

Aufbau und Evaluierung eines FEM-Modells zur Simulation mikrostrukturierter Fräswerkzeuge für die Bearbeitung stark adhäsiver Aluminiumlegierungen

C. Uschmann^{1*} und M. Patz¹

¹ Ernst-Abbe-Hochschule Jena

* Korrespondenz: christian.uschmann@eah-jena.de

Kurzfassung. Im Rahmen eines Forschungsvorhabens wurde ein Schaft-Fräswerkzeug zur Trockenbearbeitung von adhäsiven Aluminiumlegierungen entwickelt und erprobt. Zur Anpassung der tribologischen Verhältnisse im Kontaktbereich zwischen Span und Werkzeug werden die Spanflächen mit Mikrostrukturen parallel zur Umfangsschneide versehen. Darüber hinaus erfolgt das Aufbringen eines neuartigen Schichtverbundes, bestehend aus einem Hart- und einem Weichstoff, auf das Hartmetallsubstrat. Durch den Verzicht auf Kühlschmierstoff (KSS) resultieren aus der Neuentwicklung sowohl reduzierte Umwelt- und Gesundheitsbelastungen als auch finanzielle Vorteile. Dieser Beitrag behandelt den Aufbau sowie die Evaluation eines FEM-Modells zur Auslegung der Mikrostrukturen und gibt Einblick in erste experimentelle Ergebnisse.

1 Einleitung

Die Steigerung der Wirtschaftlichkeit von Fertigungsverfahren baut auf Innovationen aus den Gebieten der Maschinentechnik, der Technologien und der Werkzeugentwicklung auf. Dies gilt auch für die mit dem Fertigungsverfahren in Verbindung stehenden Gefahren für Mensch und Umwelt. Ein wesentlicher Ansatz zur Verringerung der ökonomischen und ökologischen Belastungen besteht in der Reduzierung von Betriebsmitteln im Rahmen der spanenden Bearbeitung von Bauteilen. Mit einem Anteil von 8 % bis 16 % an den Produktionskosten stellt der KSS für den Fertigungsprozess einen signifikanten Kostenfaktor dar [1]. Darüber hinaus können infolge des Umgangs mit KSS Hauterkrankungen, Allergien, Atemwegs- und sogar Krebserkrankungen entstehen [2]. Um die Risiken und die Kosten zu minimieren kann für einige Werkstoffe die Trockenbearbeitung zum vollständigen Verzicht auf KSS genutzt werden. Daraus resultiert jedoch ein deutlich verändertes Anforderungsprofil an das einzusetzende Werkzeug.

Zur Etablierung der Trockenbearbeitung bei der Zerspanung adhäsiver Aluminiumlegierungen wurde innerhalb eines Konsortiums aus Industrieunternehmen und Forschungseinrichtungen ein neuartiges Fräswerkzeug entwickelt und erprobt. Das in Abb. 1 dargestellte Werkzeug nutzt auf der Spanfläche eingebrachte V-förmige Mikrostrukturen parallel zur Schneidkante als Reservoir für einen Weichstoff (Festschmierstoff). Der Weichstoff weist eine geringe Scherfestigkeit auf und verteilt sich während der Zerspanung auf der Spanfläche. Infolge dessen reduziert sich der Reibungskoeffizient zwischen Span und Spanfläche. Die veränderten tribologischen Verhältnisse sollen das Anhaften des Werkstückmaterials am Werkzeug verhindern. Zur geometrischen Auslegung der Mikrostrukturen wird die Finite-Elemente-Methode (FEM) genutzt. Die Herausforderungen beim Aufbau sowie die Evaluierung des Simulationsmodells stehen im Zentrum dieses Beitrags.

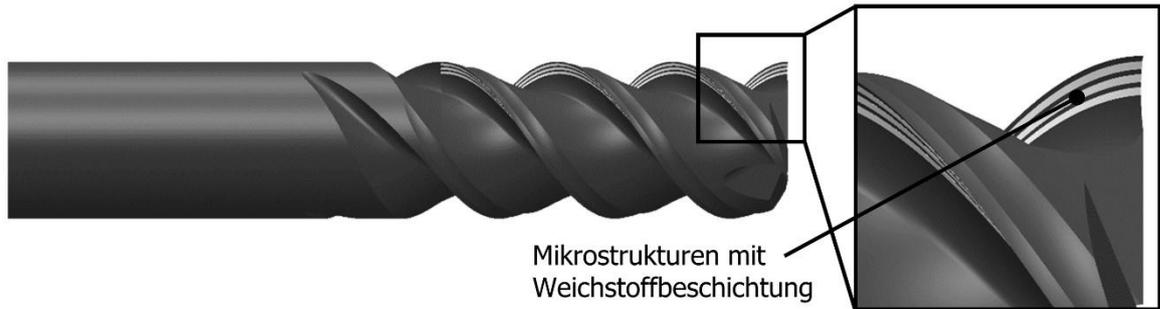


Abbildung 1: Exemplarische Darstellung eines Fräswerkzeugs mit Mikrostrukturen und Weichstoffbeschichtung

2. Zerspansimulation - Aspekte der Modellbildung

Die Modellbildung umfasst alle Tätigkeiten, die zur Abbildung der verwendeten Verfahrensvariante Stirn-Umfangs-Planfräsen in der Simulationsumgebung (Deform) notwendig sind. Dazu zählen die Erzeugung der Werkzeug- und Werkstückgeometrie in einem CAD-Programm, der Aufbau des Modells im Pre-Prozessor der Simulationssoftware sowie die Evaluierung ausgewählter Modellbestandteile. Die Zerspansimulation weist dabei in Abgrenzung zu anderen FEM-Simulationen deutliche Besonderheiten auf. Es handelt sich um einen zeitabhängigen Vorgang mit nichtlinearen Kontaktbedingungen, der zur Ausbildung neuer Oberflächen (dem Span) führt. Die hierbei auftretenden thermomechanischen Lasten mit materialspezifischen Abhängigkeiten von Dehnung, Dehnungsrate und Temperatur unterliegen wiederum nichtlinearen Zusammenhängen. Dieses Ensemble anspruchsvoller Rechenaufgaben muss durch einen robusten Algorithmus gelöst werden. Im vorliegenden Beitrag sollen drei der Herausforderungen, die sich speziell bei der Modellierung von Fräsvorgängen ergeben, dargestellt werden.

2.1 Geometrieerzeugung

Aufgrund der Möglichkeiten zur Vereinfachung der Modellgeometrie wird in den meisten Untersuchungen, in denen eine Zerspansimulation zum Einsatz kommt, die Verfahrensvariante Außen-Quer-Runddrehen verwendet. Da sich jedoch die Ergebnisse einer solchen Simulation nicht auf das Fräsen übertragen lassen, musste im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens ein neues Simulationsmodell aufgebaut werden. Dieses umfasst auch die zu erzeugenden Geometrien des Werkzeugs und des Werkstücks. Die Form der Spannuten des Schafffräasers wird beim Schleifen durch die Überlagerung verschiedener rotatorischer und translatorischer Bewegungen erzeugt. Die zur Verfügung stehenden CAD-Programme Solidworks und Inventor stoßen beim Versuch der Modellierung aufgrund der hohen Komplexität an ihre Grenzen. Die Querschnittsgeometrie konnte ausschließlich messtechnisch mit Hilfe eines Computertomographen (CT) ausreichend detailliert erfasst werden. Auf Grundlage der CT-Messungen wurde das in Abb. 2 links dargestellte Werkzeugmodell abgeleitet.

Das CAD-Modell des Werkstücks ist auf den Eingriffsbereich des Schafffräasers begrenzt (siehe Abb. 2 rechts). Zur Reduzierung notwendiger Netzelemente in der Simulation wird dieser Bereich mit einer Wandstärke von 0,7 mm ausgeführt. Die Fläche, die der Schafffräser bei seinem vorhergehenden Schnitt erzeugt hat wird unter Berücksichtigung der Schnitt- und Eingriffsgrößen modelliert. Auf diese Weise kann sichergestellt werden, dass über die gesamte Schnittlänge die realen Eingriffsgrößen wirken.

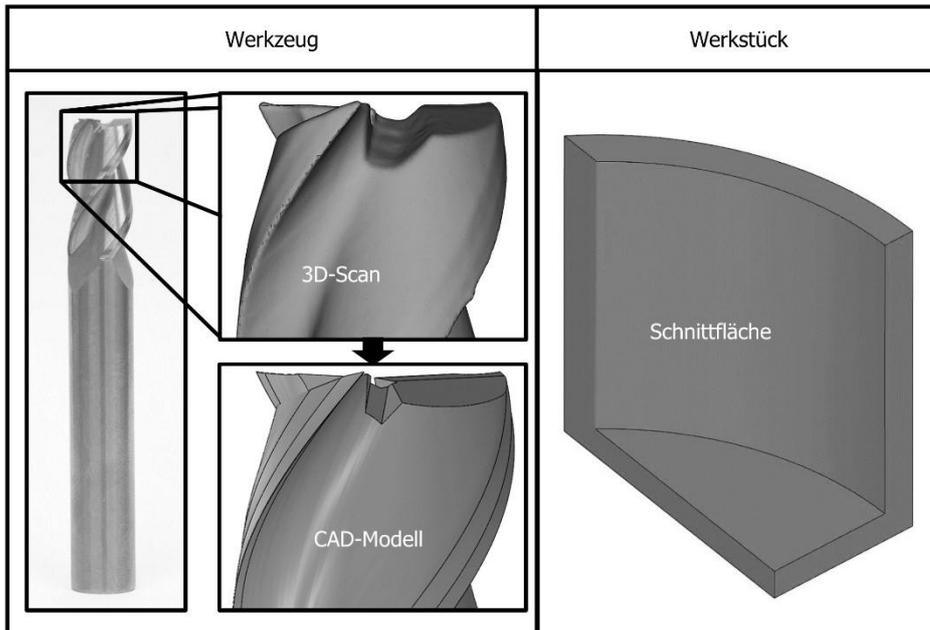


Abbildung 2: Werkzeug- und Werkstückgeometrie

2.2 Modellumfang

Nach der Erzeugung der Geometriemodelle in einer CAD-Umgebung wird der Modellumfang festgelegt. Dieser beinhaltet zum einen die Größe der Kontaktpartner. Nicht alle Bereiche des Werkzeugs und des Werkstücks sind für die Ergebnisauswertung von Interesse. Weiterhin muss entschieden werden, ob die Simulation zwei- oder dreidimensional durchgeführt werden soll. Beide Entscheidungen beeinflussen maßgeblich die Berechnungszeit der Simulation aufgrund der steigenden Netzelementanzahl.

Der Span führt beim Abgleiten über die Spanfläche des Werkzeugs eine komplexe dreidimensionale Bewegung aus. Im Sinne einer exakten Abbildung des Fräsvorgangs wurde daher im ersten Schritt ein dreidimensionales Simulationsmodell aufgebaut. Bedingt durch den geringen Zahnvorschub von $f_z = 0,075$ mm ist bei der Vernetzung eine sehr niedrige Elementkantenlänge (ca. $15 \mu\text{m}$) im Bereich der Spanwurzel notwendig. Daraus ergibt sich im Laufe der Simulation eine Netzelementanzahl von bis zu 360.000 Elementen, wodurch sich eine Berechnungszeit von ca. 4 Wochen ergibt. Da in der späteren Simulationsstudie eine Vielzahl (> 50) von Simulationen durchgeführt werden soll kommt die dreidimensionale Simulation nicht für den produktiven Einsatz in Frage.

Ein Lösungsansatz zur Reduzierung der Berechnungszeit besteht in der Überführung des Stirn-Umfangs-Planfräsens in ein 2D-Simulationsmodell (siehe Abb. 3). Dazu wird der Vorgang ausschließlich in der Orthogonalebene (senkrecht zur Drehachse des Werkzeugs) betrachtet. Bei dem realen Werkzeug handelt es sich jedoch um einen schrägverzahnten Schafffräser mit einem Werkzeug-Neigungswinkel (bzw. Drallwinkel) von $\lambda_s = 40^\circ$.

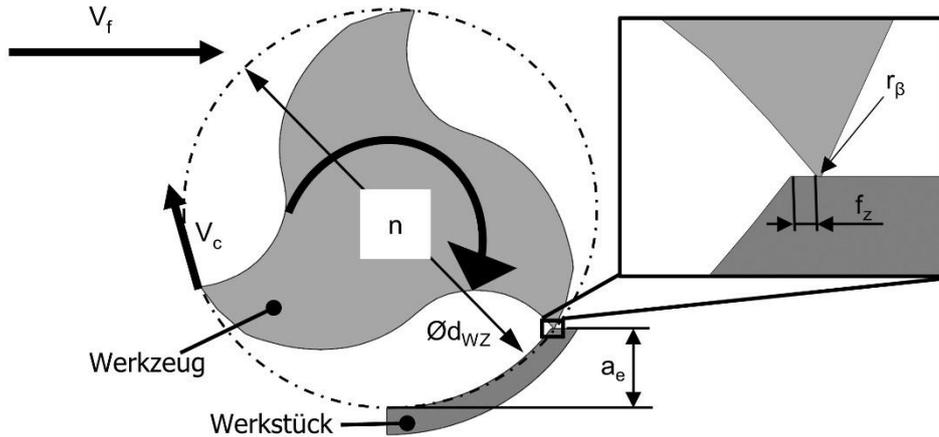


Abbildung 3: Modellaufbau zur Übertragung des Stirn-Umfangs-Planfräsens in eine 2D-Simulation

Der Drallwinkel λ_s sorgt dafür, dass sich der Span während des Abgleitens aus der betrachteten Orthogonalebene heraus bewegt. Der entstehende Fehler in der Abbildung der Spankinematik wird in Anbetracht der deutlich kürzeren Berechnungszeit (ca. 7 h pro Simulation) in Kauf genommen. Evaluierungsversuche, bei denen die Schnittkraft F_c mit variierendem Drallwinkel λ_s experimentell gemessen wurde, haben gezeigt, dass der Drallwinkel λ_s im untersuchten Wertebereich von 0° bis 50° keinen Einfluss auf die Schnittkraft F_c ausübt. Als Vergleichsgröße in der Simulationsstudie muss dementsprechend die Schnittkraft F_c verwendet werden.

2.3 Materialmodellierung

Zur Modellierung des Schnittvorgangs in Deform stehen verschiedene Materialmodelle zur Verfügung. Für die im Forschungsvorhaben verwendete Legierung AlSi10 existiert jedoch kein passendes Modell. Stattdessen kann in der Materialdatenbank zwischen fünf verschiedenen Aluminiumlegierungen ausgewählt werden. Diese Materialmodelle beschreiben die Fließspannung in Abhängigkeit von der Dehnung, der Dehnungsrate und der Werkstücktemperatur. Um ein Materialmodell mit ähnlichem Werkstoffverhalten wie AlSi10 zu identifizieren, wurden experimentelle Zerspankraftmessungen bei unterschiedlichen Schnittgeschwindigkeiten durchgeführt. Analog zu den realen Versuchen wird der Zerspanvorgang als 2D-Simulation in Deform implementiert und die Simulation für jedes Materialmodell mit den zuvor festgelegten Schnittgeschwindigkeiten wiederholt. Durch die Variation der Schnittgeschwindigkeit im Experiment kann die Abhängigkeit des Werkstoffs von der Dehnungsrate, der Dehnung und der Temperatur indirekt nachgestellt werden. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in Abb. 4 oben dargestellt.

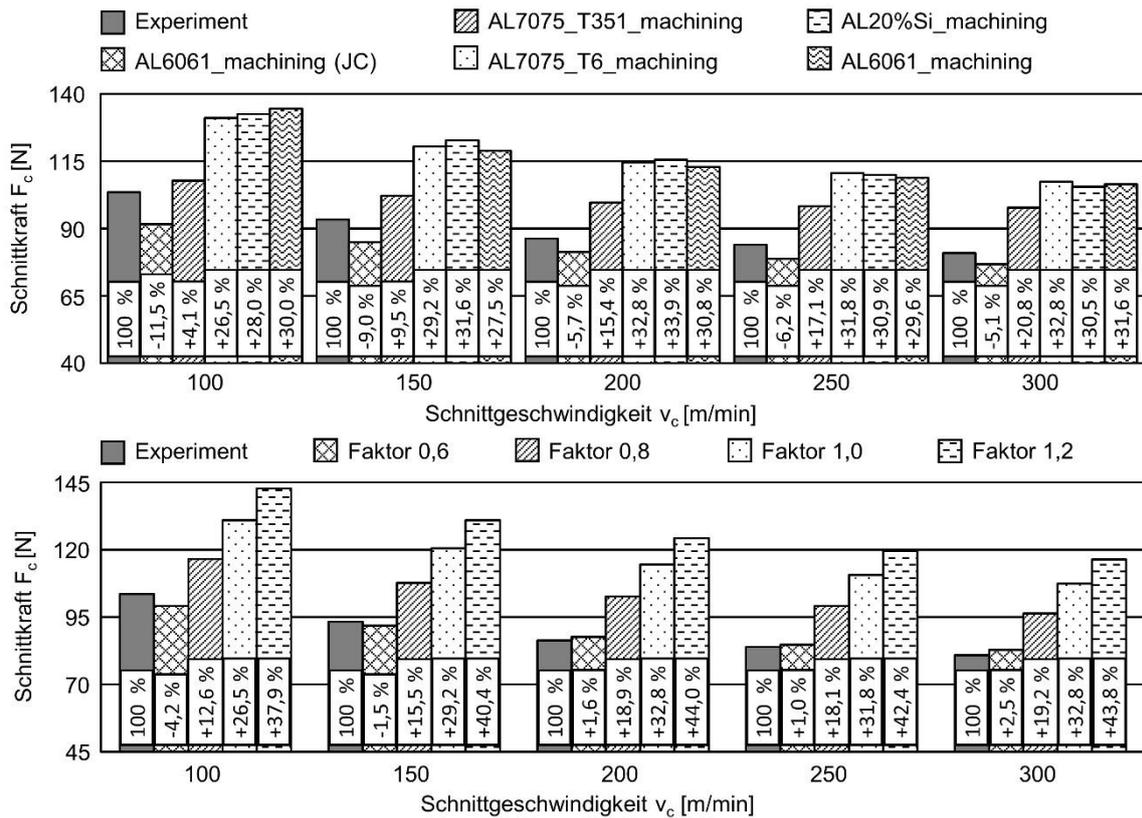


Abbildung 4: oben: Vergleich der Schnittkraft F_c zwischen Versuch und Simulation bei Variation der Schnittgeschwindigkeit v_c ; unten: Anpassung des Materialmodells AL7075_T6_machining

Es ist festzustellen, dass keines der vorhandenen Materialmodelle identische Ergebnisse im Vergleich zu den gemessenen Kraftkomponenten liefert. Die absoluten Abweichungen sind dabei von geringem Interesse. Stattdessen wird nach einem Materialmodell gesucht, dessen Abweichungen relativ zum gemessenen Wert über alle Schnittgeschwindigkeiten hinweg annähernd konstant bleiben. Auf diese Weise kann im Anschluss durch einen einfachen Offset das Materialmodell auf die realen Kraftverhältnisse angepasst werden. Die geringsten Schwankungen weisen die Materialmodelle AL20%Si_machining und AL6061_machining auf. Bei genauerer Betrachtung der in Deform tabellarisch hinterlegten Fließspannungen fällt jedoch auf, dass die Daten nur für kleine Dehnungen und Dehnungsraten hinterlegt sind. Daher können die beiden Modelle nur für niedrige Schnittgeschwindigkeiten verwendet werden. Das Materialmodell AL7075_T6_machining zeigt auch geringe Schwankungen. Für dieses Modell sind Daten im größeren Umfang als bei den anderen Modellen hinterlegt. Im nächsten Schritt wird dieses Materialmodell angepasst, um die Simulationsergebnisse den gemessenen Werten anzunähern. Zu diesem Zweck werden die tabellarisch hinterlegten Fließspannungen mit einem Faktor multipliziert (Ergebnisse siehe Abb. 4 unten). Dieses Vorgehen entspricht einer Anpassung der Streckgrenze $R_{p0,2}$, die in der Fließkurve zu einer Anhebung oder Absenkung aller Werte um einen Offsetwert führt. Die beste Übereinstimmung zwischen Messwert und Simulation wird bei einem Faktor von 0,6 erreicht. In allen weiteren Simulationen wird mit dem angepassten Materialmodell gerechnet.

3. Zusammenfassung

Durch eine gezielte Anpassung der Modellbestandteile ist es gelungen einen plausiblen und robusten Modellaufbau zur Übertragung des Fertigungsverfahrens Stirn-Umfangs-Planfräsen in die Simulationsumgebung Deform zu implementieren. Neben einer Vielzahl anderer wichtiger Aspekte zur Modellierung wurde

- die komplexe Geometrie des Werkzeugs unter Zuhilfenahme moderner Messtechnik sowie die Geometrie des Werkstücks erstellt,
- der Modellumfang zur Reduzierung der Berechnungszeit auf ein 2D-Modell vereinfacht und
- ein geeignetes Materialmodell identifiziert und angepasst.

Im Anschluss an die Modellierungsarbeiten wurde eine umfangreiche Simulationsstudie durchgeführt. Durch die Variation verschiedener Geometrieparameter der Mikrostrukturen ist eine dem Anwendungsfall angepasste Geometriekombination identifiziert worden. Erste experimentelle Untersuchungen auf diesem Gebiet zeigen, dass die Mikrostrukturen in Verbindung mit dem Weichstoff zu einer Reduzierung der Schnittkraft F_c um 19 % führen. Im Verlauf der technologischen Untersuchungen wurde weiterhin festgestellt, dass sich die Standzeit T unter Anwendung der bisherigen Weiterentwicklungen (Anpassung der Makrogeometrie und der Hartstoffschicht) um 394 % im Vergleich zum besten erprobten Konkurrenzwerkzeug anheben lässt. Darüber hinaus konnte durch die gewählten Anpassungen das Anhaften des Werkstoffs an der Freifläche komplett unterdrückt werden. Auf diese Weise ist es gelungen einen wesentlichen Beitrag zur Etablierung der Trockenbearbeitung beim Fräsen adhäsiver Aluminiumlegierungen zu leisten. In den nächsten Entwicklungsschritten steht noch die Ermittlung der Standzeit mikrostrukturierter und mit Weichstoff versehener Fräswerkzeuge aus.

Datenverfügbarkeit

Weiterführende Informationen und Ergebnisse können bei den Autoren erfragt werden.

Interessenskonflikte

Aus Sicht der Autoren gibt es keine Interessenskonflikte.

Literaturverzeichnis

1. Deutsche Gesetzliche Unfallversicherung (DGUV) (2010): Minimum quantity lubrication for machining operations. BGI/GUV-I 718 E. Berlin. Firmenschrift.
2. Frost, T. (2008): Drehen mit geschlossenem Innenkühlsystem. Dissertation, Technische Universität Berlin.