

Einfluss von Chargenschwankungen unterschiedlicher Hersteller auf den Schleifprozess

Chargenschwankungen bei Schleifscheiben

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

ZUSAMMENFASSUNG Trotz hoher Anforderungen an die Schleifwerkzeugfertigung resultieren aus ungleichmäßigen Kornverteilungen oder thermischer Abweichungen beim Brennprozesse signifikante Chargenschwankungen. Zur Analyse ihrer Auswirkungen wurden Werkzeuge verschiedener Chargen und Hersteller bezüglich ihrer Härte charakterisiert und in Schleifversuchen geprüft. Die Ergebnisse zeigen, dass härtere Schleifscheiben früher Schleifbrand verursachen, wobei das Ausmaß des Härteeinflusses je nach Hersteller variiert.

STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Schleifen, Werkzeuge

Influence of batch variations between different grinding wheel manufacturers on the grinding process

ABSTRACT Despite the high demands placed on grinding tool manufacturing, significant batch variations occur as a result of uneven grain distributions or thermal deviations during the firing process. To analyze their effects, tools from different batches and manufacturers were characterized with respect to hardness and were tested in grinding experiments. The results show that harder grinding wheels cause grinding burn at an earlier point, the extent of the hardness effect varying between manufacturers.

1 Einleitung

In der fertigen Industrie ist das Schleifen als Endbearbeitung unverzichtbar, um hohe Präzision und hohe Oberflächenqualitäten zu gewährleisten. In den führenden Industrienationen macht das Schleifen etwa 20–25 % der gesamten Ausgaben für die spanende Bearbeitung aus [1]. Das Marktvolumen wächst weltweit trotz Krise in der Automobilindustrie und Konjunkturschwäche weiter. In den letzten Jahren hat der Rückgang erfahrener Fachkräfte sowie der Bedarf an Automatisierung und Standardisierung dazu geführt, dass eine Modellierung des Prozesses angestrebt wird, um Bearbeitungsbedingungen und Qualitäten reproduzierbar und unabhängig von der Erfahrung des Bedieners gestalten zu können [2].

Die in aktuellen Modellen verwendeten Kennwerte zur Charakterisierung der Schleifscheiben beruhen überwiegend auf den in DIN ISO 525 [3] und DIN ISO 8486-1 [4] definierten Angaben zu Kornart und Körngröße oder auf Beschreibungen der Bindung und der Porosität, die physikalisch nur schwer quantitativ zu erfassen sind. Diese Kenngrößen sind zwar für den Vergleich von Spezifikationen und für allgemeine Leistungsbewertungen nützlich, können aber Leistungsschwankungen von Schleifscheiben, die in abweichenden Prozesszustands- und Ergebnisgrößen sichtbar werden, nicht immer hinreichend erklären. Schleifwerkzeuge weisen im Vergleich zu Werkzeugen anderer Bearbeitungstechnologien eine komplexere Struktur und einen aufwendigeren Herstellungsprozess auf, wodurch sogenannte Chargenschwankungen entstehen [5, 6]. Diese Schwankungen werden etwa durch Unterschiede in der Ausgangswerkstoffqualität, in der Kornverteilung oder in der Temperaturverteilung beim

Brennen verursacht [7]. Werden Chargenschwankungen nicht kontrolliert, kommt es zu Schwankungen in der Standzeit der Schleifscheiben und in der Bearbeitungsgenauigkeit, zu einer Verringerung der Genauigkeit von Prozessmodellen sowie zu erhöhten Aufwänden für die Prozessanpassung. Derzeit werden 8–12 % der gesamten Produktionszeit für die Einrichtung und Anpassung von Prozessen aufgewendet [8].

Die klassische Definition für die Härte der Schleifscheibe ist der Widerstand, den ein Schleifkorn dem Ausbrechen aus seiner Bindung entgegensetzt, eine direkte Messung ist jedoch schwierig [9]. Daher kann als Ersatzkennwert der Elastizitätsmodul (E -Modul) E der Schleifscheibe herangezogen werden. Dabei wurde ein linearer Zusammenhang zwischen beiden Größen nachgewiesen [10]. Der E -Modul E einer Schleifscheibe wird durch den E -Modul E der Bindung und der Schleifkörner sowie deren Volumenanteile bestimmt [11]. Somit kann es auch bei Schleifscheiben mit identischer Spezifikation infolge von Chargenschwankungen zu Abweichungen des E -Moduls E kommen.

Zur Bestimmung der Härte beziehungsweise Festigkeit von Schleifscheiben wurden bislang Verfahren wie das Sandstrahlverfahren, das Kugeldruckverfahren sowie die Resonanzfrequenz-Dämpfungsanalyse (RFDA) entwickelt [9]. Die Bewertung des E -Moduls E mittels RFDA ist im Vergleich zu herkömmlichen zerstörenden Härtemessverfahren schnell und einfach. Zudem gilt die Messung des E -Moduls E mit der RFDA als geeignet, um Chargenschwankungen von Schleifscheiben zu bewerten [12, 13]. König und Föllinger untersuchten die Bedeutung des E -Moduls E bei der Variation von Kornart, Körnung, Härte und Gefüge und zeigten, dass, mit Ausnahme der Kornart, bei der Variation eines

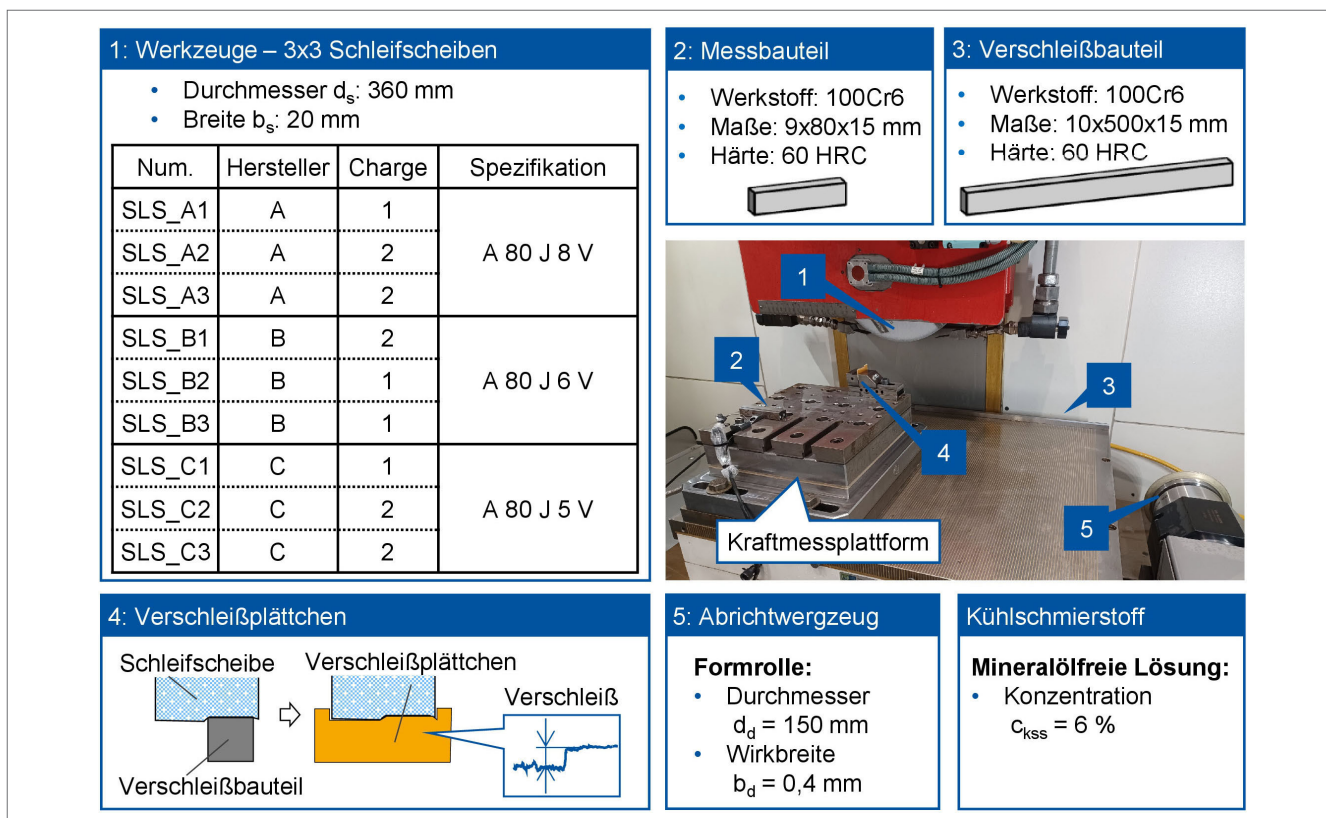


Bild 1 Versuchsmaterialien und Versuchsaufbau. Grafik und Foto: MTI der RWTH Aachen

einzelnen Parameters eine gute Korrelation mit dem E-Modul E besteht [14, 15].

Zwar liegen Studien vor, in denen Schleifscheiben mit unterschiedlichen Härtespezifikationen anhand des E-Moduls E bewertet und deren Einfluss auf den Schleifprozess beschrieben wurden, jedoch existieren keine Berichte über den Einfluss von Härteschwankungen zwischen Schleifscheibenchargen gleicher Spezifikation auf den Schleifprozess. In einer früheren Studie [16] wurden Schleifscheiben eines einzelnen Herstellers mit identischer Spezifikation, jedoch aus unterschiedlichen Chargen, hinsichtlich des Einflusses von Chargenschwankungen auf den Schleifprozess untersucht. Dabei wurde jedoch keine eindeutige Beziehung zwischen dem E-Modul E und der Standzeit festgestellt. Als mögliche Ursache ist zu nennen, dass die Beurteilung der Schleifbrandgrenze auf einer visuellen Bewertung beruhte und somit keine quantitative Beurteilung erfolgte.

In der vorliegenden Arbeit wurden Schleifscheiben identischer Spezifikation von drei verschiedenen Herstellern untersucht, um den Einfluss von Chargenschwankungen zu vergleichen und zu bewerten. Neben den Unterschieden zwischen Chargen eines Herstellers wurden auch die Unterschiede zwischen den Herstellern analysiert, um umfassendere Erkenntnisse über die bisher auf einen einzelnen Hersteller beschränkten Untersuchungen hinaus zu gewinnen. Auch wurden die Eigenspannungen der Werkstücke quantitativ erfasst und der Schleifscheibenverschleiß analysiert. Da bekannt ist, dass die Topografie der Schleifscheiben einen Einfluss auf das Schleifergebnis hat [17], wurde die Topografie zusätzlich anhand der in DIN EN ISO 25178-2 [18] definierten Parameter bewertet. Auf diese Weise wurde die Härte der Schleifscheibe, ihre Topografie, die während des Schleifens auftretenden Schleifkräfte (Normalkraft F_n und Tangentialkraft F_t) sowie die

Schleiferggebnisgrößen (zum Beispiel Eigenspannungen σ_E und Schleifscheibenverschleiß Δr_s) systematisch erfasst. Darauf aufbauend wurde der Wirkmechanismus des Einflusses von Chargenschwankungen auf den Schleifprozess erklärt.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sollen es ermöglichen, in der Prozessauslegungsphase eine genauere Vorhersage der Schleifergebnisse mithilfe von Modellen zu treffen und in bestehenden Prozessen die Abrichtintervalle an die Eigenschaften einzelner Schleifscheiben anzupassen.

2 Versuchsmaterialien und Methodik

Die Versuche wurden auf einer Flachsleifmaschine „Profi-mat MT 608“ der Firma Blohm Jung durchgeführt. Eine Übersicht über den verwendeten Versuchsaufbau zeigt **Bild 1**.

Insgesamt wurden neun Schleifscheiben eingesetzt: je drei von drei verschiedenen Herstellern. Zur Bewertung von Chargenschwankungen wurden bei jedem Hersteller drei Schleifscheiben aus zwei unterschiedlichen Chargen ausgewählt (Bild 1, Position 1). Die Abkürzung SLS steht für „Schleifscheibe“. Die drei Schleifscheiben des Herstellers A wurden als SLS_A1–3 bezeichnet; entsprechend wurden die Schleifscheiben der Hersteller B und C als SLS_B1–3 beziehungsweise SLS_C1–3 benannt. Da die Schleifkorn- und Bindungsangaben herstellerspezifische Kennzeichnungen enthielten, wurden sie auf Basis der DIN ISO 525 generalisiert aufgelistet und die Hersteller anonymisiert, um wettbewerbsrelevante Informationen zu schützen. Alle Schleifscheiben bestanden aus Edelkorund weiß (EKW) der Körnung 80 mit Härte J und keramischer Bindung. Die Porositätskennungen waren unterschiedlich, jedoch wurden die Schleifscheiben von Hersteller A und B auf Grundlage der Spezifikation von Herstel-

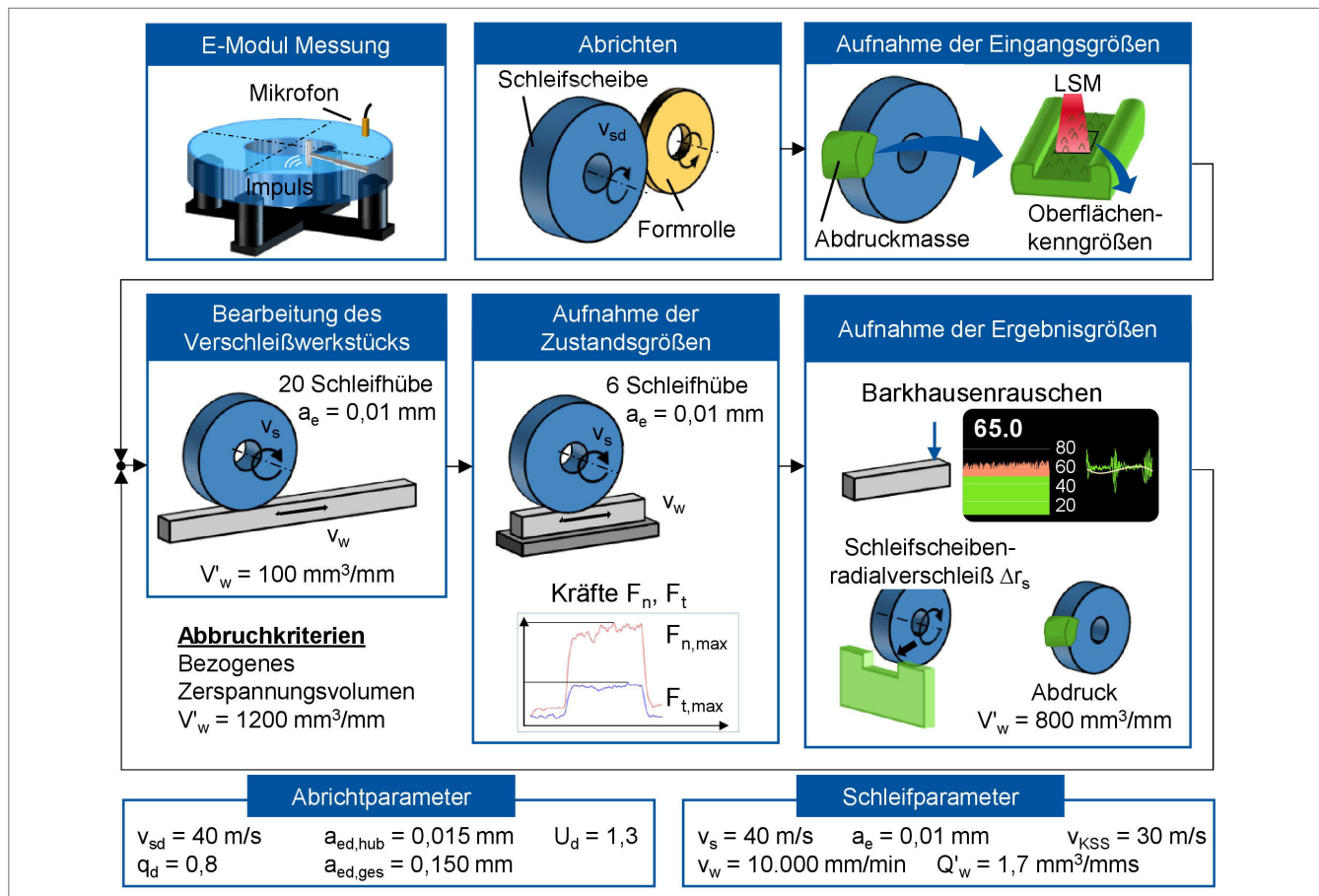


Bild 2 Versuchsablauf. Grafik: MTI der RWTH Aachen

ler C ausgewählt, sodass alle Schleifscheiben als vergleichbar spezifiziert zu betrachten waren.

Für die Versuche wurden zwei Werkstücktypen verwendet: ein Messbauteil (Abmessungen: $9 \times 80 \times 15 \text{ mm}$) und ein Verschleißbauteil (Abmessungen: $10 \times 500 \times 15 \text{ mm}$). Beide Bauteiltypen bestanden aus dem Werkstoff 100Cr6 und wiesen eine Härte von 60 HRC auf. Das Messbauteil wurde auf einer Kraftmessplattform (piezoelektrisches 3-Komponenten-Dynamometer, Kistler Typ „9255C“) befestigt, um während des Schleifens die Schleifkräfte zu erfassen (Bild 1, Position 2). Das Verschleißbauteil wurde mittels Magnetspannplatte direkt auf dem Maschinentisch gespannt (Bild 1, Position 3).

Die Breite des Verschleißbauteils betrug mit 10 mm die Hälfte der Schleifscheibenbreite von 20 mm, sodass die Schleifscheibe gezielt stufenförmig abgenutzt und der Schleifscheibenverschleiß bewertet wurde. Die Messung erfolgte, indem die verschlissene Schleifscheibe in einem Verschleißplättchen abgebildet wurde, um das Schleifscheibenprofil zu übertragen. Aus der Stufenbildung zwischen bearbeitetem und unbearbeitetem Bereich wurde der Schleifscheibenradialverschleiß Δr_s berechnet (Bild 1, Position 4). Die Messungen wurden mit einem „MarSurf LD 260“ der Firma Mahr durchgeführt. Das Abrichten erfolgte mit einer Diamantabrichtrolle der Firma Saint-Gobain (Spezifikation „VITS7P-150-113“). Als Kühlschmierstoff wurde „Hocut 5050“ der Firma Quaker Houghton in einer Konzentration von $c_{KSS} = 6 \%$ eingesetzt. Den Versuchsablauf stellt Bild 2 dar.

Vor Beginn der Schleifversuche wurde die Härte der neun verwendeten Schleifscheiben mit dem „RFDA system 23“ der Firma

Imce gemessen. Die Schleifscheiben wurden auf einem speziellen Prüfstand in vier Punkten im Abstand von 90° gelagert und durch Hammerschläge zu Schwingungen angeregt, um die Eigenfrequenz zu bestimmen. Der E-Modul E wurde aus der gemessenen Eigenfrequenz, den geometrischen Abmessungen, der Masse der Schleifscheibe sowie der Poisson-Zahl ν berechnet [10]. Für alle Schleifscheiben wurde bei der Berechnung eine Poisson-Zahl von $\nu = 0,33$ verwendet. Obwohl diese Zahl materialabhängig variiert, wurde sie hier für alle Schleifscheiben festgelegt, da das Ziel ein relativer Vergleich der Chargenschwankungen bei Schleifscheiben gleicher Spezifikation desselben Herstellers war. Die Wahl des Wertes $\nu = 0,33$ basiert zudem auf früheren Studien [16].

Zu Beginn jedes Versuchs wurde die Schleifscheibe abgerichtet. Die Abrichtbedingungen waren eine Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit von $v_{sd} = 40 \text{ m/s}$, ein Abrichtgeschwindigkeitsquotient von $q_d = 0,8$, eine Zustellung von $a_{ed,hub} = 0,015 \text{ mm}$, eine Gesamtzustellung von $a_{ed,ges} = 0,150 \text{ mm}$ sowie ein Abrichtüberdeckungsgrad von $U_d = 1,3$. Anschließend wurde die Topografie der Schleifscheiben unmittelbar nach dem Abrichten erfasst. Hierfür wurden Abdrücke angefertigt und mit einem dreidimensionalen konfokalen Laserscanningmikroskop (LSM) vom Typ „VK-X100“ der Firma Keyence gemessen. Zur Bewertung der Oberflächentopografie wurden die in DIN EN ISO 25178-2 definierten Oberflächenkenngrößen herangezogen.

Im nächsten Schritt wurde das Verschleißbauteil beim Pendelschleifen mit einer Zustellung von $a_e = 0,01 \text{ mm}$ über 20 Schleifhübe (entsprechend einem bezogenen Zerspanungsvolumen von $V'_w = 100 \text{ mm}^3/\text{mm}$) bearbeitet. Die Schleifscheibenumfangs-

geschwindigkeit betrug $v_s = 40$ m/s, die Werkstückgeschwindigkeit $v_w = 10\,000$ mm/min, das bezogene Zeitspannungsvolumen $Q'_w = 1,7$ mm³/mms und die Kühlschmierstoffgeschwindigkeit $v_{KSS} = 30$ m/s. Danach wurde das Messbauteil mit einer Zustellung von $a_e = 0,01$ mm über sechs Schleifhübe unter den gleichen Bedingungen wie beim Verschleißbauteil geschliffen. Während des Schleifens des Messbauteils wurden die Schleifkräfte gemessen, und die maximalen Schleifkräfte in Normalrichtung $F_{n,max}$ und Tangentialrichtung $F_{t,max}$ aufgezeichnet. Für die Auswertung wurde der Mittelwert der maximalen Schleifkräfte aus den letzten beiden Hüben im Gegenlaufsleifen verwendet.

Nach dem Schleifen des Messbauteils wurde der Eigenspannungszustand durch eine Barkhausenrauschen-Messung bewertet. Die Messung wurde mit dem Gerät "Rollscan 300" der Firma Stresstech durchgeführt. Die Einstellung waren eine Magnetisierungsspannung von $U_{mag} = 4$ V sowie eine Magnetisierungsfrequenz von $f_{mag} = 120$ Hz. Zur Beurteilung der Schleifscheiben nach dem Schleifen wurde der Schleifscheibenradialverschleiß Δr_s ermittelt und zusätzlich wurde bei einem bezogenen Zerspanungsvolumen $V'_w = 800$ mm³/mm die Topografie der Schleifscheiben durch einen Abdruck aufgenommen. Die Bearbeitung des Verschleißbauteils, die Aufnahme der Zustandsgrößen sowie der Ergebnisgrößen wurden bis zu einem bezogenen Zerspanungsvolumen von $V'_w = 1200$ mm³/mm wiederholt. Mit jeder Schleifscheibe wurden unter identischen Bedingungen zwei Versuchsreihen durchgeführt.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der Prozesseingangsgrößen

Die mittels RFDA ermittelten E-Modul-Werte E der einzelnen Schleifscheiben sind in **Bild 3** dargestellt.

Jede Schleifscheibe wurde dreimal gemessen, wobei die Wiederholgenauigkeit unter 0,1 GPa lag. Die Differenz zwischen dem höchsten und niedrigsten E-Modul E infolge von Chargenschwankungen betrug bei Hersteller A $\Delta E_A = 4,2$ GPa, bei Hersteller B $\Delta E_B = 5,3$ GPa und bei Hersteller C $\Delta E_C = 6,0$ GPa. Nach Rammerstorfer *et al.* entspricht die Breite eines Härtegrads der Schleifscheibe experimentell etwa 4,5 GPa [10], weshalb der Einfluss dieser Chargenschwankungen als beträchtlich einzustufen ist. Obwohl alle Schleifscheiben denselben Härtegrad J aufwiesen, waren die Unterschiede zwischen den Herstellern im Verhältnis zur Normbreite des Härtegrads von etwa 4,5 GPa beträchtlich. Dies ist möglicherweise auf die Verwendung derselben Poisson-Zahl ν zurückzuführen. Wie oben dargestellt, ist ein Vergleich der Absolutwerte zwischen den Herstellern nicht möglich, jedoch können die Chargenschwankungen innerhalb jedes Herstellers quantifiziert werden.

Bild 4 zeigt den Zusammenhang zwischen dem E-Modul E und der reduzierten Spitzenhöhe Spk als Parameter der Schleifscheibentopografie. Bild 4 (a) ist der Spk -Wert unmittelbar nach dem Abrichten dargestellt, in Bild 4 (b) der Spk -Wert bei einem bezogenen Zerspanungsvolumen von $V'_w = 800$ mm³/mm. Dass bei identischem E-Modul E beziehungsweise bei einer einzelnen Schleifscheibe zwei Punkte vorliegen, ist darauf zurückzuführen, dass unter denselben Bedingungen zwei Versuche durchgeführt wurden.

Wie in Bild 4 (a) gezeigt, wies die initiale Topografie unmittelbar nach dem Abrichten nur eine schwache Korrelation mit dem E-Modul E auf. Eine Analyse der Ursachen erfolgt in Kapitel 3.3.

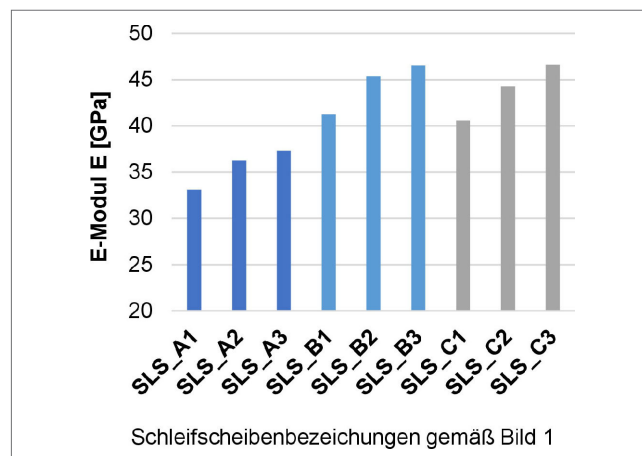


Bild 3 Mittels RFDA (Resonanzfrequenz-Dämpfungsanalyse) gemessene E-Moduln E . Grafik: MTI der RWTH Aachen

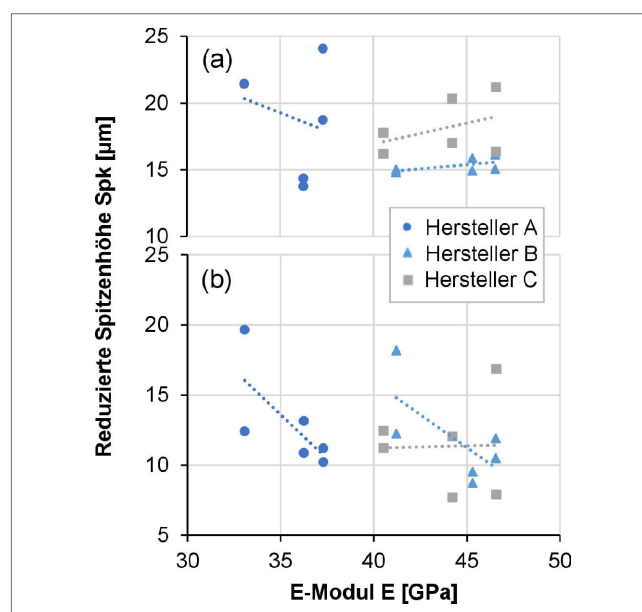


Bild 4 Reduzierte Spitzenhöhe Spk und E-Modul E : (a) initiale Topografie; (b) Topografie bei einem bezogenen Zerspanungsvolumen von $V'_w = 800$ mm³/mm. Grafik: MTI der RWTH Aachen

Dagegen zeigte die nach einem bezogenen Zerspanungsvolumen von $V'_w = 800$ mm³/mm aufgenommene Topografie in Bild 4 (b), dass bei den Herstellern A und B mit steigendem E-Modul E die reduzierte Spitzenhöhe Spk tendenziell abnahm. Es ist anzunehmen, dass Schleifscheiben mit hohem E-Modul E aufgrund ihrer hohen Kornhaltekraft eine stärkere Abflachung der Kornspitzen erfahren, wodurch die Höhe der herausragenden Spitzen Spk verringert wird. Umgekehrt traten bei Schleifscheiben mit niedrigem E-Modul E und somit weicherer Bindung verstärkt Kornausbrüche auf, sodass abgeflachte Körner aus der Schleifscheibe gelöst wurden und neue, scharfe und spitze Körner verstärkt Teil der Topografie wurden. Daraus resultierte, dass ein höherer Spk -Wert erhalten blieb.

Die Trendliniensteigungen in Bild 4 (b) betrugen für $\Delta Spk/\Delta E = -1,3$ (Hersteller A), $\Delta Spk/\Delta E = -0,9$ (Hersteller B) und $\Delta Spk/\Delta E = 0,0$ (Hersteller C). Während der Trend bei den Herstellern A und B deutlich ausgeprägt war, zeigte sich demnach bei Hersteller C kein Zusammenhang. Dies deutet darauf hin,

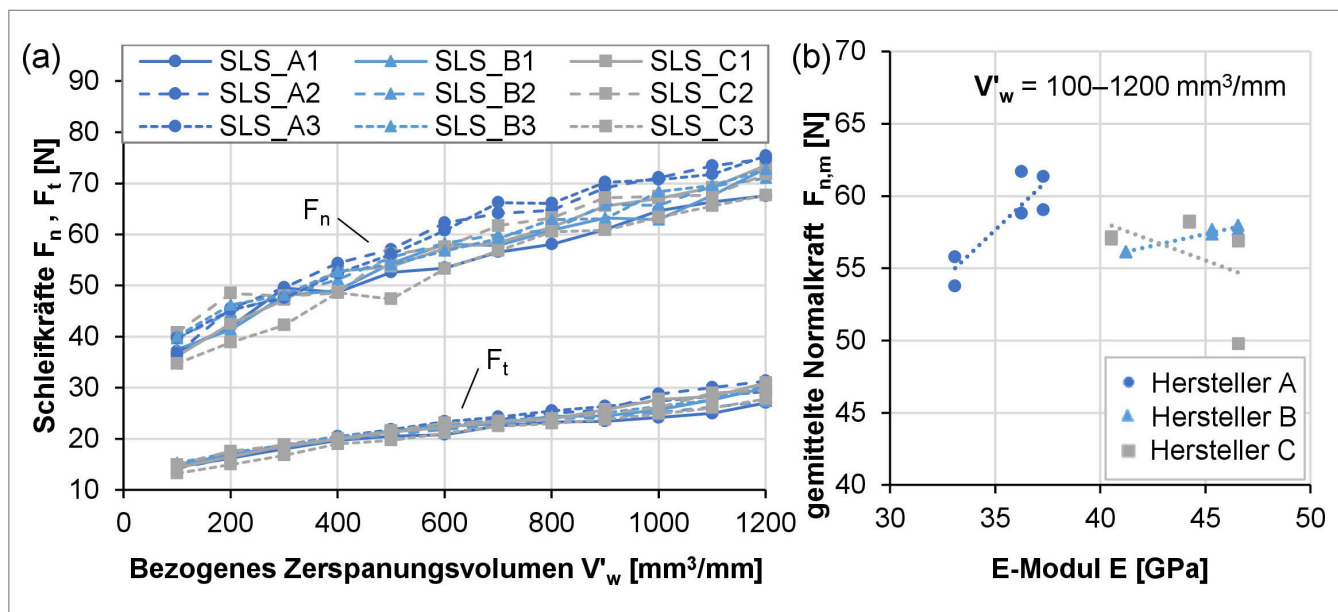


Bild 5 Schleifkräfte: (a) Normalkraft F_n und Tangentialkraft F_t in Abhängigkeit von bezogenen Zerspanungsvolumen V'_w ; (b) gemittelte Normalkraft $F_{n,m}$ in Abhängigkeit vom E-Modul E . Grafik: MTI der RWTH Aachen

dass sich die Beziehung zwischen E-Modul E und Schleifverhalten je nach Hersteller aufgrund unterschiedlicher Eigenschaften von Korn und Bindung unterscheidet.

3.2 Ergebnisse der Prozesszustandsgrößen

Die Normalkraft und die Tangentialkraft beim Schleifen des Messbauteils sind in **Bild 5** dargestellt.

In **Bild 5** (a) ist der Mittelwert aus zwei unter identischen Bedingungen durchgeführten Versuchen dargestellt, wobei für jedes Zerspanungsvolumen V'_w ein Punkt geplottet wurde. **Bild 5** (b) zeigt den Mittelwert im Intervall $V'_w = 100-1200$ mm³/mm eines einzelnen Versuchs. Da jeder Versuch zweimal durchgeführt wurde, sind pro Schleifscheibe zwei Punkte dargestellt.

Aus **Bild 5** (a) ist zu erkennen, dass die Normalkraft F_n und Tangentialkraft F_t mit zunehmendem bezogenem Zerspanungsvolumen V'_w linear anstiegen. Aus **Bild 5** (b) geht hervor, dass bei Hersteller A Schleifscheiben mit niedrigem E-Modul E eine geringere gemittelte Normalkraft $F_{n,m}$ aufwiesen, während bei hohem E-Modul E eine hohe gemittelte Normalkraft $F_{n,m}$ gemessen wurde. Die Steigungen der herstellereigenen Trendlinien betrugen $\Delta F_{n,m}/\Delta E = 1,3$ (Hersteller A), $\Delta F_{n,m}/\Delta E = 0,3$ (Hersteller B) und $\Delta F_{n,m}/\Delta E = -0,5$ (Hersteller C). Dies zeigt, wie in **Bild 4** (b) dargestellt, dass bei einer hohen reduzierten Spitzenhöhe Spk und somit hohen Schnittigkeit der Schleifwiderstand geringer ist und effizienter geschliffen wird. Bei Hersteller B war ein leicht positiver Zusammenhang erkennbar. Bei Hersteller C wiesen Schleifscheiben mit hohem E-Modul E in den Fällen, in denen durch Abrichtschwankungen eine hohe reduzierte Spitzenhöhe Spk entstand, eine geringe Schleifnormalkraft $F_{n,m}$ auf. Dies führte dazu, dass ausschließlich bei Hersteller C eine Trendumkehr beobachtet wurde.

3.3 Ergebnisse der Prozessergebnisgrößen

Die Ergebnisse des Barkhausenrauschens sind in **Bild 6** und die Ergebnisse des Radialverschleißes in **Bild 7** dargestellt.

In **Bild 6** (a) und **Bild 7** (a) ist jeweils der Mittelwert zweier unter identischen Bedingungen durchgeführten Versuche als ein Punkt pro bezogenem Zerspanungsvolumen V'_w aufgetragen. **Bild 6** (b) und **Bild 7** (b) zeigen den Mittelwert des Bereichs $V'_w = 100-1200$ mm³/mm aus einem einzelnen Versuch. Da jeder Versuch zweimal durchgeführt wurde, sind für jede Schleifscheibe zwei Punkte dargestellt. Ein niedriger Wert für das Barkhausenrauschen weist auf Druckeigenspannungen hin, ein hoher Wert auf Zugeigenspannungen [19]. Aus separat durchgeführten röntgendiffraktiven (XRD) Eigenspannungsmessungen wurde analysiert, dass Werte des Barkhausenrauschens von über 50 als Schleifbrand gelten.

Aus **Bild 6** (a) ist ersichtlich, dass bei jedem Hersteller die Schleifscheibe mit niedrigem E-Modul E (durchgezogene Linie im Diagramm) den Anstieg des Barkhausenrauschens B später zeigt als die übrigen Schleifscheiben. Dies bedeutet, dass Schleifscheiben mit niedrigem E-Modul E Schleifbrand später erzeugen, wogegen es beim Schleifen mit Schleifscheiben mit einem hohen E-Modul E bereits frühzeitig zu Schleifbrand kommt. Daraus folgt, dass in **Bild 6** (b) der über den gesamten Bereich gemittelte Wert des Barkhausenrauschens B_m bei niedrigen E-Modulen E geringer und bei hohen E-Modulen E höher ausfällt. Die Trendliniensteigungen betrugen $\Delta B_m/\Delta E = 1,2$ (Hersteller A), $\Delta B_m/\Delta E = 1,8$ (Hersteller B) und $\Delta B_m/\Delta E = 0,3$ (Hersteller C). Eine detaillierte Betrachtung, wie die Eingangsgrößen (E-Modul E , Topografie) über die Zustandsgrößen (Normalkraft) das Barkhausenrauschen beeinflussen, erfolgt in Kapitel 4.

Aus **Bild 7** (a) geht hervor, dass der anfängliche Verschleiß bei einem bezogenen Zerspanungsvolumen von $V'_w = 100$ mm³/mm zwischen $\Delta r_{s,min} = 18$ und $\Delta r_{s,max} = 25$ µm lag. Dies deutet darauf hin, dass die Schleifscheibentopografie unmittelbar nach dem Abrichten infolge des Initialverschleißes stark variiert. Im Bereich $V'_w = 100-1200$ mm³/mm betrug der Anstieg des Schleifscheibenverschleißes etwa $\Delta r_{s,min} = 5$ µm bis $\Delta r_{s,max} = 9$ µm. Daraus folgt, dass für eine präzise Analyse des Ursache-Wirkungs-Zusammenhangs beim Schleifen die Topografie zumindest nach einer geringen Schleifbearbeitung herangezogen werden sollte.

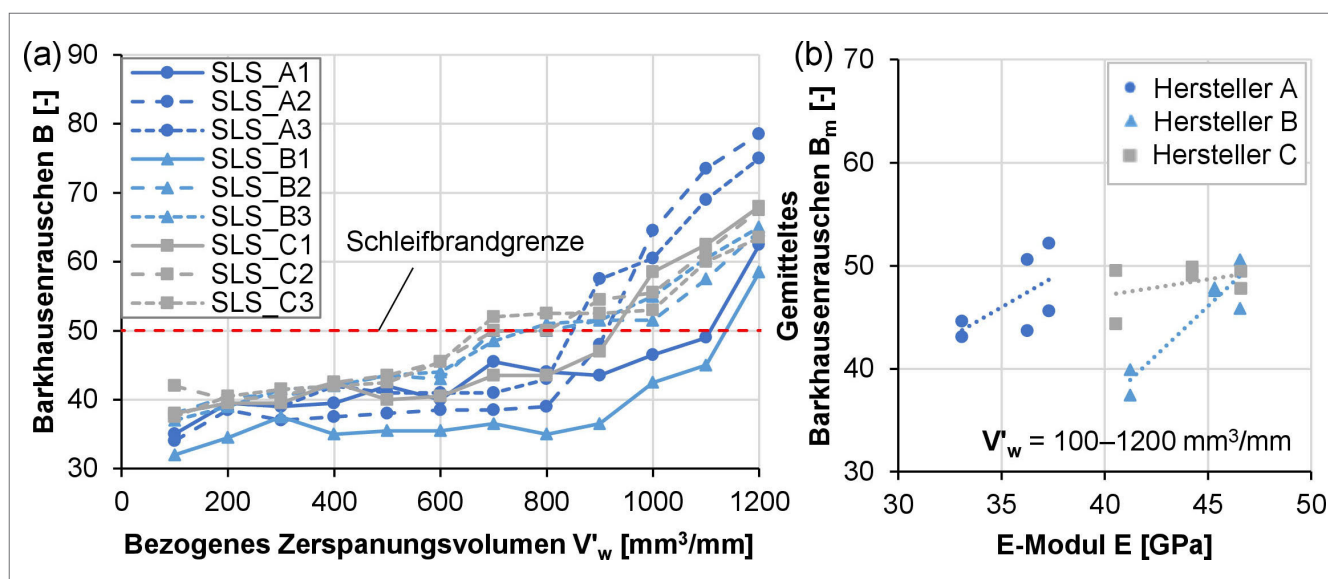


Bild 6 Barkhausenrauschen: (a) Barkhausenrauschen B in Abhängigkeit von bezogenen Zerspanungsvolumen V'_w ; (b) gemitteltetes Barkhausenrauschen B_m in Abhängigkeit vom E-Modul E . Grafik: MTI der RWTH Aachen

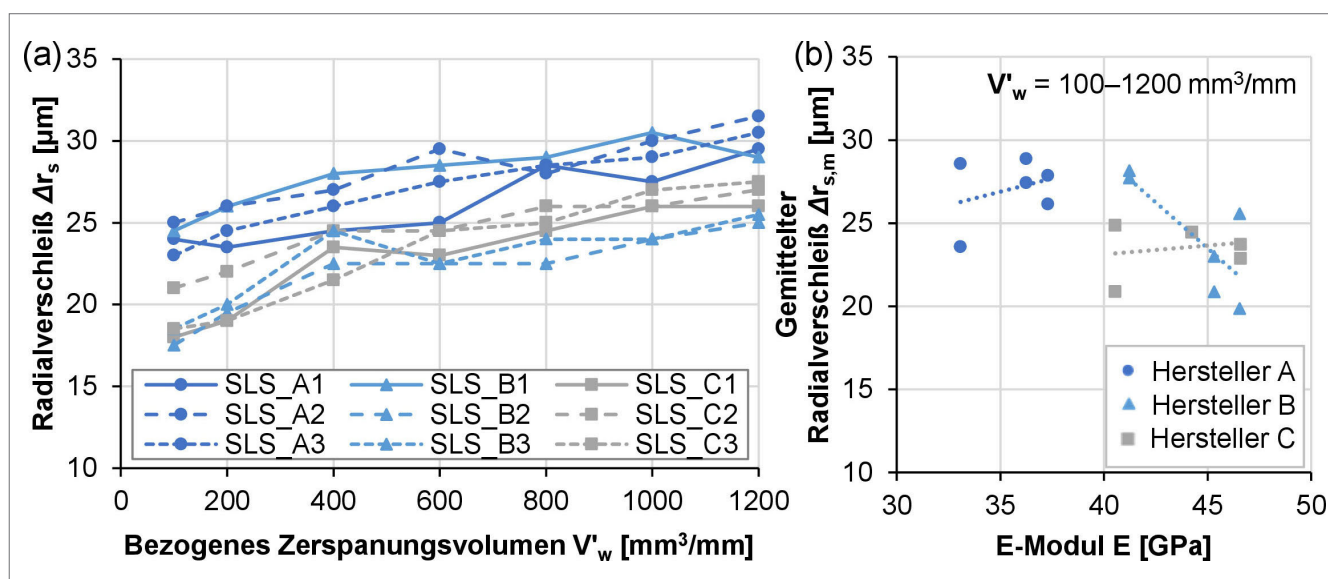


Bild 7 Schleifscheibenradialverschleiß: (a) Radialverschleiß Δr_s in Abhängigkeit von bezogenen Zerspanungsvolumen V'_w ; (b) gemittelter Radialverschleiß $\Delta r_{s,m}$ in Abhängigkeit vom E-Modul E . Grafik: MTI der RWTH Aachen

Daher wird im Folgenden die Schleifscheibentopografie anhand der Daten bei $V'_w = 800$ herangezogen, wie Bild 4 (b) zeigt.

Es ist anzunehmen, dass weichere Schleifscheiben, die demnach zugleich einen niedrigen E-Modul E aufweisen, zu einem höheren Verschleiß neigen. Analog neigen härtere Schleifscheiben mit einem höheren E-Modul E zu einem geringeren Verschleiß. Bild 7 (b) zeigt dieses Verhalten allerdings nur für Hersteller B. Bei Hersteller A und C war kein Zusammenhang zwischen E-Modul E und Verschleiß $\Delta r_{s,m}$ ersichtlich. Dies kann auf eine insgesamt hohe Messstreuung zurückgeführt werden.

4 Zusammenhang zwischen Eingangs-, Zustands- und Ergebnisgrößen

In diesem Kapitel werden die zuvor beschriebenen Eingangs-, Zustands- und Ergebnisgrößen auf ihre Korrelationen und

ursächlichen Zusammenhänge analysiert. Bezüglich der Messergebnisse des Barkhausenrauschens B ist in **Bild 8** zusammengefasst, wie die Eingangsgrößen die Schleifprozessergebnisgrößen beeinflussen. In dieser Abbildung wurden die Schleifscheibentopografie bei einem bezogenen Zerspanungsvolumen von $V'_w = 800 \text{ mm}^3/\text{mm}$ ausgewertet und für die Normalkraft F_n , gemittelte Normalkraft $F_{n,m}$ sowie das Barkhausenrauschen B die Daten im Bereich $V'_w = 100-1200 \text{ mm}^3/\text{mm}$ verwendet.

Zum Einfluss des E-Moduls E auf die Schleifscheibentopografie gilt wie in Kapitel 3.1 beschrieben und in Bild 8 (a) dargestellt: Bei Schleifscheiben mit niedrigem E-Modul E führen Kornausbrüche zu hohen Spk -Werten, wohingegen bei hohem E-Modul E durch das größere Kornhaltevermögen der Bindung primär ein Verschleiß der Kornspitzen auftritt, wodurch Spk -Werte geringer ausfallen (siehe in Bild 8 (a)). Wie in Bild 8 (b) zu erkennen, führt ein hoher Spk -Wert zu einer geringen Normal-

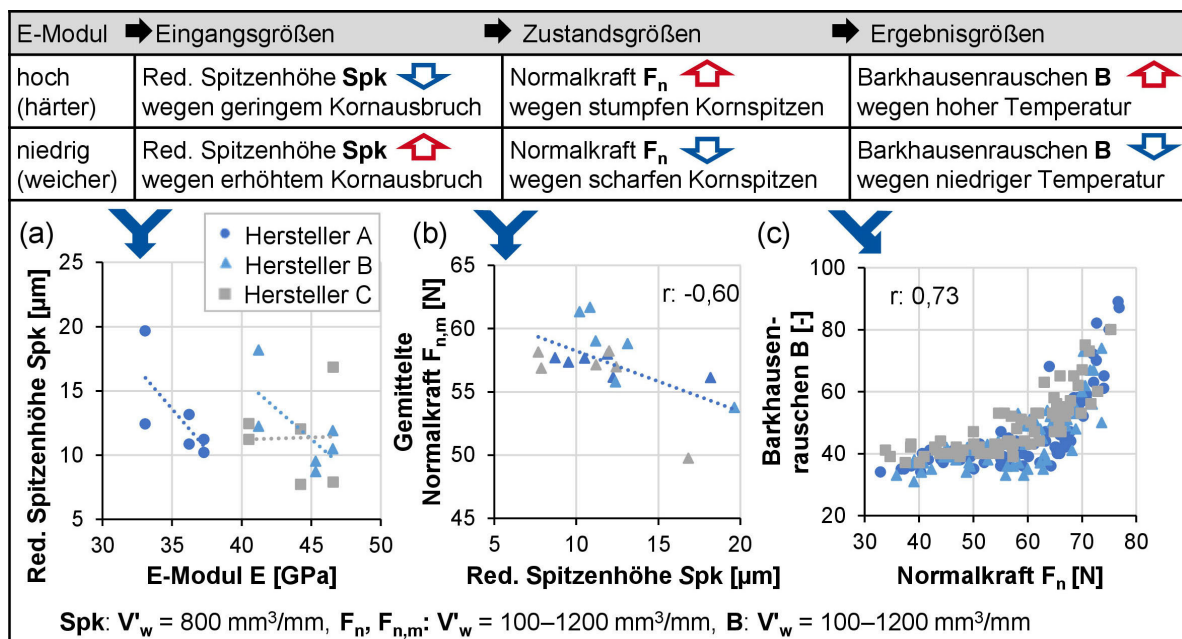


Bild 8 Zusammenfassung der Ursache-Wirkungs-Zusammenhänge zwischen den untersuchten Eingangs-, Zustands- und Ergebnisgrößen: (a) E-Modul E versus reduzierte Spitzenhöhe Spk ; (b) reduzierte Spitzenhöhe Spk versus gemittelte Normalkraft $F_{n,m}$; (c) Normalkraft F_n versus Barkhausenrauschen B . Grafik: MTI der RWTH Aachen

kraft $F_{n,m}$. Es ist anzunehmen, dass dies auf die Senkung des Schleifwiderstands durch scharfe Kornspitzen mit hohem Spk zurückzuführen ist. Weiterhin zeigt Bild 8 (c), dass bei niedrigen Normalkräften F_n das Barkhausenrauschen B klein und bei hohen Normalkräften F_n groß ausfällt. Schleifscheiben mit stumpfen Kornspitzen verursachen eine Zunahme der Schleifkräfte F_n , F_t und der Schleiftemperatur, was letztlich zu einem Anstieg des Barkhausenrauschens B führt. Demnach steigen auch die Zugspannungen an. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Schleifscheibenhärte die Topografie beeinflusst und über die Zustandsgrößen auf das Schleifergebnis wirkt, sodass sie einen der wichtigen Einflussfaktoren darstellt.

5 Fazit und Ausblick

Die mittels RFDA an jeweils drei Schleifscheiben von drei Herstellern (insgesamt neun Schleifscheiben) durchgeführten Messungen des E-Moduls E ergaben, dass trotz identischer Spezifikation die chargenbedingte Härteschwankung innerhalb eines Herstellers zwischen $\Delta E_{min} = 4,2$ und $\Delta E_{max} = 6,0$ GPa lag. Zwischen den Herstellern wurden ebenfalls deutliche Unterschiede im absoluten E-Modul E festgestellt. Dies weist darauf hin, dass für einen absoluten Härtevergleich zwischen unterschiedlichen Herstellern eine Korrektur, beispielsweise durch die Verwendung eines an das Material angepassten Poisson-Wertes ν , erforderlich ist. Ein relativer Vergleich innerhalb desselben Herstellers ist dagegen uneingeschränkt möglich.

Zur Untersuchung des Einflusses dieser Chargenschwankungen auf den Schleifprozess wurden Schleifversuche durchgeführt. Insgesamt lag der Trend vor, dass Schleifscheiben mit niedrigem E-Modul E zu geringen Werten im Barkhausenrauschen B (niedrigere Wärmeeinwirkung auf das Werkstückgefüge) führten,

während Schleifscheiben mit hohem E-Modul E zu höheren Werten (höhere Wärmeeinwirkung auf das Werkstückgefüge) führten. Das heißt, dass Schleifscheiben mit niedrigem E-Modul Schleifbrand erst spät, mit hohem E-Modul jedoch frühzeitig verursachten. Dies war so zu erklären, dass Schleifscheiben mit niedrigem E-Modul E im Verlauf der Bearbeitung eine höhere reduzierte Spitzenhöhe Spk aufwiesen. Durch Kornausbruch konnten scharfe Schneidkanten erhalten bleiben, was die Normalkraft F_n verringerte und die Wärmeentwicklung reduzierte. Im Gegensatz dazu führte bei Schleifscheiben mit hohem E-Modul E der verstärkte Kornspitzenverschleiß zu einem Absinken von Spk , zu einer Erhöhung von F_n und zu einer stärkeren Wärmeentwicklung. Der Einfluss des E-Moduls E auf das gemittelte Barkhausenrauschen B_m wurde durch das Verhältnis $\Delta B_m / \Delta E$ quantitativ bewertet, wobei sich herstellersistenspezifische Unterschiede zeigten. Diese Unterschiede lassen sich darauf zurückführen, dass sich auch das Verhältnis $\Delta Spk / \Delta E$, welches den Einfluss des E-Moduls E auf die reduzierte Spitzenhöhe Spk beschreibt, zwischen den Herstellern unterscheidet.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass Chargenschwankungen des E-Moduls E der verwendeten Schleifwerkzeuge das Schleifergebnis systematisch beeinflussen und dass das Ausmaß dieses Einflusses je nach Hersteller variiert. Die Kenntnis des E-Moduls E vorab erlaubt unter Verwendung eines geeigneten Modells eine präzisere Vorhersage des Schleifergebnisses zum Beispiel Barkhausenrauschen B). Da jedoch eine Offline-Härtemessung mit erheblichem Aufwand verbunden ist, soll künftig ein datengetriebenes Online-Modell entwickelt werden, welches den E-Modul E aus Körperschallsignalen während des Abrichtens oder Schleifens annähert und so eine für den Praxiseinsatz besser geeignete Prozessregelung ermöglicht.

FÖRDERHINWEIS

Diese Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen des Projekts BE 2542/187-1 „Datengetriebene Identifikation und Erklärung von Prozessänderungen infolge von werkstück- und werkzeugseitigen Chargenschwankungen beim Flachsleifen“ (Projektnummer 552756260) gefördert.

LITERATUR

- [1] Malkin, S.; Guo, C. (eds.): Grinding technology. Theory and applications of machining with abrasives. New York: Industrial Press 2008
- [2] Krajnik, P.; Wegener, K.; Bergs, T. et al.: Advances in modeling of fixed-abrasive processes. CIRP Annals 73 (2024) 2, pp. 589–614, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2024.05.001>
- [3] DIN ISO 525: Schleifwerkzeug aus gebundenem Schleifmittel – Formen, Bezeichnung und Kennzeichnung (ISO 525: 2020). Ausgabe Januar 2022
- [4] DIN ISO 8486-1: Schleifkörper aus gebundenem Schleifmittel – Bestimmung und Bezeichnung von Korngrößenverteilung – Teil 1: Makrokörnungen F4 bis F220 (ISO 8486-1:1996). Ausgabe September 1997
- [5] Bot-Schulz, R.: Untersuchung der Reaktionen an der Schnittstelle Korn/Bindung für Sol-Gel-Korund. Dissertation, RWTH Aachen, 2005
- [6] Telle, R.; Salmang, H.; Scholze, H. (Hrsg.): Keramik. Heidelberg: Springer 2007
- [7] Frank, H.; Schulz, S.: Ermittlung von Kennwerten an keramisch- und kunstharzgebundenen Schleifkörpern. Sankt Augustin: Berufsgenossenschaftliches Institut für Arbeitssicherheit, FGS Forschungsbericht 1993
- [8] 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, <https://doi.org/10.1108/IJPPM-01-2016-0028>
- [9] Erhard, F.: Bedeutung von Scheibenhärte und Struktur beim Vollschnittschleifgangschleifen. Maschinenmarkt 83 (1977) 24, S. 408–420
- [10] Rammerstorfer, F.; Hastik, F.: Der dynamische E-Modul von Schleifkörpern. Werkstatt und Betrieb 107 (1974) 9, S. 527–533
- [11] Matsuno, Y.; Yamada, H.: Elastic Moduli of Grinding Wheel Based on a Simplified Model. Yogyo-Kyokai-Shi 90 (1982) 6, pp. 320–325
- [12] Haupt, D.; Möckel, R.: Bestimmung der Härte an Schleifkörpern unter Verwendung physikalisch-mechanischer Kenngrößen. Silikatechnik 35 (1984) 7, S. 195–198
- [13] Blankenburg, S.; Möckel, R.; Clausnitzer, M. et al.: Akustische Härteprüfung zur Schleifkörperauswahl. Werkstatt und Betrieb 118 (1985) 5, S. 267–270
- [14] König, W.; Föllinger, H.: Elasticity modulus of grinding wheels and its impact on their in-process behavior. cfi/Ber. DKG 64 (1987) Nr. 6/7, pp. 220–224
- [15] König, W.; Föllinger, H.: Elasticity modulus of grinding wheels and its impact on their in-process behavior. cfi/Ber. DKG 64 (1987) Nr. 8/9, pp. 296–300
- [16] Reuter, E.; Prinz, S.; Breuer, P. et al.: Werkzeugseitige Chargenschwankungen beim Schleifen. wt Werkstattstechnik online 114 (2024) 10, S. 665–672, <https://doi.org/10.37544/1436-4980-2024-10-93>
- [17] Barth, S.; Klocke, F.: Influence of the Grinding Wheel Topography on the Thermo-Mechanical Stress Collective in Grinding. Inventions 2 (2017) 4, pp. 34, <https://doi.org/10.3390/inventions2040034>
- [18] DIN EN ISO 25178-2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Flächenhaft – Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit (ISO 25178-2:2021); Deutsche Fassung. Ausgabe September 2023
- [19] Sawalem, M. M.; Blaow, M. M.: Evaluation of Residual Stresses in Grinding by Magnetic Barkhausen Noise. The International Journal of Engineering and Information Technology (IJEIT) 2 (2016) 2, pp. 68–72

Shota Kuroiwa, M.Sc. 
kuroiwa-s@nsk.com

NSK Deutschland GmbH
 Harkortstr. 15, 40880 Ratingen
www.nsk.com

Eike Reuter, M.Sc. 

Peter Breuer, M.Sc. 

Sebastian Prinz, 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)

