



Oberflächensimulation und experimentelle Untersuchungen zur Mikrostrukturierung von Stahlwerkstoffen mittels schwingungsüberlagertem Planfräsen im Ultraschallbereich

Richard Börner*, Thomas Junge, Andreas Schubert

Technischen Universität Chemnitz, Professur Mikrofertigungstechnik, Reichenhainer Str. 70, 09126 Chemnitz, Deutschland

Abstract

Die industrielle Produktion technischer Systeme ist im internationalen Wettbewerb geprägt durch steigende Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Kosten, wodurch Oberflächen mit speziellen Eigenschaften zunehmend an Bedeutung gewinnen. Daher ist deren Funktionalisierung in vielen Forschungsbereichen fest verankert – beispielsweise mit dem Ziel einer verbesserten Haptik, der Erzeugung optischer Effekte oder um die Reibung in mechanischen wie auch fluidischen Systemen zu senken bzw. zu erhöhen. Ebenso können Funktionsoberflächen einen Beitrag zur Steigerung der Haftfestigkeit darauf applizierter Schichten und Schichtsysteme leisten, welche wiederum die Einsatzmöglichkeiten des Substratwerkstoffs erweitern. Im Rahmen des Schwerpunktprogramms 1676 „Trockenumformen“ der DFG soll u. a. mittels CVD-Diamantschichten eine trockene Blechumformung von Aluminiumlegierungen mit beschichteten Stahlwerkzeugen realisiert werden, wozu eine mechanische Mikrostrukturierung der Substratoberfläche zur Gewährleistung einer ausreichenden Schichthaftung vorgesehen ist. Aufgrund der definierten Schneidengeometrie und Kinematik ist das schwingungsüberlagerte Fräsen im Ultraschallbereich als ein geeignetes Verfahren zur reproduzierbaren Herstellung definierter Feingestalten in den Fokus gerückt. Dazu wurden ein entsprechendes System in einem Hochpräzisionsbearbeitungszentrum implementiert und erste experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Zur Strukturauslegung bzw. -modellierung wurde ein an der Professur Mikrofertigungstechnik der TU Chemnitz entwickeltes Oberflächensimulationstool genutzt, das anhand der relevanten Parameter eine virtuelle Mikrostruktur errechnet. Dabei konnte in ersten Versuchen bereits ein hohes Maß der Übereinstimmung mit den bearbeiteten Oberflächen festgestellt werden. Somit wurde eine Möglichkeit zur wirtschaftlichen Mikrostrukturierung von Bauteilen aus Stahlwerkstoffen geschaffen.

Keywords: Mikrostrukturierung; Oberflächenfunktionalisierung; Oberflächensimulation; ultraschallschwingungsüberlagertes Fräsen

1 Einleitung

Die Überlagerung von Zerspanungsprozessen mit Schwingungen ist nach wie vor Gegenstand unterschiedlicher Forschungsarbeiten, wird aber auch bereits industriell angewendet. Oftmals ist das Ziel eine Reduzierung der Zerspankraft beziehungsweise Standzeiterhöhung der eingesetzten Werkzeuge. Darüber hinaus wird häufig eine Reduzierung der Oberflächenrauheit angestrebt [1]. Nur sehr wenige Forschungen adressieren eine Mikrostrukturierung der Werkstückoberflächen (u. a. [2]–[4]) durch die überlagerte Schwingbewegung. Dies wird jedoch innerhalb des Schwerpunktprogramms 1676 der DFG („Trockenumformen“) als Teilziel verfolgt. Repro-

duzierbare, definierte Oberflächenfeingestalten sollen einen Beitrag zur Gewährleistung einer ausreichenden Haftfestigkeit von CVD-Diamantschichten auf Stahlwerkstoffen leisten. Dabei steht vor allem der Abbau von Eigenspannungen innerhalb der Diamantschicht im Vordergrund, daneben werden eine Verstärkung der mechanischen Verklammerung sowie der chemischen Bindungsaktivitäten angestrebt.

An der TU Chemnitz wurde ein Drehprozess mit Ultraschallschwingungsüberlagerung in verschiedene Richtungen genutzt, um unterschiedliche Oberflächenfeingestalten zu erzeugen [5], [6]. Für den nieder- wie auch hochfrequenten Schwingungsbereich sind in [7] und [8] Untersuchungen zum Strukturieren von Oberflächen beschrieben, welche über Fly-Cutting- und konventionelle

Fräsprozesse mit angeregtem Werkzeug realisiert wurden. Kommerziell erhältliche Systeme, die schwingungsüberlagertes Spanen im Ultraschallbereich ermöglichen, vertreiben unter anderem die SAUER GmbH der DMG-MORI-Gruppe sowie die Fa. SCHOTT-Diamantwerkzeuge. Die hierbei im Fokus stehenden Bearbeitungen sind hauptsächlich das Schleifen von sprödharten Werkstoffen wie Glas oder Keramiken.

Die Anzahl an Untersuchungen zum Planfräsen mit angeregtem Werkzeug oder Werkstück im Ultraschallbereich ist nach [9] vergleichsweise gering. Die Komplexität der Bewegungsüberlagerung in Abhängigkeit der geforderten Werkstückoberfläche ist einer der wesentlichen Gründe dafür. Jedoch existieren verschiedene Forschungsansätze auf diesem Gebiet, die sich überwiegend mit der Schwingungsüberlagerung in Vorschub- und / oder Schnittrichtung auseinandersetzen. Eine eindimensionale Anregung kann in Abhängigkeit der eingestellten Prozessparameter sowohl zur Reduzierung [10] als auch Erhöhung der Oberflächenrauheit [11] und der daraus resultierenden möglichen Einbringung von definierten Mikrostrukturen [12] genutzt werden. Eine zweidimensionale Anregung mit einer Schwingungsüberlagerung des Fräsprozesses in Vorschub- sowie Schnittrichtung dienen hauptsächlich zur Reduzierung der Schnittkräfte, der Erhöhung der Werkzeugstandzeit und somit auch zur Reduzierung der Oberflächenrauheit [13]–[16].

Die Überlagerung von Schwingungen in Richtung der Werkzeugachse beim Fräsen hat Einfluss auf die Oberflächenausbildung und ist unter anderem in [17] sowie [18] beschrieben. Es wurde gezeigt, dass durch die Variation der Bearbeitungs- sowie der Schwingungsparameter eine teils definierte Veränderung der Oberflächenrauheit erreicht werden kann, allerdings auch verschiedene Überlagerungseffekte (Interferenzen) auftreten, welche einen hohen Einfluss auf die Oberflächenkennwerte haben und noch nicht vollständig erklärbar sind. Zudem wurden die experimentellen Untersuchungen mit einem mehrschneidigen Fräs Werkzeug durchgeführt, wodurch solche Effekte durch ggf. voneinander abweichende Schneidengeometrien noch verstärkt werden.

Detaillierte Untersuchungen zur Ausprägung der Oberflächenfeingestalt beim ultraschallschwingungsüberlagerten Fräsen erfolgten bislang hauptsächlich experimentell. Ansätze zur Modellierung der Werkzeugtrajektorie und Simulation der resultierenden Werkstückoberflächenfeingestalt mit überlagerten Schwingungen in Vorschub- und Schnittrichtung wurden u. a. von Ibrahim und Ding et al. entwickelt [13], [15]. Für die Bearbeitung mit einer Schwingungsüberlagerung in Richtung der Werkzeugachse existieren derartige analytische Untersuchungen noch nicht. Dagegen liegen für andere schwingungsüberlagerte spanende Bearbeitungsverfahren, wie der elliptischen Vibrationszerspanung [2] und dem schwingungsüberlagerten Drehen [5], [19], bereits fundierte Oberflächensimulationsmodelle vor.

2 Simulation der Oberflächenfeingestalt beim ultraschallschwingungsüberlagerten Fräsen

Grundsätzlich ist bei der Schwingungsüberlagerung von Systemen im Ultraschallbereich im Allgemeinen

zwischen resonanter und nicht-resonanter Anregung zu unterscheiden. Beim nicht-resonanten Fall ist das gekoppelte Werkstück bzw. Werkzeug eine bewegte Masse, was zwar variable Frequenzen zulässt, allerdings nur sehr geringe Amplituden von $1\ \mu\text{m} - 2\ \mu\text{m}$ erzielt. Im Falle einer resonanten Anregung ist das gesamte System bzw. jede einzelne Komponente auf eine Nennfrequenz ausgelegt, wobei durch eine Erhöhung der Leistung deutlich größere Amplituden erzeugt werden. Es existieren allerdings Sonderfälle, wo die bewegte Masse hinreichend gering ist, um den resonanten Schwingungsfall zu gewährleisten und somit höhere Amplituden bei den jeweiligen Nennfrequenzen erreicht werden können.

Beim Planfräsen mit einer Schwingungsüberlagerung in Richtung der Werkzeugachse folgt die Werkzeugschneide einem definierten Pfad. Dieser resultiert aus den Schwingungen je Umdrehung sowie der Zykloidenbahn, welche die Drehzahl des Werkzeugs über einem translatorischen Vorschub wiedergibt. Er ist mathematisch berechenbar und in den Abbildungen 1 sowie 2 einzeln schematisch dargestellt. Auf Basis dieser Trajektorie erfolgt die Simulation der entstehenden Oberflächenfeingestalt.

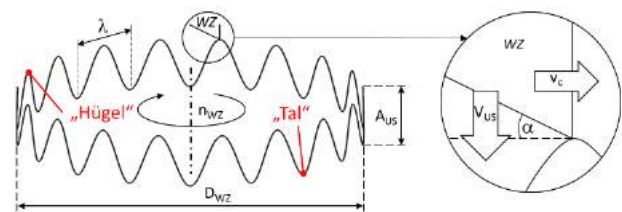


Abb. 1: Schematische Darstellung einer in Richtung der Werkzeugachse schwingungsüberlagerten Einzelumdrehung einer als Punkt abstrahierten Schneidenecke

Zur Berechnung der beim Planfräsen entstehenden Oberflächenfeingestalt wurde ein kinematisches Simulationsmodell in MATLAB entwickelt. Ein virtuelles Werkzeug wird dafür entlang einer vorgegebenen Trajektorie mit dem ebenfalls virtuellen Werkstück verschnitten. Hierbei stellt das Dixelmodell eine geeignete Variante der volumetrischen Repräsentation dar. Ein Dixel beschreibt ein Stabelement, welches durch einen Startpunkt und eine Höheninformation charakterisiert wird. Zur Beschreibung des gesamten Körpervolumens wird jedem Stabelement in einer Matrix eine exakte X- bzw. Y-Position im zweidimensionalen Raum in diskreter Form zugewiesen. Der Vorteil dieser Form der räumlichen Diskretisierung besteht darin, dass durch die zweidimensionale, abstandsgleiche Punktverteilung der Speicherbedarf für das Volumenmodell nur in zweiter Potenz zunimmt, das Modell aber gleichzeitig in Dixel-Richtung wesentlich höher aufgelöst werden kann, da eine Genauigkeitssteigerung der Höhenwerte keinen Einfluss auf die Speicherauslastung hat.

Das entwickelte Oberflächensimulationsstool ermöglicht die Integration beliebiger Werkzeuggeometrien und -bewegungen. Für die Berechnung ist nur der im Eingriff stehende Teil des Werkzeugs von Bedeutung, welcher zunächst mittels CAD-Software konstruiert werden kann. Zur anschließenden Implementierung in die Simulation wurde aus dem CAD-Modell ein dixelbasiertes

Formelzeichen	Bedeutung	Einheit
a_e	Arbeitseingriff	mm
a_p	Schnitttiefe	μm
A_p	Amplitude im mathematischen Sinn: nur Peak	μm
A_{US}	US-Amplitude: Peak-to-Peak ($A_{US} = 2 \cdot A_p$)	μm
D_{WZ}	Werkzeugdurchmesser	mm
f_{US}	Ultraschallfrequenz	kHz
f_z	Zahnvorschub	μm
i	Vielfaches der minimalen zeitlichen Auflösung	-
j	Vielfaches des Arbeitseingriffs	-
n_{WZ}	Drehzahl (Spindel)	min^{-1}
N	Anzahl der Verschneidungspunkte je Periode	-
S_a	arithmetische Durchschnittshöhe	μm
S_{dr}	entwickeltes Grenzflächenverhältnis	%
S_k	Kernhöhe	μm
S_{pk}	reduzierte Spitzenhöhe	μm
S_{tr}	Seitenverhältnis der Oberflächentextur	%
S_{vk}	reduzierte Talhöhe	μm
S_z	maximale Höhe der betrachteten Ober- fläche	μm
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{US}	maximale Schwinggeschwindigkeit	m/min
z	Zähnezahl (Anz. Werkzeugschneiden)	-
α	Werkzeugfreiwinkel	$^\circ$
λ	Wellenlänge einer Schwingung	μm
φ_0	Nullphasenwinkel der Schwingung	rad
Δt	minimale zeitliche Auflösung	s
$\Delta\varphi$	rotatorischer Winkelversatz	rad

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchsaufbau

Die Durchführung der Zerspanungsversuche erfolgte auf dem Hochpräzisionsbearbeitungszentrum KERN Pyramid Nano. Um den Bearbeitungsprozess werkstückseitig mit Ultraschall zu überlagern, wurde ein Schallwandler (Typ UIP2000hdT der Fa. Hielscher) auf dem Maschinentisch implementiert (Abb. 3). Über ein Verbindungselement wurde dieser mit einem Kreuzwandler gekoppelt, welcher einerseits die Richtung der Schwingung um 90° umlenkt sowie andererseits durch eine Schraubverbindung (Feingewinde: M14 x 1) das Werkstück aufnimmt. Als Versuchswerkstoff kam der im Schwerpunktprogramm 1676 „Trockenumformen“ der DFG festgelegte Werkzeugstahl 1.2379 (X135CrMoV12) im weichgeglühten Zustand (255 HB) zum Einsatz. Die Versuchsproben wurden für den (nahezu) resonanten Schwingungsfall ausgelegt, wodurch sie nur eine sehr geringe Höhe (3 mm) aufweisen. Über ein Sechskantprofil mit einer Schlüsselweite von 32 mm wird für diesen Werkstoff die Aufbringung eines Anzugsmoments von 150 N m ermöglicht.

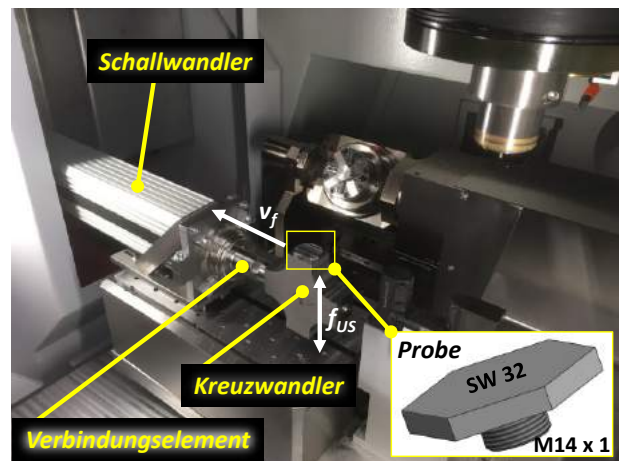


Abb. 3: Aufbau der Versuchseinrichtung

Zur Überprüfung der Performance des Systems im Leerlauf, d. h. inklusive der verschraubten Versuchsprobe, wurden der Soll-Wert für die Amplitude am Generator in 10 %-Schritten erhöht und die erreichten Amplituden ($A_p \rightarrow$ „nur Peak“) mittels Laservibrometer auf der Probenoberfläche gemessen. Der Soll-Wert bezieht sich dabei auf den prozentualen Anteil des vom Hersteller freigegebenen Wertes für die maximale Amplitude – in dem Fall $10 \mu\text{m}$. Am anderen Ende des Wandlers wird zusätzlich mittels eines Piezo-Elements ein Spannungswert gemessen, welcher in den Regelkreis am Generator einfließt. Leichte Abweichungen zum per Laservibrometer erfassten Messwert sind im für das Schwingensystem charakteristischen Übertragungsverhalten begründet. Die Messwerte der erfassten Amplituden sind in Tabelle 1 dargestellt. Die Resonanzfrequenz f_{US} betrug dabei zwischen 19,15 kHz und 19,18 kHz.

Tab. 1: Ergebnisse der Messung der Amplituden des Schwingensystems mittels Laservibrometer (Soll-Wert $\pm 10 \mu\text{m}$ bei 100 %)

Soll-Wert	Amplitude A_p
20 %	1,8 μm
30 %	3,3 μm
40 %	4,5 μm
50 %	5,7 μm
60 %	6,6 μm

3.2 Durchführung

Zur spanenden Mikrostrukturierung der Versuchsprobe kamen beschichtete (TiAlN/TiSiN) Vollhartmetall-Schaftfräser ($z = 1 / 2$, $D_{WZ} = 5 \text{ mm}$) zum Einsatz, welche eine sehr kleine Schutzfase ($20 \mu\text{m} \times 45^\circ$) der Schneidkanten aufwiesen (vgl. Abb. 8 in 4.2). Um einen möglichen fertigungsbedingten Höhenversatz zwischen beiden Schneiden auszuschließen, wurden – bis auf ein Vergleichswerkzeug – die eingriffsrelevanten Teile jeweils einer Nebenschneide und Schneidenecke mechanisch entfernt. Zur Festlegung der Bearbeitungsparameter war es notwendig, Grenzwerte für Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit festzulegen, welche einen nachträglichen Kontakt des Werkzeugs (insbesondere der Schneidkante sowie der Freifläche der Nebenschneide) mit der erzeugten Oberfläche ausschlossen. So ergab die

Berechnung des Zahnvorschubs $f_{z, \min} = 100 \mu\text{m}$, die der Schnittgeschwindigkeit $v_{c, \min} = 85 \text{ m/min}$. Die Schnittgeschwindigkeit definiert durch das Verhältnis von Drehzahl und Schwingfrequenz die „Wellenlänge“ (λ) der Struktur in Umfangsrichtung (vgl. Abb. 1). Um gleiche Strukturabstände in Vorschub- und Schnittrichtung einzustellen, wurde für die Schnittgeschwindigkeit der Wert auf $v_c = 120 \text{ m/min}$ erhöht, was näherungsweise einer Wellenlänge von $\lambda = 100 \mu\text{m}$ entspricht. Die Versuche mit dem zweischneidigen Werkzeug wurden insgesamt fünfmal durchgeführt, um zudem Aussagen über die Verschleißentwicklung ableiten zu können. Darüber hinaus erfolgten zwei Vergleichsversuche mit „ungünstigen“ Eingriffsbedingungen der relevanten Schneidteile: einerseits wurden die Strukturabstände halbiert ($f_z = 50 \mu\text{m}$, $v_c = 60 \text{ m/min}$) und andererseits die Amplitude auf $3,3 \mu\text{m}$ ($\pm 30\%$) erhöht. Die Versuche wurden ohne den Einsatz von Kühlschmiermitteln, jedoch mit Druckluftzufuhr durchgeführt. Mit einem maximal möglichen Arbeitseingriff von $a_c = 4,8 \text{ mm}$ (zur Gewährleistung der Überlappung der Fräsbahnen) wurde die Probenoberfläche parallel abgezeit. Die einzelnen Versuchsparameter sind in Tabelle 2 dargestellt.

Tab. 2: Experimenteller Versuchsplan

Nr.	z	A_p	$f_z (\approx \lambda)$	v_c
V1	1			
V2	2	1,8 μm	100 μm	120 m/min
V3			50 μm	60 m/min
V4	1	3,3 μm	100 μm	120 m/min

Als Basis für die Oberflächensimulation diente Versuch V1. Auf dessen Prozessparametern aufbauend wurden vier verschiedene Simulationsmodelle erstellt. Durch die Aneinanderreihung von Einzelzykloiden in Vorschubrichtung ist es möglich, einen definierten Versatz der sinusförmigen Struktur nach jeder Umdrehung einzustellen. Da im realen Bearbeitungsprozess sowohl Schwankungen innerhalb der Spindeldrehzahl als auch der Resonanzfrequenz existieren, ist ein eindeutiges Verhältnis dieser Größen nicht vorherzusagen. In den häufigsten Fällen ist es überdies nicht ganzzahlig, wodurch ein leichter Versatz entsteht. In der Simulation werden daher die beiden „Extremfälle“ miteinander verglichen: kein Versatz („Tal folgt auf Tal“, a / c) und maximaler Versatz einer halben Wellenlänge („Tal folgt auf Hügel“, b / d). Des Weiteren wurden beide Varianten jeweils mit

(c / d) und ohne Nachschneideeffekt (a / b) der umlaufenden Schneidenecke simuliert.

Die Charakterisierung sowohl der gefrästen als auch der simulierten Oberflächenfeingestalt erfolgte mit der Oberflächenauswerte- und -analysesoftware Mountains-Map® sowie der Software VK Analyzer von Keyence. Dazu wurden Ausschnitte der Oberflächen der experimentell hergestellten Versuchsproben mit einem Laserscanning-Mikroskop (Keyence VK-9700) erfasst. Das ausgewählte Messfeld nach DIN 25178-3, welches mittig innerhalb der gefrästen Bahnen lag, betrug $0,5 \text{ mm} \times 0,5 \text{ mm}$. Um den Werkzeugverschleiß zu dokumentieren und auszuwerten, wurden REM-Aufnahmen der Schneidkanten vor und nach der Bearbeitung angefertigt.

4 Auswertung und Diskussion

4.1 Auswertung der Oberflächenfeingestalt

Oberflächensimulation

Zur Analyse der simulierten Oberflächenfeingestalt sind in Abbildung 4 Falschfarbendarstellungen sowie die zugehörigen Oberflächenparameter in Tabelle 3 dargestellt. Auffällig ist insbesondere der hohe Wert des Seitenverhältnisses der Oberflächentextur der Oberflächen mit Versetzung (b, ca. 89 % und d, ca. 71 %) gegenüber jenen ohne Versetzung (a und c, je ca. 10 %). Dieses Maß für die Isotropie einer Oberfläche ist für eine nachfolgende Beschichtung von hoher Relevanz, da an Mikrostrukturen mit dominanten Vorzugsrichtungen eher Gebiete mit großen Druckeigenstressungen innerhalb eines Schichtverbundes entstehen können und daher eine möglichst isotrope Anordnung der Oberflächenmikrostrukturen angestrebt werden soll.

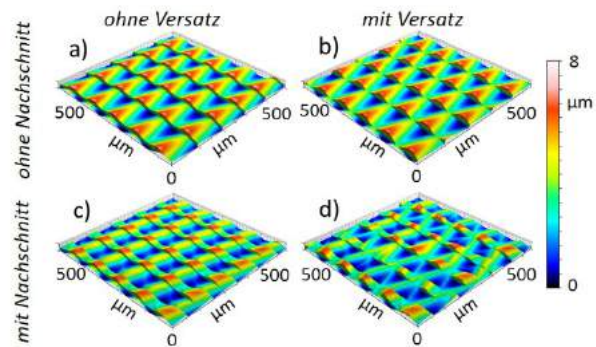


Abb. 4: Übersicht der simulierten Oberflächen in Falschfarbendarstellung als Variation von Versuch V1

Tabelle 3: Ergebnisse der Oberflächenanalyse

	S_a	S_b	S_c	S_d	V1	V2	V3	V4
Sz [μm]	7,27	6,98	6,89	6,91	7,15	8,59	7,47	12,2
Sa [μm]	1,30	1,28	1,26	1,14	1,28	0,98	0,74	1,73
Sdr in %	1,5	1,6	1,7	1,7	1,6	2,5	3,2	2,9
Str in %	10,3	89,1	10,1	70,5	10,3	76,7	12,8	8,2
Sk [μm]	4,52	4,38	4,08	3,76	4,06	3,27	2,52	5,59
Spk [μm]	0,95	0,91	1,34	1,74	1,12	1,08	0,77	1,51
Svk [μm]	0,94	1,00	0,73	0,54	0,41	0,71	0,7	0,53

Außerdem wird ersichtlich, dass die Oberflächenkennwerte S_z , S_a , S_k und S_{vk} von a) bis d) tendenziell abnehmen, während die Oberflächenvergrößerung S_{dr} sowie die reduzierte Spitzenhöhe S_{pk} ansteigen. Dies ist auf das entfernte Material zurückzuführen. In Simulation d) tritt der Fall des am größten wirkenden Nachschneideeffekts ein, da hier die Strukturversetzung maximal ($\Delta\phi \cong \lambda/2$) ist.

Experimentelle Untersuchungen

Bei der visuellen Betrachtung der Oberflächen (Abb. 5) fällt auf, dass einzig bei Versuch 2 Nachschneideeffekte sowie eine Versetzung der Strukturen je Vorschubriefe erkennbar sind. Dadurch können die Oberflächen klar hinsichtlich ihrer Isotropie getrennt werden: während die Anordnung der Mikrostrukturen bei V2 mit knapp 77 % als isotrop zu bezeichnen ist, weisen V1, V3 und V4 nur geringe Werte auf (8 % – ca. 13 %). Insbesondere beim Versuch mit größerer Amplitude (V4) sind dominante Riefen in Vorschubrichtung wahrnehmbar, wodurch eine klare Vorzugsrichtung geschaffen wird. Außerdem wird hierbei deutlich, dass Vorschub- und Schnittgeschwindigkeit zu gering für die Ausprägung der Feingestalt gewählt sind, sodass ein Kontakt der Mikrostrukturen mit der Freifläche der Nebenschneide vorliegt.

Darüber hinaus ist festzustellen, dass die Oberfläche von V1 die geringste Oberflächenvergrößerung ($S_{dr} = 1,6\%$) aufweist, obwohl V2 mit gleichen Prozessparametern erzeugt wurde. Dies ist auf die Auswirkung minimal unterschiedlicher Schneidenlängen bei V2 (in axialer Richtung zum Werkzeugschaft) sowie Nachschneideeffekte zurückzuführen, welche zu einem leichten Anstieg von S_{dr} führen. Diese Annahme korreliert zudem in der Tendenz mit den Erkenntnissen der Simulation. Einen noch größeren Einfluss besitzt erwartungsgemäß die Erhöhung der Amplitude bei V4, während den höchsten Wert der Oberflächenvergrößerung V3 mit $S_{dr} = 3,2\%$ erreicht. Dies ist mit einem etwa doppelten Aspektverhältnis (A_{US}/λ) der Strukturen erklärbar: während die Höhe der Struktur nur wenig geringer ist, wurden die Strukturabstände halbiert, wodurch die reale Oberfläche vergrößert wurde.

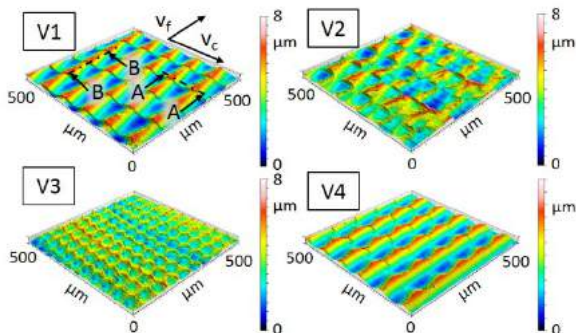


Abb. 5: Übersicht der gefrästen Oberflächen (V1-V4) in Falschfarbendarstellung mit Profilschnitten in V1 (vgl. Abb. 6)

Anhand von Profilschnitten durch die Oberflächenfeingestalt von V1 (vgl. Abb. 5) wird die unterschiedliche Formausprägung in Schnitt- und Vorschubrichtung sichtbar. Während in Schnitttrichtung (Abb. 6, oben) eine nahezu sinusförmige Kurve erkennbar ist, weist das Profil

in Vorschubrichtung (unten) jenes der kinematischen Rauheit (ca. $1,5\ \mu\text{m}$) in Form der Schneidenecke auf. Die eingestellte Amplitude ($A_p \approx 2\ \mu\text{m}$) ist im Profilschnitt in Schnitttrichtung erkennbar. Die geringe Abweichung der theoretisch ausgelegten zur gemessenen Wellenlänge ($100\ \mu\text{m}$ zu $95\ \mu\text{m}$) ist auf gerundete Werte ($v_c = 120\ \text{m/min}$) zurückzuführen; darüber hinaus bestehen leichte Schwankungen innerhalb der US-Frequenz sowie der Spindeldrehzahl während des Bearbeitungsprozesses.

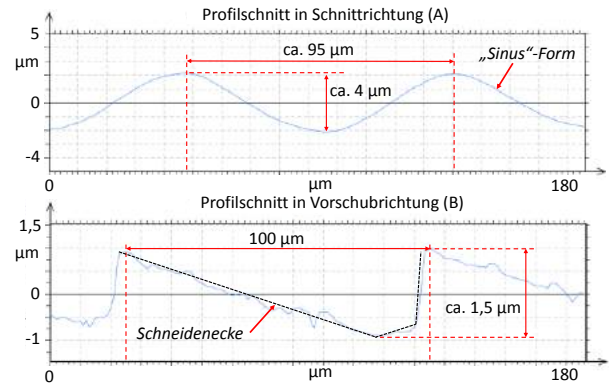


Abb. 6: Profilschnitte in Schnitttrichtung (oben) und Vorschubrichtung (unten) von Versuch V1 (siehe Abb. 5)

Vergleich ausgewählter Oberflächen

Zum direkten Vergleich von Referenzversuch V1 mit einer simulierten Oberfläche wurde Simulation a) aufgrund der höchsten visuellen Übereinstimmung ausgewählt. Diese qualitative Einschätzung wird durch die Betrachtung der oberflächenbeschreibenden Parameter in Tab. 3 deutlich: insbesondere die Kenngrößen S_z , S_a , S_{dr} sowie S_{tr} weisen eine hohe Konformität auf. Die Parameter der Materialanteilkurve zeigen dagegen leichte Abweichungen, was auch in Abbildung 7 visualisiert wird.

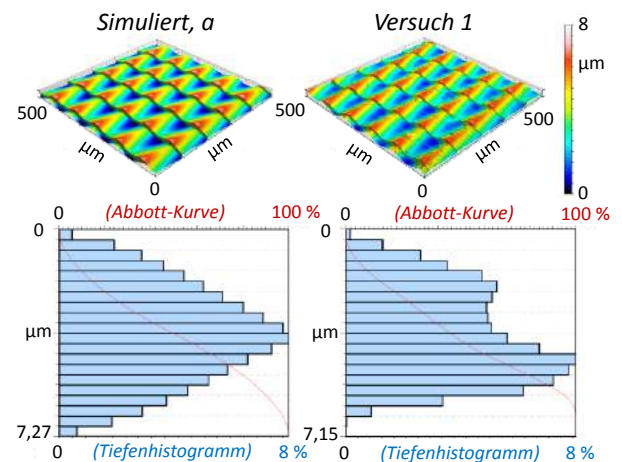


Abb. 7: Gegenüberstellung der grafischen Darstellungen in Falschfarben sowie der Tiefenhistogramme und der Materialanteilkurven der simulierten (a) und gefrästen (V1) Oberfläche mit hoher visueller Übereinstimmung

Dies ist mit einem sehr geringen, jedoch existenten Werkzeugverschleiß, insbesondere an der Schneidenecke und dem relevanten, da im Eingriff befindlichen Teil der

Schneidkante der Nebenschneide, zu erklären. Die hierbei auftretende Vergrößerung der Verrundung führt zu einem ungleichmäßigen Schneidkantenversatz, welcher zur Schneidenecke hin größer wird. Dies resultiert in einer Geometrieänderung der Feingestalt, woraus Abweichungen der simulierten und realen Feingestalten im Submikrometerbereich entstehen.

4.2 Werkzeugverschleißanalyse

Stellvertretend für alle Neuwerkzeuge steht die Darstellung der „arbeitscharfen“ Schneide in Abbildung 8 (links oben). Es ist ersichtlich, dass die Werkzeuge der durchgeführten Versuche mit „günstigen“ Eingriffsbedingungen (V1 und V2) kaum verschlissene Schneidkanten und Schneidenecken aufweisen. Lediglich eine sehr geringe Verrundung konnte festgestellt werden, was u. a. auf eine sukzessive Abnutzung der Beschichtung zurückzuführen ist.

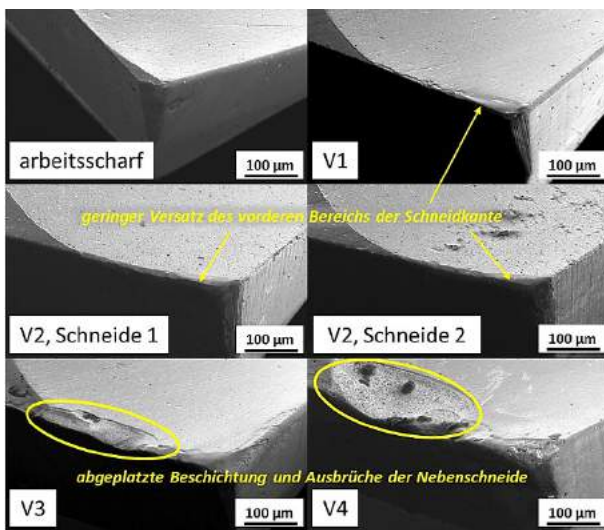


Abb. 8: Übersicht der Verschleißzustände der eingesetzten Werkzeugschneiden

Der Verschleiß der Werkzeuge von V3 und V4 ist hingegen deutlich ausgeprägt. So sind insbesondere an der Nebenschneide sowie der Spanfläche größere Kantenstücke (bis zu 300 µm, vgl. Abb. 8, rechts unten) ausgebrochen und die Beschichtung in diesem Bereich großflächig abgeplatzt. Dies ist auf die ungünstigen Eingriffsverhältnisse während des Zerspanungsprozesses zurückzuführen, wo ein Kontakt zwischen der Freifläche der Nebenschneide und der Werkstückoberfläche bzw. den erzeugten Mikrostrukturen zustande kam und dadurch hohe mechanische Spannungen an der Schneidkante wirkten. Dies führte letztlich zum lokalen Versagen der Beschichtung sowie des Schneidstoffs.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Das Ziel der Untersuchungen besteht in der Erzeugung von definierten Mikrostrukturen auf Versuchsproben aus dem Werkzeugstahl 1.2379 mittels ultraschall-schwingungsüberlagertem Fräsen sowie der simulativen Abbildung der entstehenden Oberflächenfeingestalt. Dazu wurde hinsichtlich der experimentellen Untersuchungen ein entsprechendes System im verwendeten Bearbeitungszentrum implementiert, durch welches die

werkstückseitige Schwingungsanregung realisiert werden konnte. Des Weiteren erfolgte die Entwicklung eines MATLAB-basierten Simulationstools, das auf Grundlage der Prozessparameter mittels boolescher Verschneidung eine virtuelle Oberfläche ausgibt. Es konnte gezeigt werden, dass sowohl die spanende Mikrostrukturierung technologisch reproduzierbar möglich ist als auch ein hohes Maß der Übereinstimmung mit dem Simulationsmodell, bzw. den unterschiedlichen Modellen, besteht. Dies ermöglicht die Vorhersage und Modellierung von Oberflächen mit definierten Feingestalten, wodurch eine signifikante Einsparung des experimentellen Versuchsaufwands erzielt werden kann. Außerdem wurde deutlich, dass die Eingriffsverhältnisse des Werkzeugs einen entscheidenden Einfluss auf die Verschleißentwicklung und damit ebenfalls auf die Reproduzierbarkeit der Mikrostrukturen besitzen. Es ist daher von großer Notwendigkeit, die Schneidengeometrie und die Prozessparameter aufeinander abzustimmen.

Ausblickend auf fortführende Forschungen mit direktem Themenbezug sind zu nennen:

- die Verschiebung technologischer Grenzen hinsichtlich des Aspektverhältnisses sowie der Form der Mikrostrukturen, beispielsweise durch werkzeug- und / oder prozesseitige Anpassungen,
- die Erweiterung und Verbesserung des Simulationsmodells, beispielsweise durch die Implementierung einer Option zur Definition der Werkzeugposition sowie der Einbindung von gemessenen, realen Schneidkanten als Werkzeugmodell,
- die Verifizierung des Beitrags der Oberflächenfeingestalt zur Schichthftung von CVD-Diamantschichten.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung des Vorhabens „Schmierstofffreies Tiefziehen von Aluminiumblechen für den Karosseriebau“ im Rahmen des Schwerpunktprogrammes 1676.

Literatur

- [1] D. E. Brehl, T. A. Dow: Review of vibration-assisted machining. *Precision Engineering* 32 (2008) 153-172
- [2] P. Guo, K. F. Ehmann: An analysis of the surface generation mechanics of the elliptical vibration texturing process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 64 (2013) 85-95
- [3] H. Suzuki, M. B. Marshall, N. D. Sims, R. S. Dwyer-Joyce: Design and implementation of a non-resonant vibration-assisted machining device to create bespoke surface textures. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* (2016) 1-16
- [4] Z. Zhu, S. To, K. F. Ehmann, G. Xiao, W. Zhu: A novel diamond micro-/nano-machining process for the generation of hierarchical micro-/nano-structures. *Journal of Micromechanics and Microengineering* 26 (2016) 1-12
- [5] R. Zhang, P. Steinert, A. Schubert: Microstructuring of Surfaces by Two-stage Vibration-assisted Turning. *Procedia CIRP* 14 (2014) 136-141
- [6] A. Nestler, A. Schubert: Surface Properties in Ultrasonic Vibration Assisted Turning of Particle Reinforced Aluminium Matrix Composites. *Procedia CIRP* 13 (2014) 125-130
- [7] B. Denkena, J. Kästner, B. Wang: Advanced microstructures and its production through cutting and grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 59 (2019) 67-72

- [8] B. Denkena, T. Grove, A. Seibel: Direct Part Marking by Vibration Assisted Face Milling. *Procedia Technology* 26 (2016) 185-191
- [9] B. Lauwers, F. Klocke, A. Klink, A. E. Tekkaya, R. Neugebauer, D. McIntosh: Hybrid processes in manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 63 (2014) 561-583
- [10] J. H. Ko, K. C. Shaw, H. K. Chua, R. M. Lin: Cusp error reduction under high speed micro/meso-scale milling with ultrasonic vibration assistance. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing* 12 (2011) 15-20
- [11] X.-H. Shen, J. Zhang, D. X. Xing, Y. Zhao: A study of surface roughness variation in ultrasonic vibration-assisted milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 58 (2011) 553-561
- [12] X.-H. Shen, G.-C. Tao: Tribological behaviors of two micro textured surfaces generated by vibrating milling under boundary lubricated sliding. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 79 (2015) 1995-2002
- [13] R. Ibrahim: Vibration assisted machining: Modelling, simulation, optimization, control and applications. Dissertation, Brunel University School of Engineering and Design (2010)
- [14] H. Ding, R. Ibrahim, K. Cheng, S.-J. Chen: Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel using two dimensional vibration-assisted micro-end-milling. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50 (2010) 1115-1118
- [15] H. Ding, S.-J. Chen, K. Cheng: Dynamic surface generation modeling of two-dimensional vibration-assisted micro-end-milling. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 53 (2010) 1075-1079
- [16] X. Jin, B. Xie: Experimental study on surface generation in vibration-assisted micro-milling of glass. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81 (2015) 507-512
- [17] A. Maurotto, C. T. Wickramarachchi: Experimental investigations on effects of frequency in ultrasonically-assisted end-milling of AISI 316L: A feasibility study. *Ultrasonics* 65 (2016) 113-120
- [18] M. Kuruc, M. Zvončan, J. Peterka: Investigation of Ultrasonic Assisted Milling of Aluminum Alloy AlMg4.5Mn. *Procedia Engineering* 69 (2014) 1048-1053
- [19] H. Wang, S. To, C. Y. Chan, C. F. Cheung, W. B. Lee: A theoretical and experimental investigation of the tool-tip vibration and its influence upon surface generation in single-point diamond turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 50 (2010) 241-252