

## Optimierte Schnittaufteilung mehrstufiger Schleifprozesse

# Tiefenwirkung bei variierten Abrichtbedingungen

G. Kuhlmann, N. Guba, T. Hüseemann, C. Heinzel, B. Karpuschewski

**ZUSAMMENFASSUNG** Prozess- und Abrichtparameter beeinflussen die thermische Wirkung und damit die Energieumwandlung und Randzonenausbildung. Dies wird für einen ein- sowie dreistufigen Schleifprozess gegenübergestellt. Die Randzonen- und Tiefenbeeinflussung bei geänderten Abrichtgeschwindigkeitsverhältnissen verdeutlichen das Potenzial, bei mehrstufigen Prozessen zwischen den Zyklen Stellgrößen produktivitätsoptimiert anzupassen. Zudem kann mit einem schleifleistungsbasierten Modell Schleifbrand detektiert werden.

### STICHWÖRTER

Fertigungstechnik, Schleifen, Energieeffizienz

### Depth effect under varied dressing conditions

**ABSTRACT** Process parameters and dressing conditions influence the thermal load and thus the energy consumption and surface integrity. This is compared for a single-step and multi-step grinding process. By the influence of the thermal impact and its depth effect with changed dressing speed ratio, the potential is shown to vary the dressing conditions and material stock in multi-step processes between the cycles. Furthermore, grinding burn can be detected with a power-based model.

## 1 Einleitung und Motivation

In der Prozesskette von hochbelasteten Komponenten aus Einsatzstahl erfahren diese eine gezielte Wärmebehandlung, um deren Randzoneigenschaften an die Beanspruchungen im Betrieb anzupassen [1]. In der Hart-Feinbearbeitung mittels Schleifen, dem letzten Prozessschritt, werden die Oberflächen- und Randzonenbeschaffenheit final eingestellt [2]. Bearbeitungsbedingt erfährt das Bauteil erneut eine thermomechanische Beanspruchung, die bei fehlerhafter Prozessauslegung zum Ausschuss des Werkstückes aufgrund des Auftretens von thermischen Schädigungen wie beispielsweise Zugeigenspannungen oder Anlasszonen führen kann [3]. Industrielle Schleifprozesse werden in der Regel mehrstufig ausgeführt, wobei sich der resultierende Randzonenzustand aus der Überlagerung der Prozesszyklen zusammensetzt. Nach der Schruppbearbeitung wird eine Schlichtbearbeitung mit geringeren Prozesslasten angegliedert, um hochwertige Funktionsoberflächen mit möglichst hohem Druckeigenspannungsniveau zu erzeugen. Eine aus dem Schruppvorgang eingebrachte Schädigung ist hinsichtlich der Tiefenwirkung als unkritisch zu bewerten, sofern die unerwünschte Modifikation im folgenden Schlichtprozess vollständig abgetragen wird, ohne dabei neue Schädigungen einzubringen. Aus produktivitätstechnischer Sicht sollte möglichst nahe der thermischen Prozessgrenze geschliffen werden [4], wodurch Prozesszeiten reduziert werden können. Hierbei wird jedoch ein hohes Maß an Schleifenergie umgesetzt. Eine Möglichkeit, Prozesse energetisch effizient und schädigungsfrei zu gestalten, ist durch die Wahl geeigneter

Schnittaufteilungen und Abrichtbedingungen gegeben. Diesbezüglich wird in diesem Beitrag ein energetischer Vergleich eines ein- und dreistufigen Prozesses durchgeführt. Aufbauend erfolgt eine Analyse der Randzonentiefenbeeinflussung bei zwei verschiedenen Abrichtgeschwindigkeitsverhältnissen mit einer umfangreichen Charakterisierung der Randzonenzustände und Ermittlung der thermischen Prozessgrenzen für das Auftreten von Schleifbrand. Anhand der Ergebnislage werden abschließend Potenziale aufgezeigt, inwiefern mehrstufige Prozesse energetisch effizient bei schädigungsfreier Schleifbearbeitung ausgelegt werden können.

## 2 Stand der Wissenschaft

### 2.1 Randzonenbeeinflussung beim Schleifen

Das thermomechanische Belastungskollektiv sorgt beim Schleifen für eine geometrische sowie stoffliche Veränderung der Materialeigenschaften in einem begrenzten Werkstoffvolumen, der Randzone. Diese grenzt sich dabei nach außen zur umgebenden Atmosphäre und im Inneren zum unbeeinflussten Werkstoffbereich ab [5]. Falsch ausgelegte Schleifprozesse können durch ihren thermischen Einfluss zu negativen Modifikationen der Randzone führen [6]. Ursächlich für thermisch induzierte Randzonenbeeinflussungen sind innere und äußere Reibvorgänge zwischen den Wirkpartnern sowie Verformungs- und Trennprozesse, wobei in der Kontaktzone der Hauptanteil der zugeführten Energie in Wärme umgewandelt wird. Ein Großteil der Wärme wird über das Werkstück abgeführt, was ein Risiko thermischer Schädigungen des Bauteils birgt. Die Größe der thermischen Bean-

**Werkstück:**

18CrNiMo 7-6 (61 HRC)  
Einsatzgehärtet  
 $d_w = 67,5$  mm  
Anlasstemperatur: 150 °C  
Rand-C: 0,8 %, CHD = 2 mm

**Maschine, Prozess und Schleifscheibe:**

Studer S41, Außenrundeinstechschleifen  
Korundschleifscheibe:  
54A 120 H H15VPMF904W

**Abrichten:**

CVD-Formrolle  
 $a_{ed} = 2 \cdot 20$   $\mu$ m  
 $U_d = 3$   
 $q_d = -1$  und  $+0,8$   
Abrichtvorgänge: 1

**KSS-Zufuhr:**

Freistrahldüse  
Öl: Rhenus EG 10  
 $Q_{KSS} = 40$  l/min  
 $p_{KSS} = 0,9$  bar

**Stellgrößen Versuchsreihe „Dreistufig“:**

$v_s = 35$  m/s  
 $q = 90$   
 $a_e = 300$  und  $200 - 50 - 50$   $\mu$ m  
 $v_{fr} = 0,28$  und  $2,82 - 1,69 - 0,28$  mm/min  
 $Q_w^i = 1$  und  $10 - 6 - 1$  mm<sup>3</sup>/mm·s  
 $q_d = -1$

**Stellgrößen Versuchsreihe „Abrichten“:**

$v_s = 35$  m/s  
 $q = 90$ ,  
 $a_e = 100$   $\mu$ m  
 $v_{fr} = 0,28 - 1,69 - 2,82$  mm/min  
 $Q_w^i = 1 - 6 - 10$  mm<sup>3</sup>/mm·s  
 $q_d = -1$  und  $+0,8$

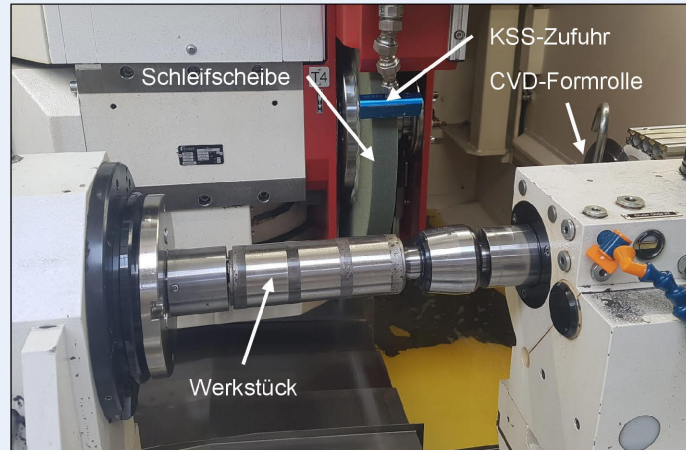


Bild 1. Systemgrößen, Versuchsprogramm und -aufbau. Grafik: IWT Bremen

spruchung hängt wiederum maßgeblich von der Wärmeaufteilung und Kontaktzeit zwischen den einzelnen Wirkpartnern und der Geschwindigkeit ab, mit der die Wärme aus der Kontaktzone transportiert wird [7]. In thermisch stark beeinflussten Werkstücken entstehen je nach eingebrachter Schleifenergie ungewollte Zugeigenspannungen. Der Eigenspannungszustand des Bauteils kann bereits Änderungen aufzeigen, bevor Gefüge- und Härteänderungen detektiert werden können, und dient somit als wichtiges Kriterium für thermische Beeinflussungen [8]. Bei Überschreitung werkstoffspezifischer, kritischer Temperaturen kann es zu ungewollten Gefügeveränderungen kommen, wie die Bildung von Anlass- oder gar Neuhärtungszonen. Das Auftreten dieser Modifikationen wird im Allgemeinen als Schleifbrand bezeichnet und fungiert als thermische Prozessgrenze [9].

## 2.2 Thermische Prozessgrenzen und Randzonendiagramme

Die Detektion von Schleifbrand durch Ermittlung kritischer Temperaturgrenzwerte, die bei Überschreitung zu Gefügeänderungen beziehungsweise -schädigungen führen, wird bereits ausführlich in der Literatur thematisiert. Malkin hat auf Basis der bewegten Wärmequelle nach Carslaw und Jaeger einen analytisch-empirischen Ansatz entwickelt, bei dem unter Verwendung einer werkstoffspezifischen kritischen Kontaktzonen-temperatur eine kritische spezifische Schleifenergie bestimmt wird, bei deren Überschreitung ungewollte Gefügemodifikationen auftreten [10, 11]. In weiteren Arbeiten wurde nachgewiesen, dass neben der spezifischen Energie eine thermische Grenze auch auf Basis der kontaktflächenbezogenen Schleifleistung  $P_c$  in Verbindung mit der Kontaktzeit  $\Delta t$  definiert werden kann. Dabei können die kontaktflächenbezogene Schleifleistung  $P_c$  (Gleichung 1) als ein Maß für die Wärmeintensität und die Kontaktzeit  $\Delta t$  (Gleichung 2) eines auf der neu entstehenden Oberfläche gelegenen Punktes mit der Schleifscheibe (beziehungsweise der bewegten

Wärmequelle) als ein Maß für die Einwirkdauer verstanden werden [12, 13]. Die Größen berechnen sich anhand der Tangentialkraft  $F_t$ , Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , geometrischen Kontaktlänge  $l_g$ , Eingriffsbreite  $a_p$  und tangentialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{ft}$ .

$$P_c = (F_t \cdot v_c) / (l_g \cdot a_p) \quad (1)$$

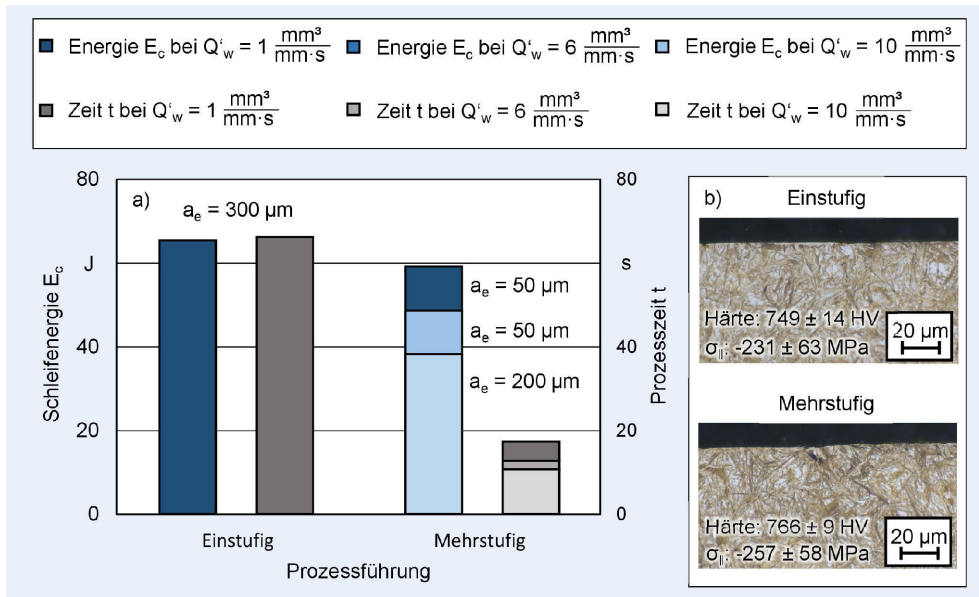
$$\Delta t = l_g / v_{ft} \quad (2)$$

Bei der Erweiterung der sogenannten Randzonendiagramme werden Malkins experimentelle Daten in das  $P_c$ - $\Delta t$ -Diagramm überführt. Dieses Modell ermöglicht die Identifizierung von Schleifbrand an der Werkstückoberfläche bei Überschreitung einer thermischen Grenze auf Basis einer empirisch ermittelten Gleichung [12, 13]. Aus bisherigen Untersuchungen geht die Vermutung hervor, dass Randzonendiagramme eine schleifverfahrensunabhängige thermische Prozessgrenze abbilden. So konnte in [14] die Gültigkeit einer einheitlichen Grenze für das diskontinuierliche Verzahnungsprofilschleifen und das Profilschleifen mit Variation von Stell- und Systemgrößen gezeigt werden. In [15] wurde die Gültigkeit der Grenze für weitere Kontaktzeitbereiche mithilfe des Außenrundscheifens und des kontinuierlichen Wälzschleifens mit komplexer Schleifkinematik nachgewiesen.

## 3 Experimentelle Untersuchungen

### 3.1 Versuchsumgebung und Vorgehensweise

Die Schleifversuche erfolgten mit einer Rundscheifmaschine des Typs S41 der Fritz Studer AG an zylindrischen, einsatzgehärteten Werkstücken aus 18CrNiMo7-6 mit einer Korundschleifscheibe beim Außenrundeinstechschleifen. Während des Schleifprozesses wurden Tangentialkräfte durch jeweils ein in der Werkstückspindel und im Reitstock integriertes piezoelektrisches



**Bild 2.** Energetische Betrachtung beim ein- sowie dreistufigen Prozess (a). Gefügeschliffe, Oberflächenhärte und -eigenstressungen (b). Grafik: IWT Bremen

Messsystem von Kistler aufgezeichnet, um die kontaktfächenbezogene Schleifleistung  $P_c$  nach Gleichung 1 zu berechnen. Die Einstellung unterschiedlicher spezifischer Zeitspanvolumina  $Q'_w$  erfolgte durch Variation der radialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fr}$ . Die Abrichtbedingungen wurden durch Änderung des Abrichtgeschwindigkeitsquotienten  $q_d$  variiert. Die Kühlschmierstoffzufuhrbedingungen blieben konstant.

Im Rahmen des Beitrages erfolgt eine energetische Betrachtung eines ein- und dreistufigen Schleifprozesses mit industrienahe Schrupp- und Schlichtaufteilung. Mit zwei unterschiedlichen Abrichtbedingungen wird das Ziel verfolgt, die Einflussnahme thermischer Prozesslasten auf die Randzonenausbildung zu untersuchen und das Optimierungspotenzial mehrstufiger Prozesse aufzuzeigen. **Bild 1** zeigt alle Stell- und Systemgrößen der beiden Versuchsreihen sowie den Versuchsaufbau. Die Charakterisierung der Randzonen erfolgte anhand von metallographischen Gefügeschliffen, Härte- und Rauheitsmessungen sowie Eigenspannungstiefenverläufen.

### 3.2 Ein- und mehrstufige Prozesszyklusgestaltung

Zunächst erfolgt eine energetische Gegenüberstellung zwischen einem einstufigen- sowie dreistufigen Schleifprozess. Beim einstufigen Prozess wird ein konstantes bezogenes Zeitspanvolumen von  $Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$  bei einer Zustellung von  $a_c = 300 \mu\text{m}$  gewählt. Beim dreistufigen Prozess wird das bezogene Zeitspanvolumen von  $Q'_w = 10 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$  bei  $200 \mu\text{m}$  Aufmaß fürs Schruppen über  $Q'_w = 6 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$  bei  $a_c = 50 \mu\text{m}$  Aufmaß fürs Schlichten bis hin zu  $Q'_w = 1 \text{ mm}^3/\text{mm} \cdot \text{s}$  bei  $a_c = 50 \mu\text{m}$  Aufmaß fürs Feinschlichten gesenkt. Mit der jeweilig umgesetzten Schleifleistung  $P_c$  und der Prozesszeit  $t$  lässt sich die Schleifenergie  $E_c$  berechnen (Gleichung 3).

$$E_c = P_c \cdot t = F_t \cdot v_c \cdot t \quad (3)$$

Im mehrstufigen Prozesszyklus wird trotz höherer bezogener Zeitspanvolumina circa 12,6 % weniger Energie umgesetzt bei einer Reduzierung der Prozesszeit um circa 72,4 % (**Bild 2 a**). Die dazugehörige Randzonencharakterisierung zeigt anhand der

Schliffbilder sowie der gemessenen Oberflächenhärten und tangentialen Eigenspannungen  $\sigma_{II}$ , dass bei beiden Prozessausführungen ein schädigungsfreies Gefüge mit Druckeigenspannungen resultierte (**Bild 2 b**). Beim dreistufigen Prozess liegen im Vergleich ein höherer gemessener Härte- sowie Druckeigenspannungswert vor. Dies ist darauf zurückzuführen, dass durch die geringere umgesetzte Schleifenergie das Gefüge weniger thermisch beeinflusst wird. Es ist davon auszugehen, dass beim Feinschlichten geringere Werkstofftemperaturen vorliegen als gegenüber dem verbleibenden Aufmaß von  $50 \mu\text{m}$  für den einstufigen Prozess. Der mehrstufige Prozess verdeutlicht somit das Potenzial einer schnelleren und energetisch günstigeren Bearbeitung bei ebenfalls vorteilhaften Randzoneneigenschaften mit schädigungsfreiem Gefüge.

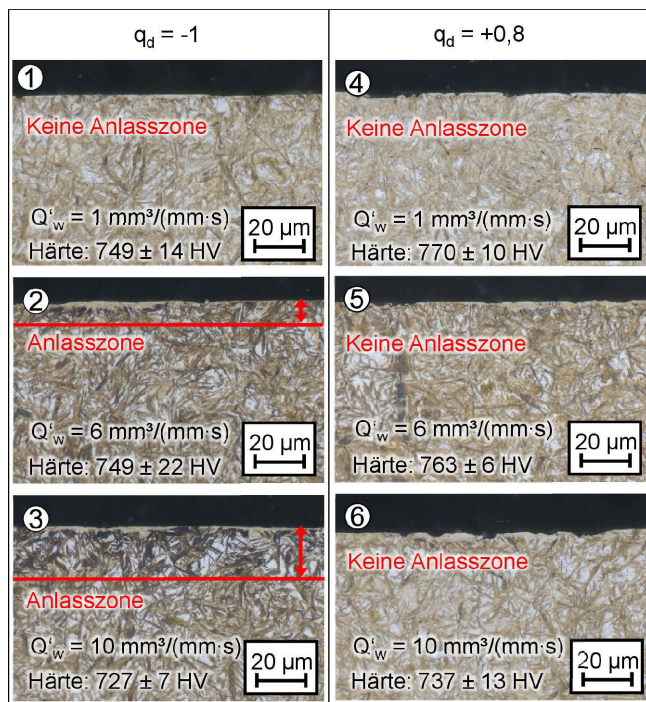
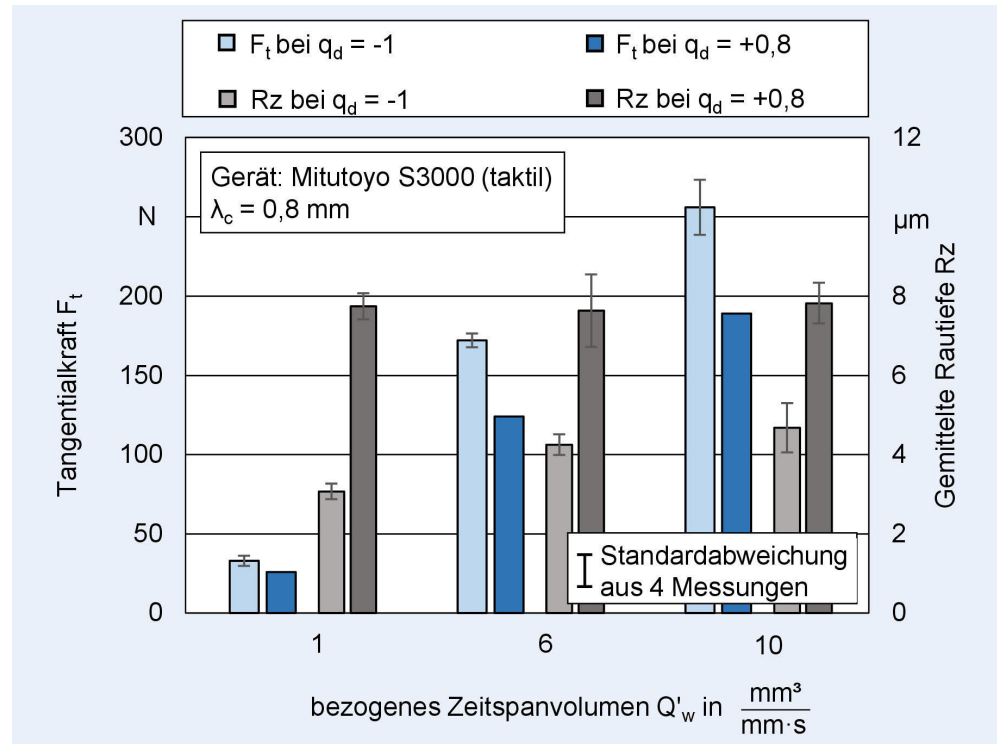
Die Abrichtbedingungen beim Schleifen haben direkte Auswirkungen auf die umgesetzte Energie. Die Anzahl der am Prozess aktiven Körner und ihr Schärfeegrad werden als die beiden topografischen Einflussfaktoren für die Umsetzung der Schleifleistung angesehen [16, 17]. Eine Möglichkeit zur Energieeinsparung erscheint nur dann sinnvoll, wenn zugleich das Arbeitsergebnis im Hinblick auf die geforderte Oberflächenqualität nicht nachteilig beeinflusst wird. Zur weiteren Betrachtung wird daher der Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses auf das Potenzial der Prozess- und Randzonenoptimierung untersucht.

### 3.3 Randzonen- und Tiefenbeeinflussung bei variierten Abrichtbedingungen

Im Folgenden wird der Einfluss von zwei unterschiedlichen Abrichtbedingungen auf die Randzonen- sowie Tiefenbeeinflussung bei einstufigen Prozessen ausgewertet. Die Abrichtbedingungen entscheiden über die Gestalt der Schleifscheibentopografie, die je nach ihrer Ausprägung zu unterschiedlichen Belastungseinflüssen bei der Interaktion mit dem Werkstück führt. Ein Vergleich der Tangentialkräfte und der gemittelten Rautiefe  $R_z$  in **Bild 3** zeigt, dass sich für ein geändertes Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = -1$  (Gegenlauf) auf  $q_d = +0,8$  (Gleichlauf) geringere Kräfte und höhere Rauheitswerte bei Steigerung des bezogenen Zeitspanvolumens  $Q'_w$  ergeben. Im Gleichlauf ab-

**Bild 3.** Gegenüberstellung der Tangentialkraft und gemittelten Rautiefe bei variiertem bezogenen Zeitspanvolumen und Abrichtbedingungen.

Grafik: IWT Bremen



**Bild 4.** Schliffbilder mit Tiefenwirkung der Anlasszonen und Oberflächenhärten bei variiertem bezogenen Zeitspanvolumen und Abrichtbedingungen. Grafik: IWT Bremen

gerichtete Schleifscheiben verfügen über eine höhere Wirkrautiefe und damit einer raueren Schnitt- sowie kleineren Interaktionsfläche mit scharfkantigen Körnern. Der konstante Rz-Wert kann darauf zurückgeführt werden, dass kaum Zusetzungs- oder Verschleißerscheinungen auftreten, weshalb trotz höherer Prozesskräfte keine ausschlaggebende Änderung der Schleifschei-

benetopographie resultiert. Der Materialabtrag mit der im Gleichlauf abgerichteten Schleifscheibe gestaltet sich somit effizienter bei gleichzeitig geringerer thermischer Beanspruchung der Randzone, jedoch mit einer schlechteren Oberflächenqualität, was charakteristisch für einen Schruppprozess ist.

Zur Beurteilung der thermischen Beeinflussung des Gefüges in die Tiefe werden metallographische Schläffe angefertigt. Die vermutete reduzierte thermische Belastung für die schärfere Schleifscheibe bei gleichen bezogenen Zeitspanvolumina  $Q'_w$  lässt sich bei Betrachtung der jeweiligen Schliffbilder in **Bild 4** bestätigen. Bei einem Wert von  $q_d = -1$  ergeben sich ausgehend von  $Q'_w = 6 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  Anlasszonen mit zunehmender Ausbreitung in die Tiefe, wie im linken Teilbild gezeigt. Andererseits resultierten bei Einsatz des schärferen Werkzeugs für alle Versuche keine sichtbaren Anlasszonen auf der Oberfläche, was auf eine geringere umgesetzte Schleifleistung hindeutet. Eine Gegenüberstellung der Versuchspunkte eins und vier verdeutlicht für beide Abrichtbedingungen einen unbeeinflussten Gefügestand. Mit Steigerung des bezogenen Zeitspanvolumens folgt ebenfalls eine Abnahme der Oberflächenhärte. Dies fällt für die im Gleichlauf abgerichtete Schleifscheibe ebenfalls geringer aus, was insgesamt auf einen thermisch unkritischeren Prozess hindeutet.

Die metallographischen Gefügeschläffe zeigen, dass das bezogene Zeitspanvolumen  $Q'_w$  nicht als alleiniges Beurteilungskriterium für thermische Prozesslasten ausreicht. Geringere Tangentialkräfte  $F_t$  bei der schneidfreudigeren Schleifscheibentopografie resultieren in geringeren kontaktflächenbezogenen Schleifleistungen bei sonst gleichen Kontaktzeiten und Zeitspanvolumina. In **Bild 5** sind die jeweiligen Versuchspunkte im Randzonen-diagramm mit Berücksichtigung der Prozessgrenze nach *Malkin* dargestellt. Die Punkte, bei denen keine sichtbaren Anlasszonen aufgetreten sind, werden grün eingefärbt und liegen unterhalb der Schleifbrandgrenze. Gefügeschläffe mit vorliegender thermischer Schädigung werden rot dargestellt. Zu erkennen ist, dass

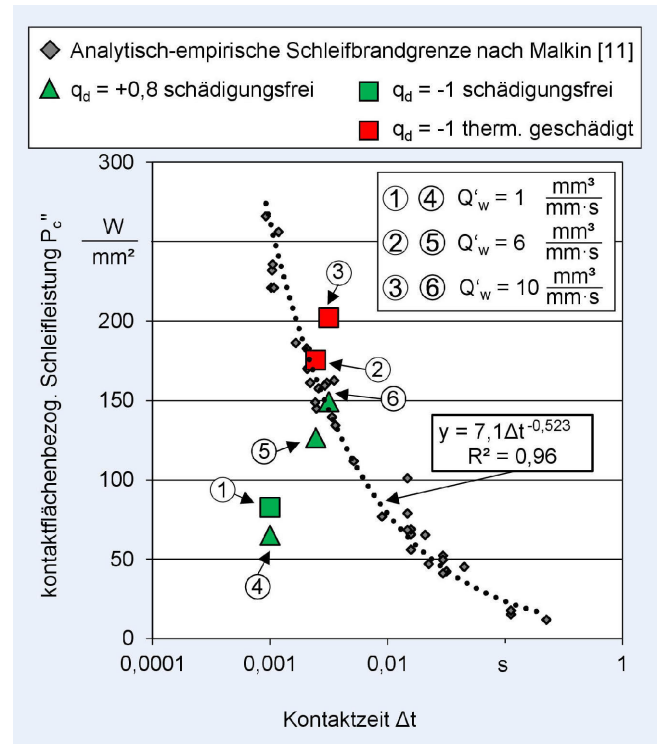
mit Zunahme des bezogenen Zeitspanvolumens die Punkte sich der Grenze annähern und im Fall der stumpferen Schleifscheibe ( $q_d = -1$ ) sogar überschreiten. Die vorliegenden Gefügeschliffe bestätigen die Grenze im Randzonendiagramm und unterstreichen die Zuverlässigkeit des Modells, Schleifbrand detektieren zu können. Im Fall der Punkte zwei und sechs liegen diese knapp über beziehungsweise auf der Grenze. Eine klare Unterscheidung zwischen Gut- und Ausschussteil ist nicht ohne weiteres möglich, da bereits kritische Zugeigenspannungen vor sichtbaren Anlasszonen vorliegen können und die Unterscheidung von den anwenderspezifischen Ausschusskriterien abhängig ist.

Zur Bewertung des Eigenspannungszustandes sind in **Bild 6** die Tiefenverläufe dargestellt. Für beide Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisse verlagern sich die Eigenspannungen mit zunehmendem bezogenem Zeitspanvolumen  $Q'_w$  in Richtung Zug beziehungsweise in den Zugbereich hinein. Dies ist auf die ansteigende thermische Wirkung zurückzuführen, deren Wirkung ebenfalls in den Gefügeschliffen sowie im Randzonendiagramm erkennbar ist. Die Eigenspannungstiefenverläufe mit im Gegenlauf abgerichteten Schleifscheiben bleiben dabei vollständig im Druckbereich. Somit lässt sich der Versuchspunkt sechs mit höchstem bezogenen Zeitspanvolumen als Gutteil deklarieren. Dies bestätigt ebenfalls die geringere thermische Belastung bei einem Abrichtgeschwindigkeitsquotienten  $q_d = +0,8$ . Der Versuchspunkt zwei zeigt in einer Tiefe von  $10 \mu\text{m}$  bereits Zugeigenspannungen. Mit der im Gleichlauf abgerichteten Schleifscheibe wird selbst beim höchsten gewählten bezogenen Zeitspanvolumen eine schädigungsfreie Randschicht mit Bildung von Druckeigenspannungen erreicht, während im Gegenlauf bereits bei Versuchspunkt zwei Anlasszonen und Zugeigenspannungen vorliegen.

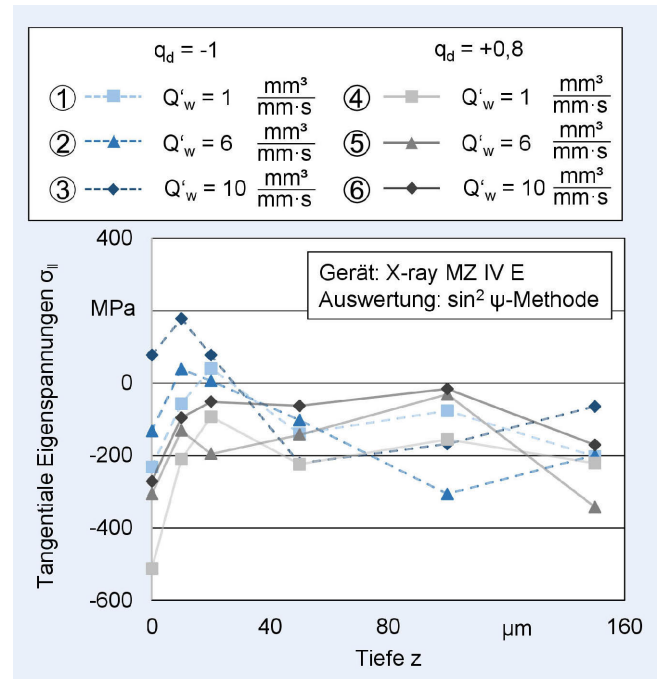
Mit der höchsten Abtragsrate wird unter geänderten Abrichtbedingungen ein schädigungsfreies Gefüge mit vorteilhaften Randzoneneigenschaften erzielt. Somit liegt die Vermutung nahe, dass eine weitere Optimierung des dreistufigen Prozesses durch eine noch größere Zustellung beim Schrappzyklus bei weiterhin schädigungsfreiem Gefüge möglich wäre. Weiterhin verdeutlichen die Ergebnisse das Potenzial, den mehrstufigen Schleifprozess durch gezielte Anpassung der Abrichtbedingungen hinsichtlich Energiebedarf und Randzoneneigenschaften zu verbessern.

#### 4 Zusammenfassung und Ausblick

Die dargestellten Ergebnisse verdeutlichen Zusammenhänge zwischen Stell- und Prozessgrößen, Abrichtgeschwindigkeitsverhältnissen, Randzoneneigenschaften und deren Tiefenbeeinflussung für einen ein- sowie dreistufigen Schleifprozess. Zunächst wurde ein einstufiger mit einem dreistufigen Schleifprozess verglichen. Dabei wurde festgestellt, dass trotz höherer bezogener Zeitspanvolumina im dreistufigen Prozess weniger Energie aufgrund der kürzeren Prozesszeit umgesetzt wurde und beide Prozessvarianten zu einem schädigungsfreiem Gefüge mit Druckeigenspannungen führten. Anschließend erfolgte eine Änderung der Schleifscheibentopographie durch Variation des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses. Die Tiefenbeeinflussung des Gefüges wurde durch metallographische Schliffe und Eigenspannungstiefenverläufe analysiert. Bei den untersuchten Abrichtbedingungen wurde mit einer im Gleichlauf abgerichteten Schleifscheibe eine schädigungsfreie Randschicht mit Druckeigenspannungen erreicht, während bei einer im Gegenlauf abgerichteten Schleifscheibe bereits ab einem bezogenen Zeitspanvolumen



**Bild 5.** Darstellung der Versuchspunkte im Randzonendiagramm mit Berücksichtigung der überführten Schleifbrandgrenze nach Malkin zur Detektion von Schleifbrand. Grafik: IWT Bremen



**Bild 6.** Gegenüberstellung der Eigenspannungstiefenverläufe in Schleifrichtung bei variierten bezogenen Zeitspanvolumina und Abrichtbedingungen. Grafik: IWT Bremen

von  $Q'_w = 6 \text{ mm}^3/\text{mm}\cdot\text{s}$  Anlasszonen und Zugeigenspannungen vorlagen. Im Randzonendiagramm konnte die thermische Prozessgrenze für die untersuchten Schleifprozesse dargestellt und anhand der Schliffbilder bestätigt werden.

Insgesamt verdeutlichen beide Versuchsreihen das Potenzial Schleifprozesse hinsichtlich ihrer energetischen Bilanz mit geringerer thermischer Beanspruchung bei gleichzeitig vorteilhaften Randzoneigenschaften zu optimieren. Die generierten Erkenntnisse bilden die Basis um in weiteren Forschungsansätzen eine optimierte Schnittaufteilung zu untersuchen. Zur Hauptzeitreduzierung kann beim Schruppen eine Überschreitung der thermischen Prozessgrenze bewusst hingenommen und damit eine Schädigung in die Tiefe akzeptiert werden. Durch eine gezielte, an der Schädigungstiefe orientierte Auslegung der Zustellung des anschließenden Schlichtprozesses soll die Zyklusgestaltung zukünftig so angepasst werden, dass keine negativen Randzonenmodifikationen verbleiben.

### FÖRDERHINWEIS

Die Arbeit wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft DFG im Rahmen des Schwerpunktprogramms SPP 2086 (Projekt 401804277) und des Projektes 508491085 gefördert. Die Autoren danken der DFG für die finanzielle und technische Förderung.

### Literatur

- [1] Thiemann, P.; Dollinger, C.; Goch, G.: Untersuchungen zum Phänomen Schleifbrand. HMT J. Heat Treat. 69 (2014)
- [2] Jawahir, I.S.; Brinksmeier, E.; M'Saoubi, R.; Aspinwall, D.K.; Outeiro, J.C.; Meyer, D. et al.: Surface integrity in material removal processes: recent advances. CIRP Annals – Manufacturing Technology 60 (2011) S. 603–26
- [3] Tönshoff, H.K.; Brinksmeier, E.: Determination of the Mechanical and Thermal Influences on Machined Surfaces by Microhardness and Residual Stress Analysis. CIRP Annals – Manufacturing Technology 29 (1980)
- [4] Sackmann, S.; Hüsemann, T.; Karpuschewski, B.: Der Einfluss eines mehrstufigen Schleifprozesses auf das Barkhausenrauschen. Schleifen, Honen, Läppen und Polieren – Verfahren und Maschinen 70 (2022), S. 134–147
- [5] Brinksmeier, E.: Randzonenanalyse geschliffener Werkstücke. Dissertation, Universität Hannover, 1988
- [6] Holtermann, R.; Schumann, S.; Zabel, A.; Biermann, D.; Menzel, A.: Numerical Determination of Process Values Influencing the Surface Integrity in Grinding. Procedia CIRP 45 (2016) S.39–42
- [7] Rowe, W.B.; Pettit, J.A.; Boyle, A.; Moruzzi, J.L.: Avoidance of thermal damage in Grinding and Prediction of the Damage Threshold. CIRP Annals 37 (1988) S. 327–330
- [8] Karpuschewski, B.: Mikromagnetische Randzonenanalyse geschliffener einsatzgehärteter Bauteile. Dissertation, Universität Hannover, 1995
- [9] Jermolajev, S.; Epp, J.; Heinzel, C.; Brinksmeier, E.: Material Modifications Caused by Thermal and Mechanical Load During Grinding. Procedia CIRP 45 (2016) S.43–46
- [10] Carslaw, H.; Jaeger, J. C.: Conduction of heat in solids. Oxford Science Publications (1959). (Hrsg.): Oxford University Press
- [11] Malkin, S.; Lenz, E.: Burning limit for surface and cylindrical grinding of steels. CIRP Annals 27/1 (1978) S. 233–236
- [12] Heinzel, C.; Sölter, J.; Jermolajev, S.; Kolkwitz, B.; Brinksmeier, E.: A versatile method to determine thermal limits in grinding. Procedia CIRP 13 (2014) S. 131–136
- [13] Guba, N.; Heinzel, J.; Heinzel, C.; Karpuschewski, B.: Grinding burn limits: Generation of surface layer modification charts for discontinuous profile grinding with analogy trials. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 31 (2020) S. 99–107
- [14] Heinzel, J.: Thermische Prozessgrenzen beim Schleifen erkennen. Dissertation, Universität Bremen, 2022
- [15] Heinzel, C.; Heinzel, J.; Guba, N.; Hüsemann, T.: Comprehensive analysis of the thermal impact and its depth effect in grinding. CIRP Annals – Manufacturing Technology 00 (2021)
- [16] Wegener, K.; Hoffmeister, H.-W.; Karpuschewski, B.; Kuster, F.; Hahmann, W.-C.; Rabiye, M.: Conditioning and monitoring of grinding wheels. CIRP Annals – Manufacturing Technology (2011)
- [17] Macerol N.; Franca LFP; Drazumeric R.; Krajnik P.: The Effects of Grit Properties and Dressing on Grinding Mechanics and Wheel Performance: AnalyticalAssessment Framework. International Journal of Machine Tools and Manufacture (2022)



**Gerrit Kuhlmann, M.Sc.**  
Foto: Autor

**Nikolai Guba, M.Sc.**

**Dr.-Ing. Tobias Hüsemann**

**Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Heinzel**

**Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Dr. h.c. Dr. h.c. Bernhard Karpuschewski**

Leibniz-Institut für Werkstofforientierte Technologien IWT und Universität Bremen  
FB4, Fachgebiet Fertigungsverfahren  
Badgasteiner Str. 3, 28359 Bremen  
Tel. +49 421 / 218-51141  
gkuhlmann@iwt-bremen.de  
www.iwt-bremen.de

### LIZENZ



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