure in der Simulation vorrangig Prozesse, welche von je her eng miteinander verbunden sind. So wird auch bei der Umformung die Wärmebehandlung simuliert, während im Bereich der Zerspanung die mechanische Oberflächenbehandlung Beachtung findet.

Ein tiefgehender Austausch zwischen den Disziplinen ist selten, obwohl in der ganzheitlichen Betrachtung von Prozessketten in der Simulation großes Potenzial hinsichtlich der bedarfsgerechten Auslegung von Bauteileigenschaften besteht. Insbesondere die Wechselwirkung aus Zerspanbarkeit und resultierendem Werkzeugverschleiß wird in der industriellen Anwendung im Kontext des Surface Engineering von Funktionsflächen wenig Beachtung geschenkt. Das liegt auch daran, dass durch den hohen Anspruch an Detailgenauigkeit die Zerspanungssimulation nicht

routiniert auf Bauteilebene angewendet wird. Obwohl in der Forschung dieser Fragestellung intensiv nachgegangen wird, beinhaltet der Fokus nicht flächendeckend den Prozesskettengedanken.

Bei Neuentwicklungen wird zunehmend vor dem Prototyping zunächst die Prozesskette simulativ abgebildet, um neben den resultierenden Bauteilzuständen und -eigenschaften die notwendige Anlagentechnik sowie Prozesszeit vorauszusagen und in den Produktentstehungsprozess mit einzubeziehen. Dabei geht es nicht nur um die in diesem Beitrag demonstrierte Verkettung von Umformen, Wärmebehandeln und Zerspanung, sondern auch um das Einbeziehen der additiven Fertigung, des Fügens und der mechanischen Oberflächenbehandlung in die Prozesskette.

Notwendig ist aus Sicht der Autoren das Zusammenrücken der Disziplinen auf simulativer Ebene, nicht zuletzt um Modellierungstechniken auszutauschen. Beispielsweise bietet die Materialmodellierung der Zerspanung Lösungen für Problemstellungen des Hochgeschwindigkeitsformens und könnte von der in der Umformsimulation routiniert durchgeführten Gefüge- und Phasenumwandlungsmodellierung profitieren.



- [1] Schulze, V.; Michna, J.; Zanger, F.; Faltin, C.; Maas, U.; Schneider, J. (2013): Influence of cutting parameters, tool coatings and friction on the process heat in cutting processes and phase transformations in workpiece surface layers, *Journal of Heat Treatment and Materials* 68, pp. 22 – 31
- [2] Schulze, V.; Michna, J.; Schneider, J.; Gumbsch, P. (2011): Modelling of cutting induced surface phase transformations considering friction effects, in *Procedia Engineering* 19, pp. 331 – 336
- [3] Bollig, P.; Faltin, C.; Schießl, R.; Schneider, J.; Maas, U.; Schulze, V. (2015), In *Procedia CIRP* 31, pp. 142 – 147
- [4] Segebade, E.; Zanger, F.; Schulze, V. (2016): Influence of different asymmetrical cutting edge microgeometries on surface integrity, In *Procedia CIRP* 45 pp. 11 – 14
- [5] Gerstenmeyer, M.; Ort, B.; Zanger, F.; Schulze, V. (2017), Influence of the cutting edge microgeometry on the surface integrity during mechanical surface modification by Complementary Machining, In *Procedia CIRP* 45, pp. 55 – 60
- [6] Schulze, V.; Pabst, R.; Meier, H. (2009): Simulation von Prozessketten in der Fertigung, *Jahresmagazin Ingenieurwissenschaften Werkstofftechnik*, Band 11, S. 90 – 93