

Modellierung von Kühlschmierstoffwirkung im Zerspanprozess



**Marc Bredthauer, Hui Liu, Thorsten Helmig, Lukas Topinka, Steffen Brier,
Joachim Regel, Patrick Mattfeld, Thomas Bergs, Sebastian Barth, Markus
Meurer und Reinhold Kneer**

T. Helmig · R. Kneer
Lehrstuhl für Wärme- und Stoffübertragung, Aachen, Deutschland
E-Mail: helmig@wsa.rwth-aachen.de

R. Kneer
E-Mail: kneer@wsa.rwth-aachen.de

L. Topinka · S. Brier · J. Regel
Professur Produktionssysteme und -prozesse, Chemnitz, Deutschland
E-Mail: lukas.topinka@mb.tu-chemnitz.de

S. Brier
E-Mail: steffen.brier@mb.tu-chemnitz.de

J. Regel
E-Mail: joachim.regel@mb.tu-chemnitz.de

H. Liu · P. Mattfeld · T. Bergs (✉) · M. Meurer
Manufacturing Technology Institute (MTI) der RWTH Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: t.bergs@mti.rwth-aachen.de

P. Mattfeld
E-Mail: p.mattfeld@mti.rwth-aachen.de

M. Meurer
E-Mail: m.meurer@mti.rwth-aachen.de

M. Bredthauer · S. Barth
Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule (RWTH) Aachen, Aachen, Deutschland
E-Mail: marc.bredthauer@rwth-aachen.de

S. Barth
E-Mail: sebastian.barth@rwth-aachen.de

1 Einleitung

Bei Zerspanungsprozessen wird die mechanische Energie in den Scher- und Reibzonen zwischen Werkzeug und Werkstück weitgehend in Wärme umgewandelt. Dadurch entstehen außerordentlich hohe mechanische und thermische Spannungen, die zu einer thermisch bedingten Verschiebung der Werkzeugspitze und damit zu einer geringeren Bearbeitungsgenauigkeit führen (Klocke 2011). Während der Zerspanung verursacht die Prozesswärme einen erheblichen Wärmeeintrag in das Werkzeug und sein Spannsystem. Dieser beläuft sich auf 10 % der gesamten Prozessenergie (Pabst 2008). Nach dem Stand der Technik wird von thermischen Werkzeugverformungen bis zu einigen zehn Mikrometern berichtet (Bräunig 2015). Für viele Bearbeitungsaufgaben ist die Verwendung von Kühlschmierstoffen aufgrund ihrer hohen Wärmekapazität und der Verringerung der Reibung, die eine höhere Kühlwirkung gewährleistet, unerlässlich (Helmig et al. 2019). Bislang existieren jedoch keine Ansätze um die Wärmeströme in Abhängigkeit von dem Bearbeitungsprozess und von dem Kühlschmierstoff vorherzusagen. Insbesondere die Kopplung der entstehenden Wärme im Zerspanprozess und der Wärmeübergang zu Maschinenkomponenten, die bei einer Erwärmung zur Verlagerung des Tool-Center-Points (TCP) führen, wurde bislang nicht untersucht.

Dieses Kapitel zeigt die Möglichkeiten zur Modellierung der Wärmestromverteilung innerhalb des Werkzeugs und des Werkstücks unter Berücksichtigung von der Kühlschmierstoffzufuhr. Mithilfe einer gekoppelten FE-CFD-Simulation wird der konvektive Wärmeübergang zwischen dem Kühlschmierstoff und der Schneidzone sowie die Wärmestromverteilung auf der Werkzeugoberfläche während des Zerspanungsprozesses untersucht.

Mithilfe der entwickelten Modelle und Methoden können orts aufgelöste konvektive Kühleffekte in Abhängigkeit von den Stellgrößen des Kühlschmierstoffsystems ermittelt und als thermische Randbedingung an das nachgelagerte Modell zur Vorhersage der thermischen Belastung des Werkzeughalters weitergegeben werden (siehe Abb. 1). Das bedeutet, dass eine Vorhersage der Wärmeströme möglich ist

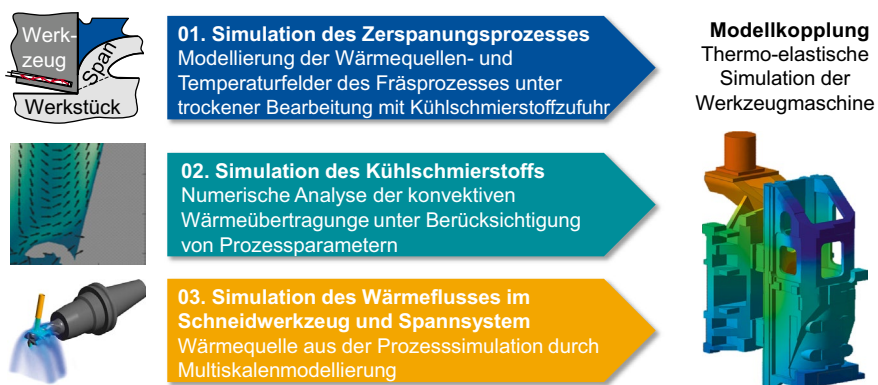


Abb. 1 Modellübersicht für die Simulation der werkzeugseitigen thermischen Belastung

und eine Korrektur der Kühlschmierstoffstrategie auf Basis der Wärmestromberechnungen erfolgen kann, sodass eine Verlagerung von Maschinenkomponenten verhindert oder kompensiert werden kann. Der Kühlschmierstoff kann demnach bedarfsgerecht eingesetzt werden: zum einen hinsichtlich des Kühlbedarfs für den Bearbeitungsprozess an sich und zum anderen zur Korrektur oder Kompensation von thermisch bedingten Verlagerungen in Maschinenkomponenten.

2 Prozessmodellierung unter Berücksichtigung des Kühlschmierstoffeffekts

Um die Temperaturfelder im Werkzeug sowie die Wärmestromverteilung im Prozess präziser abbilden zu können, wird der Einfluss des Kühlschmierstoffs auf die Werkzeugtemperatur in Analogieversuchen in Form eines Orthogonaldrehs grundlegend untersucht. Die anschließende Modellierung erfolgt durch numerische Modellierungsansätze, bei denen eine Spanbildungssimulation mit einer Strömungssimulation gekoppelt wird. Letztendlich wird der ermittelte Wärmestrom unter Berücksichtigung der Kühlschmierstoffwirkung im analytischen Modell zur Abbildung der Temperaturverteilung im Fräsprozess verwendet.

2.1 Versuchsanordnung

Um eine Datenbasis für die Modellvalidierung zu schaffen, wurden Orthogonalschnitte auf einer CNC-Drehmaschine DMG NEF 600 durchgeführt. Dabei wurde der Einfluss des Kühlschmierstoffdrucks auf die Spanform und die Werkzeugtemperatur ermittelt. Abb. 2 zeigt den Versuchsaufbau. Als Kühlschmierstoff wurde ein wasserlösliches Kühlschmiermittel Vasco TP 519 der Firma Blaser Swisslube AG mit einer Konzentration von 10 % verwendet. Der Volumenstrom und der Zufuhrdruck des Kühlschmierstoffs werden von Sensoren erfasst. Während des Versuchs wurden sowohl die Schnittkraft F_c als auch die Vorschubkraft F_t mit dem Dynamometer gemessen. Die Prozesskräfte werden als Validierungsparameter für die Simulation verwendet. Eine detaillierte Beschreibung der verwendeten Sensoren sowie der Werkzeug- und Werkstückcharakterisierung sind in der Veröffentlichung (Liu 2021) zu finden.

Die Werkzeugtemperatur T_{tool} in der Nähe der Schneidkante wird mit einem Quotientenpyrometer gemessen. Zu diesem Zweck ist eine Glasfaser in das Werkzeug eingebaut. Die Infrarotstrahlung gelangte durch die Glasfaser zum Pyrometer. Abb. 3 zeigt die Einbaulage der Glasfaser. Die Späne werden nach jedem Schnitt gesammelt. Der Einfluss des Kühlmitteldrucks auf den Spanbildungsvorgang wird durch den Vergleich der Spanformen ermittelt. Im Folgenden sind die Spanform bei der Zerspannung von C45 mit einer Schnittgeschwindigkeit von



- 1 Werkstück
- 2 Multi-Komponenten Dynamometer
- 3 Kühlschmierstoffzufuhrleitung
- 4 Werkzeug und Werkzeughalter
- 5 Glasfaser verbunden mit Pyrometer
- 6 Kühlschmierstoffdüse

Abb. 2 Versuchsaufbau des Orthogonal Drehversuchs

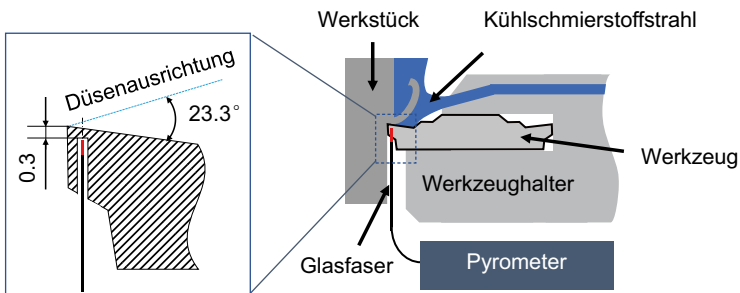


Abb. 3 Einbaulage der Glasfaser

$v_c = 60$ m/min und einer Spannungshöhe von $h = 100 \mu\text{m}$ unter verschiedenen Kühlschmierstoffdrücken dargestellt.

Abb. 4 zeigt die gemessene Spangröße bei einem Druck von $p_{kss} = 80$ bis 216 bar. Mit zunehmendem Kühlmitteldruck verringern sich Außendurchmesser und Länge der Späne. Die Änderung der Spangröße ist nicht linear mit dem Kühlschmierstoffdruck. Bei Drücken über $p_{kss} = 160$ bar ändert sich die Spangröße nicht mehr. Die beobachtete mechanische Wirkung des Kühlschmierstoffs wird

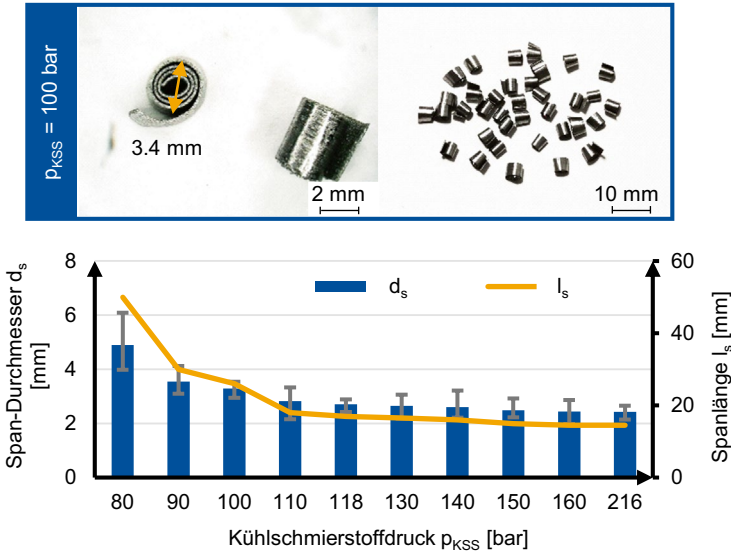


Abb. 4 Spanform unter Hochdruck-Kühlschmierstoffbedingungen. (Liu 2021)

durch ein numerisches Modell abgebildet. Das Funktionsprinzip des Modells wird im Folgenden erläutert.

2.2 Spanbildungssimulation unter Berücksichtigung der Kühlschmierstoffwirkung

Zur Modellierung des Zerspanungsprozesses mit der Kühlschmierstoffwirkung wird die gekoppelte Euler-Lagrangian (CEL)-Methode verwendet, wobei das Werkstück und der Kühlschmierstoff im Eulerschen Bereich definiert sind und das Werkzeug mit Lagrangeschen Netzen diskretisiert ist.

Abb. 5 zeigt den Modellaufbau. In der Simulation wird das Werkzeug als starrer Körper betrachtet und somit der Werkzeugverschleiß vernachlässigt. Die Werkzeugposition bleibt während der Simulation unverändert und das Werkstück bewegt sich mit der Schnittgeschwindigkeit auf das Werkzeug zu. Der Kühlschmierstoff tritt durch einen kreisförmigen Einlass ein, der der Ausrichtung und dem Durchmesser der Düse entspricht. Die Einlassgeschwindigkeit des Kühlschmierstoffs wird aus der gemessenen Durchflussmenge abgeleitet.

Abb. 6 zeigt die Simulationsergebnisse. Der Kühlschmierstoff wird bei einem Spandurchmesser von $d_s = 3,4$ mm appliziert. Bei $p_{kss} = 120$ und 160 bar verursachen die Kühlmittelstrahlen innerhalb einer Prozesszeit von $t_s = 1,6$ ms Spanbruch, während bei $p_{kss} = 80$ bar kein sofortiger Spanbruch auftritt. Dies stimmt gut mit den in Abb. 3 dargestellten experimentellen Ergebnissen überein.

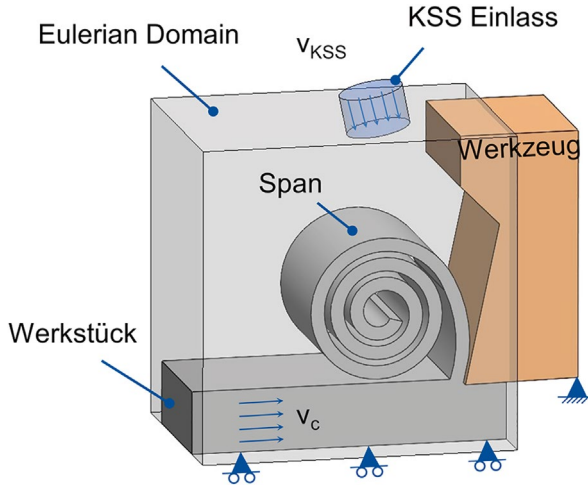


Abb. 5 Konzept und Mesh-Typ des gekoppelten Euler-Lagrange-Modells für die 3D-Zerspannsimulation unter Berücksichtigung der Kühlschmierstoffwirkung. (Liu 2021)

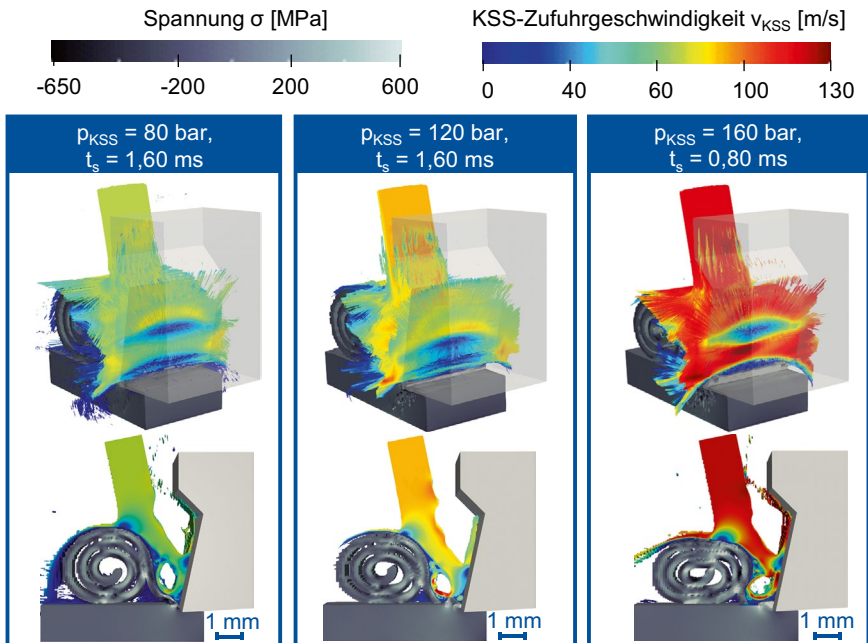


Abb. 6 Stromlinie des Kühlschmierstoffs aus der 3D-Simulation. Liu (2021b)

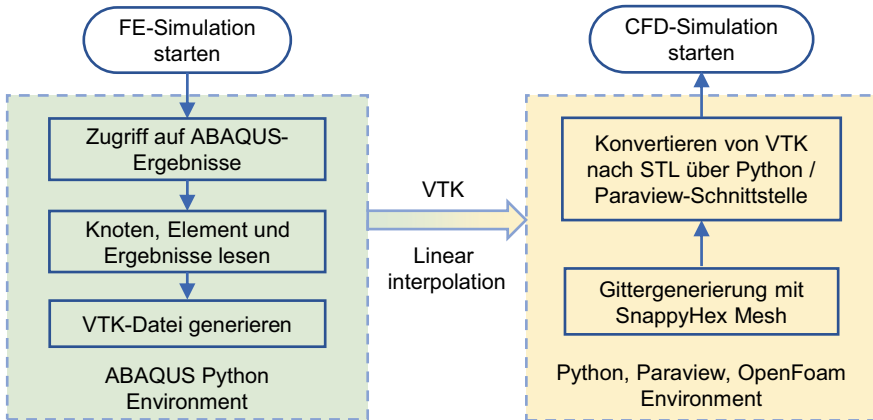


Abb. 7 Arbeitsabläufe des Schnittstellenprogramms

Die CEL-Simulation ist geeignet, um die mechanische Wirkung des Kühlschmierstoffs zu analysieren. Die konvektive Kühlung kann jedoch aufgrund der unzureichenden Auflösung der Festkörpergrenzzone nicht direkt gelöst werden. Die thermische Analyse wird dann in der numerischen Strömungsmechanik (CFD)-Simulation durchgeführt. Die CEL-Simulation generiert geometrische und thermische Randbedingungen für die CFD-Simulation. Der Datenaustausch zwischen beiden Simulationen wird durch ein Schnittstellenprogramm realisiert. Der Arbeitsablauf des Programms ist in Abb. 7 dargestellt.

Das Schnittstellenprogramm verwendet Python zum Einlesen der ABAQUS-Simulationsergebnisse und generiert eine VTK-Datei, die die physikalischen Ergebnisse und die Geometrie der Teile enthält. Basierend auf der VTK-Datei wird die für die CFD-Simulation benötigte Volumengeometrie mit der Open-Source-Software Paraview erzeugt. Da sich das für die CFD-Simulation benötigte Randschichtnetz von dem der FE-Simulation unterscheidet, werden keine Netzinformationen übertragen. In der CFD-Simulation wird ein neues Netz auf Basis des geometrischen Modells mit dem Netzgenerator snappyHexMesh erstellt.

3 Thermische Modellierung der Kühlschmierstoffströmung in der Zerspanzone

Im Folgenden wird die Methodik zur thermischen Modellierung des Kühlschmierstoffs exemplarisch für die Zerspanzone im Orthogonalschnitt beschrieben. Grundsätzlich handelt es sich hierbei um ein multiphysikalisches Problem, bei dem mechanische Prozesse wie die Spannbildung und Verformung aber auch die Kontaktwärmeübergänge zwischen Werkzeug und Werkstück sowie konvektive

Wärmeübergänge zwischen Kühlschmierstoff und Werkzeug/Werkstück berücksichtigt werden müssen. Aufgrund der Komplexität dieses Phänomens und der thermo-mechanischen Interaktion existieren bisher keine Gesamtansätze, welche sowohl Thermik als auch Mechanik mit zufriedenstellender Genauigkeit modellieren können. Aus diesem Grund wird eine Kopplung zwischen FE-Simulation und strömungsmechanischer Simulation realisiert, um die individuellen Stärken der jeweiligen Methode zu nutzen und Synergieeffekte zu erzielen.

3.1 Generierung des Rechengitters und Modellannahmen

Der derzeitige Entwicklungsstand der CFD-Methodik nutzt ein statisches Rechengitter, dementsprechend werden kontinuierliche Spanbildungsprozesse durch die Modellierung mehrerer diskreter Spanzustände berücksichtigt. Die hierfür notwendigen Geometrieinformationen zur Generierung des Rechengitters werden über die zuvor durchgeführte FEM-Simulation bereitgestellt. Als Dateiformat für den Geometrietransfer bietet insbesondere das „.stl“ (Standard Triangulation/Tessellation Language) Vorteile, da dieses Format von vielen CAD-Programmen, aber auch kommerziellen Tools und Freeware CFD-Software zur Gittergenerierung genutzt werden kann. Ein kritischer Punkt bei der Gittergenerierung ist eine ausreichend hohe Auflösung der Strömungsgrenzschicht, um den Wärmeübergang hinreichend genau abbilden zu können.

Abb. 8 zeigt typische Randbedingungen für den untersuchten Fall. Neben der Geometrie wird der berechnete Wärmestrom von der FEM-Simulation an die CFD

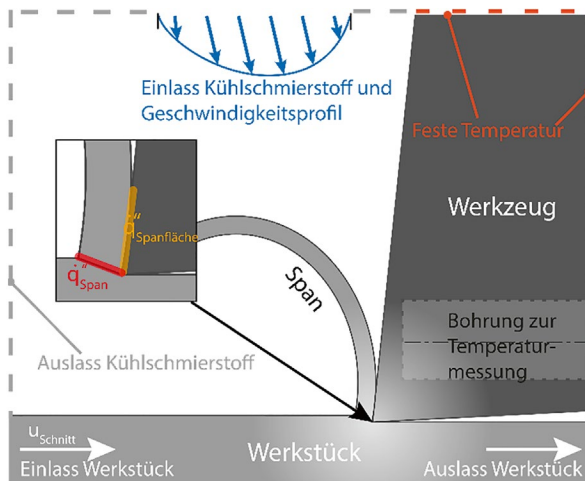


Abb. 8 Typische Wahl der Randbedingungen einer strömungsmechanischen Untersuchung in der Zerspanzone (Helmig et al. 2019)

übergeben und entlang des Kontaktbereichs aufgeprägt (siehe Abb. 8). Als Dateiformat können hier beispielsweise Tabellen oder Vektorformate gewählt werden, welche in Abhängigkeit von der Ortskoordinate den Wärmestrom definieren und vom CFD-Programm entsprechend eingelesen werden können. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, Anteile gasförmiger Umgebungsluft in der Simulation zu vernachlässigen, da Voruntersuchungen gezeigt haben, dass ein Großteil des Fluidomäne durch den Kühlschmierstoff bedeckt wird. Die thermophysikalischen Eigenschaften von Fluid und Feststoff werden zunächst als konstant angenommen. Zur Entwicklung und Etablierung der Methode wird eine Überflutungskühlung mit moderaten Geschwindigkeiten (ca. 10 m/s) untersucht. Die entsprechende Reynoldszahl am Düsenaustritt liegt bei ca. 2300 und somit noch im laminaren Regime.

Im Folgenden werden exemplarische Ergebnisse der Strömungssimulation vorgestellt und diskutiert.

3.2 Exemplarische Ergebnisse der Strömungssimulation

Abb. 9 zeigt das Geschwindigkeitsfeld des Kühlschmierstoffs in der Zerspanzone. Im Bereich zwischen Werkzeug und Span bildet sich ein „Totwassergebiet“ aus, in dem es nur zu geringem Austausch des Kühlmediums kommt. Oberhalb der

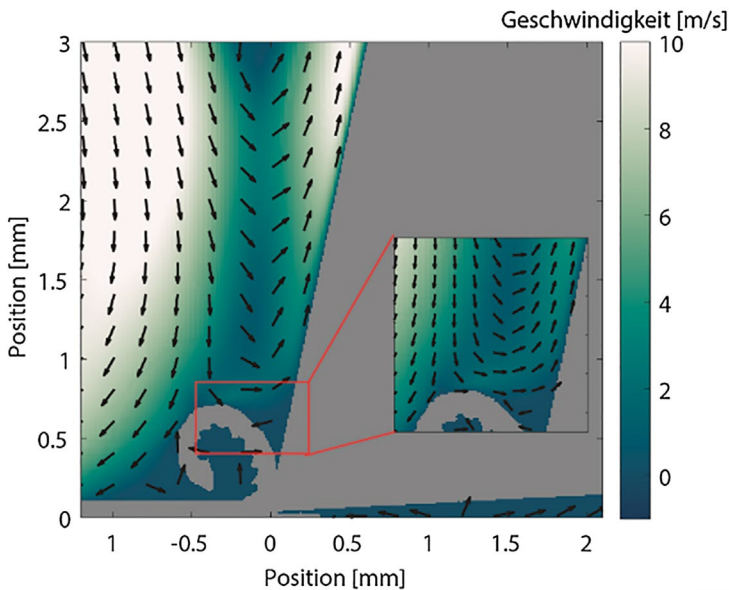


Abb. 9 Resultierendes Geschwindigkeitsfeld des Kühlschmierstoffes aus der CFD Simulation (Liu et al. 2021a, b)

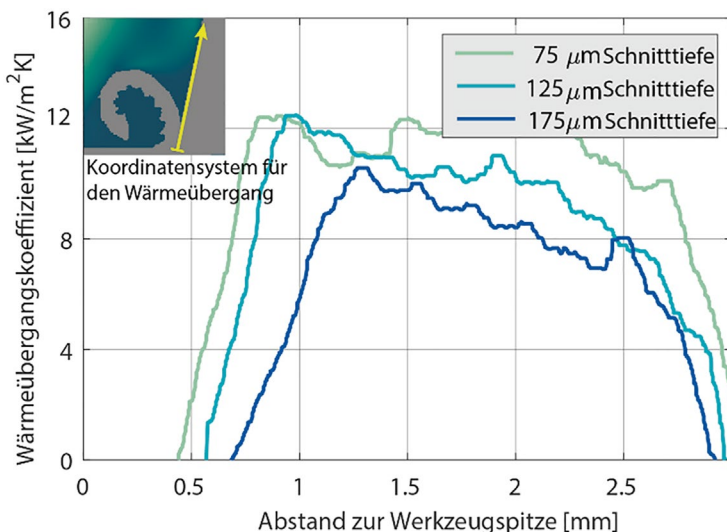


Abb. 10 Wärmeübergangskoeffizient entlang der Werkzeugschneide für verschiedene Schnitttiefen (Liu et al. 2021a, b)

unmittelbaren Zerspanzone beschleunigt der Kühlschmierstoff jedoch wieder und verläuft parallel zur Werkzeugschneide.

Die geringen Geschwindigkeiten in der Stauzone führen zu einem geringen Wärmetransport. Dies ist in Abb. 10 zu erkennen, in welcher der orts aufgelöste Wärmeübergang entlang der Werkzeugschneide darstellt wird. Erst in einem Abstand von 0,5 mm zur Werkzeugschneide kann ein deutlicher Anstieg des Wärmeübergangs verzeichnet werden. Dieser geht in ein Plateau über, bevor gegen Ende ein abfallende Trend zu erkennen ist. Zudem wird deutlich, dass höhere Schnitttiefen zu einem verzögerten Anstieg im Wärmeübergang führen. Dies ist insbesondere durch die größeren Späne zu begründen, welche ein Eindringen des Kühlschmierstoffs in die Zerspanzone zusätzlich erschwert. Insgesamt können als erste Näherung mittlere Wärmeübergangskoeffizienten zwischen 8–10 $\text{kW/m}^2\text{K}$ angenommen werden.

4 Modellierung des Wärmeflusses in den Werkzeughalter

Im Anschluss an die zweidimensionale Betrachtung der Spanentstehung und Wärmestrompartitionierung erfolgt eine dreidimensionale Makromodellierung des thermo-elastischen Verhaltens von Werkzeug und Werkzeughalter. Mit dieser

Makrobetrachtung kann die thermisch induzierte Verformung von Werkzeug und Spannsystem bzw. die Verlagerung des Werkzeugs unter Berücksichtigung des Wärmeeintrags aus dem Zerspanungsprozess und verschiedener Kühlstrategien ermittelt werden.

4.1 Simulationsmodellbeschreibung

Um den Einfluss der Kühlmethode auf das Temperaturregime des Schneidwerkzeugs und seiner Aufnahme zu simulieren und somit die thermisch bedingten Verformungen zu erfassen, wird ein CFD-Simulationsmodell unter Verwendung von ANSYS CFX eingesetzt. Im ersten Schritt werden nur das Fräs Werkzeug und die Werkzeugaufnahme ohne das Werkstück simuliert, um vereinfachte Randbedingungen zu definieren. Außerdem enthält es eine Düse zur Ausrichtung der zugeführten Kühlmittel sowie die umgebenden Luftbereiche. Aufgrund der nicht rotationssymmetrischen Form des Fräs Werkzeugs und der damit verbundenen Notwendigkeit einer transienten Vernetzung aufgrund der Rotation wird ein zylindrischer Luftbereich um das Werkzeug herum erstellt, der die Rotation der Komponenten ohne transiente Vernetzung ermöglicht. Für jede Komponente bzw. Luftbereich wird im Simulationssetup eine Domäne definiert, in der die Materialparameter und Schnittstelleneinstellungen festgelegt werden. Dieses Simulationsmodell ist in Abb. 11 dargestellt.

Der zuvor simulativ ermittelte Wärmeeintrag in den Fräser, der mittels Kalibrierung durch Daten aus einem realen Zerspanungsprozess (äquivalente Prozessparameter) verifiziert wurde, wird als thermische Randbedingung auf den kleinen Flächen an den Schneidkanten des Schaftfräses appliziert. Diese Kontaktbereiche

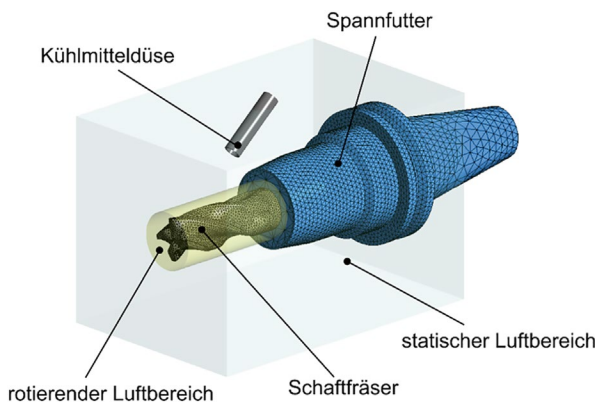


Abb. 11 3D-Makrosimulationsmodell der untersuchten Komponenten (Topinka et al. 2021)

mit dem Span entsprechen flächenmäßig dem Wärmeeintragsbereich, wie er bei einem realen Fräsprozess vorliegt.

4.2 Kühlmittelströmung um das Werkzeug

Um die Kühlwirkung des flüssigen Kühlmittels zu simulieren, wird in dem entwickelten CFD Simulationsmodell für Vollstrahl- und Mindermengenkühlung der Einsatz von Kühlschmiermittel in einer Zweiphasenströmung realisiert. Dies beinhaltet die Definition der beiden auftretenden Phasen, wie Luft- und Kühlmittelphase, und der Beziehungsparameter zwischen ihnen. In der unmittelbaren Umgebung des Zerspanungswerkzeugs entsteht aufgrund der Rotation des spiralförmigen Werkzeugs eine turbulente und verwirbelte Strömung. Daher erfordert dieser Bereich eine feinere Vernetzung im Vergleich zum äußeren Luftraum. Außerdem wird ein Shear-Stress-Transport-Turbulenzmodell (SST) angewendet, um diese nicht laminare Strömung korrekt abzubilden und somit eine korrekte Berechnung des Wärmeübergangs in diesem Bereich zu gewährleisten. Mit der definierten Wärmequelle an den Schneidkanten und der Kühlwirkung durch umströmendes Kühlmittel berechnet das CFX-Modell die Wärmebilanz und das resultierende Temperaturfeld des Werkzeugs und seiner Aufnahme. Dieses inkludiert die räumlich und zeitlich nicht konstanten Wärmeübertragungskoeffizienten, welche aufgrund der Rotation des Werkzeugs und der auftretenden intensiven Turbulenzen und Wirbel nicht a priori abgeschätzt werden können. Ein Beispiel für die simulierte Kühlmittelströmung um das Schaftfräs Werkzeug (links) und das resultierende Temperaturfeld nach Erreichen eines stationären thermischen Zustands (rechts) ist in Abb. 12 zu sehen.

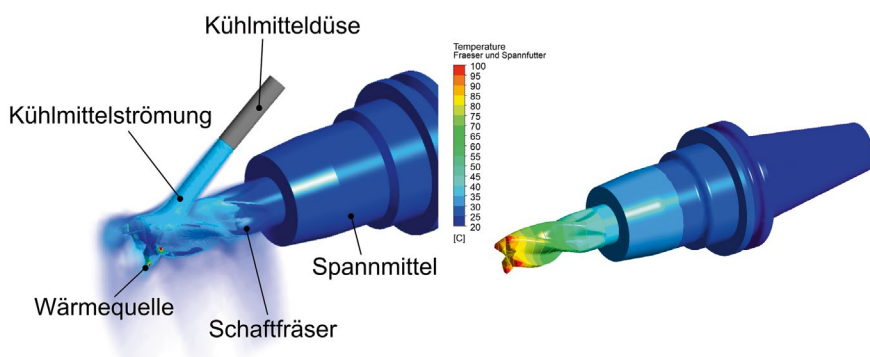


Abb. 12 CFD-Simulation der Kühlmittelströmung um das Schaftfräs Werkzeug (links) und berechnetes Temperaturfeld (rechts)

5 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wird eine Methodik vorgestellt, die die Vorhersage und Korrektur der Verschiebung am TCP in Abhängigkeit vom Zerspanungsprozess und den Kühlschmierstoffbedingungen mittels einer Multiskalensimulation ermöglicht. Zu diesem Zweck werden Simulationsmodelle kombiniert, um die Wärmequellen und -senken sowohl im Schneidprozess an der Schneide als auch im Werkzeughalter zu bestimmen. Mithilfe des entwickelten Modellansatzes kann das transiente Temperaturfeld im Werkzeug für definierte Prozessparameter vorhergesagt werden. Darüber hinaus ist der Ansatz in der Lage, die lokalen und globalen Auswirkungen der transienten Wärmequelle auf die Temperatur im Werkzeug zu simulieren, wobei die Kühlschmierstoff-Effekte berücksichtigt werden. Der entwickelte Ansatz kann auf verschiedene Fräsprozesse angewendet werden und bietet die Möglichkeit, die Prozessparameter zu optimieren sowie als Eingangsparameter für die Korrektur der TCP-Verschiebung verwendet zu werden.

Literatur

- Bräunig M, Semmler U, Schmidt G, Wittstock V, Putz M, (2015) Model-Based Representation of Thermoenergetic Effects in Cutting Tools and Part Clamping Devices. In: Großmann K (Hrsg) Thermoenergetic design of machine tools. Springer International Publishing, S 13–25
- Bräunig M, Regel J, Richter C Putz M (2018) Industrial relevance and causes of thermal issues in machine tools. In: 1st Conference on Thermal Issues in Machine Tools, Dresden
- Chorin A, Marsden JE (2000) A mathematical introduction to fluid mechanics. Springer Verlag
- Helmig T, Peng B, Ehrenpreis C, Augspurger T, Frekers Y, Kneer R, Bergs T (2019) A coupling approach combining computational fluid dynamics and finite element method to predict cutting fluid effects on the tool temperature in cutting processes. *J Manuf Sci Eng* 141(10)
- Klocke F (2011) Manufacturing processes 1. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg
- Liu H, Helmig T, Augspurger T, Nhat N, Kneer R, Bergs T (2021a) Modeling the cooling effect of the cutting fluid in machining using a coupled FE-CFD Simulation. 2nd International Conference on Thermal Issues in Machine Tools
- Liu H, Peng B, Meurer M, Schraknepper D, Bergs T (2021b) Three-dimensional multi-physical modelling of the influence of the cutting fluid on the chip formation process. *Procedia CIRP* 102:216–221
- Pabst R (2008) Mathematische Modellierung der Wärmestromdichte zur Simulation des thermischen Bauteilverhaltens bei der Trockenbearbeitung [Dissertation]. Universität Karlsruhe
- Putz M, Oppermann C, Bräunig M (2018) Enhancement and analysis of multidimensional characteristic diagrams for correction of TCP-displacements caused by thermal tool displacement”, 8th CIRP Conference on High Performance Cutting (HPC 2018), *Procedia CIRP* 77:553–556
- Topinka L, Bräunig M, Regel J, Putz M, Dix M (2021) Multi-phase simulation of the liquid coolant flow around rotating cutting tool. *MM Science* 5:5148–5153

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

