Bei diesem Beitrag handelt es sich um einen wissenschaftlich begutachteten und freigegebenen Fachaufsatz („reviewed paper“).

doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93

Einfluss von Chargenschwankungen auf die Zustands- und Ergebnisgrößen beim Schleifen

Werkzeugseitige Chargenschwankungen beim Schleifen

E. Reuter, S. Prinz, P. Breuer, T. Bergs

ZUSAMMENFASSUNG Da bisherige Modelle werkzeugseitige Chargenschwankungen nicht berücksichtigen, ist die Übertragbarkeit der Modelle in die Praxis nur eingeschränkt möglich. Auch deswegen werden immer noch 8–16 % der Fertigungszeit für die Prozessanpassung aufgewendet. Um die Auswirkung des Einsatzes chargenverschiedener Werkzeuge zu quantifizieren, wurden Schleifuntersuchungen durchgeführt und der Einfluss von Chargenschwankungen auf die Zustands- und Ergebnisgrößen ermittelt und erklärt.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Schleifen, Werkzeuge

Tool-side batch fluctuations during grinding – How batch fluctuations affect the state and result variables during grinding

ABSTRACT As previous models do not take into account tool-side batch fluctuations, transfering these models into practice is only possible to a limited extent. This is one of the reasons why process adaptation still takes up 8–16 % of production time. To quantify the effect of using tools of different batches, grinding tests were carried out to determine and explain the influence of batch fluctuations on the state and result variables.

1 Einleitung

Um die Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den Prozesseingangs-, Zustands- und Ergebnisgrößen zu bestimmen und zu erklären, wurden in bisherigen Forschungsarbeiten auf dem Gebiet der Schleiftechnik hauptsächlich empirische und numerische Modelle entwickelt. Die Arbeiten umfassen vor allem die Erklärung von Werkzeugverschleiß oder Werkstückqualität durch aufgetretene Prozesskräfte und in Abhängigkeit von Prozessparametern und Kennwerten für die verwendeten Werkzeuge [1]. Als Kennwerte dienen fast ausschließlich die aus den Normen DIN ISO 525 und DIN ISO 8486-1 stammenden Informationen zur Kornart und Korngröße des Schleifwerkzeugs sowie nicht direkt physikalisch quantifizierbare Angaben zur Bindung und dem Porengehalt [2, 3].

Aufgrund des verglichen mit anderen Fertigungstechnologien komplexen Aufbaus und Herstellungsprozesses, unterliegen Schleifwerkzeuge sogenannten Chargenschwankungen in der Produktion [4, 5]. Diese Chargenschwankungen resultieren beispielsweise aus der Verwendung verschiedener Kornverteilungen oder unterschiedlichen Temperaturverteilungen beim Brennen oder Härten. Meist werden Chargenschwankungen durch den Werkzeughersteller nur unzureichend erfasst und nicht an den Endanwender weitergegeben. Daraus resultieren in der schleiftechnischen Fertigung bei Verwendung spezifikationsgleicher aber chargenverschiedener Werkzeuge signifikante Änderungen im Verschleißverhalten und davon abgeleitet variable Standzeiten und Werkstückqualitäten.

Da Chargenschwankungen von den eingesetzten Werkzeugen in den bisherigen empirischen oder numerischen Modellen nicht berücksichtigt werden, ist eine Übertragbarkeit der Modelle in die Praxis nur eingeschränkt möglich. Bei Schleifprozessen mit wechselnden, spezifikationsgleichen Werkzeugen treten infolgedessen oft Abweichungen zwischen gemessenen und modellierten Ergebnissen auf. Daraus resultiert für die industrielle Praxis eine verringerte Prozesseffizienz, die durch kosten- und zeitintensive Prozessneuauslegungen gekennzeichnet ist. Auch daher werden bis heute immer noch 8–16 % der Gesamtfertigungszeit in der Industrie für die Prozesseinrichtung und die Prozessanpassung aufgewendet [6].

Die Quantifizierung werkzeugseitiger Chargenschwankungen bietet zukünftig das Potenzial, diese erweiternd zu bestehenden Schleifprozessmodellen zu berücksichtigen. Dies ermöglicht eine Erklärung der Änderungen in den Prozesszustands- und Ergebnisgrößen in Abhängigkeit von Chargenschwankungen und erweitert die Übertragbarkeit vor allem von empirischen Modellen.

Die Untersuchung spezifikationsgleicher, aber chargenverschiedener Schleifwerkzeuge ist derzeit unerforscht. Demzufolge existieren keine Literaturquellen, die eine anwendbare Methodik zum Vergleich der Werkzeuge aufzeigen und darauf aufbauend die Auswirkung der chargenverschiedenen Schleifwerkzeuge auf die Prozesszustands- und Prozessergebnisgrößen identifizieren. Davon abgeleitet wurde, ausgehend vom Stand der Technik, zunächst geprüft, durch welche messbaren Kennwerte eine Charakterisierung von Schleifwerkzeugen möglich ist. Anschließend wurde durch praktische Versuchsreihen beschrieben und erklärt, wie Differenzen in den charakteristischen Schleifwerkzeugkenn-

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

werten eine Änderung in den Prozesszustands- und Prozessergebnisgrößen hervorrufen.

Die Charakterisierung werkzeugseitiger Chargenschwankungen erfordert sowohl eine Analyse des Schleifscheibenwerkstoffs als auch der Topografie der Schleifscheibe. Werkstoffseitig wird an die Werkzeughersteller die Forderung gestellt, sowohl die Art des Schleifmittels als auch die Korngröße, den Härtegrad und die Bindungsart anzugeben. Dabei wird für die Angabe der Korngröße von konventionellen Schleifmitteln eine Korngrößenverteilung auf Basis mehrerer Siebdurchgänge mit unterschiedlichen Maschenweiten bestimmt [3]. Die Härte der Schleifscheibe beeinflusst das Schleifverhalten entscheidend und wird im Allgemeinen als Maß für die Kraft zum Herauslösen des Schleifmittels aus dem Kornverband angesehen [7]. Ergänzend zum Volumenverhältnis der Schleifkörperkomponenten ist sie von den Festigkeitseigenschaften der Bindung und den Bedingungen beim Brennen der Schleifkörper abhängig. Aufgrund der Signifikanz der Härte für das Einsatzverhalten der Schleifscheibe wurden in der Vergangenheit verschiedene Prüfverfahren wie das Sandstrahl-, Schlagbohr- und Drehmeißelverfahren und die Messung von Schwingungsfrequenzen (Resonance Frequency Damping Analysis, RFDA) entwickelt. Ziele der Messverfahren sind die Ableitung von Werkstoffkenngrößen, allen voran des Elastizitätsmoduls (E-Modul). Insbesondere die Messung des E-Moduls über RFDA-Messungen und die Korrelation des E-Moduls mit dem Schleifverhalten wurden in der Literatur vermehrt untersucht [8].

Frank ermittelte sowohl für kunstharz- als auch keramisch gebundene Korundschleifscheiben den E-Modul und stellte mit steigendem Bindungs- und Kornvolumenanteil einen Anstieg des E-Moduls fest. Bei gleichen Porenvolumina verschiedener Schleifscheiben wurden nur geringe Unterschiede beobachtet. Die Körnung der Schleifscheiben hatte vor allem bei größeren Kornverteilungen einen Einfluss auf den E-Modul der Schleifscheiben. [9]

König untersuchte die Aussagefähigkeit des E-Moduls im Hinblick auf die Vorhersage des Schleifverhaltens von keramisch gebundenen Schleifscheiben. Unter Variation des Kornwerkstoffes, der Körnung, Härte und des Gefüges überprüfte er sowohl die Korrelation des E-Moduls mit den Prozesszustands- als auch den Ergebnisgrößen. Seine Ergebnissen zeigen, dass der E-Modul als alleinige Bewertungsgrundlage zur Vorhersage der Schleifleistung, des Grenzzerspanungsvolumens oder der Rauheit nicht ausreichend ist. Unter Voraussetzung identischer Kornwerkstoffe und einem ähnlichen volumetrischen Aufbau der Schleifscheiben konnte er aber den Zusammenhang zwischen E-Modul und den Prozessgrößen Grenzzerspanungsvolumen und Grenzzeitspanungsvolumen nachweisen. [10]

Neben den werkstoffspezifischen Eigenschaften von Schleifscheiben beeinflusst die Topografie der Schleifscheibe das Einsatzverhalten beim Schleifen maßgeblich. Sie ist abhängig von der Kornart, der Korngröße und den Abrichtbedingungen. Für die Charakterisierung der Schleifscheibentopografie werden vielfach die in der DIN EN ISO 25178–2 definierten Kenngrößen zur Bewertung der Oberflächenbeschaffenheit verwendet. Unter dem Überbegriff Höhenparameter werden die mittlere quadratische Höhe *Sq*, die maximale Spitzenhöhe *Sp*, die maximale Höhe *Sz* und die mittlere arithmetische Höhe *Sa* zusammengefasst. Ergänzend zu den aufgezählten Kenngrößen können weitere zweidimensionale Oberflächenkenngrößen wie die Kernhöhe *Sk*, die reduzierte Spitzenhöhe *Spk* sowie die reduzierte Senkentiefe *Svk* aus der Materialanteilkurve (Abbott-Firestone-Kurve) berechnet werden. Zusätzlich ist eine Messung dreidimensionaler Volumenparameter wie Spitzenmaterialvolumen *Vmp*, Kernmaterialvolumen *Vmc* und Tälerleervolumen *Vvv* möglich. [11]

Abgeleitet von dem aufgeführten Stand der Technik ist die Charakterisierung von Schleifwerkzeugen durch Werkstoffkenngrößen verbreitet und deren Einfluss auf den Schleifprozess in verschiedenen Forschungsarbeiten untersucht worden. Dabei ist vor allem die Charakterisierung der Werkzeuge durch RFDA-Messungen und der Angabe des E-Moduls etabliert. Zudem existieren Topografiekennwerte, welche für die Charakterisierung der Schleifwerkzeuge und die Erklärung von Prozesszustands- und Prozessergebnisgrößen beim Schleifen genutzt werden können. Eine Quantifizierung werkzeugseitiger Chargenschwankungen erfolgte noch nicht. Außerdem ist unbekannt, inwieweit die durch Chargenschwankungen hervorgerufene Änderungen in den Prozesszustands- und Ergebnisgrößen durch quantifizierbare Werkstoff- und Topografiekennwerte erklärt werden können.

2 Versuchsmaterialien und Methode

Die Untersuchungen wurden mittels Flachschleifversuchen auf der Flach- und Profilschleifmaschine „Profimat MT 608“ von Blohm durchgeführt. Der entsprechende Versuchsaufbau wird in **Bild 1** dargestellt.

Für die Untersuchungen wurden ein Verschleißbauteil (Maße: 19 x 200 x 300 mm) sowie ein Messbauteil (Maße: 19 x 80 x 300 mm) aus 100Cr6 und einer Härte von 60 HRC genutzt. Das Messbauteil wurde vor den Untersuchungen mit einem Folienthermoelement „Typ J“ ausgestattet, sodass beim Überschleifen die Messung der Schleiftemperatur möglich war.

Die Aufspannung des Messbauteils erfolgte durch einen am Manufacturing Technology Institute – MTI der RWTH Aachen gefertigten Versuchsaufbau (1). Dieser umfasst eine Kraftmessplattform sowie die Möglichkeit, Werkstücke mit integrierten Thermoelementen zu bearbeiten. Die Aufspannung des Verschleißbauteils erfolgte direkt auf dem Magnetspanntisch der Werkzeugmaschine (3).

Werkzeugseitig wurden drei spezifikationsgleiche, keramisch gebundene Korundschleifscheiben (Spezifikation: 89A 802 J5A V217) eingesetzt mit einer Meshgröße von F80, einem Härtegrad von J und einem Porositätsgrad von 5, laut Hersteller. Unterschieden wurde in die Schleifscheibe SLS 1 einer ersten Charge, die Schleifscheibe SLS 2 einer zweiten Charge und SLS 3 einer dritten Charge. Vor den schleiftechnischen Untersuchungen wurden der Elastizitätsmodul E der Schleifscheiben mittels RFDA (RFDA Professional der Firma IMCE) gemessen und berechnet.

Als Kühlschmierstoff wurde die Emulsion „Aquatec 7520“ von Oelheld mit einer Konzentration von c_{kss} = 6 % Öl-Anteil verwendet. Für den Abrichtprozess der Schleifscheiben wurde eine DDS (Diamond Dressing System)-Formrolle der Spezifikation 305DS71P-150–1–2 von Saint-Gobain eingesetzt. Die Untersuchungen wurden als Standzeitversuche durchgeführt. Der Versuchsablauf ist in **Bild 2** abgebildet.

In den Untersuchungen wurden die drei chargenverschiedenen Schleifscheiben bis zu einem bezogenen Zerspanungsvolumen von V'_w = 2500 mm³/mm oder bis zum vorzeitigen Erreichen des Standzeitendes eingesetzt. Das Standzeitende der Schleifscheiben wurde durch die thermische Beschädigung der Werkstückoberfläche in Form von Verfärbungen und Rissbildung festgelegt. Durch den Einsatz von drei Schleifscheiben wurden drei Versuchsreihen

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

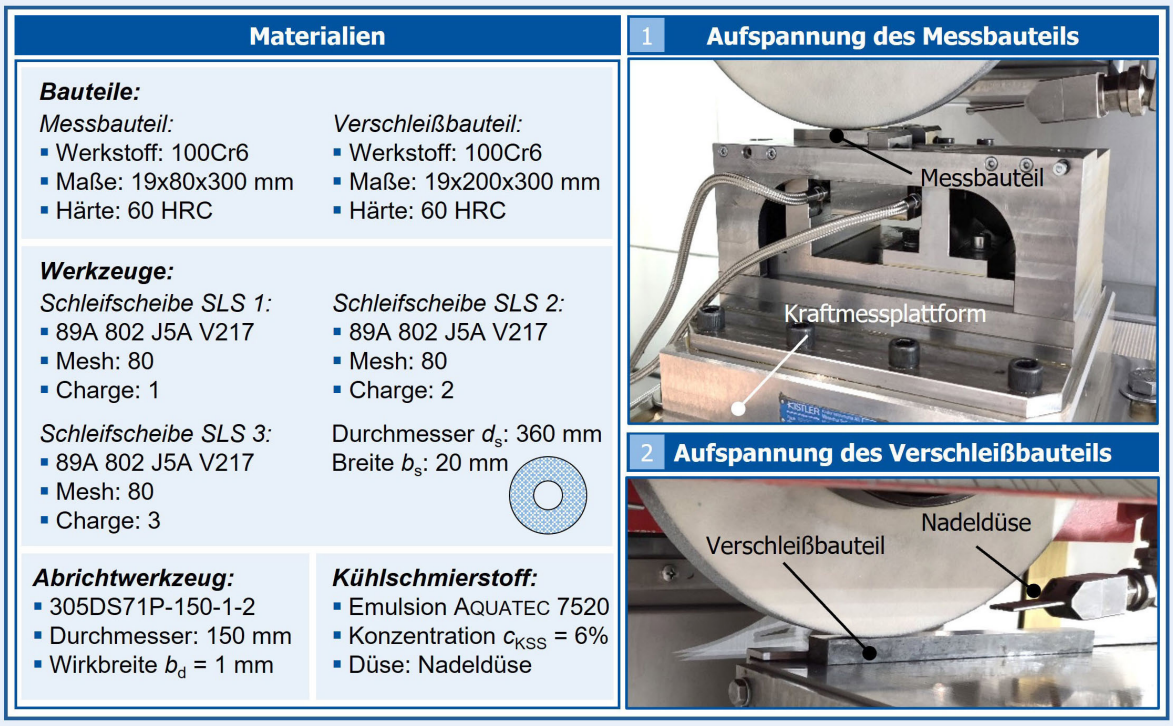

Bild 1. Versuchsmaterialien und Versuchsaufbau. *Grafik und Foto: MTI Aachen*

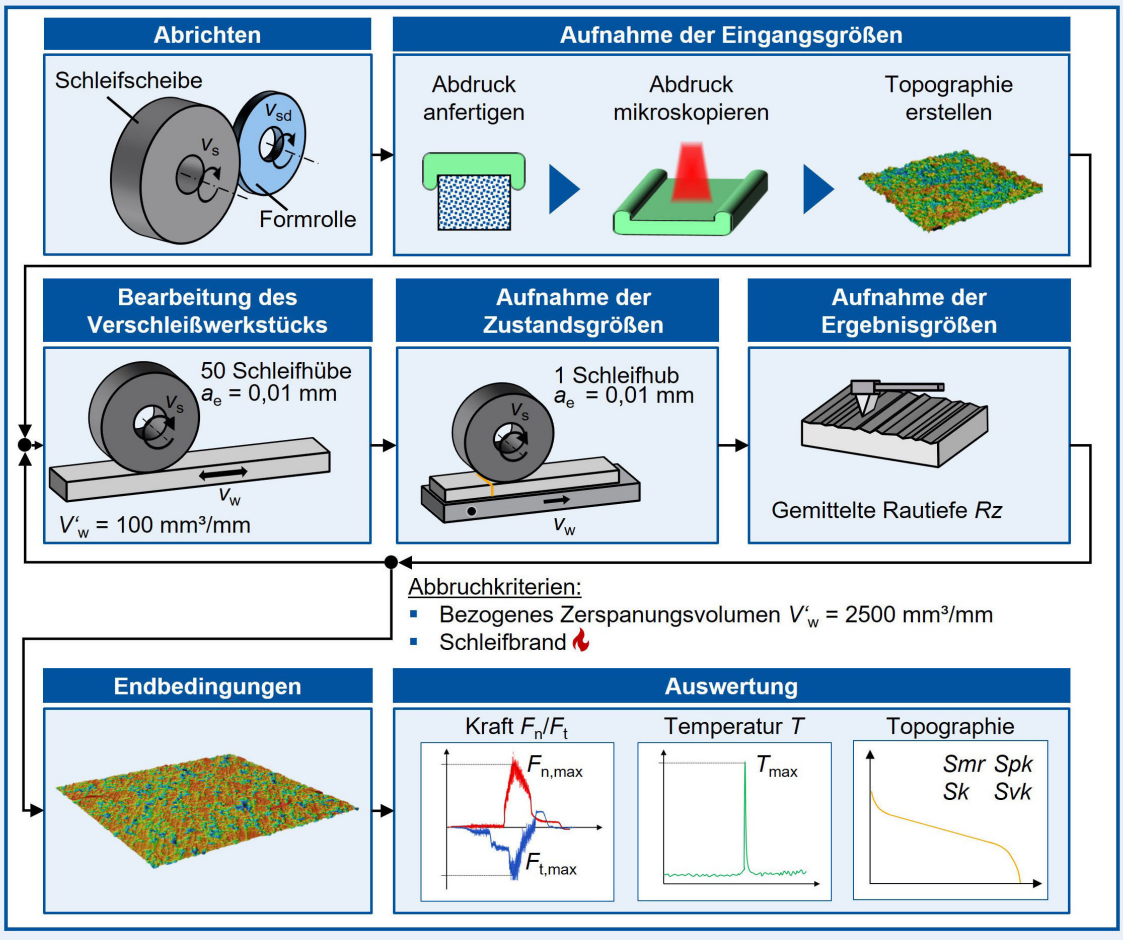

Bild 2. Versuchsmethodik. *Grafik: MTI Aachen*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

abgeleitet. Für jede Versuchsreihe wurden maximal 25 Versuchspunkte durchgeführt. Dabei wurde jeder Versuchspunkt durch das Zerspanen eines bezogenes Zerspanungsvolumen von V'_w = 100 mm³/mm definiert. Das bezogene Zerspanungsvolumen pro Versuchspunkt resultierte aus 50 Schleifhüben bei einer Zustellung von a_e = 0,01 mm auf dem Verschleißbauteil und einem abschließenden Schleifhub bei einer Zustellung von a_e = 0,01 mm auf dem Messbauteil. Um die erfassten Werte statistisch abzusichern, wurden alle Versuchsreihen zweimal durchgeführt.

Die eingesetzten Schleifscheiben wurden zu Beginn einer Versuchsreihe mit einer Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe von $v_{s,d}$ = 40 m/s, einem Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis von q_d = 0,8 und einem Überdeckungsgrad von U_d = 2 konditioniert. Um die Veränderung der Schleifscheibentopografie im Schleifprozess zu untersuchen, wurde nach dem Abrichten durch Abdruckmasse ein Negativabdruck der Schleifscheibe im Initialzustand für spätere Mikroskopieaufnahmen abgenommen und die Stelle auf der Schleifscheibe markiert. Anschließend wurden die Versuchspunkte nach dem erläuterten Vorgehen durchgeführt. Die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe wurde mit v_s = 40 m/s konstant gehalten, wie auch die Vorschubgeschwindigkeit mit v_w = 24 m/s. Die Austrittsgeschwindigkeit des KSS betrug v_{KSS} = 28 m/s.

Während des Überschleifens des Messwerkstücks erfolgte die Erfassung der Prozesszustandsgrößen. Dazu zählten die normalen beziehungsweise tangentialen Schleifkräfte F_n und F_t sowie die Schleiftemperatur *T*. War nach einem Versuchspunkt das bezogene Zerspanungsvolumen von V'_w = 2500 mm³/mm oder das Standzeitende der Schleifscheiben erreicht, wurde die Scheibentopografie im Endzustand abschließend mittels Negativabdruck an den markierten Stellen aufgenommen.

Die Auswertung der zunächst zeitkontinuierlich vorliegenden Schleifkräfte erfolgte durch die Anwendung eines IIR (Infinite Impulse Response)-Tiefpassfilters mit einer Grenzfrequenz von f_{grenz} = 5 Hz und der Berücksichtigung des Maximalwerts der Kraft F_{max} des gefilterten Signals. Die Auswertung der Prozesstemperatur erfolgte analog über das Temperaturmaximum T_{max}. Eine Filterung des Signals war nicht notwendig.

Für die Topografieauswertungen wurde ein 25 mm² großer Topografieausschnitt des Negativabdrucks der Schleifscheibe aufgenommen, eine Form- und Lagekorrektur durchgeführt und anschließend invertiert. Die Aufnahme der Topografie erfolgte durch ein Laserscanningmikroskop vom Typ „VK-X 100“ von Keyence bei einer 400-fachen Vergrößerung. Die Wiederholgenauigkeit der Messungen betrug hierbei $3\sigma_{Höhe}$ = 0,02 µm² für die Höhenmessung und $3\sigma_{Breite}$ = 0,05 µm² für die Breitenmessung. Auf Basis der aufgenommenen Schleifscheibentopografien erfolgte deren Charakterisierung durch die Bestimmung von flächenbezogenen und dreidimensionalen Kenngrößen analog zur Norm DIN EN ISO 25178-2.

Als Maß für die Oberflächengüte des Messwerkstücks nach dem Schleifen wurde die gemittelte Rautiefe *Rz* herangezogen. Zur Erfassung der gemittelten Rautiefe *Rz* wurde das mobile taktile Rauheitsmessgerät „MarSurf M300 C“ mit dem Vorschubgerät „MarSurf RD 18C“ von Mahr verwendet.

3 Ergebnisse

Ausschnitt (1) in **Bild 3** zeigt den mittels RFDA gemessenen E-Modul *E* der drei verwendeten Schleifscheiben SLS 1 bis SLS 3. Schleifscheibe SLS 3 wies den geringsten E-Modul mit $E_{SLS\,3}$ = 36,6 GPa auf, was einer Abweichung von 7 % verglichen mit Schleifscheibe SLS 2 entsprach ($E_{SLS\,2}$ = 39,3 GPa). Bei Schleifscheibe SLS 1 wurde ein E-Modul von *E* = 38,7 GPa gemessen. Messwiederholungen zeigten Unterschiede in den E-Modulen von ΔE < 0,1 MPa.

Eine mögliche Auswirkung des E-Moduls auf die Wirkmechanismen beim Abrichten und damit verbunden der resultierenden Topografien der Schleifscheiben zeigt Ausschnitt (2) exemplarisch anhand des Extremwerts der Spitzenhöhe *Sxp*. Dabei beschreibt *Sxp* den Höhenunterschied zwischen der Bindungsebene und den Spitzen nach dem Entfernen der höchsten Spitzen. In der Auswertung der Mikroskopaufnahmen nach dem Abrichten ist zu sehen, dass Schleifscheibe SLS 3 mit dem geringsten E-Modul gesteigerte Werte in der extremen Spitzenhöhe *Sxp* verglichen mit den anderen Schleifscheiben aufweist. Bei Schleifscheibe SLS 2 wurde der geringste Wert gemessen. In der Tendenz wurde somit eine Abnahme der Spitzenhöhen bei wachsendem E-Modul innerhalb von spezifikationsgleichen Schleifscheiben beobachtet.

Eine potenzielle Ursache ist das verringerte Dämpfungsverhalten der Schleifscheiben mit wachsendem E-Modul. Es wird angenommen, dass die aufgrund der Abrichtparameter (q_d = 0,8 und U_d = 2) hohen Stoßbelastungen zu einem hohen Maß an Kornausbrüchen während des Abrichtprozesses führten. Bei einer verringerten Dämpfung der Bindung aufgrund von einem hohen E-Modul resultierte ein gesteigerter Anteil an Kornausbrüchen und dadurch der Verlust von potenziellen Schneiden mit hohem Kornüberstand. Ausschnitt (3) des Bilds zeigt das maximal erreichte spezifische Zerspanungsvolumen $V'_{w,max}$ der Schleifscheiben in Abhängigkeit von dem E-Modul *E*. Schleifscheibe SLS 1 wies das geringste erreichte Zerspanungsvolumen mit einem Maximalwert von $V'_{w,max}$ = 2000 mm³/mm auf. Das maximale Zerspanungsvolumen wurde von Schleifscheibe SLS 2 bei einem Wert von $V'_{w,max}$ = 2500 mm³/mm erreicht.

Somit wurde innerhalb der betrachteten Stichprobe bei chargenverschiedenen Schleifscheiben eines Herstellers eine Abweichung von 20 % im maximalen Zerspanungsvolumen festgestellt. Schleifscheibe SLS 2 mit dem höchsten E-Modul wies das höchste erreichte Zerspanungsvolumen auf. Der positive Einfluss auf das maximal erreichte Zerspanungsvolumen könnte durch eine erhöhte Kornhaltekraft und davon abgeleitet einem reduzierten Anteil an Kornausbrüchen während des Schleifens zurückgeführt werden. Eine Aussage, dass mit steigendem E-Modul ein Anwachsen des maximalen Zerspanungsvolumen einhergeht, ist mit der vorliegenden Datengrundlage nicht möglich. Hierfür müsste Schleifscheibe SLS 1 ein höheres maximales Zerspanungsvolumen erreicht haben als Schleifscheibe SLS 3. In Ausschnitt (4) der Abbildung ist das maximale spezifische Zerspanungsvolumen V'_{max} in Abhängigkeit von *Sxp* dargestellt. Auch hier ist keine alleinige Korrelation der extremen Spitzenhöhe *Sxp* mit $V'_{w,max}$ ersichtlich. Das höhere Zerspanungsvolumen der Schleifscheibe SLS 3 gegenüber der Schleifscheibe SLS 1 könnte mit der höheren extremen Spitzenhöhe *Sxp* und somit der höheren Anzahl kinematischer Schneiden erklärt werden.

Zusammenfassend konnten Unterschiede im maximalen spezifischen Zerspanungsvolumen spezifikationsgleicher Schleifscheiben festgestellt werden. Die Ursachen sind sowohl auf Differenzen im E-Modul wie auf daraus resultierende Änderungen in den Topografien nach dem Abrichten rückführbar. Es wird vermutet, dass Chargen mit geringerem E-Modul aufgrund der erhöhten

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - CC BY

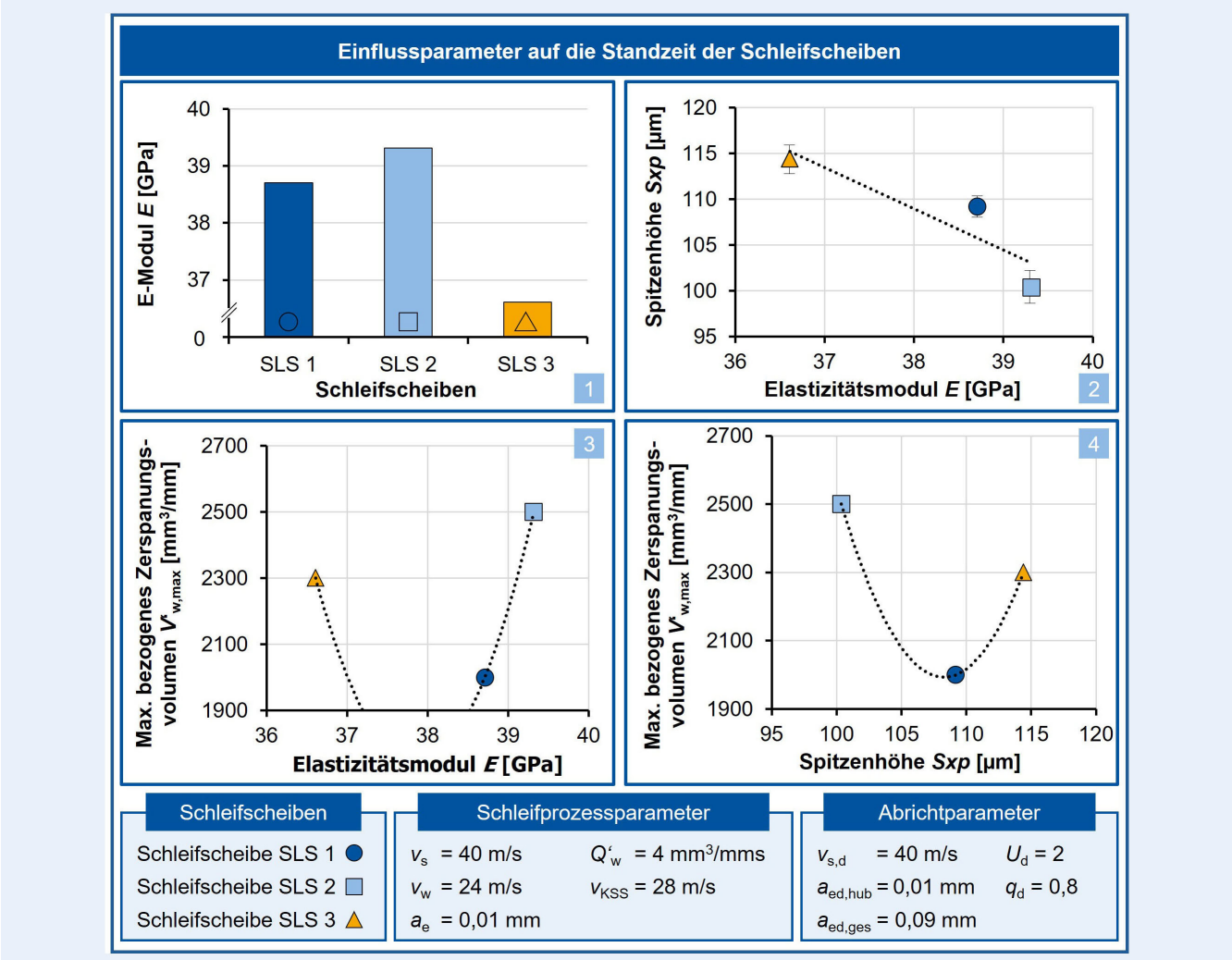

Bild 3. Einflussparameter auf die Standzeit. *Grafik: MTI Aachen*

Spitzenhöhe nach dem Abrichten höhere Standzeiten erzielen als Chargen mit leicht erhöhtem E-Modul. Beim Überschreiten eines kritischen E-Moduls überwiegt jedoch sein positiver Einfluss in Form von gesteigerten Kornhaltekräften.

Bild 4 zeigt die normalen und tangentialen Schleifkräfte F_n beziehungsweise F_t in Abhängigkeit des bezogenen Zerspanungsvolumens V'_w. Sowohl für die Normalkraft F_n als auch für die Tangentialkraft F_t ist ein leichter linearer Anstieg der Kräfte mit wachsendem Zerspanungsvolumen V'_w zu erkennen. Zu Beginn weist Schleifscheibe SLS 3 die geringsten Kräfte auf, was auf die erhöhte Spitzenhöhe *Sxp* zurückzuführen ist. Zum Standzeitende der Schleifscheiben ist für jede der drei Chargen ein Anstieg in den Kräften zu beobachten, was auf einen Verlust der Schneidfähigkeit der Schleifscheibe hindeutet. Die Ursachen sind jedoch aus dem Diagramm nicht zu entnehmen.

In **Bild 5** ist die gemessene Schleiftemperatur T über dem bezogenen Zerspanungsvolumen V'_w dargestellt.

Zu erkennen ist, dass alle drei Temperaturverläufe bis kurz vor dem Erreichen des Standzeitendes um ΔT = 150 °C anstiegen. Bei Erreichen des Standzeitendes wurde eine exponentielle Zunahme der Schleiftemperatur T auf bis zu T_{max} = 500 °C gemessen. Durch den zunächst konstanten Temperaturanstieg aller Schleifscheibenchargen bis zu einem bezogenen Zerspanungsvolumen von V'_w = 2000 mm³/mm ist von einem kontinuierlichen Verlust der Schneidfähigkeit der Schleifscheiben auszugehen. Dieser ist entweder durch das fortwährende Abstumpfen der Kornspitzen oder den wiederholten Ausbruch von Körnern zu erklären.

Die Verschleißmechanismen der Schleifscheiben sind indirekt über die gemittelte Rautiefe *Rz* in **Bild 6** abgebildet. Die Abbildung zeigt die gemittelte Rautiefe *Rz* des Messbauteils über dem bezogenen Zerspanungsvolumens V'_w. Alle drei Verläufe weisen initial eine Abnahme der gemittelten Rautiefe *Rz* bis zu einem bezogenen Zerspanungsvolumen von V'_w = 300 mm³/mm auf. Ab diesem Punkt ist ein schleifscheibenspezifischer Verlauf der gemittelten Rautiefe *Rz* erkennbar.

Für Schleifscheibe SLS 1 ist ein nahezu linearer Anstieg der Rauheit zu sehen, der beim Erreichen des Standzeitendes exponentiell auf ein Maximum ansteigt. Für Schleifscheibe SLS 2 ist ein wellenförmiger Anstieg und Abfall der gemittelten Rautiefe *Rz* erkennbar. Zum Standzeitende der Schleifscheibe steigt auch hier die gemittelte Rautiefe *Rz* sprunghaft an. Die erzielte gemittelte Rautiefe *Rz* von Schleifscheibe SLS 3 verläuft zwischenzeitlich nahezu konstant, bis ein Anstieg zum Standzeitende gemessen deutlich wird.

Der initiale Abfall der gemittelten Rautiefe *Rz* bei allen Schleifscheiben ist auf ein Abflachen der Kornspitzen zurückführbar.

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

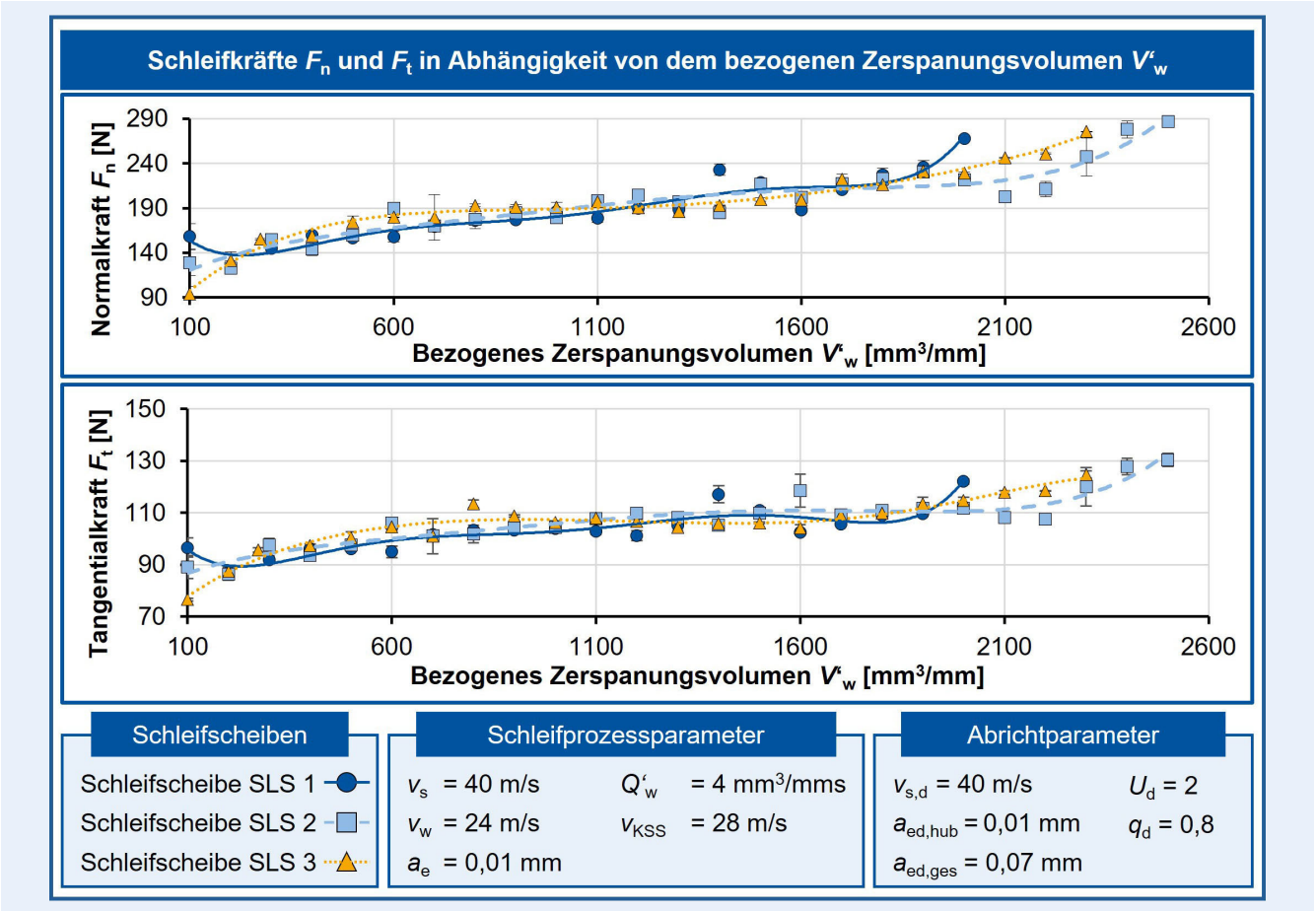

Bild 4. Schleifkräfte in Abhängigkeit von dem Zerspanungsvolumen. *Grafik: MTI Aachen*

Die höchste Standzeit der Schleifscheibe SLS 2 kann mit dem höchsten E-Modul und daraus resultierend mit der größten Kornhaltekraft beim Schleifen erklärt werden. Durch die erhöhte Kornhaltekraft von SLS 2 kommt es demnach während der Standzeitversuche nicht direkt zu einem Ausbruch der Körner, sondern zunächst zu einem Abflachen der Schneiden und nachfolgend zu Kornbrüchen. Aus den Kornbrüchen resultierend entstehen neue Schneiden, die wiederum infolge der Schleifversuche abstumpfen. Unterstützt wird die Erklärung durch das charakteristische Ansteigen und Abfallen der gemittelten Rautiefe *Rz*, die für einen solchen Selbstschärfeeffekt spricht.

Der Verlauf der gemittelten Rautiefe *Rz* von Schleifscheibe SLS 1 weist keinen wellenförmigen Verlauf infolge einer Selbstschärfung auf. Vielmehr spricht der kontinuierliche Anstieg der gemittelten Rautiefe *Rz* für das stetige Ausbrechen von Körnern aus der Bindung aufgrund der geringeren Kornhaltekraft der Schleifscheibe.

Auch der Rauheitsverlauf von Schleifscheibe SLS 3 deutet nicht auf einen Selbstschärfeeffekt hin. Aufgrund des geringsten E-Moduls ist wie bei SLS 1 davon auszugehen, dass die Bindungskräfte der Schleifscheibe nicht ausreichen, um ein Ausbrechen der Körner aus der Bindung zu verhindern. Die höhere Standzeit der Schleifscheibe kann durch die höhere initiale Spitzenhöhe *Sxp* hervorgerufen werden, wodurch die Schneidfähigkeit von SLS 3 länger aufrechterhalten wird, verglichen mit SLS 2.

4 Fazit und Ausblick

Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass werkzeugseitige Chargenschwankungen beim Schleifen zu Unterschieden in den Prozesszustands- als auch -ergebnisgrößen führen können. Bezogen auf das Standzeitende konnten Unterschiede von bis zu 20 % beobachtet werden. Die Beobachtungen können auf Schwankungen im E-Modul der Schleifscheiben zurückführbar sein. In den Untersuchungen wurden in RFDA-Messungen Abweichungen von bis zu 7 % im E-Modul gemessen. Die Auswertung der Topografiekennwerte nach dem Abrichten zeigte in der Tendenz, dass ein erhöhter E-Modul zu einer geringeren extremen Spitzenhöhe *Sxp* führte. Eine mögliche Erklärung könnte das reduzierte Dämpfungsverhalten der Schleifscheibenbindung beim Abrichten sein, wodurch es beim Abrichten zu einem höheren Anteil an Kornausbrüchen kommt. Eine alleinige Korrelation des E-Moduls mit dem Standzeitende der Schleifscheiben konnte jedoch nicht nachgewiesen werden. Vielmehr könnte eine Kombination aus hohem E-Modul gepaart mit einer hohen Spitzenhöhe während des Schleifens zu einer erhöhten Standzeit führen. Ein hoher E-Modul würde dabei ein Ausbrechen der Körner aufgrund der größeren Kornhaltekraft der Bindung verhindern und somit einen Selbstschärfeeffekt der Schleifscheibe ermöglichen. Die höhere Spitzenhöhe könnte die Schneidfähigkeit der Schleifscheibe aufgrund der erhöhten Anzahl kinematischer Schneiden verlängern.

Die Untersuchungen dienen einem ersten Nachweis, dass spezifikationsgleiche, aber chargenverschiedene Schleifwerkzeuge

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY

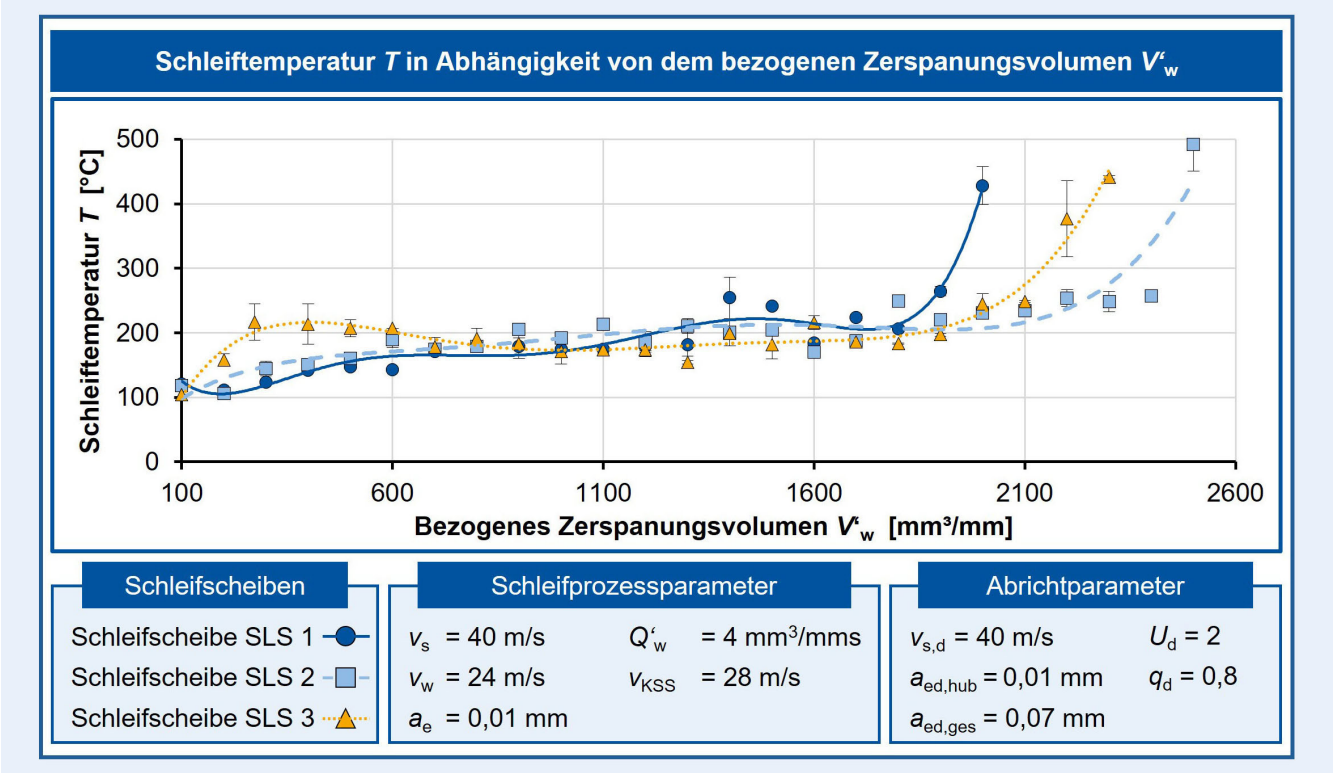

Bild 5. Schleiftemperatur in Abhängigkeit von dem Zerspanungsvolumen. *Grafik: MTI Aachen*

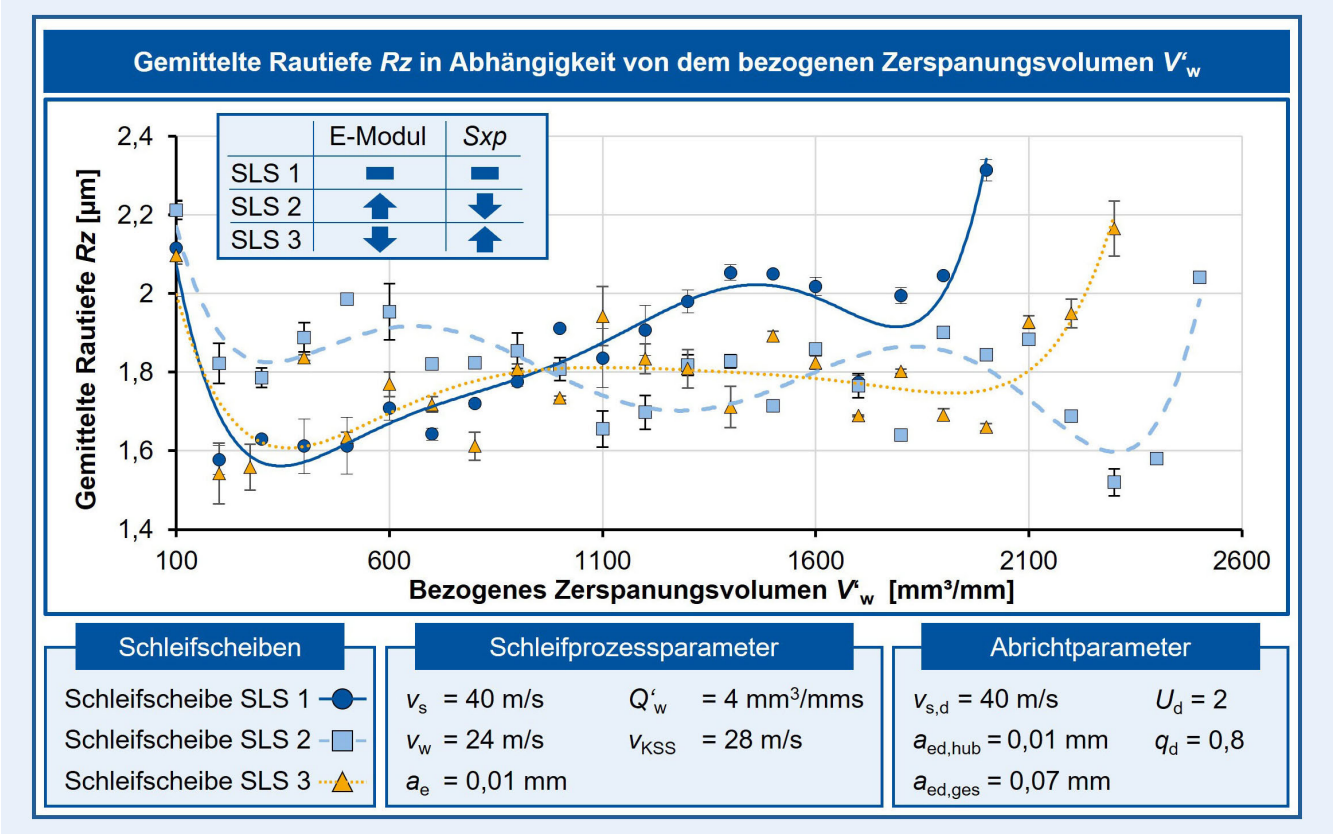

Bild 6. Gemittelte Rautiefe in Abhängigkeit von dem Zerspanungsvolumen. *Grafik: MTI Aachen*

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access -

eines Herstellers das Prozessergebnis beim Schleifen beeinflussen. Dabei ist davon auszugehen, dass die Berücksichtigung weiterer Chargen und Werkzeughersteller zu einem tieferen Verständnis beitragen, um Chargenschwankungen im Eingangszustand zu charakterisieren, deren Auswirkung auf den Schleifprozess zu quantifizieren und zu erklären. Kombiniert mit einer Untersuchung werkstückseitiger Chargenschwankungen wird in folgenden Forschungsarbeiten die Grundlage bereitet, Schleifprozesse zukünftig auch chargenabhängig zu modellieren, um die Prozesseffizienz beim Schleifen weiter zu steigern.

Literatur

[1] Krajnik, P.; Wegener, K.; Bergs, T. et al.: Advances in modeling of fixed-abrasive processes. CIRP Annals 73 (2024) 2, pp. 589–614, doi. org/10.1016/j.cirp.2024.05.001

[2] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 525:2022–01: Schleifwerkzeug aus gebundenem Schleifmittel. Berlin: DIN Media GmbH 2022

[3] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN ISO 8486–1: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel. Ausgabe 1996

[4] Bot-Schulz, R.: Untersuchung der Reaktionen an der Schnittstelle Korn/Bindung für Sol-Gel-Korund. Dissertation, RWTH Aachen, 2005

[5] Telle, R.: Keramik. Heidelberg: Springer-Verlag 2007

[6] Ylipää, T.; Skoogh, A.; Bokrantz, J. et al.: Identification of maintenance improvement potential using OEE assessment. International Journal of Productivity and Performance Management 66 (2017) 1, pp. 126–143, doi.org/10.1108/IJPPM-01–2016–0028

[7] Blankenburg: Akustische Härteprüfung zur Schleifkörperauswahl. Werkstatt und Betrieb (1985) 118, S. 267–270

[8] Haupt, D.; Mockel, R.: Bestimmung der Härte an Schleifkörpern unter Verwendung physikalisch-mechanischer Kenngrößen. Silikattechnik (1984), S. 195–198

[9] Frank, H.; Schulz, S.: Ermittlung von Kennwerten an keramisch- und kunstharzgebundenen Schleifkörpern. Sankt Augustin: FGS-Forschungsbericht 1993

[10] König, W.; Lung, D.; Föllinger et al.: Die Bedeutung des Elastizitätsmoduls von Schleifscheiben für deren Verhalten im Schleifprozess. Ergebnisdarstellung für das VDS/DKG/AIF-Forschungsvorhabens. 1985

[11] DIN Deutsches Institut für Normung e.V.: DIN EN ISO 25178–2:2023–09. Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit Teil 2. Berlin: DIN Media GmbH 2023

Eike Reuter, M.Sc.
e.reuter@mti.rwth-aachen.de
Tel. +49 241 80-25388
Foto: MTI

Sebastian Prinz, M.Sc.

Peter Breuer, M.Sc.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Bergs

Manufacturing Technology Institute – MTI der RWTH Aachen
Campus Boulevard 30, 52074 Aachen
www.mti.rwth-aachen.de

LIZENZ

Dieser Fachaufsatz steht unter der Lizenz Creative Commons Namensnennung 4.0 International (CC BY 4.0)

https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93 https://www.inlibra.com/de/page/agb - Open Access - (cc) BY