#### **Titel**

# Technologische CAD/CAM-Kette zur Funktionalisierung von Bauteilen

IGF-Nr.: 19684 N

#### Forschungseinrichtungen

Forschungseinrichtung: Leibniz Universität Hannover, Institut für Fertigungstechnik und

Werkzeugmaschinen (IFW)



Institut für Fertigungstechnik und Werkzeugmaschinen

Ansprechpartner Institut: M. Eng. Julia Huuk

0511 762 5209

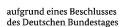
huuk@ifw.uni-hannover.de

### Danksagungen

Das IGF-Vorhaben 19684 N (Technologische CAD/CAM-Kette zur Funktionalisierung von Bauteilen) der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Förderung des Forschungsprojektes. Ein besonderer Dank gilt allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit und für die umfangreiche Unterstützung durch Sachmittel und Dienstleistungen sowie für die vielfachen ausführlichen Diskussionen und konstruktiven Anmerkungen in den Projekttreffen.

Gefördert durch:











TCK Seite 1 von 10

## Ausgangssituation

Zur Prozessplanung komplexer Bauteile mit spanenden Fertigungsprozessen werden heute in vielen Betrieben CAD/CAM-Systeme eingesetzt. Infolge des Trends zu kundenindividuellen Produkten und kleinen Losgrößen steigen die anteiligen Kosten für die Prozessauslegung. Dadurch kommt der computergestützten virtuellen Inbetriebnahme von Prozessen eine immer größere Bedeutung zu, da so Aufwände und Kosten bereits in der Planungsphase mit höherer Sicherheit abgeschätzt und reduziert werden können.

Die Zerspanung spielt als finaler Schritt der Massivteilfertigung für die Bauteilqualität eine entscheidende Rolle. Im Zerspanungsprozess können über die Wahl geeigneter Stellgrößen maßgeblich die Oberflächeneigenschaften und damit das funktionale Verhalten der Bauteile beeinflusst werden. Die Anforderungen an die Bauteiloberfläche werden hierbei durch ihre Funktion vom Kunden festgelegt. Obgleich die Oberflächeneigenschaften dadurch kritischer Bestandteil der Bauteilqualität sind, finden diese in der heutigen Prozessplanung bisher keine ausreichende Berücksichtigung. Die Prozessplanung beschränkt sich in der Regel auf eine rein geometrische Auslegung der Werkzeugwege, während die Festlegung der Stellgrößen entweder von erfahrenen Mitarbeitern vorgenommen wird, oder auf Basis von aufwendigen Einfahrversuchen erfolgt. Dieses iterative Vorgehen in der Prozessauslegung kann zu erheblichen Abweichungen von den kalkulierten Fertigungskosten führen, da die Fertigungsanlage mit nicht wertschöpfenden Tätigkeiten blockiert wird und Werkstücke aus dem Einfahrprozess ggf. als Ausschuss behandelt werden müssen, wenn die Qualitätskriterien nicht direkt erreicht werden.

#### **Forschungsziel**

Das Hauptziel des Forschungsvorhabens war es, eine Methode zum automatisierten Erzeugen vorgegebener, funktionsgebender Oberflächeneigenschaften in der CAD/CAM-Kette am Beispiel der Oberflächenrauheit bei der Fräsbearbeitung zu erforschen. Dazu wurde eine wissensbasierte Planung von Stellgrößen für 3-Achs-Fräsprozesse prototypisch in die kommerzielle CAD/CAM Software Siemens NX integriert.

#### Vorgehensweise und Forschungsergebnisse

Der prinzipielle Ablauf der Rauheitsauslegung ist in Abbildung 1 dargestellt und wird im Folgenden erläutert.

TCK Seite 2 von 10

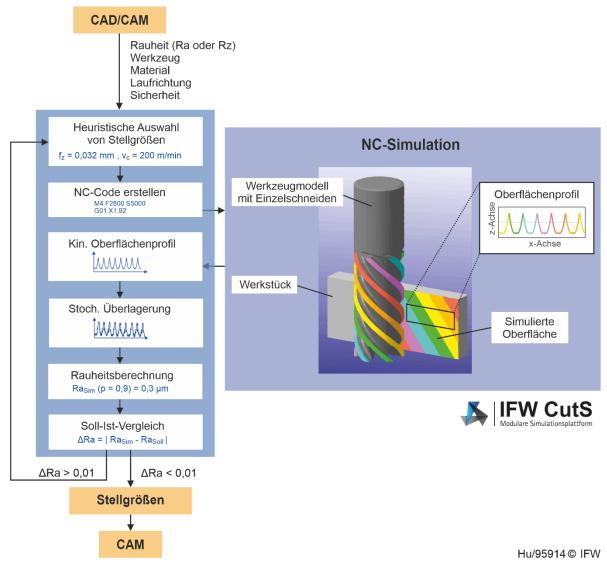


Abbildung 1 Ablauf der Stellgrößenoptimierung

der Prozessplanung werden durch den Nutzer im CAM-System Bearbeitungsoperationen definiert, welche u. a. Informationen über das verwendete Werkzeug und die Laufrichtung (Gleich- oder Gegenlauf) enthalten. Angaben zur Rauheit (Ra oder Rz), dem Bauteilmaterial und der gewünschten Sicherheit der Rauheitsprognose werden über Attribute dem CAD-Modell angehängt. Nach Abschluss der CAM-Planung werden zur Stellgrößenermittlung die relevanten Größen (Rauheit, Werkzeug, Material, Laufrichtung, Sicherheit) für jede Operation automatisiert mit Hilfe der Programmierschnittstelle NX-Open ausgelesen und der Heuristik übergeben. Hier erfolgt ein iteratives Variieren von verschiedenen Stellgrößenkombinationen (fz und vc), um den Soll-Rauheitswert zu erreichen. Hierzu wird in jeder Iteration ein NC-Code mit den ausgewählten Stellgrößen erzeugt. Dieser wird an die NC-Simulationssoftware übermittelt, welche das kinematische Oberflächenprofil ermittelt. Dieses wird mit dem erforschten stochastischen Rauheitsmodell überlagert. Die ebenfalls entwickelte Methodik zur automatisierten Auswertung der Oberflächenrauheit wird genutzt, um die für die geforderte Sicherheit ermittelte Rauheit zu berechnen. Die Differenz zwischen simuliertem und gefordertem Rauheitswert stellt das Optimierungskriterium, welches es zu minimieren gilt, für die Heuristik dar. Sobald eine Stellgrößenkombination gefunden

TCK Seite 3 von 10

wurde, die den Rauheitswert mit einer maximalen Abweichung von 0,01 µm erreicht, wird die Optimierung gestoppt, der berechnete Wert an das CAM-System zurückgegeben und nach Bestätigung durch den Nutzer in die entsprechende Operation geschrieben. Sollte nach einer gegebenen maximalen Anzahl an Iterationen kein ausreichend genaues Ergebnis erzielt worden sein, wird dem Nutzer der bisher beste Wert als Option angezeigt.

#### Simulation der Oberflächenrauheit

Die Auswertung des Rauheitsprofils erfolgt entsprechend der gängigen Definitionen aus der DIN EN ISO 4287. Zur Bestimmung der Rauheitskennwerte aus dem simulierten Oberflächenprofil werden die Höhen der geschnittenen Dexel aus der Abtragssimulation wie Messpunkte aus einer taktilen Messung behandelt. Zu diesem Zweck wird aus dem simulierten Bauteil ein Profil extrahiert, das den Oberflächenquerschnitt beschreibt (siehe Abbildung 2).

# Simulierte Oberflächen Geschnittene Dexel Werkstück Werkstück

Abbildung 2 Bestimmen der Oberflächenrauheit am simulierten Rauheitsprofil

Auf dieses Profil werden die Formeln aus DIN EN ISO 4287 zur Bestimmung der Rauheitskennwerte angewandt, um diese automatisiert im Anschluss an die Simulation zu ermitteln. Im Projekt werden die industriell üblichen Rauheitskennwerte Ra und Rz betrachtet. Eine Erweiterung um beliebig viele Rauheitswerte ist allerdings jederzeit möglich, da das simulierte Oberflächenprofil die Basis für die Auswertung bildet.

Zur Modellierung der Oberflächenrauheit wurde in dem Projekt ein kombiniertes Rauheitsmodell aufgestellt, welches sich aus der kinematisch und der stochastischen Rauheit zusammensetzt. Die kinematische Rauheit bezieht sich hierbei rein auf die geometrischen Größen des Werkzeugs und die Kinematik des Fräsprozesses, welche maßgeblich durch den gewählten Vorschub und die Laufrichtung beeinflusst wird. Wird die rein kinematische Rauheit mit empirisch ermittelten Rauheitswerten verglichen, fallen die kinematischen Rauheitswerte stets niedriger aus. Das ist darauf zurückzuführen, dass es noch zusätzliche Effekte wie z. B. Materialinhomogenitäten, Temperatureinflüsse oder Variationen Materialtrennmechanismus gibt, die im kinematischen Modell nicht berücksichtigt werden. In diesem Forschungsvorhaben wurde angestrebt diese verbliebenen Einflüsse mit Hilfe eines stochastischen Rauheitsmodells abzubilden. Die stochastische Rauheit bildet auf Basis von empirischen Daten eine mathematische Verteilung, welche zur Überlagerung der kinematischen Rauheit herangezogen wird. Damit wird eine bessere Annäherung an die tatsächlich vorliegende Oberflächenrauheit angestrebt.

# Kinematische Rauheit

Für die durchgeführten Simulationen wurden schneidenaufgelöste CAD-Modelle des Werkzeugs genutzt, um die Prozesskinematik und den Materialabtrag möglichst exakt abzubilden. Bei ersten Untersuchungen der kinematischen Rauheit und dem Vergleich dieser

TCK Seite 4 von 10

mit empirisch erfassten Rauheiten wurde festgestellt, dass die ausschließliche Verwendung der Werkzeuggeometrie und des Zahnvorschubs nicht ausreichend sind, um die Einflüsse adäquat abzubilden. Zwei weitere dominierende Einflüsse, welche auf die kinematisch erzeugte Oberfläche wirken, sind der Rundlauffehler am Werkzeug und die Abweichungen des Werkzeugs von seiner Sollgeometrie. In der Praxis sind gängige Toleranzen für Werkzeuge für den Rundlauf bis zu 15 µm und den Planlauf bis zu 25 µm üblich. Diese überschreiten die kinematische Rauheit, welche sich aus einer idealisierten Werkzeuggeometrie und dem eingestellten Zahnvorschub ergibt, um ein Vielfaches, wie in Abbildung 3 dargestellt. Zur Verdeutlichung des Einflusses von Rundlauffehler und Zahnlängenvariation sind hier die einzelnen Zahneingriffe unterschiedlich farblich markiert. Es ist zu erkennen, dass sich die Oberflächenstruktur unter Einbezug des Rundlauffehlers und der Zahnlängenvariation verändert. So kann es z. B. sein, dass kürzere Zähne nur noch zu einem geringen Anteil an der Oberflächengenerierung mitwirken, während längere Zähe tiefere Riefen hinterlassen.

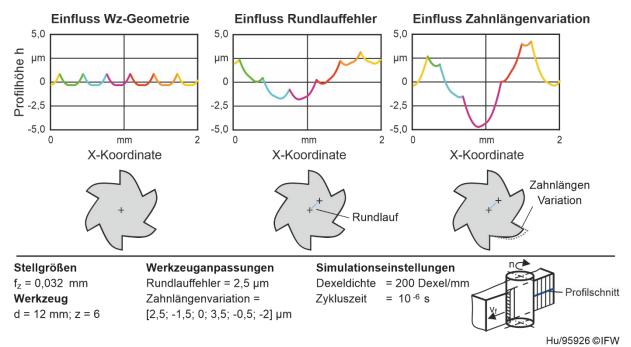


Abbildung 3 Einfluss von Werkzeuggeometrie, Rundlauffehler und Zahnlängenvariation auf die kinematische Oberflächenrauheit beim Schaftfräsen

Hieraus ergibt sich für das Forschungsvorhaben die Notwendigkeit diese Größen in die Modellierung der kinematischen Rauheit miteinzubeziehen. Um die Rechenzeiten möglichst gering zu halten, werden für die kinematischen Oberflächen lediglich ausschnittsweise Simulationen durchgeführt. Dazu wird repräsentativ für das gesamte Werkstück die Bearbeitung eines Werkstückausschnitts mit einem Segment des Fräsers simuliert. Bei dem Schaftfräsprozess wird hier eine Fräserumdrehung und bei dem Stirnfräsprozess das Überfahren eines Werkstückausschnitts abgebildet.

Die so erzeugte Oberfläche kann hinsichtlich der Oberflächenrauheit ausgewertet werden und wird im nächsten Schritt mit der stochastischen Rauheit zur Gesamtrauheit überlagert.

TCK Seite 5 von 10

#### Stochastische Rauheit

Als stochastische Rauheit wird der Anteil der Oberflächenrauheit aufgefasst, der nicht mit vertretbarem Aufwand bestimmten Einflussgrößen zugeordnet oder deterministisch simuliert werden kann. Im Forschungsvorhaben wurden alle weiteren Einflüsse auf die Oberflächenrauheit, die nicht in der kinematischen Simulation abgebildet wurden, als stochastische Einflüsse angesehen. Die Arbeitshypothese war, dass durch den Vergleich von empirischen Untersuchungen mit den korrespondierenden kinematisch simulierten Oberflächen, eine Aussage über die stochastische Rauheit und ihrer mathematischen Verteilung gemacht werden kann.

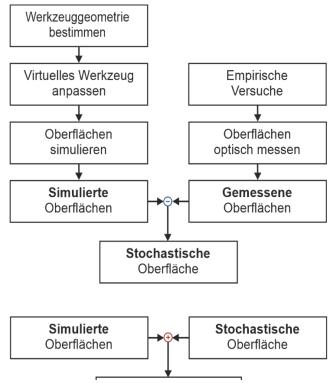


Abbildung 4 Vorgehen bei der Modellierung und Anwendung der der stochastischen Rauheit

Der Ablauf zur Ermittlung der stochastischen Oberfläche, aus welcher die mathematische Verteilung zur Beschreibung des stochastischen Rauheitsanteils generiert wird, ist in Abbildung 4 dargestellt. Die simulierte Oberfläche stellt hierbei den kinematischen Rauheitsanteil dar. Dazu werden zunächst einige Kenngrößen der Werkzeuggeometrie des realen Werkzeugs am Werkzeugeinstellgerät erfasst. Diese Werte werden genutzt, um das virtuelle Werkzeug anzupassen und anschließend mit Hilfe einer Materialabtragssimulation die kinematische abzubilden. Parallel erfolgen empirische Versuche, mit Stellgrößenkombinationen. Die so entstehenden Oberflächen werden messtechnisch erfasst und bilden den real gemessenen Zustand der Oberfläche ab. Durch einen Vergleich der beiden Oberflächen und eine Differenzbildung wird der stochastische Anteil ermittelt. Durch Differenzbildung zwischen simuliertem und gemessenem Profil nach der Ausrichtung wurden für 10 gemessene Profile die absoluten Abweichungen zueinander ermittelt. Dazu wurde ausgehend von jedem Punkt auf dem kinematischen Rauheitsprofil der Abstand zum gemessenen Profil ermittelt. Die so bestimmten Abweichungen wurden in eine statistische

TCK Seite 6 von 10

Verteilfunktion überführt, welche mit ihrem Mittel- und Erwartungswert die stochastischen Abweichungen beschreibt.

Als Basis für die Modelle des Erwartungswertes und der Standardabweichung werden die Verteilfunktionen verwendet, die sich aus der Differenzierung der simulierten und empirisch ermittelten Profile ergeben. Dadurch wird eine Ebene aufgespannt, welche kubisch interpoliert wurde. Hierdurch können bei der Anwendung der Modelle auch Zwischenwerte für  $f_z$  und  $v_c$  gesetzt und der Erwartungswert bzw. die Standardabweichung abgeleitet werden.

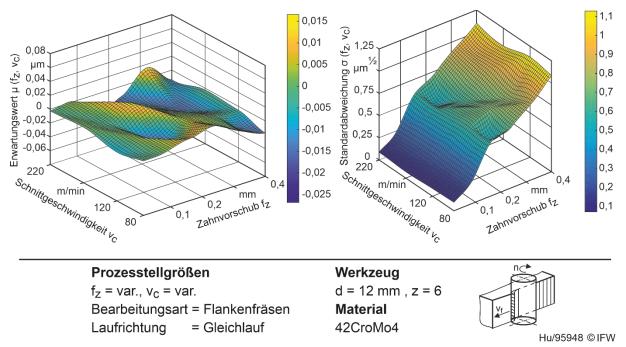


Abbildung 5 Beispiel für stochastisches Rauheitsmodell für die Flankenbearbeitung von 42CrMo4 im Gleichlauf mit Erwartungswert (links) und Standardabweichung (rechts)

Ein Beispiel für ein solches Rauheitsmodell ist für die Bearbeitung von 42CrMo4 mit der Flanke im Gleichlauf (Modell Nr. 5) ist in Abbildung 5 dargestellt.

Für den Erwartungswert ist zu erkennen, dass dieser um 0 herum in kleinem Abstand streut und Werte zwischen -0,025 und 0,018  $\mu$ m annimmt. Dies sind im Vergleich zu den laut DIN 4766-1 in der spanenden Fertigung erzielten Rz Werten von 1,6 bis 25  $\mu$ m sehr geringe Abweichungen. Große Beträge im Erwartungswert würden eine Verschiebung zwischen Simulation und empirischen Daten hinweisen. Dies war aber nach erfolgter Ausrichtung nicht zu erwarten. Die Standardabweichung ist für steigende  $f_z$  Werte stetig steigend, während sie für steigende  $v_c$  Werte annähernd konstant bleibt. Eine mögliche Begründung, die eingehend mit dem PA diskutiert, aber nicht näher untersucht wurde, ist, dass mit steigendem  $f_z$  der Schnitt mit größeren Kräften erfolgt und daher zu erwarten, dass die Materialtrennung hier auch unsauberer und dadurch mit größeren Rauheitsspitzen erfolgt. Daher resultiert eine größere Standardabweichung bei größeren  $f_z$ , was entsprechend der Erwartungen ist.

#### Anwendung der Rauheitsmodelle

Die erforschten empirischen Rauheitsmodelle werden zur Überlagerung der simulierten kinematischen Rauheitsprofile genutzt. Dazu wird zunächst mit den gewählten Stellgrößen  $f_z$  und  $v_c$  der Erwartungswert und die Standardabweichung der Verteilungsfunktion mit Hilfe der

TCK Seite 7 von 10

beschriebenen Funktionen bestimmt. Ausgehend von der Verteilungsfunktion wird für jeden Punkt auf dem kinematischen Profil ein zufälliger Wert generiert. Diese Werte werden dann punktweise mit dem kinematischen Profil addiert und bilden das resultierende Oberflächenprofil. Die generierten Punkte und das resultierende Oberflächenprofil sind bespielhaft für eine Stellgrößenkombination in Abbildung 6 dargestellt.

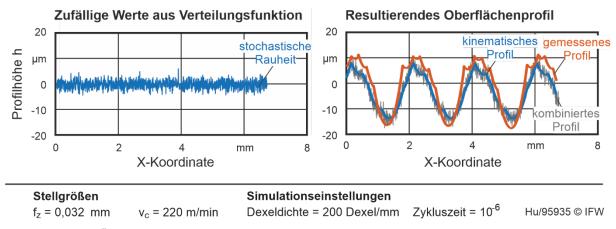


Abbildung 6 Überlagerung von stochastischer Rauheit und kinematischem Profil zum kombinierten Profil

Abschließend wird das kombinierte Profil hinsichtlich der resultierenden Rauheit ausgewertet. Der Vergleich zum gemessenen Profil zeigt, dass durch die Überlagerung eine geometrische Annäherung an die gemessenen Profile erfolgt.

# Genauigkeit der Rauheitsmodellierung

Für den im Projekt betrachteten Anwendungsfall wurden die Rauheitswerte Ra und Rz bestimmt. In Abbildung 7 ist das Verhältnis von simulierter und gemessener Rauheit für die untersuchten Werkstoffe, Bearbeitungsarten und Laufrichtungen dargestellt. In der Darstellung bedeutet ein Wert von 1 eine völlige Übereinstimmung des Wertes von simulierter und gemessener Rauheit und bildet somit den Soll-Zustand ab. Es sind für Ra und Rz jeweils zwei Werte dargestellt, zunächst der Rauheitswert aus der rein kinematischen Simulation (Ra<sub>kin</sub> bzw. Rz<sub>kin</sub>) und des Weiteren der Rauheitswert, den das kombinierte Rauheitsmodell liefert (Ra<sub>kin+sto</sub> bzw. Rz<sub>kin+sto</sub>).

Ein Vergleich der Simulationsqualität zwischen der Prognose der Oberflächengüte im Gleichund Gegenlauf ergibt, dass die Modellierung sowohl für Gleich- als auch Gegenlauf annähernd gleich ist. Für Ra ergeben sich Unterschiede von  $1.8 \pm 0.8$  % und für Rz  $10.5 \pm 7.1$  %. Bei Vergleich der Simulationsergebnisse zwischen der Flanken- und Stirnbearbeitung ist zu erkennen, dass die Übereinstimmung der simulierten Rauheitswerte für die Flankenbearbeitung mit 100 - 123 % relativ gut ist, während die Übereinstimmung bei der Stirnbearbeitung mit 43 - 228 % nur sehr bedingt gegeben ist. Die Werte schwanken zudem stark abhängig vom Material, eine Übersicht ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1 Mittelwerte der Simulationsgenauigkeit für Bearbeitungsart und Material

	Flanke		Stirn	
	42CrMo4	AlZnMgCu1,5	42CrMo4	AlZnMgCu1,5
Ra	123 %	134 %	228 %	131 %
Rz	100 %	101 %	156 %	43 %

TCK Seite 8 von 10

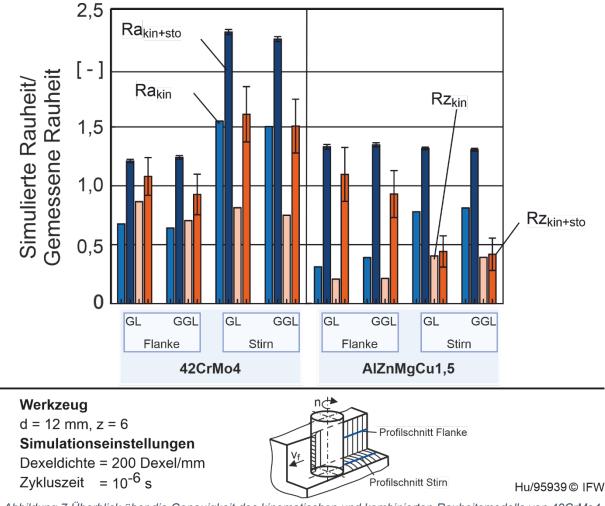


Abbildung 7 Überblick über die Genauigkeit des kinematischen und kombinierten Rauheitsmodells von 42CrMo4 und AlZnMgCu1,5

Eine mögliche Erklärung für die hohen Unterschiede zwischen der Flanken- und der Stirnbearbeitung ist der Einfluss der Abdrängungskräfte beim Fräsen. Diese führen beim Flankenfräsen zu einer Formabweichung, da der Fräser parallel zur generierten Oberfläche abgedrängt wird. Eine Hypothese für die größeren Abweichungen beim Strinfräsen, die ebenfalls mit dem PA diskutiert wurde, ist, dass eine Abdrängung des Fräsers in Vorschubrichtung zu einer Kippung des Fräsers führen könnte. Die Verkippung führt im Anschluss zu einer lokalen Änderung der Eingriffstiefe, sodass die Zähne teilweise tiefer in das Material eingreifen als durch die modellierte Prozesskinematik vorgesehen. Dadurch entstehen hier höhere Rauheitswerte die zunächst nicht mit dem kinematischen Rauheitsmodell dargestellt werden können.

Ebenfalls ist auffällig, dass die Genauigkeit der rein kinematischen Rauheitssimulation für die Aluminiumlegierung wesentlich geringer ausfällt, als dies für 42CrMo4 der Fall ist. Dieser Zustand ist möglicherweise auf einen Unterschied im Materialtrennmechanismus zurückzuführen. Für 42CrMo4 erfolgte eine saubere Trennung ohne große Rauheitsspitzen und es werden Wendel- bzw. Spiralspänne abgeführt. Bei dem weniger zugfesten AlZnMgCu1,5 ( $R_m = 360 - 540$  MPa) kann es zu einem Schmieren bei der Spanbildung TCK

kommen, welches vermehrt dazu führt, dass hier höhere Rauheitsspitzen entstehen. Abschließend lässt sich festhalten, dass der untersuchte Ansatz zur Modellierung der Oberflächenrauheiten beim Schaftfräsen von 42CrMo4 bereits eine hohe Übereinstimmung bietet. Gleichzeitig bedürfen die die Übertragung auf das Stirnfräsen sowie auf andere Werkstoffe weiterführende Untersuchungen.

## Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben wurde die CAD/CAM-Kette um eine Möglichkeit der Vorgabe von Oberflächeneigenschaften erweitert. Diese an den einzelnen Flächen hinterlegten Oberflächeneigenschaften konnten genutzt werden, um beliebige Rauheitswerte, Sicherheiten und das verwendete Material flächenaufgelöst zu speichern und in einem maschinenlesbaren Format zwischen CAD und CAM-System zu übertragen. Die so hinterlegten Eigenschaften wurden über eine erweiterbare Schnittstelle an das Simulationssystem übergeben und eine Methode zur automatisierten Auswertung der simulierten Oberfläche wurde entwickelt. Als Modellierungsansatz für die Oberflächenrauheit wurde ein kombinierter Ansatz aus kinematischer und stochastischer Rauheit verwendet. Die hier erforschten Rauheitsmodelle zeigten bereits eine hohe mittlere Übereinstimmung von 80 – 100 % für Flankenfräsprozesse von 42CrMo4. Weiteres Potential in der Rauheitsmodellierung besteht bei der Modellierung von Stirnfräsprozessen und bei der Übertragung auf weitere Materialien. Die ausgewählte Prozessplanungsheuristik "Pattern Search" nähert die simulierten Rauheitswerte zuverlässig geforderten Rauheitswerten an. Die Rechengeschwindigkeit der Prozessplanungsheuristik konnte durch eine Datenbank zur Startwertauswahl um das 2,5-fache gesteigert werden. Im Rahmen der Validierung wurde die gesamte CAD/CAM-Kette durchlaufen und es konnte somit die Funktionalität der Erweiterung validiert werden.

Eine Langfassung der Forschungsarbeiten kann in Form eines Schlussberichts bei der Forschungsgemeinschaft Werkzeuge und Werkstoffe e.V., Papenberger Str. 49, 42859 Remscheid, www.fgw.de, angefordert werden.

Weiter Informationen erhalten Sie bei Frau M. Eng. Julia Huuk unter 0511 / 762 5209 oder per Mail unter <a href="https://doi.org/10.2016/nat/2016/n

TCK Seite 10 von 10