

doi.org/10.37544/1436-4980-2026-05-65
Datum der Einreichung: 23.02.2026
Datum der Annahme: 08.04.2026
Datum der Veröffentlichung: 24.06.2026

Verhalten der Werkzeugdeformation beim Einsatz von Schleifmittel auf Unterlage

Analyse der Werkzeugdeformation beim Bandschleifen

E. Uhlmann, J. Henning, M. Walter

ZUSAMMENFASSUNG In diesem Beitrag wird das Deformationsverhalten elastischer Werkzeugsysteme beim Bandschleifen untersucht. Anhand quasistatischer Druckversuche, Zentrifugalkraftmessungen und kontaktmechanischer Analysen werden die Einflüsse von Kontaktrollenhärte h_k und Schleifbandunterlage auf Normalkraft F_n , Kontaktfläche A_0 und effektive Zustellung $a_{e,eff}$ analysiert. Die Ergebnisse zeigen ausgeprägte nichtlineare Zusammenhänge mit direktem Einfluss auf Prozessstabilität und Arbeitsergebnis.

STICHWÖRTER

Schleifen, Feinbearbeitung, Produktionstechnik

Behavior of tool deformation when using Abrasive Media on a Backing – Analysis of tool deformation in belt grinding

ABSTRACT This paper investigates the deformation behavior of elastic tool systems in belt grinding. Quasi-static compression tests, centrifugal force measurements, and contact-mechanical analyses are used to study the influence of contact wheel hardness h_k and abrasive belt backing on normal force F_n , contact area A_0 , and effective depth of cut $a_{e,eff}$. The results reveal pronounced nonlinear relationships with a direct impact on process stability and machining results.

1 Einleitung

Elastische Schleifwerkzeuge gewinnen aufgrund ihrer hohen Flexibilität zunehmend an Bedeutung im industriellen Umfeld [1, 2, 3]. Besonders hervorzuheben sind Werkzeugsysteme mit elastischen Kontaktelementen, wie sie beispielsweise beim Bandschleifen eingesetzt werden. Entsprechende Anwendungen finden sich insbesondere in der Endbearbeitung funktionaler Oberflächen zylindrischer Bauteile wie Nocken- und Kurbelwellen sowie bei der Bearbeitung komplex geformter Freiformflächen, etwa im Turbomaschinen- und Luftfahrtbereich [4]. Im Gegensatz zu starr gebundenen Schleifscheiben, bei denen die Schleifkörner metallisch, keramisch oder kunstharzgebunden sind, erlauben elastische Schleifwerkzeuge durch den Einsatz von elastischen Unterlagen und einer Kunstharzbindung eine gezielte Einstellung der Werkzeugelastizität über einen weiten Bereich [2, 5, 6, 7]. Die flexiblen Eigenschaften des Werkzeugsystems, bestehend aus Schleifband und Kontaktrolle, werden maßgeblich durch das Laufpolster der Kontrolle bestimmt. Das Laufpolster besteht aus Nitrilkautschuk und bestimmt die Kontaktrollenhärte h_k die üblicherweise im Bereich zwischen 40° Shore und 90° Shore liegt [8, 9]. Trotz der breiten industriellen Anwendung ist der Einfluss der Werkzeugelastizität auf wesentliche Prozessgrößen wie elastisch effektive Zustellung $a_{e,eff}$, Formabweichungen und Oberflächenqualität bislang nur unzureichend untersucht. Die Prozessauslegung erfolgt daher häufig auf Basis empirischer Zusammenhänge und Erfahrungswerte [8, 9, 10]. Eine zentrale Herausforderung besteht in der Beschreibung des nichtlinearen Material- und Prozessverhaltens des elastischen Werkzeugsystems sowie dessen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Insbesondere

die Wechselwirkungen zwischen der Steifigkeit des Schleifbandes und der Kontaktrollenhärte h_k führen zu prozessspezifischen, bislang nicht vollständig verstandenen Systemüberlagerungen. Diese äußern sich auf makroskopischer Ebene in Formabweichungen und auf mikroskopischer Ebene in Veränderungen der Oberflächenrauheit. Ziel ist es daher, die Quantifizierung elastischer Prozessinteraktionen zwischen Schleifband, Kontaktrolle und Werkstück zu verstehen, um Vorhersagen zu diesem Verhalten treffen zu können. Als Untersuchungsprozess wird das Längs-Plan-Bandschleifen gewählt, da es industriell weit verbreitet ist [5, 11].

2 Methodik und Versuchsaufbau

2.1 Statische Verformungsuntersuchungen des Werkzeugsystems

Zur Analyse der Verformungseigenschaften des Werkzeugsystems, bestehend aus Kontaktrolle und Schleifband, wurden zunächst quasistatische Druckversuche ohne aktiven Schleifprozess durchgeführt. Ziel dieser Untersuchungen war es, den Einfluss der Kontaktrollenelastizität sowie der Interaktion zwischen Kontaktrolle und Schleifband auf das Verformungsverhalten zu quantifizieren und geeignete Kenngrößen für den Vergleich mit dem technologischen Schleifprozess abzuleiten. Hierzu wurden drei Kontaktrollen mit unterschiedlichen Kontaktrollenhärten von $h_k = 40^\circ$, 60° und 80° Shore eingesetzt. Die Versuche erfolgten an einer Zug-Druck-Prüfmaschine des Typs „Z150“ der Firma Zwick & Roell AG, Ulm. Die Kontaktrollen mit einer Breite von $b_s = 20$ mm wurden mit definierten Zustellung a_e verfahren, während die resultierende Normalkraft F_n erfasst wurde. Es wurden zwei Belastungsfälle untersucht:

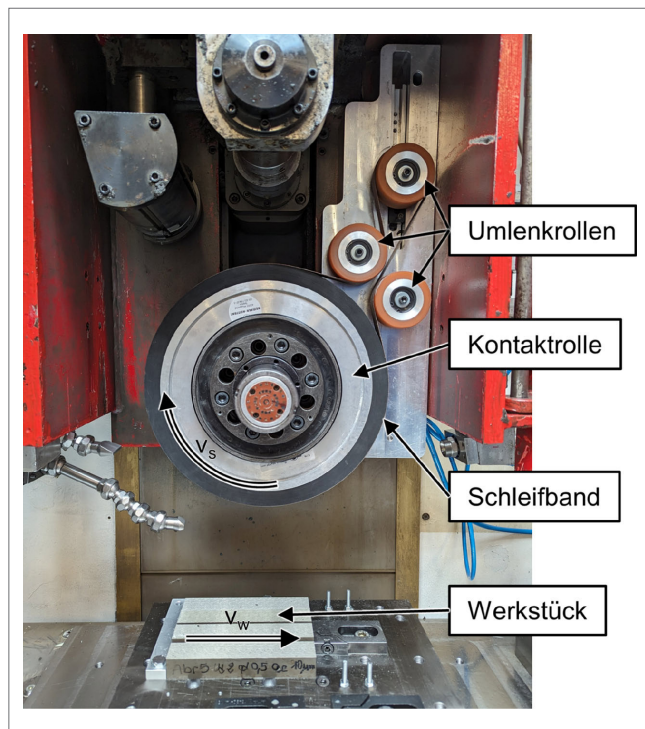


Bild 1 Spindelkasten mit Bandschleifmodul und 2D-Profilillaser.
Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin

- Belastungsfall 1: vollflächiger Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück mit einer Werkstückbreite von $b_{sw} = 25 \text{ mm}$
- Belastungsfall 2: teilflächiger Kontakt mit einer Werkstückbreite von $b_{sw} = 15 \text{ mm}$

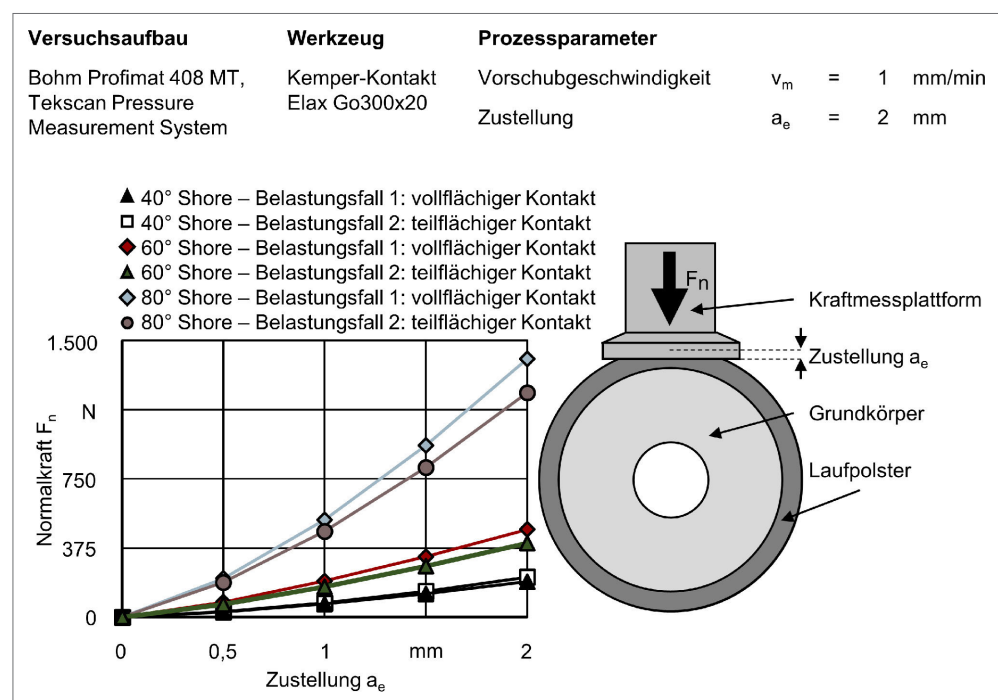
Alle Messungen wurden jeweils fünfmal durchgeführt und gemittelt. Die Zustellung wurde konstant auf $a_e = 2 \text{ mm}$ eingestellt, wodurch in Abhängigkeit der Kontaktrollenhärte h_k verschiedene Vorspannkraft F_s resultierten. Die Untersuchungen wurden für Kontaktrollen mit einer Kontaktrollenhärte von $h_k = 40^\circ, 60^\circ$ und

80° Shore durchgeführt, jeweils für beide Belastungsfälle. Die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist im Piktogramm von **Bild 2** zu sehen. Im zweiten Teil dieser Experimente wurde der Einfluss der Schleifbänder auf das Deformationsverhalten im Werkzeugsystem untersucht. Dafür wurden die zwei Schleifbandspezifikationen mit den unterschiedlichen Unterlagen JF und XP um die Kontaktrolle geführt. Beide Unterlagen bestehen aus einem Polyestergerewebe. JF ist dabei die Unterlage mit einem leichten, flexiblen Gewebe und XP ist ein schweres Gewebe [13]. Um darüber hinaus noch mögliche Effekte der Vorspannkraft F_s zu untersuchen, wurde das Schleifband mit drei verschiedenen Vorspannkraften von $F_s = 0 \text{ N}$, 50 N und 100 N beaufschlagt. Die schematische Darstellung des Versuchsaufbaus ist im Piktogramm von **Bild 3** im Kapitel 3.2 zu sehen. Zusätzlich wurde bei diesem Versuchsaufbau die Druckmessfolie „Prescale“ der Firma Fujifilm Europe GmbH, Ratingen, zwischen dem Werkzeugsystem und der Kontaktzone platziert, um Einflüsse der Kontaktrollenhärte h_k und der Schleifbandunterlage auf die Kontaktfläche A_0 zu analysieren.

2.2 Untersuchung der Fliehkraftverformung

Zur Analyse des Einflusses der Fliehkraft F_z auf die Verformung der Kontaktrolle wurden Profilmessungen während der Rotation des Werkzeugsystems durchgeführt. Die Erfassung der radialen Profilverformung erfolgte mittels eines 2D-Laser-Triangulationssensors „scanControl 3060-50“ der Firma Micro Epsilon Messtechnik GmbH, Ortenburg, mit einer Auflösung von $\eta_x = 1 \mu\text{m}$. Die Messungen wurden für Kontaktrollen mit unterschiedlichen Shore-Härten sowohl mit als auch ohne Schleifband durchgeführt. Für die ermittelten Profile unter Rotation wurden statische Referenzmessungen vorgenommen, um die maximale radiale Ausdehnung $\Delta r_{\max}$ zu bestimmen. Die Versuche wurden direkt in der Werkzeugmaschine „Profimat MT 408“ der Firma Blohm Jung GmbH, Hamburg, durchgeführt. **Bild 1** zeigt den Versuchsaufbau.

Bild 2 Druckversuche ohne Schleifband zur Erfassung der Normalkraft F_n unter weggebundener Verformung. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin



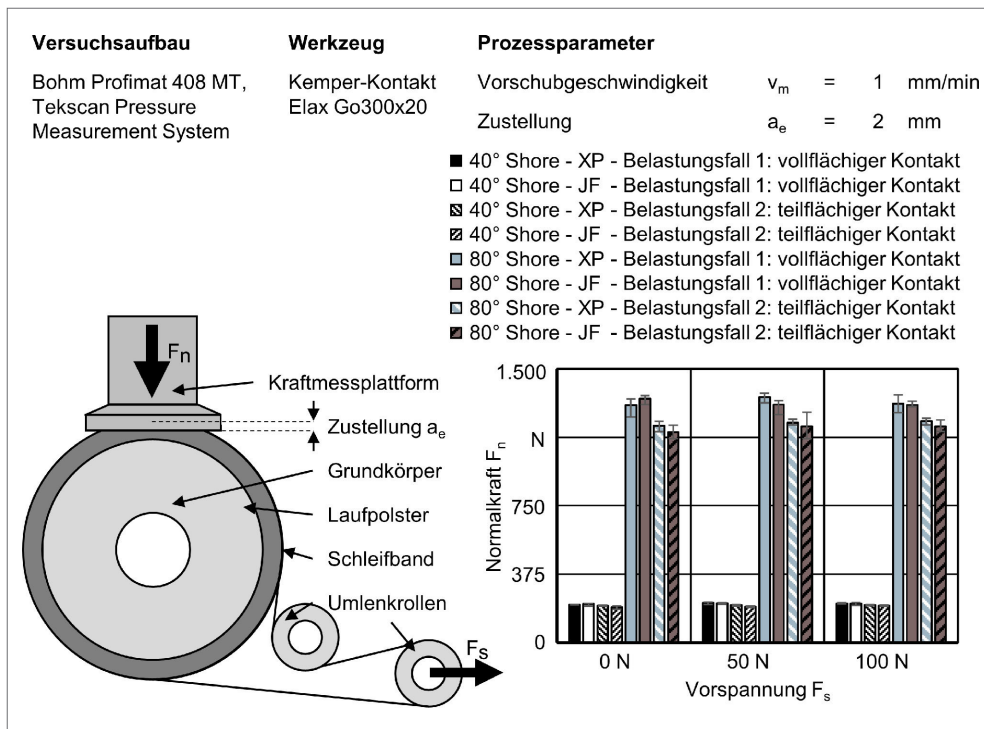


Bild 3 Druckversuche mit Schleifband zur Erfassung der Normalkraft F_n unter weggebundener Verformung. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin

2.3 Kontaktflächen- und Druckverteilungsanalyse mittels Druckmessfolie

Zur ergänzenden Untersuchung der Kontaktmechanik zwischen Werkzeugsystem und Werkstück wurden experimentelle Messungen der Kontaktfläche und Druckverteilung durchgeführt. Hierzu kam ein Druckmessfoliensystem Pressure Measurement System der Firma Tekscan, Inc., Norwood, mit der Hardwarekonfiguration 102-J729 zum Einsatz. Zur Vorbereitung wurden Werkstücke mit einer Länge $l_w = 100$ mm und einer Breite $b_w = 15$ mm über einen Schleifstrecke $y_{\text{schleif}} = 70$ mm geschliffen. Bei Erreichen der maximalen Schleifstrecke y_{schleif} wurde das Werkzeugsystem mit maximaler Beschleunigung der Werkzeugmaschine angehoben, um die Kontaktzone zu erhalten. Die Druckmessfolie wurde auf die Kontaktzone des zuvor geschliffenen Werkstücks aufgelegt und anschließend das vollständige Werkzeugsystem mittels Prozesszustellung $a_e = 1$ mm in die Kontaktzone gepresst. Um den Einfluss der Foliendicke $h_f = 0,15$ mm zu berücksichtigen, wurde diese von der eingestellten Zustellung a_e subtrahiert. Auf diese Weise konnte eine realitätsnahe statische Druckverteilung p_{kontakt} während der Messung sichergestellt werden. Als Zielgrößen der Untersuchung wurden die effektive Kontaktfläche A_0 sowie die lokale Druckverteilung p_{kontakt} definiert. Es wurden konstante Parameter zum Schleifen der Werkstücke gewählt. Die Umfangsgeschwindigkeit betrug $v_s = 25$ m/s, der Vorschub betrug $v_v = 300$ mm/min und die Zustellung betrug $a_e = 1$ mm mit einer Schleifkörnung von 60 nach CAMI-Standard. Variiert wurden die Härte der Kontaktrolle mit $h_k = 40^\circ$, 60° und 80° Shore sowie die Schleifbandunterlage mit den Gewichtsklassen XP und JF. Ziel war es, den Einfluss dieser Parameter auf die Kontaktmechanik und insbesondere auf die Ausprägung der Druckverteilung zu analysieren. Die Messungen konnten ausschließlich mit schmalen Werkstücken mit einer Breite $b_{sw} = 15$ mm durchgeführt werden. Bei den Werkstücken mit einer Breite von $b_{sw} = 25$ mm war eine Nut durch die Bear-

beitung entstanden, wodurch die Druckmessfolie infolge ihrer Eigenhöhe an den Kanten der Nut zusätzlichen Druck auf das Werkzeugsystem ausübte. Daher ist diese Methodik nicht auf den ersten Belastungsfall anzuwenden.

3 Ergebnisse

3.1 Ergebnisse der statischen Verformungsuntersuchungen

Die Ergebnisse der quasistatischen Versuche, dargestellt in Bild 2, zeigen einen deutlich nichtlinearen Zusammenhang für alle Kontaktrollenhärten h_k zwischen der Zustellung a_e und der resultierenden Normalkraft F_n . Mit zunehmender Zustellung a_e kommt es zu einer verstärkten Deformation der Kontaktrolle, wodurch sukzessive größere Volumenanteile des elastischen Laufpolsters in den Lastfall einbezogen werden. Darüber hinaus konnte ein signifikanter Einfluss der Kontaktrollenhärte h_k festgestellt werden. Mit steigender Shore-Härte nimmt die Normalkraft F_n bei gleicher Zustellung a_e deutlich zu. Dieser Zusammenhang ist ebenfalls nichtlinear und resultiert aus dem reduzierten Deformationsvermögen härterer Elastomere. Der Vergleich der beiden Belastungsfälle zeigt, dass bei teilflächigem Kontakt eine Reduktion der Normalkraft F_n um $\Delta F_n = 11,5\%$ bis $15,8\%$ auftritt. Dieser Effekt ist weitgehend unabhängig von der Kontaktrollenhärte h_k und lässt sich durch das seitliche Umgreifen der Kontaktrolle erklären, wodurch auch außerhalb der nominellen Kontaktzone Last übertragen wird.

In Bild 3 wurden die Schleifbänder mit den beiden Unterlagenspezifikationen in den Versuchsaufbau integriert. Die Ergebnisse sind für die beiden Kontaktrollenhärten $h_k = 40^\circ$ Shore und $h_k = 80^\circ$ Shore, sowie die beiden Belastungsfälle und die Veränderung der Vorspannkraft F_s dargestellt. Im Belastungsfall 1 zeigt sich bei einer Vorspannkraft von $F_s = 0$ N, dass die steifere Schleifbandunterlage XP geringere Normalkräfte F_n hervorruft als die weichere Unterlage JF. Bei einer Erhöhung der Vorspannkraft

Versuchsaufbau	Werkzeug	Prozessparameter	
Bohm Profimat 408 MT, Tekscan Pressure Measurement System	Kemper-Kontakt Elax Go300x20	Vorschubgeschwindigkeit	$v_m = 1 \text{ mm/min}$
		Zustellung	$a_e = 2 \text{ mm}$
		Kontaktrollenhärte	$h_k = 80 \text{ ° Shore}$

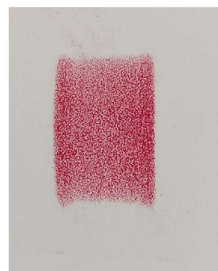
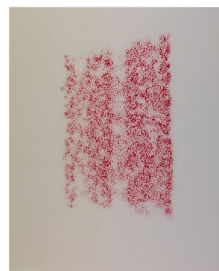
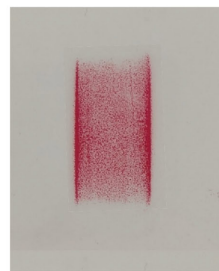
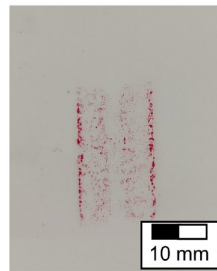
Belastungsfall 1: vollflächiger Kontakt		Belastungsfall 2: teilflächiger Kontakt	
Ohne Schleifband	Schleifbandunterlage XP	Ohne Schleifband	Schleifbandunterlage XP
			

Bild 4 Druckversuche zur Erfassung der Kontaktfläche A_0 unter weggebundener Verformung. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin

auf $F_s = 50$ N weist hingegen die weichere Unterlage JF niedrigere Normalkräfte auf. Wird die Vorspannkraft weiter auf $F_s = 100$ N gesteigert, gleichen sich die resultierenden Normalkräfte beider Unterlagen weitestgehend an. Im Belastungsfall 2 führt die steifere Schleifbandunterlage XP über alle untersuchten Vorspannkraften hinweg zu höheren Normalkräften F_n als die weichere Unterlage JF. Die Unterschiede zwischen den beiden Schleifbandunterlagen sind insgesamt gering ausgeprägt. Das Kraftniveau in Abhängigkeit von der Kontaktrollenhärte h_k zeigt auch bei Verwendung der Schleifbänder ein analoges Verhalten zu den isolierten Versuchen ohne Schleifband aus Bild 1.

Die Invertierung der Kraftverhältnisse im Belastungsfall 1 zwischen den Schleifbandunterlagen über der Vorspannkraft F_s lässt sich mit folgender These erklären. Ohne Vorspannung liegt das Schleifband unbefestigt an und da die steifere Unterlage aus mehr Material desselben Gewebes besteht, ist hier mehr Materialmasse vorhanden, die sich deformieren kann [13]. Mit moderater Vorspannkraft $F_s = 50$ N ist das Band stabil vorgespannt. Jetzt wirkt die Unterlage stärker als strukturelles Steifigkeitselement. Bei hoher Vorspannung wird die Bandmechanik zunehmend durch den Zuganteil bestimmt. Dann ist die zusätzliche Systemsteifigkeit durch die Vorspannkraft F_s so groß, dass die Unterschiede in der Unterlage im Vergleich klein werden und sich die Normalkräfte F_n annähern.

Zusätzlich wurden bei gleichem Versuchsaufbau Untersuchungen zur effektiven Kontaktfläche A_0 durchgeführt. Hierfür wurde die Prescale-Druckmessfolie zwischen der Kraftmessplattform und dem Werkzeugsystem platziert. Die Versuchsmessungen sind exemplarisch in Bild 4 dargestellt. Die Versuche im Belastungsfall 2 mit teilflächigem Kontakt zeigen eine deutliche Erhöhung der Normalkraft F_n an der Werkstückkante, wo das Werkzeug das Werkstück überlappt. Deutlich weniger ausgeprägt ist dieser Effekt im Belastungsfall 1, wo das Werkzeug über der volle Werkzeugbreite $b_k = 20$ mm im Eingriff ist. Dennoch ist ein Normalkrafterhöhung ΔF_n hin zur Werkzeugkante zu sehen. Das Schleifband hatte auf diesen Effekt keinen Einfluss. Auf den Abbildungen ist jedoch zusehen, dass durch die hohe Oberflächenrauheit

bei den Schleifbändern die Ränder schwerer zu erkennen sind und die Kontaktfläche nicht vollständig eingefärbt ist. Die Messergebnisse zeigen, dass die Deformation des Werkzeugsystems im untersuchten Parameterbereich ausschließlich von der eingestellten Zustellung a_e abhängig ist. Dieser Zusammenhang wird durch den etablierten theoretischen Ansatz nach Popov [12] gestützt. Demnach ergibt sich die Kontaktlänge A_0 näherungsweise aus dem Radius r , der Breite b_k der Kontaktrolle und der Zustellung a_e gemäß: $A_0 \approx 2 \cdot b_k \cdot \sqrt{2 \cdot r \cdot a_e}$. Das Ergebnis dieser Formel stimmte mit den experimentellen Ergebnissen unter Verwendung eines Korrekturfaktors $c_k = 0,792$ überein. Daraus folgt, dass eine Zunahme der effektiven Zustellung $a_{e,eff}$ unter quasistatischen Bedingungen unmittelbar zu einer Vergrößerung der Kontaktfläche A_0 führt.

3.2 Ergebnisse der Fliehkraftuntersuchungen

Die Untersuchungen unter rotierendem Betrieb zeigen einen ausgeprägten Einfluss der Fliehkraft F_z auf die radiale Verformung der Kontaktrolle. Die Ergebnisse sind in Bild 5 dargestellt. Zu sehen sind drei Diagramme mit Profilformverläufen für die unterschiedlichen Kontaktrollenhärten h_k mit und ohne den beiden Schleifbandspezifikationen, wobei Bild 5a die Formverläufe für $h_k = 40^\circ$ Shore, Bild 5b die Formverläufe für $h_k = 60^\circ$ Shore und Bild 5c die Formverläufe für $h_k = 80^\circ$ Shore darstellt. Erwartungsgemäß ist die maximale Radiusausdehnung Δr_{max} bei $h_k = 40^\circ$ Shore am größten. Mit einer maximalen Radiusausdehnung von $\Delta r_{max} = 3,31$ mm bei den Versuchen ohne Schleifband. Darüber hinaus ist eine deutliche konvexe Wölbung des im Ruhezustand flachen Profils zu erkennen. Die Wölbung ist bei den Versuchen mit Verwendung von Schleifbändern wesentlich geringer, bleibt jedoch signifikant. Aus den Kurvenverläufen der Schleifbandunterlagen ist abzuleiten, dass die Steifigkeit der Schleifbandunterlagen kaum bis keinen Einfluss auf Radiusausdehnung Δr haben. Die maximale Radiusausdehnung nimmt durch den Einfluss des Schleifbands grundsätzlich ab und beträgt gegenüber dem Profilformverlauf der Konfiguration ohne Schleif-

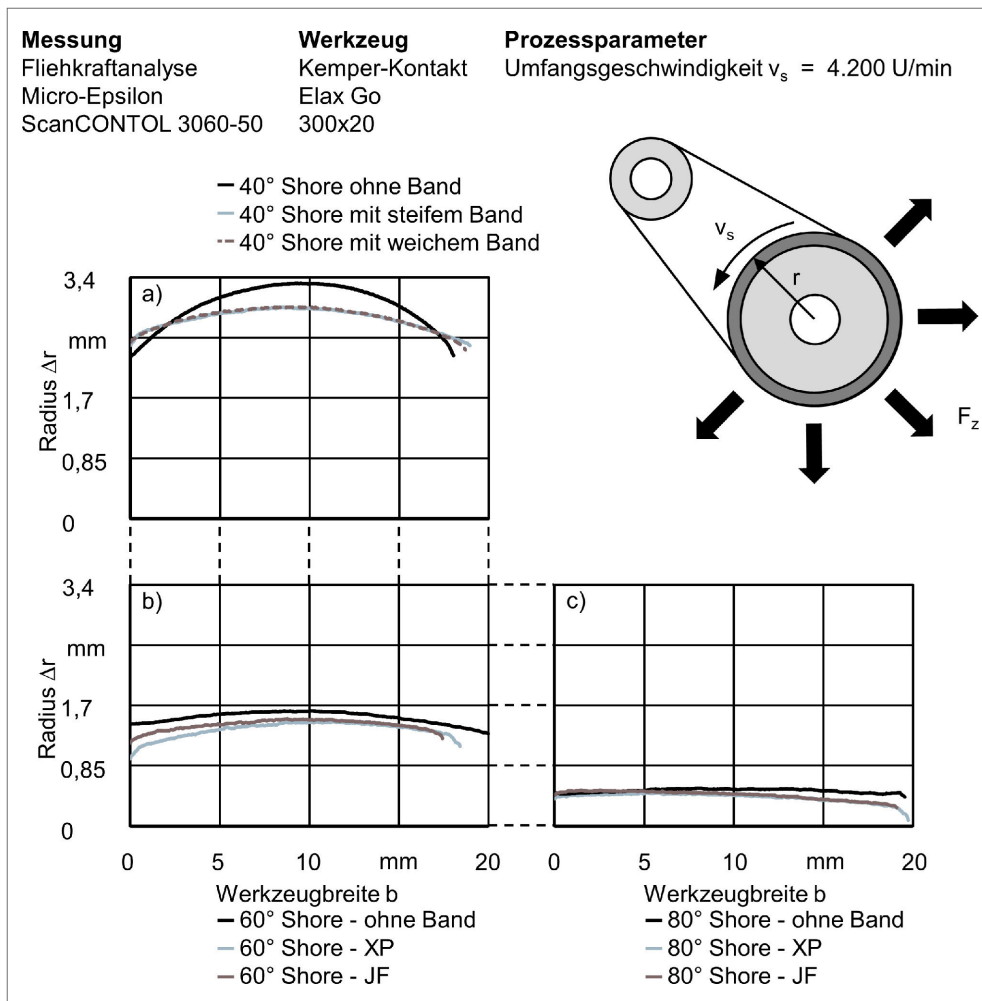


Bild 5 Ausdehnung der Kontaktrolle unter der Einwirkung von Fliehkraft F_z . a) Kontaktrollenhärte $h_k = 40^\circ$ Shore, b) Kontaktrollenhärte $h_k = 60^\circ$ Shore, c) Kontaktrollenhärte $h_k = 80^\circ$ Shore. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin

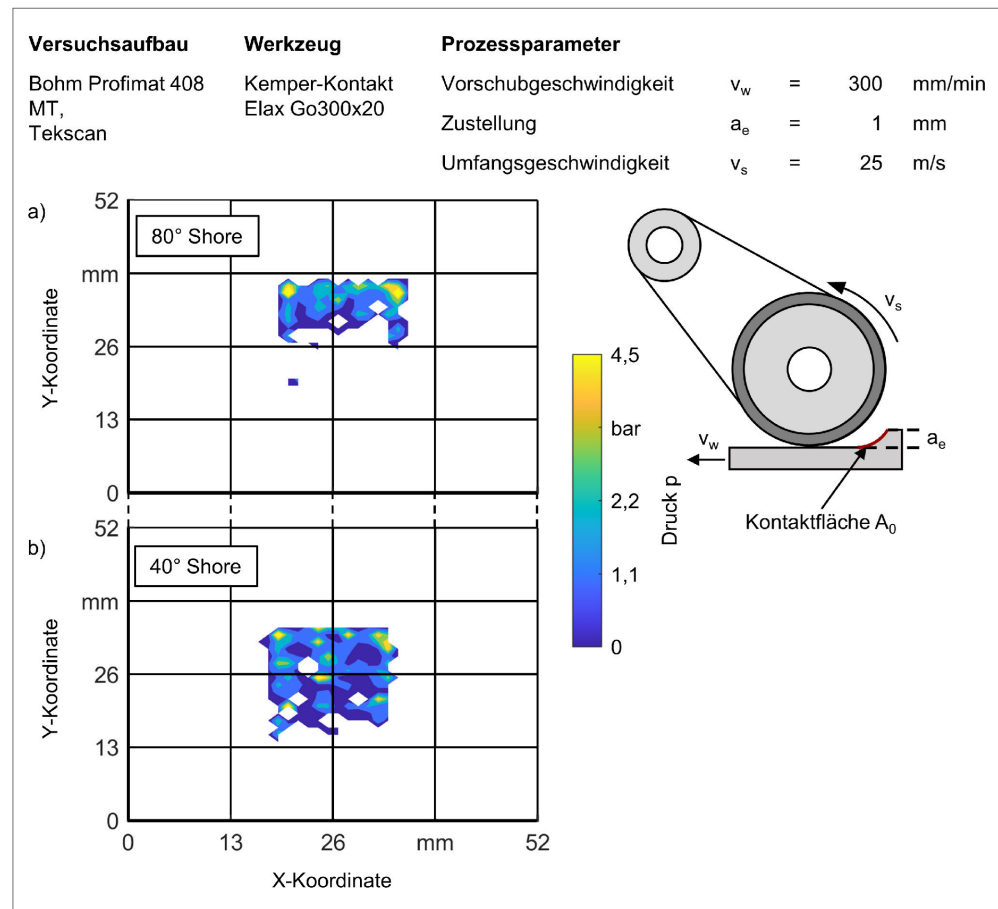
band im Maximalfall $\Delta r_{\max} = 2,98 \text{ mm}$. Bei der Kontaktrollenhärte $h_k = 60^\circ$ Shore, Bild 5b, lag die maximale Radiusausdehnung ohne Schleifband bei $\Delta r_{\max} = 1,62 \text{ mm}$ und ist damit weniger als halb so groß verglichen mit der Kontaktrollenhärte $h_k = 40^\circ$ Shore, Bild 5a. Die Wölbung ist ebenfalls geringer ausgeprägt und das Schleifband hat hier einen geringen Einfluss auf die Wölbung. Bei Verwendung eines Schleifbands sinkt die maximale Radiusausdehnung um $\Delta r_{\max} = 1,51 \text{ mm}$. Auch bei diesen Versuchen gab es keine wesentlichen Unterschiede zwischen den Schleifbandunterlagen. Im Diagramm mit der Kontaktrollenhärte $h_k = 80^\circ$ Shore, Bild 5c, liegt die maximale Radiusausdehnung bei $\Delta r_{\max} = 0,54 \text{ mm}$ ohne Schleifband. Dies entspricht einem Drittel der maximale Radiusausdehnung $\Delta r_{\max}$ bei einer Kontaktrollenhärte $h_k = 60^\circ$ Shore, Bild 5b. Die Wölbung des Profils fällt bereits ohne Schleifband sehr gering aus und folglich ist kaum ein Einfluss des Schleifbands auf die Wölbung festzustellen, welcher $\Delta r_{\max} = 0,01 \text{ mm}$ beträgt. Es ist für diese Kontaktrollenhärte $h_k = 80^\circ$ Shore ebenfalls kein Unterschied zwischen den Schleifbändern zu erkennen.

Die Ergebnisse der Fliehkraftuntersuchung zeigen, dass insbesondere bei weichen Kontaktrollen mit $h_k = 40^\circ$ Shore ein signifikanter Einfluss des Schleifbandes auf die Profilwölbung und die maximale Radiusausdehnung $\Delta r_{\max}$ vorliegt. Mit zunehmender Kontaktrollenhärte h_k nimmt dieser Einfluss deutlich ab. Ein signifikanter Effekt der Schleifbandträgersteifigkeit konnte in den durchgeführten Versuchen nicht festgestellt werden. Die Ergeb-

nisse verdeutlichen den engen Zusammenhang zwischen Kontaktrollenhärte h_k , zentrifugalbedingter Deformation und effektiver Zustellung $a_{e,eff}$. Aufgrund der gekrümmten Verformung ist zudem von einer inhomogenen Verteilung der Kornnormalkräfte F_N über die Werkzeugbreite b_s auszugehen, was potenziell zu Formabweichungen, inhomogener Oberflächenqualität beim Werkstück und ungleichmäßigem Verschleiß beim Werkzeug führen kann.

3.3 Einfluss der Kontaktrollenhärte h_k auf Kontaktfläche und Druckverteilung

Bild 6 zeigt zwei exemplarische Messergebnisse der Kontaktflächen- und Druckverteilungsanalyse mittels Druckmessfolie. Untersucht wurden Kontaktrollen mit unterschiedlicher Kontaktrollenhärte h_k bei identischer Schleifbandunterlage XP. Bereits der qualitative Vergleich der Messbilder verdeutlicht signifikante Unterschiede in der effektiven Kontaktfläche A_0 . Die Kontaktrolle mit einer Kontaktrollenhärte von $h_k = 40^\circ$ Shore weist eine deutlich größere Kontaktfläche A_0 auf als die Kontaktrolle mit einer Kontaktrollenhärte $h_k = 80^\circ$ Shore. Quantitativ ergibt sich für die harte Kontaktrolle mit einer Kontaktrollenhärte von $h_k = 80^\circ$ Shore eine um 36 % reduzierte Kontaktfläche A_0 im Vergleich zur weichen Kontaktrolle mit einer Kontaktrollenhärte von $h_k = 40^\circ$ Shore. Gleichzeitig unterscheiden sich die gemessenen Normalkräfte F_n deutlich. Für die harte Kontaktrolle wurde eine Normalkraft von $F_n = 27,6 \text{ N}$ ermittelt, während bei der weichen



Kontaktrolle eine deutlich höhere Normalkraft von $F_n = 44,8$ N auftrat. Die erhöhte Normalkraft F_n bei der weichen Kontaktrolle ist auf die stärkere elastische Verformung des Werkzeugsystems während des Schleifens zurückzuführen. Durch die erhöhte Nachgiebigkeit der weichen Kontaktrolle reduziert sich die elastisch effektive Zustellung $a_{e,eff}$ im Vergleich zur maschinell eingestellten Zustellung a_e . Da für alle untersuchten Kontaktrollen eine identische maschinelle Zustellung von $a_e = 1$ mm angewandt wurde, führt die stärkere Deformation der weichen Kontaktrolle zu einer größeren realen Kontaktzone und somit zu einer erhöhten Kontaktfläche A_0 . Eine größere Kontaktfläche A_0 sorgt für mehr Schneiden im Eingriff, wodurch die Normalkraft F_n auf eine größere Fläche wirkt und die Einzelkornkräfte in der Folge sinken. Dies führt zu geringeren Spannungsdicken h_{cu} , welche wiederum geringere Oberflächenrauheit hervorbringen. Negativ wirkt sich eine große Kontaktfläche A_0 auf die Temperaturentwicklung aus und kann zu erhöhtem Werkzeugverschleiß sowie zu Oberflächenschädigungen am Werkstück führen [14]. Die Messungen der Druckverteilung $p_{Kontakt}$ zeigen, dass der Druck p innerhalb der Kontaktzone nicht homogen verteilt ist. Insbesondere in Vorschubrichtung v_w ist bei der Kontaktzone eine erhöhte Druckintensität erkennbar. Dies deutet auf eine asymmetrische Belastung des Werkzeugsystems hin, welche im realen Schleifprozess Einfluss auf den Kornverschleiß nehmen kann.

Bild 7 zeigt den kombinierten Einfluss der Kontaktrollenhärte h_k sowie der Schleifbandunterlage auf die effektive Kontaktfläche A_0 . Untersucht wurden zwei unterschiedliche Schleifbandunterlagen bei variierender Kontaktrollenhärte h_k . Die Ergebnisse

zeigen ein deutlich nichtlineares Verhalten der Kontaktfläche A_0 in Abhängigkeit von der Kontaktrollenhärte h_k . Mit zunehmender Shore-Härte der Kontaktrolle nimmt die Kontaktfläche A_0 signifikant ab. Die Reduktion der Kontaktfläche A_0 mit zunehmender Kontaktrollenhärte h_k hat einen unmittelbaren Einfluss auf den Schleifprozess. Eine kleinere Kontaktfläche A_0 führt zu einer geringeren Anzahl gleichzeitig wirksamer Schleifkörner innerhalb der Kontaktzone. Infolgedessen steigt die mittlere Spannungsdicke h_{cu} der einzelnen Schleifkörner. Das tiefere Eindringen der Schleifkörner in das Werkstück resultiert in größeren Einzelkornkräften sowie einer Zunahme der Oberflächenrauheit. Gleichzeitig kann sich die reduzierte Anzahl tragender Schneiden negativ auf den Verschleißzustand des Schleifbandes auswirken, da höhere mechanische Belastungen pro Korn auftreten [14]. Darüber hinaus wird ersichtlich, dass der Einfluss der Schleifbandunterlage auf die Kontaktfläche A_0 insbesondere bei weichen Kontaktrollen mit einer Kontaktrollenhärte $h_k = 40^\circ$ Shore deutlich ausgeprägt ist, während der Einfluss der Schleifbandunterlage mit steigender Kontaktrollenhärte h_k abnimmt. Dies lässt sich damit begründen, dass die harte Kontaktrolle das Deformationsverhalten im Werkzeugsystem dominiert. Bei den Versuchen mit der weichen Unterlage JF fallen die Kontaktflächen A_0 größer aus als bei der steifen Unterlage XP. Insgesamt verdeutlichen die Ergebnisse, dass sowohl die Kontaktrollenhärte h_k als auch die Schleifbandunterlage maßgeblich die Kontaktmechanik beeinflussen und damit entscheidende Stellgrößen zur gezielten Beeinflussung von Oberflächenqualität, Werkzeugverschleiß und Prozessstabilität darstellen.

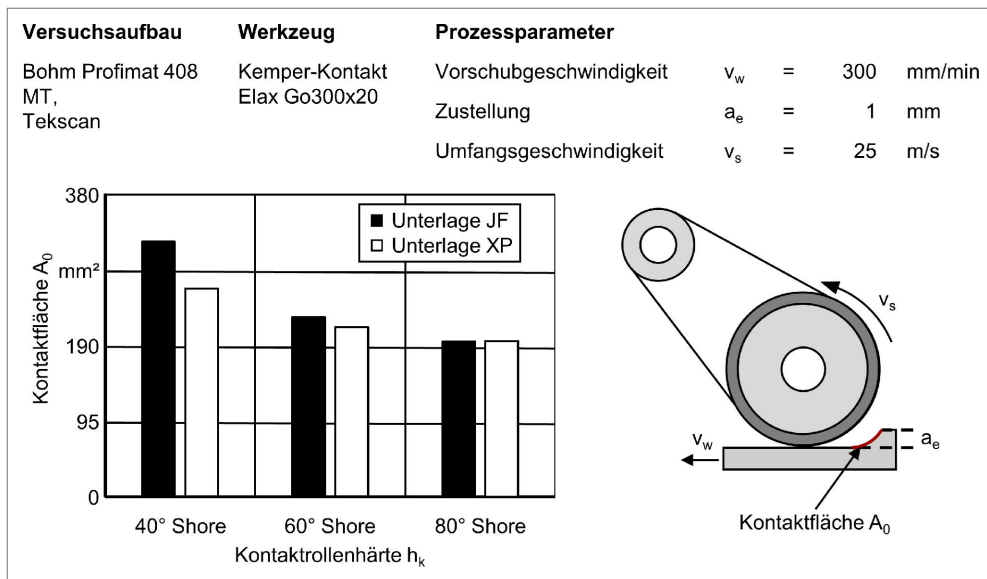


Bild 7 Kontaktfläche A_0 in Abhängigkeit von der Kontaktrollen Härte h_k und der Schleifbandunterlage. Grafik: Fachgebiet Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU Berlin

4 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit wurde das Deformationsverhalten elastischer Werkzeugsysteme beim Bandschleifen systematisch untersucht. Ziel war es, den Einfluss der Kontaktrollen Härte h_k , der Schleifbandunterlage sowie der wirkenden Prüfkraft auf die Werkzeugverformung, die elastisch effektive Kontaktmechanik und daraus resultierende Prozessgrößen zu analysieren. Hierzu wurden quasistatische Druckversuche, Untersuchungen unter Zentrifugalkrafteinfluss sowie kontaktmechanische Analysen mittels Druckmessfolie durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen einen ausgeprägten nichtlinearen Zusammenhang zwischen der maschinell eingestellten Zustellung a_e und der resultierenden Normalkraft F_n , der maßgeblich durch die elastische Deformation der Kontaktrolle bestimmt wird. Mit zunehmender Kontaktrollen Härte h_k nimmt die Werkzeugverformung deutlich ab, welches sich im Schleifprozess in einer reduzierten Kontaktfläche A_0 widerspiegelt. Die Untersuchungen unter rotierendem Betrieb verdeutlichen zudem den signifikanten Einfluss der Zentrifugalkräfte auf die radiale Ausdehnung der Kontaktrolle. Insbesondere bei weichen Kontaktrollen führt dies zu einer erheblichen Veränderung des Radius r des Werkzeugsystems und der Kontaktgeometrie. Die Ergebnisse der Druckmessungen zeigen darüber hinaus eine inhomogene Druckverteilung p_{Kontakt} innerhalb der Kontaktzone, mit erhöhten Druckniveaus im vorderen Bereich der Kontaktzone. Insgesamt belegen die Ergebnisse, dass sowohl die Kontaktrollen Härte h_k als auch die Schleifbandunterlage entscheidende Einflussgrößen auf die elastisch effektive Zustellung $a_{e,\text{eff}}$, die Kontaktmechanik und damit auf Werkzeugverschleiß, Produktivität und Prozessstabilität darstellen. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen werden in weiteren Untersuchungen gezielte Schleifversuche durchgeführt. Dabei sollen die elastisch effektive Zustellung $a_{e,\text{eff}}$, die resultierende Formabweichung f_{max} der Werkstücke sowie die Prozesskräfte systematisch erfasst werden. Ziel ist es, den Zusammenhang zwischen Werkzeugdeformation, Kontaktmechanik und Arbeitsergebnis unter realen Schleifbedingungen quantitativ zu beschreiben. Aus der Gesamtheit der experimentellen Ergebnisse sollen mittels Regressionsanalyse die maßgeblichen Wirkzusammenhänge zwischen Prozessparametern, Werkzeugdeformation und Arbeitsergebnis identifiziert werden. Auf dieser Grundlage

wird ein Durchdringungsmodell zur Beschreibung der Korn-Werkstück-Interaktion entwickelt, das dem Ansatz einer Grey-box-Modellierung folgt. Das zu entwickelnde Modell wird anschließend durch weitere Schleifversuche validiert und iterativ angepasst. Ziel ist es, ein praxistaugliches Modell zur verbesserten Vorhersage von der elastisch effektiven Zustellung $a_{e,\text{eff}}$, der Formabweichungen f_{max} und der Oberflächenqualität beim elastischen Schleifen bereitzustellen und damit die Prozessauslegung und -stabilität nachhaltig zu verbessern.

FÖRDERHINWEIS

Die vorgestellten Ergebnisse basieren auf den Inhalten des DFG-Forschungsprojekts „Analyse der Auswirkungen von Werkzeugsystemdeformationen auf das Arbeitsergebnis beim elastischen Schleifen“, Projekt-Nr. 459416034.

Literatur

- [1] Götsching, T.; Christiani, S.; Despong, F.: Glatt läuft gut. WB Werkstatt und Betrieb (2018) 3, S. 42–45
- [2] Koch, C.: Elastisch gebundene Schleif- und Polierwerkzeuge – Eine Übersicht. Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren. Hrsg.: Hoffmeister, H.-W.; Denkena, B. Essen: Vulkan, 2011, S. 76–86
- [3] Tyrolit: Werkzeug für die Feinwerktechnik. maschine+werkzeug (2017) 3, S. 82–83
- [4] Uhlmann, E. et al.: Applicability of industrial robots for machining and repair processes. ScienceDirect Procedia CIRP 11 (2013) S. 234–238
- [5] Klocke, F.: Fertigungsverfahren 2. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2017
- [6] Westkämper, E.; Spaeth, B.: Produktionsmanagement im Wandel. Heidelberg: Springer-Verlag 2010
- [7] Uhlmann, E.; Heitmüller, F.: Improving efficiency in robot assisted belt grinding of high performance materials. Advanced Materials Research (2014)

- [8] Eiken, M.: Deformationsverhalten des elastischen Werkzeugsystems beim Bandschleifen. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (2024), S. 38
- [9] Uhlmann, E.; Buelter, M.: Belt grinding of cast iron without cooling lubricant. ScienceDirect Procedia Manufacturing 33 (2019) S. 746–753
- [10] Mezghani, S.; El Mansori, M.; Sura, E.: Wear mechanism maps for the belt finishing of steel and cast iron. Wear 267 (2009) 1–4, S. 86–91
- [11] Heisel, U.: Handbuch Spanen., 2., vollst. neu bearb. Aufl. München: Hanser, 2014
- [12] Popov, V. L.: Kontaktmechanik und Reibung. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer (2015)
- [13] Förster, R.; Förster, A.: Einführung in die Fertigungstechnik, 2. Auflage: Berlin, Heidelberg: Springer (2023), S. 176
- [14] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 2 – Schleifen, Honen, Läppen. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg (2018), S. 11–12

**Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing.
Eckart Uhlmann**

Julian Henning, M.Sc.
julian.wolfgang.henning@tu-berlin.de

Technische Universität Berlin
Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb IWF
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
www.iwf.tu-berlin.de

Prof. Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann
Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen
und Konstruktionstechnik IPK
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin
www.ipk.fraunhofer.de

LIZENZ



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