

## Flexible Nachbearbeitung der Oberflächen unterschiedlicher Verzahnungsgeometrien

# Zahnflankenfinishing mittels abrasiver Bürstwerkzeuge

E. Uhlmann, B. Gützow

Am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin wurde ein Finishingverfahren zur Verbesserung der Oberflächenqualität von Zahnradflanken mittels abrasiver Bürstwerkzeuge am Beispiel eines schrägverzahnten Planetenrads entwickelt. Für den etablierten Referenzprozess konnte gezeigt werden, dass die Rauheit der Zahnflanken in Abhängigkeit des Ausgangszustandes nach dem Schleifen prozessfähig um  $\Delta Ra \approx 0,2 \mu m$  verbessert werden kann. Zur Überprüfung der Übertragbarkeit des Bürstfinishingprozesses auf unterschiedliche Verzahnungsgeometrien wurden Verzahnungen aus zwei kleineren Modulbereichen untersucht.

## STICHWÖRTER

Antriebstechnik, Feinbearbeitung, Oberflächentechnik

## Tooth flank finishing using abrasive brushing tools – Flexible post-machining of surfaces for different gear geometries

A finishing process to improve the surface quality of tooth flanks using abrasive brushing tools was developed at the TU Berlin (IWF). For the established reference process, it could be shown that the roughness of the tooth flanks can be improved by  $\Delta Ra \approx 0.2 \mu m$  depending on the initial state after grinding. To check the transferability of the brush finishing process to different gear geometries, gears from two smaller module ranges were examined..

## 1 Einleitung

Die Nachbearbeitung von Zahnflanken hat in den letzten Jahren grundlegend an Bedeutung gewonnen. Gründe dafür sind beispielsweise in der Energiewende zu finden. Um bei Windkraftanlagen mehr Leistung zu erzeugen, werden die Rotordurchmesser vergrößert, während die Drehzahlen sinken, was zu höheren Drehmomenten führt [1]. Um bei diesen hochbelasteten Zahnrädern die Gefahr von Grübchenbildung zu reduzieren und die Tragfähigkeit zu erhöhen, sind höhere Oberflächengüten an den Zahnflanken erforderlich. Zudem kann eine Erhöhung der Oberflächengüte den Getriebewirkungsgrad verbessern [2–5]. Darüber hinaus können die akustischen Emissionen von Getrieben durch eine geringe Zahnflankenoberflächenrauigkeit reduziert werden [6, 7]. Um die geforderte Oberflächengüte zu erreichen, ist nach dem Schleifprozess in der Regel ein zusätzlicher Prozessschritt nötig, der die Verzahnungsqualität in Bezug auf die hohe geometrische Genauigkeit des Profils nicht negativ beeinflusst. Dies ist insbesondere im Bereich der E-Mobilität von größter Bedeutung [8]. Neben der Senkung der Oberflächenrauheit ist die Erhaltung der Schleifriefen in Vorschubrichtung erwünscht, da diese den Schmierstofftransport innerhalb des Getriebes positiv beeinflussen können.

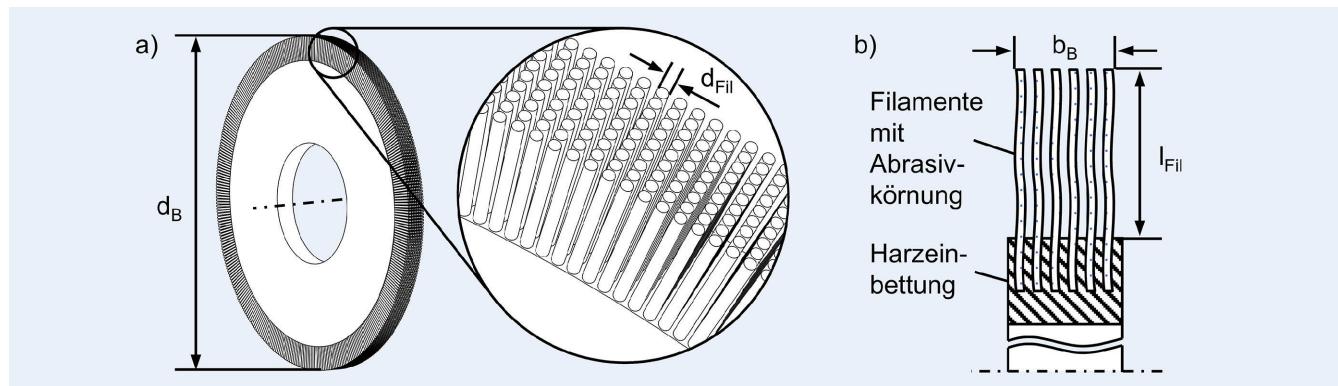
Ein weit verbreitetes Fertigungsverfahren zum Finishen von Zahnflanken ist das Gleitschleifen. Dabei wird die Werkstückoberfläche mit Schleifmitteln geglättet, welche durch äußere Anregung wie Rotation oder Vibration relativ zum Werkstück in

Bewegung versetzt werden [9]. Eine spezielle Variante dieses Verfahrens ist das isotrope Superfinishing (ISF). Dabei wird eine Oxidschicht auf der Oberfläche durch die Zugabe einer aktiven Chemikalie erzeugt, welche die Glättung durch die Gleitschleifkörper begünstigt [10, 11]. Mit dieser Vorgehensweise können zwar effektiv sehr niedrige Oberflächenrauheiten erzielt werden, es ist jedoch ein zusätzlicher, kostenintensiver Produktionsschritt außerhalb der Schleifmaschine notwendig, welcher aufgrund der speziellen Anlagentechnik zumeist an Drittanbieter ausgelagert werden muss. Um vor allem kleinen und mittleren Unternehmen (KMU) die Möglichkeit zu bieten, die Endbearbeitung eigenständig durchzuführen, wurde am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin ein schleifmaschinenintegrierter Finishingprozess entwickelt, der ohne die Verwendung von umweltschädlichen Zusatzstoffen auskommt.

Generell eignen sich abrasive Bürstwerkzeuge aufgrund ihrer flexiblen Filamente zur Bearbeitung komplexer Geometrien. Dadurch können hohe Oberflächengüten erzeugt werden, ohne die Form- und Maßhaltigkeit negativ zu beeinflussen [12, 13]. Im Rahmen einer ersten Studie am IWF konnte gezeigt werden, dass abrasive Bürsten für die Nachbearbeitung von Zahnflanken geeignet sind und die Oberflächenqualität in Abhängigkeit der Prozessparameter signifikant verbessert werden kann, ohne die Makrogeometrie der Verzahnung zu verändern [14, 15]. In einem weiterführenden Projekt konnten zusätzlich der Einfluss der Ausgangsrauheit nach dem Schleifprozess auf das Bürst-

**Tabelle 1.** Geometrie- und Spezifikationsdaten der untersuchten Bürstwerkzeuge.

Spezifikation	max. Bürsten-durchmesser $d_B$	max. Filament-länge $l_{Fil}$	Filament-durchmesser $d_{Fil}$	Korngröße $d_K$	Abrasivmittel
-	mm	mm	mm	Mesh	-
S240x0,75	350	51,5	0,75	240	SiC
S320x0,60	350	51,5	0,60	320	SiC

**Bild 1.** Aufbau einer abrasiven Rundbürste: a) 3-D-Darstellung; b) schematischer Querschnitt. *Grafik: IWFTU Berlin***Tabelle 2.** Geometrische Verzahnungskenngrößen der untersuchten Werkstücke.

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert		
			Referenz	mittel	klein
Zähnezahl	$z$	-	39	21	47
Normalmodul	$m_n$	mm	10,0	5,5	2,0
Eingriffswinkel	$\alpha$	°	20	20	20
Schrägungswinkel		°	7,5	0,0	30,7
Zahnbreite	$b$	mm	200	205	22

ergebnis sowie die Prozesssicherheit und die Werkzeugstandzeit ermittelt werden [16]. Ein weiteres Ziel dieses Vorhabens war die Untersuchung der Übertragbarkeit des Prozesses auf verschiedene Verzahnungsgeometrien. Die Ergebnisse sind nachfolgend dargelegt.

## 2 Versuchsbedingungen und Messmethoden

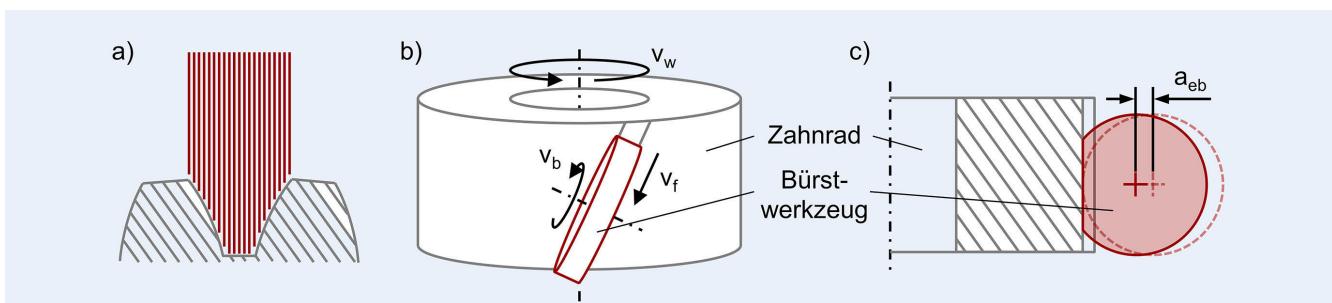
Die Bürstversuche wurden auf einer Verzahnungsprofilschleifmaschine Typ „ZP 12“ der Firma Kapp Niles GmbH (kurz: Kapp Niles) durchgeführt. Für die technologischen Untersuchungen wurden zwei verschiedene Bürstwerkzeugspezifikationen verwendet. Diese unterscheiden sich in der Korngröße  $d_K$  der in die Filamente eingebetteten Korund (SiC)-Körnung und dem davon abhängigen Filamentdurchmesser  $d_{Fil}$ . Die Geometrie- und Spezifikationsdaten können **Tabelle 1** entnommen werden.

Der prinzipielle Aufbau einer abrasiven Rundbürste ist in **Bild 1** dargestellt.

Die Referenzverzahnung, die für die grundlegende Entwicklung des Prozesses genutzt wurde, bildet eine gängige Geometrie von Planetenzahnradern ab, wie sie Anwendung in den Getrieben

von Windkraftanlagen finden. Um ein breites Spektrum von Verzahnungsgeometrien in den Untersuchungen abzudecken, wurden Versuchszahnräder aus einem mittleren Modulbereich, wie sie häufig im Anlagenbau vorkommen, und aus einem kleineren Modulbereich, wie sie im Automobilbereich üblich sind, ausgewählt. Eine Übersicht der Verzahnungskenngrößen gibt **Tabelle 2**.

Zur Untersuchung der Oberflächenqualität wurde die Oberflächenrauheit in der Mitte des Zahnprofils an drei verschiedenen Stellen pro Zahnflanke mit einem mobilen Oberflächenmessgerät vom Typ „MarSurf PS 10“ der Firma Carl Mahr Holding GmbH gemessen. Die Änderungen der Rauheit im Zahnpkopf- beziehungsweise Zahnußbereich wurden nicht betrachtet, um die Vergleichbarkeit der Ergebnisse für die unterschiedlichen Verzahnungsgeometrien zu gewährleisten. Um die Messungen an den Zahnflanken innerhalb der Schleifmaschine durchzuführen zu können, wurde eine Vorrichtung konstruiert, die es ermöglicht, den Messstaster reproduzierbar an derselben Stelle zu montieren. Mithilfe eines CNC-Codes kann somit stets exakt die gleiche Position auf der Zahnflanke angefahren werden. Die Beurteilung der Oberflächenrauheit erfolgte für die in diesem Beitrag dargestellten Ergebnisse auf Basis des arithmetischen Mittelwerts der



**Bild 2.** Schematische Prinzipdarstellung des Referenzbürstprozesses: a) Werkzeugprofilierung entsprechend Zahnlückengeometrie; b) Prozesskinematik; c) Bürztstellung  $a_{eb}$ . *Grafik: IWFTU Berlin*

Höhe  $Ra$ , da dieser in der Industrie derzeit als Referenzgröße gilt. Es wurden jedoch stets die Rohprofile der Rauheitsschriebe abgespeichert, sodass es jederzeit möglich ist, beliebige andere Kenngrößen auszuwerten. Die Messbedingungen für die Rauheitsmessungen entsprechen der aktuellen Norm DIN EN ISO 21920-2 und wurden für alle Messungen im Rahmen der hier vorgestellten Untersuchungen beibehalten [17].

Zur Betrachtung des Einflusses des Bürstfinishingprozesses auf die Makrogeometrie der Zahnräder wurde die Zahnrädergeometrie vor und nach der Bürztbearbeitung vermessen. Die Beurteilung der Beeinflussung der Verzahnungsqualität erfolgte hauptsächlich anhand der Profile. Dabei wurde primär die Winkelabweichung  $f_{Ha}$  betrachtet, da diese am stärksten auf einen ungleichmäßigen Materialabtrag im Kopf- beziehungsweise Zahnußbereich reagiert und somit als relevante Bezugsgröße identifiziert wurde. Die Messungen für die Referenzversuche wurden am IWF mit einer Verzahnungsmessmaschine des Typs „ZMC-550“ der Firma Carl Zeiss AG durchgeführt. Die Verzahnungen aus dem mittleren und kleinen Modulbereich wurden von der Firma Kapp Niles vermessen. Alle Werte wurden dabei sowohl am IWF als auch bei Kapp Niles unter Berücksichtigung der aktuellen Norm DIN ISO 1328-1 erfasst und ausgewertet [18].

### 3 Ergebnisse und Diskussion

Um die Übertragbarkeit des Bürstfinishingprozesses auf verschiedene Verzahnungsgeometrien bewerten zu können, müssen zunächst die grundlegenden Erkenntnisse des entwickelten Referenzprozesses dargelegt werden. Für diesen werden die Filamente der Rundbürsten entsprechend des Zahnlückenprofils vorprofiliert (**Bild 2a**).

Um ein Aufschmelzen der Bürstfilamente zu vermeiden, wurden die Bürsten vor jedem Hub mit Kühlsmierstoff (KSS) gespült. Während des Bearbeitungshubs blieb das KSS ausgeschaltet, da die unmittelbare Zufuhr des Schmiermittels in die Wirkzone zu einer verminderten Abtragsleistung führt. Für die Gewährleistung konstanter Eingriffsbedingungen über die gesamte Zahnbreite  $b$ , wurde das Bürstwerkzeug, wie beim Zahnräderprofilen, mit einem Überlauf in die Lücke ein- und ausgeführt. Ein dadurch entstehender, positiver Nebeneffekt ist die leichte Verrundung der Kante des Stirnprofils. Für eine möglichst effiziente Glättung der Oberflächenrauheit muss die Bearbeitung im Gegenlauf durchgeführt werden. Neben Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  und der Bürstenumfangsgeschwindigkeit  $v_b$  (**Bild 2b**) kann die Bürztstellung  $a_{eb}$  eingestellt werden. Diese ist als zusätzliche radiale Zustellung, ab dem Ankratzpunkt zwischen

**Tabelle 3.** Prozessparameter des Referenzbürstprozesses.

Bezeichnung	Formelzeichen	Einheit	Wert
Bürztstellung	$a_{eb}$	mm	5
Vorschubgeschwindigkeit	$v_f$	mm/min	200
Bürstenumfangsgeschwindigkeit	$v_b$	m/s	20
Hubanzahl pro Lücke	$n_{Hub}$	-	3

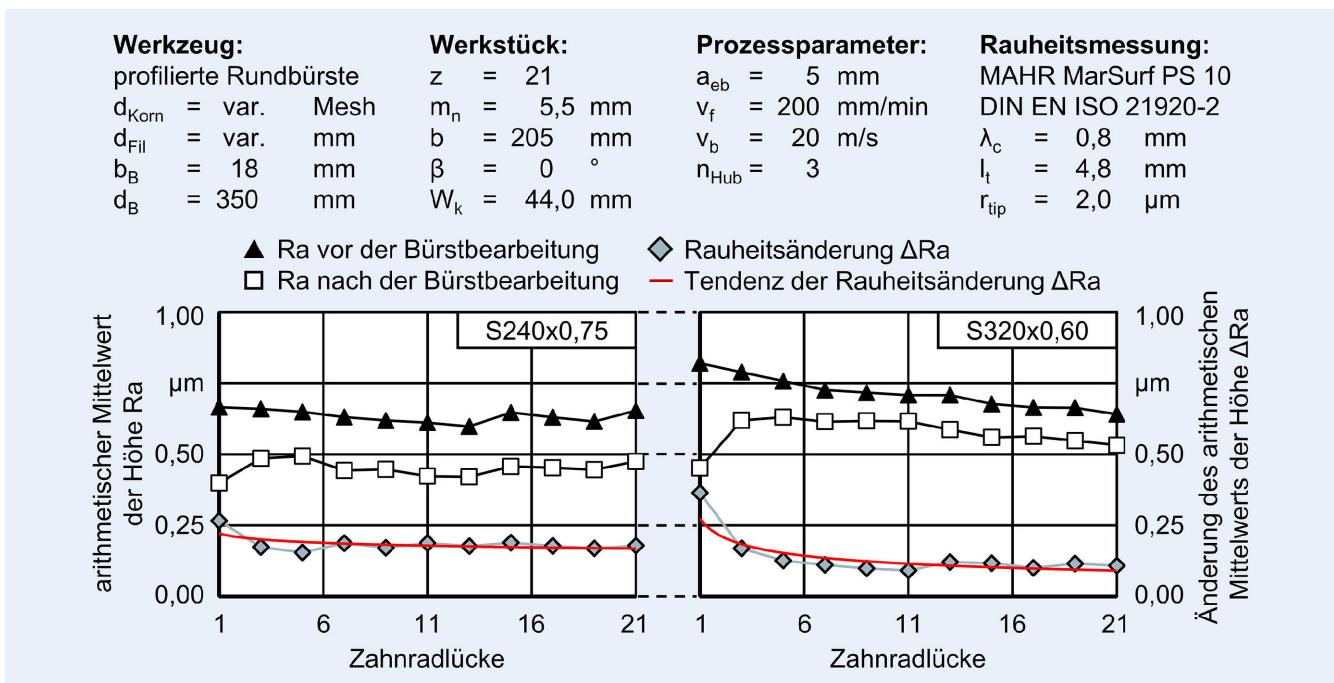
den unbelasteten Filamenten und der Profilkontur der Zahnlücke, definiert (**Bild 2c**).

Je größer die Bürztstellung  $a_{eb}$  gewählt wird, desto stärker werden die Filamente in die Zahnlücke gepresst. Damit steigt die Kraft, mit der die Abrasivkörner auf die Zahnräderoberfläche gedrückt werden. Dieser Zusammenhang ist aufgrund der Interaktion der Filamente miteinander nicht linear. Ähnlich wie beim Schleifen führt eine höhere Umfangsgeschwindigkeit zu mehr Korneingriffen und damit zu einer besseren Abtragsleistung. Da es in Voruntersuchungen bei einer zu hohen Bürstenumfangsgeschwindigkeit durch die erhöhte Wärmeentwicklung zum Aufschmelzen der Filamente kam, wurde diese auf  $v_b = 20 \text{ m/s}$  begrenzt. Für den Referenzprozess wurden die in **Tabelle 3** aufgelisteten Parameter verwendet und bilden die Grundlage für alle weiterführenden Untersuchungen.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass es durch den Einsatz abrasiver Bürstwerkzeuge möglich ist, in Abhängigkeit von der Ausgangsrauheit  $Ra_{ini}$  eine durchschnittliche Verbesserung des arithmetischen Mittelwerts der Höhe von  $\Delta Ra \approx 0,2 \mu\text{m}$  über ein komplettes Referenzzahnrad zu erreichen. Zusätzlich werden Ungleichheiten in der Rauheitsverteilung über das gesamte Zahnräder leicht ausgeglichen. Hierfür wurde ein einziges Bürstwerkzeug der Spezifikation S240x0,75 benötigt, und es konnte bestätigt werden, dass die Verzahnungsgeometrie nicht negativ durch die Nachbearbeitung beeinflusst wird. Die Arbeitsergebnisse mit der Bürstenspezifikation S320x0,60 fielen aufgrund des schwächeren Verschleißverhaltens und der damit zusammenhängenden niedrigeren Steifigkeit des Filamentverbunds deutlich schlechter aus [16].

#### 3.1 Mittlerer Modulbereich

Für die Versuchsreihen mit den Verzahnungen aus dem mittleren Modulbereich wurden dieselben Prozessparameter abgebildet wie bei den Referenzuntersuchungen, um zu überprüfen, ob



**Bild 3.** Vergleich der Verbesserung der Oberflächenrauheit für die Analogueuntersuchungen im mittleren Modulbereich mit den Versuchswerkzeugen der Spezifikationen S240x0,75 und S320x0,60. *Grafik: IWFTU Berlin*

die Erkenntnisse auf eine kleinere Verzahnungsgeometrie übertragen werden können (**Bild 3**).

Analog zu den Referenzversuchen ist zu erkennen, dass die Änderung des arithmetischen Mittelwerts der Höhe  $\Delta Ra$  bei der Bearbeitung mit der Bürstenspezifikation S320x0,60 in den ersten Zahnradlücken deutlich steiler abfällt. Danach bleibt sie bei beiden Bürsten auf einem konstanten Niveau. Dabei konnte mit der Spezifikation S240x0,75 eine durchschnittliche Änderung von  $\Delta Ra = 0,19 \mu\text{m}$  erreicht werden. Die Bearbeitung mit der Bürstenspezifikation S320x0,60 erzielte eine Änderung von  $\Delta Ra = 0,14 \mu\text{m}$ . Dabei ist aufgrund der flacheren und kürzeren Initialphase der Bürste S240x0,75 die Standardabweichung mit  $\sigma = 0,034 \mu\text{m}$  deutlich kleiner als bei der Bürstenspezifikation S320x0,60, die eine Standardabweichung von  $\sigma = 0,063 \mu\text{m}$  aufweist. Diese Ergebnisse sind in Bezug auf die Änderung des arithmetischen Mittelwerts der Höhe  $\Delta Ra$  sowohl qualitativ als auch absolut im Bereich der Messunsicherheit mit den Referenzuntersuchungen vergleichbar. Da die hier genutzten Versuchszahnräder eine kleinere Zähnezahl  $z$  besitzen, wurde zusätzlich ein zweites Zahnrad mit dem Bürstwerkzeug der Spezifikation S240x0,75 nachbearbeitet. Es konnte gezeigt werden, dass die Bürstleistung auch hier konstant geblieben ist. Die Erkenntnisse zur Werkzeugstandzeit aus den Referenzversuchen können somit ebenfalls auf die mittlere Verzahnungsgeometrie übertragen werden.

Um zu überprüfen, ob die Verzahnungsgeometrie durch die Bürstbearbeitung auch bei diesem Anwendungsfall nicht negativ beeinflusst wird, wurde das Zahnrad nach der Bearbeitung mit der Werkzeugspezifikation S240x0,75 vermessen. Neben der Stirnprofil-Winkelabweichung  $f_{H_a}$  wurde zusätzlich die Profil-Winkelabweichung  $f_{f_a}$  betrachtet. Wie **Bild 4** zu entnehmen, sind beide Werte für das komplette Zahnrad auch nach der Bürstbearbeitung in der durch den Hersteller geforderten Qualitätsklasse geblieben. Es konnte also gezeigt werden, dass die Bürstbearbei-

tung auch bei Verzahnungen aus einem mittleren Modulbereich keinen negativen Einfluss auf die Makrogeometrie hat.

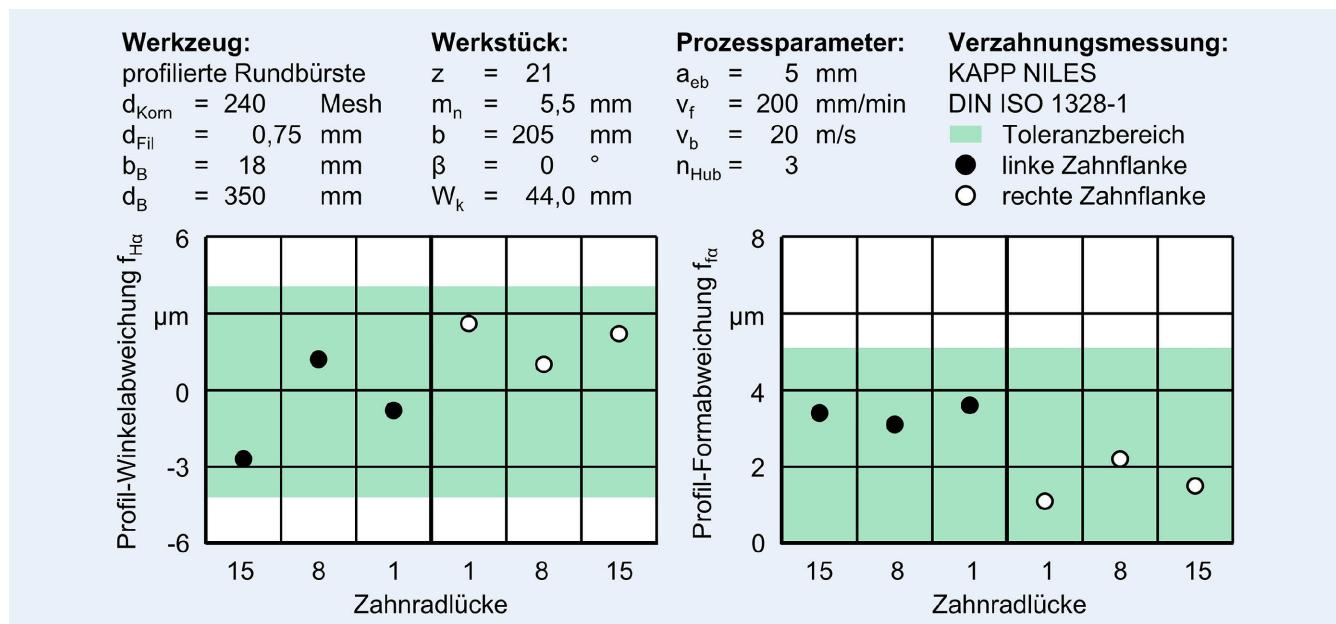
### 3.2 Kleiner Modulbereich

Für die Verzahnungen aus dem kleinen Modulbereich konnte die Prozessführung des Referenzprozesses nicht sinnvoll eingesetzt werden. Daher wurde eine Bearbeitungsstrategie entwickelt, bei der eine unprofilierte Rundbürste entsprechend des Schräungswinkels  $\beta$  angestellt und in Richtung der Werkstückachse bewegt wird, während das Zahnrad kontinuierlich um diese dreht (**Bild 5**).

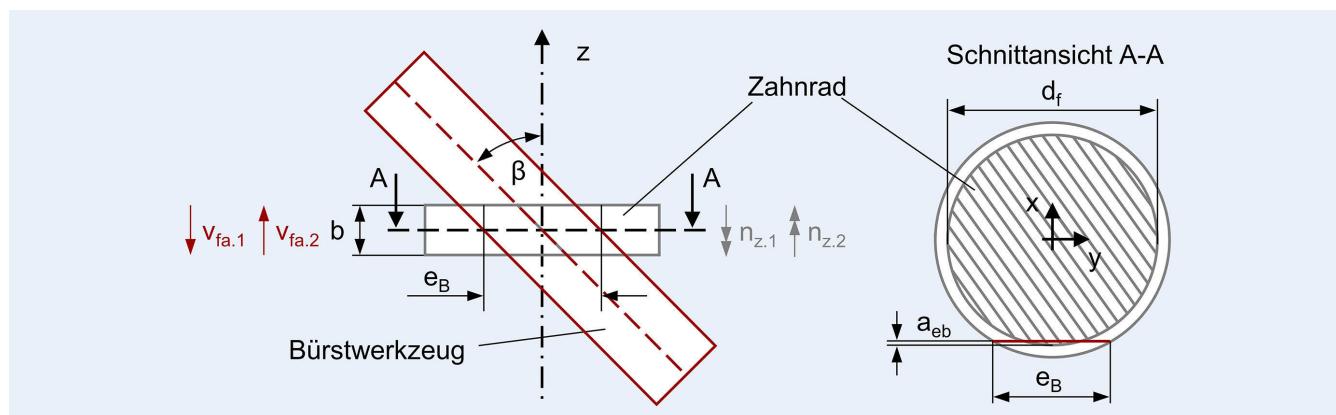
Es wurde jeweils ein Hub in beide Richtungen der Werkstückachse durchgeführt, um die Zahnradflanken gleichmäßig zu bearbeiten. Dabei drehte das Zahnrad mit einer Drehzahl  $n_z$  entsprechend der Steigung der Verzahnung zuzüglich einer geraden Anzahl von Umdrehungen pro Zahnradbreite  $b$ . Dadurch ist die Drehzahl  $n_z$  über die Anzahl der Umdrehungen pro Hub  $U_{Hub}$  an die axiale Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fa}$  gekoppelt.

Um zunächst Erkenntnisse über den Einfluss der Relativgeschwindigkeit zu gewinnen, wurden diese beiden Größen variiert. Wie der Darstellung der Ergebnisse der Parameterstudie in **Bild 6** zu entnehmen ist, konnte das beste Arbeitsergebnis mit einer axialen Vorschubgeschwindigkeit von  $v_{fa} = 20 \text{ mm/min}$  und zwei Zahnradumdrehungen pro Bearbeitungshub erzielt werden ( $\Delta Ra = 0,103 \mu\text{m}$ ,  $\sigma = 0,008 \mu\text{m}$ ). Dieser Prozesspunkt wurde für die weiteren Untersuchungen mit den beiden unterschiedlichen Bürstenspezifikationen sowohl an den ungestrahlten als auch an den gestrahlten Versuchswerkstücken genutzt.

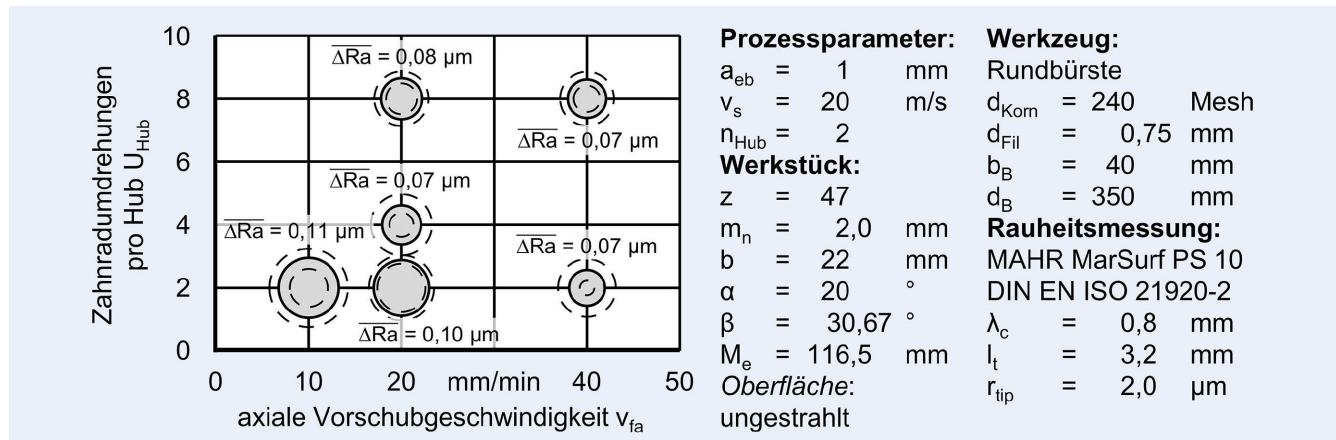
Um das Einsatzverhalten der beiden verschiedenen Bürstenspezifikationen bei der Bearbeitung von gestrahlten und ungestrahlten Automobilverzahnungen zu bewerten, wurde die Rauheit von jeweils fünf Werkstücken vor und nach der Bürstbear-



**Bild 4.** Einfluss der Bürstbearbeitung auf die Verzahnungsgeometrie bei den Analogieuntersuchungen im mittleren Modulbereich mit der Werkzeugspezifikation S240x0,75. *Grafik: IWFTU Berlin*



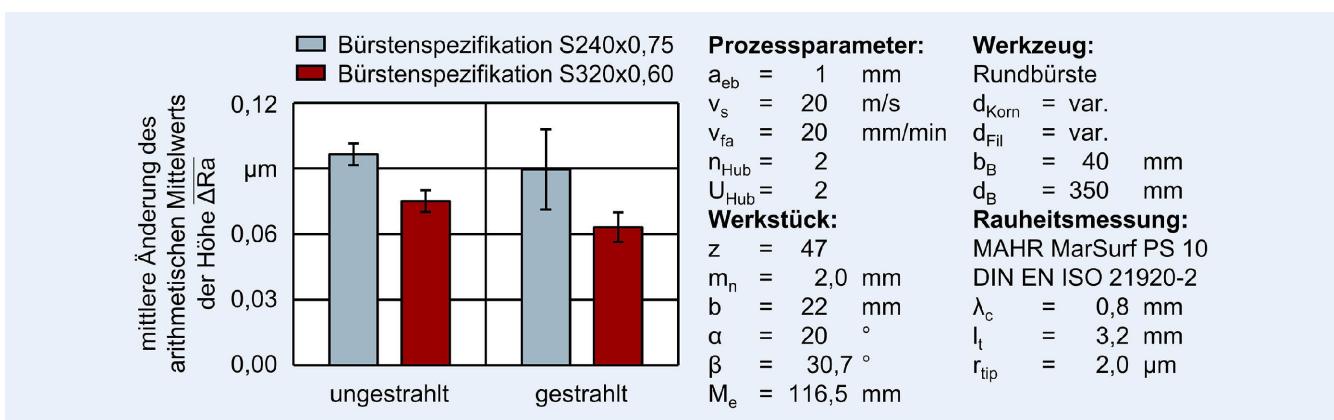
**Bild 5.** Prozesskinematik für die Bürstbearbeitung kleinmoduliger Verzahnungen. *Grafik: IWFTU Berlin*



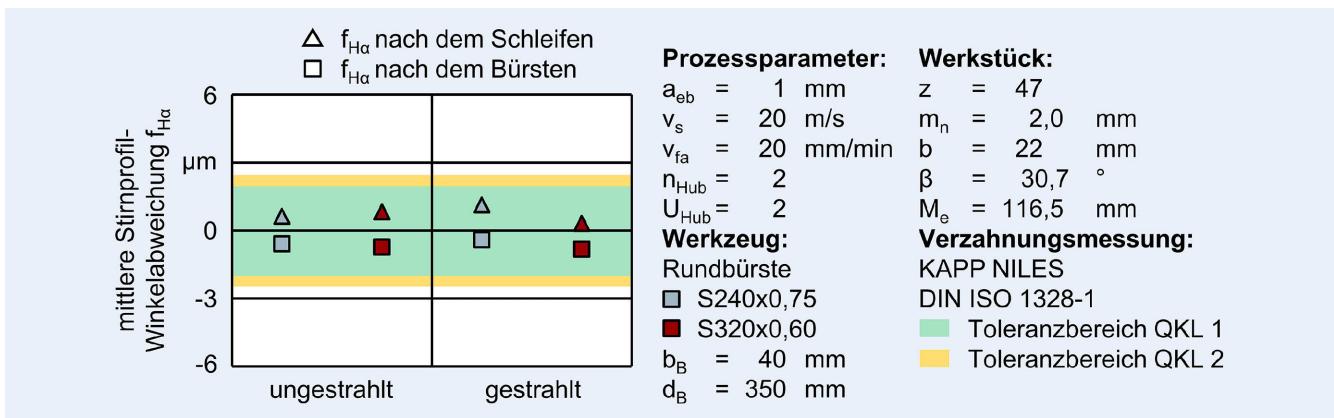
**Bild 6.** Parameterstudie zur Bestimmung der optimalen Prozessparameter für die Bürstbearbeitung kleinmoduliger Verzahnungen. *Grafik: IWFTU Berlin*

bearbeitung mit den zuvor bestimmten Prozessparametern gemessen. In **Bild 7** sind die mittleren Änderungen des arithmetischen Mittelwerts der Höhe  $\overline{\Delta Ra}$  dargestellt.

Zunächst ist zu erkennen, dass mit der Bürstenspezifikation S240x0,75, wie auch bei den Versuchen mit den anderen Zahnrädgometrien, eine stärkere Steigerung der Oberflächenqualität



**Bild 7.** Mittlere Änderung des arithmetischen Mittelwerts der Höhe  $\Delta Ra$  bei der Bürstbearbeitung gestrahlter und ungestrahlter Verzahnungen aus einem kleinen Modulbereich. *Grafik: IWFTU Berlin*



**Bild 8.** Einfluss der Bürstbearbeitung auf die Verzahnungsgeometrie der Zahnräder aus dem kleinen Modulbereich. *Grafik: IWFTU Berlin*

als mit der Bürste S320x0,60 erzielt werden konnte. Des Weiteren konnte festgestellt werden, dass die Änderung des Ra-Werts bei den gestrahlten Verzahnungen etwas geringer ist als bei den ungestrahlten Werkstücken. Es ist aber grundsätzlich möglich, die Oberflächenrauheit der Zahnflanken von zusätzlich gehärteten Zahnradern durch den Bürstprozess zu verbessern. Bei allen vier Versuchsreihen konnte weder eine signifikante Initialphase, noch Verschleiß des Bürstwerkzeugs über die Bearbeitung der fünf Verzahnungen erkannt werden.

Zur Untersuchung des Einflusses des Bürstprozesses auf die Verzahnungsgeometrie wurden die Verzahnungen der vier Versuchsreihen vor und nach der Bürstbearbeitung vermessen. Wie **Bild 8** zu entnehmen ist, ändert sich die Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  leicht in negative Richtung. Dies lässt darauf schließen, dass der Abtrag am Zahnkopf geringfügig stärker ausgeprägt ist als im Zahnfußbereich. Insgesamt liegt die Stirnprofil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  allerdings auch nach dem Bürsten durchgehend in Qualitätsklasse (QKL) 1. Es ist also möglich, auch bei kleindmoduligen Verzahnungen eine Verbesserung der Oberflächenqualität zu erreichen, ohne die Verzahnungsgeometrie signifikant zu beeinflussen.

## 4 Zusammenfassung und Fazit

Das Ziel der in diesem Beitrag dargestellten Untersuchungen war es, die Übertragbarkeit eines Bürstfinishingprozesses für Zahnradflanken auf verschiedene Verzahnungsgeometrien zu

überprüfen. Dazu wurden zunächst Verzahnungen aus dem Anwendungsbereich des Anlagenbaus ( $m_n = 5,5$  mm,  $z = 21$ ) mit derselben Prozessstrategie wie bei dem entwickelten Referenzprozess ( $m_n = 10$  mm,  $z = 39$ ) bearbeitet. Die Analogieversuche mit den entsprechend der kleineren Lückengeometrie profilierten Werkzeugen zeigten vergleichbare Ergebnisse zu den Referenzuntersuchungen. Bei gleicher Prozessführung kann also davon ausgegangen werden, dass die Erkenntnisse nahezu unabhängig von der Werkstückgeometrie übertragen werden können.

Zusätzlich wurde die Bürstbearbeitung von Zahnräder aus dem Automobilbau ( $m_n = 2,0$  mm,  $z = 47$ ) untersucht. Bei solch kleinen Verzahnungen ist eine Profilbürstbearbeitung nicht zielführend. Daher wurde eine kontinuierliche Prozessstrategie mit unprofilierten Rundbürsten entwickelt. Für den neu entwickelten Prozess wurde mit einer Parameterstudie das optimale Verhältnis zwischen Werkstückdrehzahl  $n_z$  und axiale Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fa}$  ermittelt. Die mit diesen Prozessparametern durchgeführten Bürstversuche an gestrahlten und ungestrahlten Werkstücken ergaben analog zu den vorherigen Ergebnissen, dass die Bürstenspezifikation S240x0,75 bessere Ergebnisse erzielt, als die Spezifikation S320x0,60. Auch wenn die maximale Verbesserung der Rauheit mit  $\Delta Ra \approx 0,1$  μm deutlich geringer ist, als bei den Versuchen mit der Referenzprozessführung ( $\Delta Ra \approx 0,2$  μm), ist es dennoch gelungen, die Oberflächenqualität zu verbessern, ohne die Verzahnungsgeometrie negativ zu beeinflussen. Dies könnte die Grundlage für weitere Untersuchungen und eine Optimierung dieser kontinuierlichen Prozessführung bilden.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass der Einsatz von abrasiven Bürstwerkzeugen für die Finishingbearbeitung von Zahnradflanken eine Alternative gegenüber den derzeit üblichen Verfahren sein kann – und dies für die unterschiedlichsten Verzahnungsgeometrien.

## FÖRDERHINWEIS

Diese Forschung wurde vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) unter dem Vorhaben „Bürsten von Verzahnungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität“, Projektnummer 21015 N gefördert.

## DANKSAGUNG

Die Autoren bedanken sich bei der Renk GmbH, Augsburg, für die Bereitstellung von Versuchswerkstücken sowie Kapp Niles GmbH & Co. KG, Coburg, für die messtechnische Unterstützung.

## L iteratur

- [1] Bundesverband für Windenergie: Funktionsweise und technische Fortschritte – Leistungssteigerung bei Windenergieanlagen. Internet: [www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/](http://www.wind-energie.de/themen/anlagentechnik/funktionsweise/). Zugriff am 15.06.2023
- [2] Tobie, T.: Optimierung Flankentragfähigkeit – Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Kombination von Stahlbehandlung und Finishingprozess. Forschungsvereinigung Antriebstechnik FVA Nr. 521 I (2010), Forschungsheft Nr. 957
- [3] Kapp, M.: Hartfeinbearbeitete Antriebskomponenten zur Steigerung der Energieeffizienz in Antrieben. Proceedings des XIII. Internationalen Produktionstechnischen Praktikum, Berlin, 2010
- [4] Niskanen, P.; Manesh, A.: Reducing wear with superfinish technology. The AMPTIAC Quarterly 7 (2003) 1, pp. 3–9
- [5] Schwienbacher, S.: Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. Dissertation, Technische Universität München, 2008
- [6] Hohle, A. C.: Auswirkungen von Rauheit, Oberflächenstruktur und Fertigungsabweichung auf das Lauf- und Geräuschverhalten hartfeinbearbeiteter hochüberdeckender Zylindrerräder. Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, 2002
- [7] Otmar, A.; Tröbst, S.: Untersuchungen von Zahnradgeräuschen an schweren Nutzfahrzeugdieselmotoren mittels MAN-Geräuschindex. In: Tschöke, T.; Henze, W. (Hrsg.): Motor- und Aggregat-Akustik II. Fachbuch Band 51. Essen: Expert Verlag 2005, S. 181–189
- [8] Zimmer, M.: Die Bedeutung der E-Mobilität für das Wälzschleifen von Verzahnungen mit Fokus auf das Geräuschverhalten im Getriebe. Schweizer Schleif-Symposium, Zürich/Schweiz 2022
- [9] Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren: Schleifen, Honen, Läppen. Berlin: Springer-Verlag 2005
- [10] Rösler Oberflächentechnik GmbH: Gleitschliffanlage für Superfinishing – Die Spitzen glätten. Journal für Oberflächentechnik 1 (2008), S. 48–49
- [11] Menz Stahlwaren GmbH: ISF. Isotropic Super Finishing. Internet: [www.menz-stahlwaren.de/oberflaechentechnik/gleitschleifen /-isotropic-super-finishing/](http://www.menz-stahlwaren.de/oberflaechentechnik/gleitschleifen/-isotropic-super-finishing/). Zugriff am 15.06.2023
- [12] Landenberger, D.; Steinhilper, R.; Rosemann, B.: Verbesserung der Oberflächengüte durch Bürstspanen. VDI-Z integrierte Produktion 149 (2007) 3, S. 67–69
- [13] Hochschild, L.: Finishingbearbeitung technischer Oberflächen aus gehärtetem Stahl unter Verwendung von Rundbürsten mit Schleiffilamenten. Dissertation, Technische Universität Berlin, 2017
- [14] Uhlmann, E.: Bürsten von Verzahnungen zur Verbesserung der Oberflächenqualität. Forschungsvereinigung Antriebstechnik FVA Nr. 753 I (2018), Forschungsheft Nr. 1291
- [15] Uhlmann, E.; Thalau, J.: Finishing of Gear Wheels Using Abrasive Brushes. International Conference on Competitive Manufacturing, Stellenbosch/South Africa, 2019, pp. 324–330
- [16] Gölzow, B.; Uhlmann, E.: Gear Wheel Finishing with Abrasive Brushing Tools to Improve the Surface Quality of Tooth Flanks for the Industrial Application. Machines 10 (2022) #1220, doi.org/10.3390/machines10121220
- [17] DIN EN ISO 21920–2: Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Profile – Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth Verlag 2022
- [18] DIN ISO 1328–1: Zylindrerräder – ISO-Toleranzsystem – Teil 1: Definitionen und zulässige Werte für Abweichungen an Zahnflanken. Berlin: Beuth Verlag 2018



Prof. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann

Fraunhofer Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin

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



Bernhard Gölzow, M.Sc.

Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF), Technische Universität Berlin  
Pascalstr. 8–9, 10587 Berlin  
Tel. +49 30 / 314-24963  
guelzow@iwf.tu-berlin.de  
www.iwf.tu-berlin.de

## LIZENZ



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