

Mikrozerspanuntersuchungen zur Korrelation von Zerspanbarkeitskennwerten mit Werkstoffkennwerten

A. Beinhauer, C. Heinzl, O. Riemer

LFM Labor für Mikrozerspanung, Universität Bremen, Badgasteiner Straße 2, 28359
Bremen, Deutschland

1 Abstract

Schlagworte: Mikrozerspanung, Mikrodrehen, Werkstoffeigenschaften

Die Charakterisierung der mechanischen Eigenschaften metallischer Werkstoffe mit heute üblichen Verfahren ist ein zeit- und kostenintensiver Vorgang. Mechanische Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Härte oder der Elastizitätsmodul werden durch Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlungszustand beeinflusst und wirken sich auch auf technologische Kenngrößen wie die Zerspanbarkeit aus. Gegenstand dieser Untersuchung ist die Verknüpfung mechanischer Werkstoffeigenschaften mit Kennwerten der Zerspanbarkeit, die durch Mikrozerspanung erhoben werden. Dadurch soll eine Möglichkeit geschaffen werden, den Zeitaufwand für die Charakterisierung von Werkstoffen mithilfe von einfach zu erhebenden Prozessgrößen wie der Zerspankraft zu verringern. In dieser Arbeit werden sphärische Mikroproben aus zwei unterschiedlichen Chromstahllegierungen (100Cr6, X46Cr13) durch Mikrodrehen bearbeitet. Durch die Montage der Proben auf einer Trägerplatte findet die Zerspanung im unterbrochenen Schnitt statt. Die Ergebnisse der Zerspankraftmessungen werden mit Experimenten im kontinuierlichen Schnitt verglichen, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse zu erörtern.

2 Einleitung

Die Entwicklung neuer Konstruktionswerkstoffe ist aufgrund der erforderlichen Verfahrensschritte (Legierungserzeugung, Wärmebehandlung, Analyse der Eigenschaften) und der notwendigen Probenanzahl ein zeit- und kostenintensiver iterativer Vorgang. Die Verfahrensschritte Legierungserzeugung und Wärmebehandlung können im Labormaßstab durch das kürzlich von Springer et al. vorgestellte Rapid Alloy Prototyping (RAP-Verfahren) beschleunigt werden. Hierbei wird die angesetzte Schmelze auf mehrere Gussformen verteilt, wobei nach jedem Abguss die Zusammensetzung der Schmelze durch Hinzufügen eines Legierungselements verändert wird. Aus den Gussteilen werden nach dem Walzen jeweils mehrere Zugproben entnommen, die unterschiedlichen Wärmebehandlungen unterzogen werden, wodurch insgesamt 45 Kombinationen aus

Legierungszusammensetzung und Wärmebehandlungszustand entstehen [1]. Zur Charakterisierung der erzeugten Proben sind jedoch nach wie vor konventionelle Prüfverfahren wie der Zugversuch erforderlich, die in ihrer Verfahrensgeschwindigkeit begrenzt und darüber hinaus ressourcenaufwändig sind. Um insbesondere die Bestimmung von mechanischen Werkstoffeigenschaften neuartiger, bisher unbekannter metallischer Legierungen zu beschleunigen, sind hochdurchsatzfähige Probenerzeugungs- und Prüfmethoden erforderlich. Derartige Verfahren werden beispielsweise in der Chemie und der Medizintechnik, aber auch bei der Entwicklung von Funktionswerkstoffen angewendet und basieren auf der Durchführung einer großen Zahl von Experimenten in kurzer Zeit, in denen einfach und schnell zu erhebende Ersatzgrößen betrachtet werden, die Rückschlüsse auf die zu bestimmenden Eigenschaften zulassen [2].

Bei der Entwicklung neuer Konstruktionswerkstoffe kann die Zerspanung derartige Ersatzgrößen bereitstellen. So beeinflussen die Legierungszusammensetzung und der Wärmebehandlungszustand eines Materials sowohl die wesentlichen mechanischen Eigenschaften wie Zugfestigkeit, Härte und Elastizitätsmodul als auch technologische Eigenschaften wie die Zerspanbarkeit. Die im Zerspanprozess erfassbaren Messdaten wie Zerspankraft, Körperschallemissionen, Spanform und -art sowie die Oberflächenrauheit liefern die Kenngrößen der Zerspanbarkeit, welche direkt oder indirekt mit den Eigenschaften des zugrundeliegenden Werkstoffes verknüpft sind [3]. In dieser Arbeit wird untersucht, wie die Kenngrößen der Zerspanbarkeit in hohem Durchsatz erhoben und genutzt werden können, um Rückschlüsse auf die gesuchten Werkstoffeigenschaften zu ziehen.

3 Mikrozerspanuntersuchungen

3.1 Probengeometrie und Versuchsaufbau

Um Zerspanbarkeitskennwerte in hohem Durchsatz an Proben aus unterschiedlichen Legierungen und/oder Wärmebehandlungszuständen zu ermitteln, bietet sich die Verwendung von sphärischen Mikroproben mit Abmessungen ≤ 1 mm an, die auf einer Trägerplatte montiert werden. In Abhängigkeit der Trägergröße können so zwischen 10 und 100 unterschiedliche Proben in einem Durchgang durch Plandrehen bearbeitet werden. Diese Arbeit betrachtet die Zerspankräfte in Mikrodrehprozessen. Diese sind gekennzeichnet durch Spannungsdicken im Bereich weniger Mikrometer sowie durch einen Schneidkantenradius, der in der Größenordnung der Spannungsdicke liegt.

Bei der Mikrozerspanung sind Größeneffekte zu berücksichtigen, die beispielsweise Einfluss auf die Prozesskräfte haben [4, 5]. Da aufgrund der Geometrie und Anordnung der Mikroproben ein unterbrochener Schnitt vorliegt, ist zusätzlich der Einfluss des Impulsübertrags auf die Ergebnisse der Kraftmessung zu beachten. Aus diesem Grund werden vergleichende Untersuchungen an makroskopischen Proben im kontinuierlichen orthogonalen Schnitt durchgeführt, um die bei der Zerspanung der Mikroproben erhobenen Daten entsprechend interpretieren zu können. Als Probenwerkstoffe wurden der gehärtete Wälzlagerstahl 1.3505 (100Cr6, Härte ca. 62 HRC) sowie der Vergütungsstahl 1.4034 (X46Cr13, Härte ca. 55 HRC) ausgewählt, da diese in Form sphärischer Mikroklugeln kommerziell verfügbar sind. Die

Versuchsanordnung für beide Probenvarianten ist Bild 1 zu entnehmen. Die Versuche wurden an einer Präzisionsdrehmaschine Benzinger GOFuture B2 durchgeführt. Für alle Versuche wurde ein Hartmetall-Einsteckwerkzeug mit einem Schneidkantenradius von $6\ \mu\text{m} \pm 2\ \mu\text{m}$ und einem Spanwinkel von 0° verwendet.

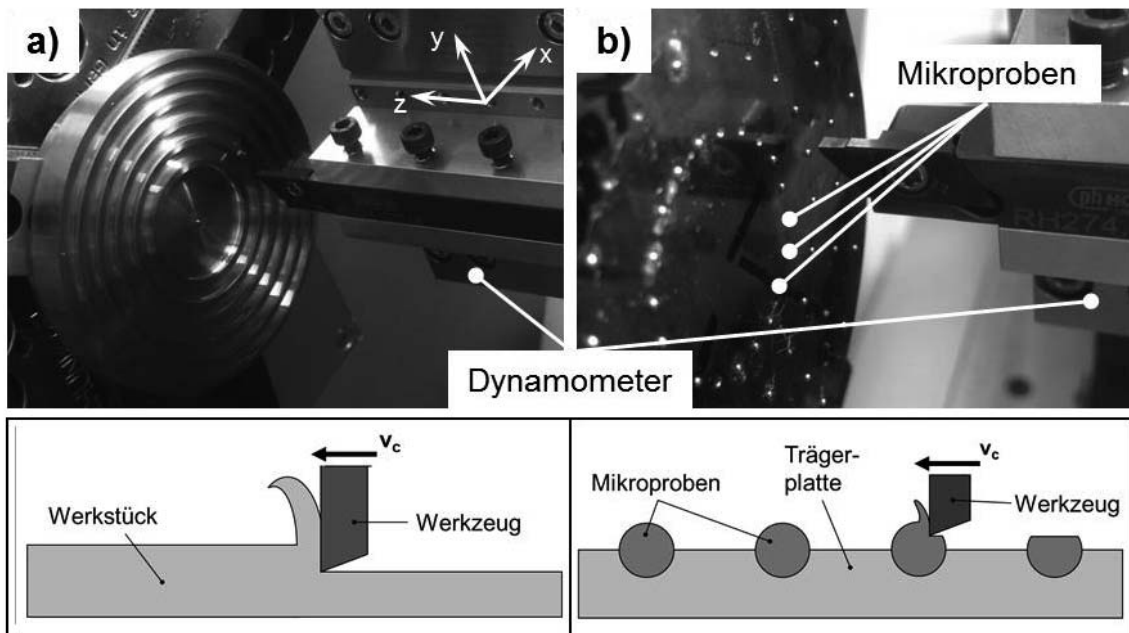


Bild 1: Versuchsaufbau mit Werkstück für kontinuierlichen orthogonalen Schnitt (a), Mikroproben auf Probenträger für diskontinuierlichen Schnitt (b)

Vor Beginn der Versuche wurden die Nachgiebigkeitsfrequenzgänge des Aufbaus in allen drei Raumrichtungen unter Anregung in Richtung der Schnitt- und Passivkraft ermittelt. Diese sind in Bild 2 dargestellt.

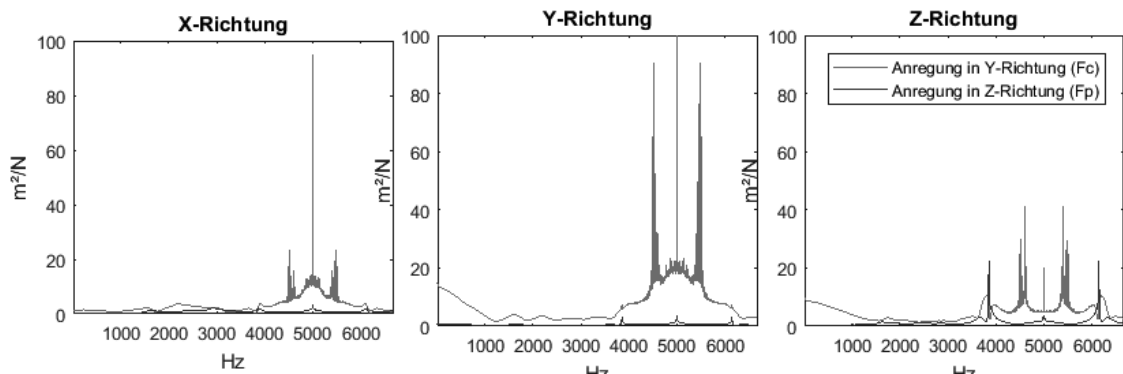


Bild 2 Nachgiebigkeitsfrequenzgänge des Aufbaus in drei Raumrichtungen

3.2 Versuchsdurchführung

Die Bearbeitung der Proben erfolgt durch Axial-Einsteckdrehen. Um eine hinreichend hohe Auflösung der Datenpunkte der Kraftmessung für die Mikroproben zu gewährleisten, wurden alle Zerspanexperimente mit einer relativ geringen Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 20\ \text{mm/min}$ ohne die Verwendung von Kühlschmierstoff durchgeführt. Bei den Experimenten an den makroskopischen Proben wurde jeweils der axiale Vorschub je Umdrehung f_a variiert, welcher der Spannungsdicke entspricht. Die maximale Schnitttiefe $a_{p,\text{max}}$ betrug für alle Makroproben

250 μm , um Einflüsse von Unregelmäßigkeiten aus der Vorbearbeitung bei Versuchen mit geringer Spannungsdicke auszuschließen. Für die Mikroproben erfolgte die Bearbeitung von jeweils 8 Kugeln beider Werkstoffe in einer Aufspannung, ebenfalls unter Variation des axialen Vorschubs. Die Aufzeichnung der Kräfte (Abtastrate: 20 kHz, tiefpassgefiltert bei 6 kHz) erfolgte für je 10 Werkstückumdrehungen. Eine Übersicht der Experimente ist in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Versuchsübersicht

Probe	Schnittgeschw. v_c [mm / min]	Axialer Vorschub f_a [μm]	Max. Schnitttiefe $a_{p,max}$ [μm]
100Cr6 (Makroprobe)	20	5	250 μm
	20	25	250 μm
X46Cr13 (Makroprobe)	20	5	250 μm
	20	25	250 μm
Mikroproben- träger	20	5	50 μm
	20	25	250 μm

4 Ergebnisse

4.1 Mikrozerspanung von Makroproben

Die Verläufe von Schnitt- und Passivkraft sind in Bild 3 für die Versuche an Makroproben aus 100Cr6 und in Bild 4 für die Versuche an Makroproben aus X46Cr13 abgebildet. Für alle Makroproben zeigt sich ein ähnliches mittleres Schnittkraftniveau in Abhängigkeit des axialen Vorschubs, dieses liegt bei $f_a = 5 \mu\text{m}$ bei ca. 70N und bei $f_a = 25 \mu\text{m}$ bei etwa 200 N. Die Passivkraft liegt bei $f_a = 25 \mu\text{m}$ um ca. 75 N bzw. 37% niedriger als die Schnittkraft, während die Differenz bei $f_a = 5 \mu\text{m}$ nur etwa 20 N bzw. 28% beträgt. Bei beiden Werkstoffen zeigen sich bei $f_a = 5 \mu\text{m}$ Schwankungen im Kraftverlauf, diese sind insbesondere bei der X46Cr13-Probe mit ± 30 N besonders stark ausgeprägt. Dieses ist einerseits auf bekannte Größeneffekte in der Mikrozerspanung zurückzuführen, da der Schneidkantenradius für $f_a = 5 \mu\text{m}$ in etwa der Spannungsdicke entspricht und somit angenommen werden kann, dass durch eine Unterschreitung der Mindestspannungsdicke ungünstige Zerspanbedingungen herrschen. Ein Einfluss aus der Vorbearbeitung kann aufgrund des kontinuierlichen Verlaufs der Schwankungen über die gesamte Bearbeitungsdauer ausgeschlossen werden. Andererseits wird aus der Analyse der Nachgiebigkeitsfrequenzgänge deutlich, dass der Aufbau des Werkzeughalters auch bei Anregung deutlich unterhalb der prägnanten Eigenfrequenzen zu Schwingungen neigt. Bei beiden Werkstoffen ist für den höheren axialen Vorschub weiterhin ein Überschwingverhalten der Kräfte während der ersten Werkstückumdrehung erkennbar. Die Kräfte steigen annähernd linear auf einen Maximalwert an und fallen dann auf einen nahezu konstanten Wert ab. Der Kraftabfall beträgt für den Werkstoff 100Cr6 etwa 150 N und für den Werkstoff X46Cr13 etwa 100 N. Auch die Abklingzeit unterscheidet sich für beide Werkstoffe, sie beträgt bei 100Cr6 ca. 0,5 s und bei X46Cr13 ca. 1,5 s.

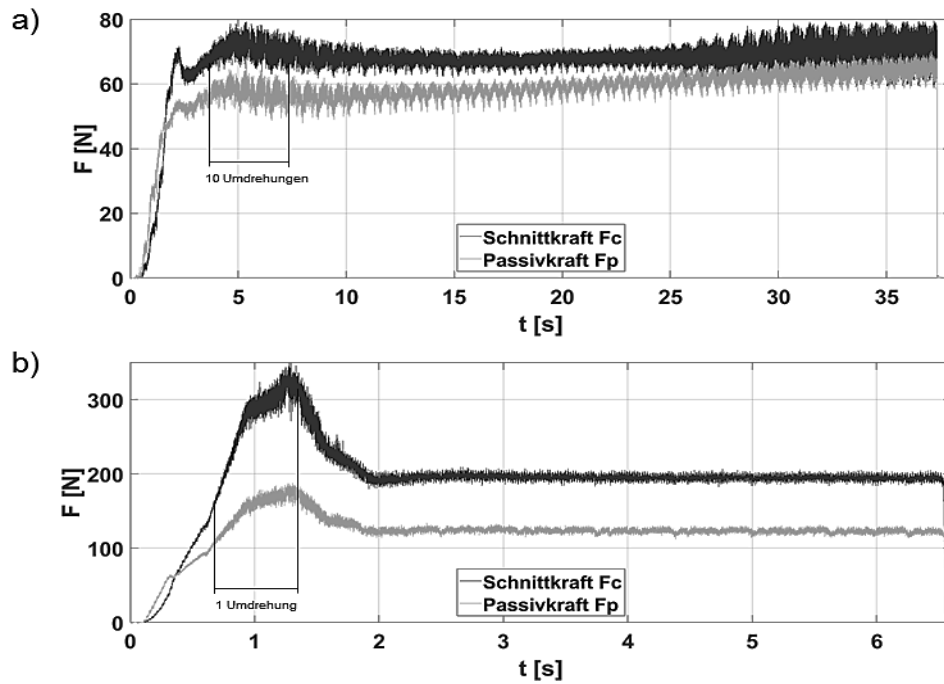


Bild 3: Verlauf der Schnitt- und Passivkräfte im kontinuierlichen Schnitt an Makroproben aus 100Cr6 bei $f_a = 5 \mu\text{m}$ (a) und $f_a = 25 \mu\text{m}$ (b)

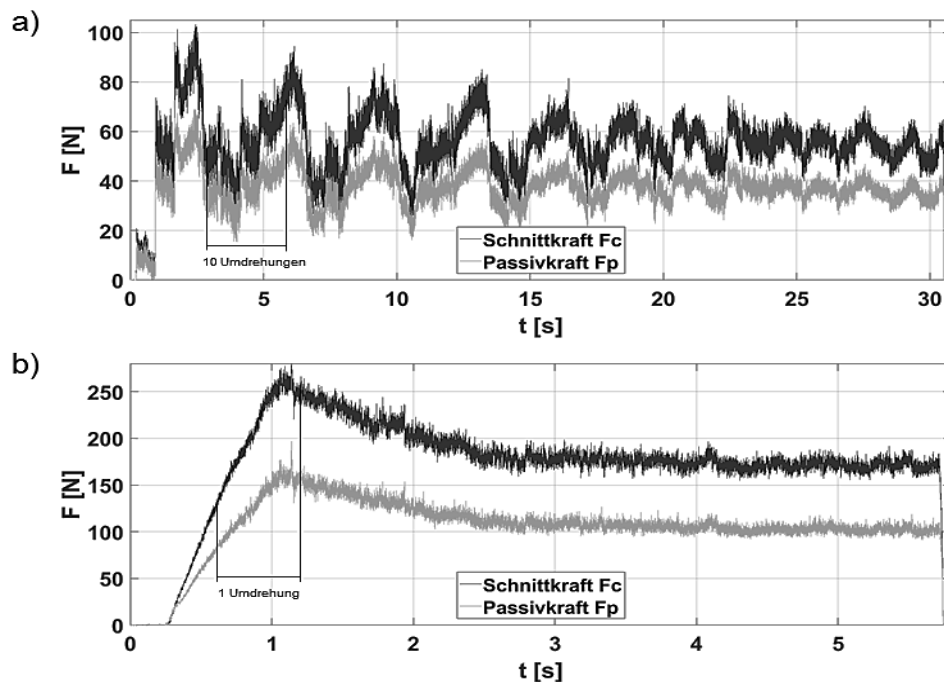


Bild 4: Verlauf der Schnitt- und Passivkräfte im kontinuierlichen Schnitt an Makroproben aus X46Cr13 bei $f_a = 5 \mu\text{m}$ (a) und $f_a = 25 \mu\text{m}$ (b)

4.2 Mikrozerspannung von Mikroproben

Die Kraftverläufe der Versuche an Mikroproben zeigen starke Unterschiede zu den Verläufen bei Makroproben. Die Kraftmessungen in Bild 5 und Bild 6 zeigen jeweils den Ausschnitt einer einzelnen Werkstückumdrehung bei gleicher Zustelltiefe $a_p = 25 \mu\text{m}$, in dem jeweils acht Proben bearbeitet wurden. Es ist zunächst erkennbar,

dass je Probe nur ein kurzer Kraftimpuls mit kurzem Abklingverhalten aufgezeichnet wurde, wobei die Ausschläge der Passivkraft für beide Werkstoffe und Vorschübe deutlich größer sind als die Ausschläge der Schnittkraft. Weiterhin zeigt sich, dass die Kraftausschläge bei gleichem Werkstoff und gleicher Zustellung über alle Proben stark variieren. Im Gegensatz zu den Versuchen im kontinuierlichen Schnitt sind die Kräfte bei höherem Axialvorschub insgesamt deutlich geringer als bei Niedrigem. Aufgrund der geringen Schnittfrequenz ($30 < f < 40$) kann eine Verfälschung der Kraftausschläge durch Anregung im Bereich der Eigenfrequenz des Aufbaus ausgeschlossen werden.

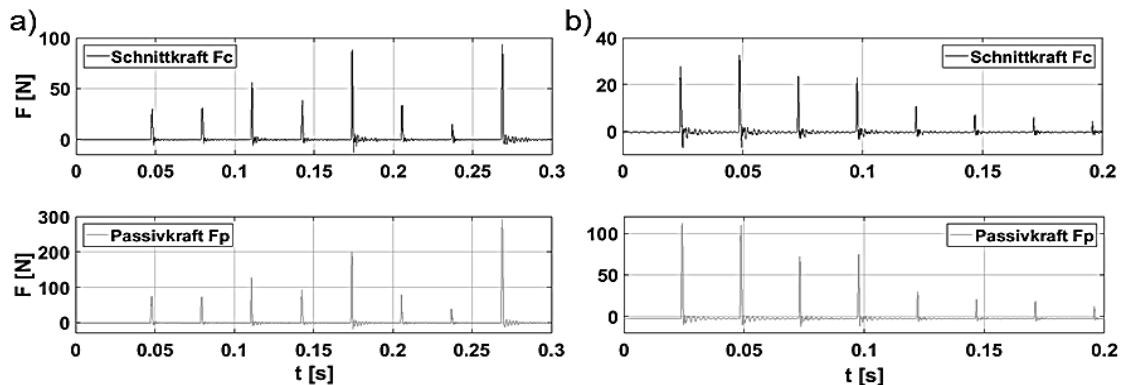


Bild 5: Verlauf der Schnitt- und Passivkräfte im unterbrochenen Schnitt an Mikroproben aus 100Cr6 bei $f_a = 5 \mu\text{m}$ (a) und $f_a = 25 \mu\text{m}$ (b)

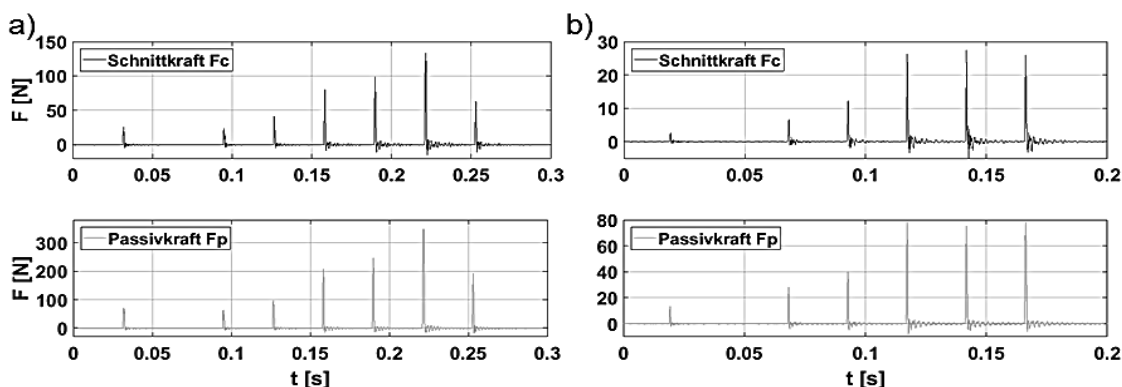


Bild 6: Verlauf der Schnitt- und Passivkräfte im unterbrochenen Schnitt an Mikroproben aus X46Cr13 bei $f_a = 5 \mu\text{m}$ (a) und $f_a = 25 \mu\text{m}$ (b)

5 Fazit und Ausblick

Aus den Kraftmessungen beider Probengeometrien wird erkennbar, dass der verwendete Werkstoff unter sonst gleichen Bedingungen einen Einfluss auf die Charakteristik des Kraftverlaufs hat. Bei den Makroproben äußert sich dies insbesondere im Überschwingverhalten der Kräfte während der ersten Werkstückumdrehung, während die durchschnittliche Kraft nach dem Abklingen des Einlaufverhaltens für beide Werkstoffe trotz unterschiedlicher Härte in etwa gleich ist. Das unterschiedliche Einlaufverhalten kann auf Unterschiede in der Zähigkeit zurückgeführt werden, die bei X46Cr13 im vorliegenden Zustand deutlich höher ist als bei 100Cr6. Eine Quantifizierung der Unterschiede ist ohne tiefere Betrachtung

des jeweiligen Werkstoffs noch nicht möglich und daher Gegenstand weiterer Untersuchungen. Auch die Kraftmessungen an sphärischen Mikroproben zeigen Unterschiede im Kraftverlauf, die auf die Werkstoffeigenschaften zurückzuführen sind. Eine Übertragung der Ergebnisse auf Makroproben ist einerseits aufgrund der impulsartigen Kraftverläufe und andererseits aufgrund der starken Schwankungen des maximalen Kraftausschlags innerhalb der einzelnen Experimente nicht ohne weiteres möglich. Es zeigen sich für den geringeren axialen Vorschub $f_a = 5 \mu\text{m}$ bei beiden Werkstoffen einige maximale Ausschläge der Schnittkraft, die in einem ähnlichen Wertebereich (ca. 80 N) der Schnittkraft im kontinuierlichen Schnitt liegen. Zusätzlich führt die Erhöhung des axialen Vorschubes im Gegensatz zur Entwicklung der Kräfte bei den Makroproben zu einer Verringerung der Kräfte. Dieser Beitrag zeigt auf, dass eine Interpretation von Zerspankraftmessungen an Mikroproben weitere, detaillierte Untersuchungen erfordert, wobei einerseits die Eigenschaften der verwendeten Werkstoffe im Detail betrachtet werden und andererseits der Schnittimpuls im diskontinuierlichen Schnitt im Vergleich zur Zerspankraft im kontinuierlichen Schnitt charakterisiert werden muss.

6 Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Finanzierung der Forschungsarbeiten im Rahmen des Teilprojektes S04 "Skalenübergreifende Zerspanbarkeitsanalyse" des Sonderforschungsbereiches 1232 "Farbige Zustände".

7 Literatur

- [1] Springer, H.; Raabe, D.:
Rapid alloy prototyping: Compositional and thermo-mechanical high throughput bulk combinatorial design of structural materials based on the example of 30Mn–1.2C–xAl triplex steels
Acta Materialia 60 (2012), 4950–4959
- [2] Mädler, L.:
Is high-throughput screening for structural materials metals possible?
4th International Conference on Nanomanufacturing (2014), Bremen
- [3] Paucksch, E.; Holsten, S.; Linß, M.; Tikal, F.:
Zerspantechnik
Wiesbaden, Vieweg & Teubner (2008), 86 – 87
- [4] Aramcharoen, A.; Mativenga, P. T.:
Size effect and tool geometry in micromilling of tool steel
Precision Engineering 33 (2009), 402 – 407
- [5] Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y.:
Recent Advances in Mechanical Micromachining
CIRP Annals Manufacturing Technology 55 (2006), 745 – 768