

Sebastian Goeke

**Oberflächenstrukturierung tribologisch  
beanspruchter Funktionsflächen  
durch Microfinishen**

**Schriftenreihe des ISF  
Hrsg.: Dirk Biermann**

# **Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Microfinischen**

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Dr.-Ing.**

von der Fakultät Maschinenbau  
der Technischen Universität Dortmund  
genehmigte Dissertation

**Dipl.-Wirt.-Ing. Sebastian Goeke**

aus

Münster

Tag der mündlichen Prüfung: 17.10.2016

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann
2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Alfons Fischer

**Dortmund, 2016**

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.

**ISBN 978-3-8027-8790-4**

# Danksagung

Die vorliegende Dissertationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) der Technischen Universität Dortmund. Für die stetige wissenschaftliche Förderung und das mir entgegengebrachte Vertrauen möchte ich mich bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr.-Ing. Dirk Biermann, dem Institutsleiter des ISF, bedanken. Für die Übernahme des Koreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Alfons Fischer, Leiter des Lehrstuhls Werkstofftechnik der Universität Duisburg-Essen. Weiterer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther für die Mitwirkung in der Prüfungskommission sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Markus Rabe für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei allen aktuellen und ehemaligen Mitarbeitern des ISF sowie im Speziellen den Mitarbeitern der Abteilung *Schleiftechnologie* möchte ich mich für die hervorragende Arbeitsatmosphäre bedanken. Die äußerst kollegiale Zusammenarbeit und wertvollen Diskussionen mit meinem langjährigen Bürokollegen Herrn Dipl.-Ing. Michael Kansteiner habe ich besonders geschätzt. Frau Dr.-Ing. Priska Stemmer und Herrn Dr.-Ing. Daniel Stickel danke ich für die sehr gute Zusammenarbeit im Rahmen des Kooperationsprojektes „Erhöhung von Leistungsdichte und Lebensdauer hochbelasteter Funktionsflächen durch spanende Oberflächenkonditionierung“, gefördert von der Stiftung Mercator.

Für die konstruktiven Anmerkungen bei der Erstellung der Arbeit möchte ich mich bei Frau Jun.-Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Petra Wiederkehr, Herrn Dr.-Ing. Sascha Rausch und Herrn Dipl.-Ing. Sebastian Schumann bedanken. Vielen Dank auch an Herrn Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Tobias Wagner für die stete Bereitschaft zur Unterstützung in Fragen zur statistischen Versuchsplanung und -auswertung. Großer Dank gilt zudem unseren Technikern, insbesondere Herrn Jörg Eichmann und Herrn Michael Kater, die mir mit hilfreichen Ratschlägen und tatkräftiger Unterstützung zur Seite standen. Ganz besonders hervorheben möchte ich den Beitrag von Frau Dipl.-Wirt.-Ing. Rebecca Folle sowie Herrn Dipl.-Ing. Meik Tilger, den sie im Rahmen ihrer Diplomarbeiten geleistet haben und damit einen entscheidenden Anteil am Gelingen dieser Arbeit hatten. Frau Nicole Kneppel danke ich für die Durchsicht und Korrektur meiner Arbeit.

Mein größter Dank gilt meiner Familie und insbesondere meinen Eltern, ohne deren kontinuierliche Unterstützung die Erstellung der Arbeit in dieser Weise nicht möglich gewesen wäre. Bei meinen Brüdern Pascal und Marvin möchte ich mich für diverse gemeinsame Freizeitaktivitäten bedanken, die mir die Möglichkeit zur zeitweiligen Ablenkung boten. Besonders bedanken möchte ich mich bei meiner Freundin Stella für die liebevolle Unterstützung und Geduld insbesondere in der Endphase der Promotion.



# Kurzfassung

## **Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Microfinishen**

Die Funktionsflächen der Kontaktkörper eines tribologischen Systems sind einer hohen Beanspruchung durch diverse Verschleißmechanismen ausgesetzt. Kontinuierlich steigende Leistungsanforderungen erfordern einen vermehrten Einsatz dieser Systeme unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen, sodass die Funktionsflächen zumindest partiell in direktem Kontakt stehen. Dies steigert den Einfluss der spezifischen Oberflächentopographie der Kontaktflächen auf das Systemverhalten.

Durch das Honen lassen sich hohe Oberflächenqualitäten in Form geringer Rauheiten erzielen und insbesondere der Materialanteil der Werkstückrandzone gezielt einstellen. Konventionell wird das Honen mit Honsteinen ausgeführt, wobei der Verschleiß des Honsteins eine schlecht kalkulierbare Einflussgröße auf die resultierende Oberflächenstruktur darstellt. Alternativ bietet das Außenrund-Kurzhubhonen mit Finishbändern, auch Microfinishen genannt, aufgrund des kontinuierlichen Bandvorschubs und dem daraus resultierenden stetigen Eingriff neuer, ungenutzter Schneidkörner eine höhere Reproduzierbarkeit.

Im Rahmen dieser Dissertation wird das Potenzial des Microfinishens zur gezielten Konditionierung der Oberflächentopographie tribologisch beanspruchter Funktionsflächen aufgezeigt. Die primäre Zielsetzung besteht dabei in der Entwicklung von Prozessstrategien, die abgestimmt auf den jeweiligen Anwendungsfall die Fertigung angepasster Oberflächenstrukturen ermöglichen. Basierend auf der Identifikation der für das Prozessergebnis maßgeblichen Stellgrößen erfolgt eine Analyse der generierten Topographien hinsichtlich der erzielten Oberflächenqualität und des Materialanteils. Die Wechselwirkungen der einzelnen Stellgrößen sowie die resultierenden Materialabtragsmechanismen bilden dabei einen zentralen Aspekt der Arbeit.

Durch die zusätzliche Berücksichtigung der Ausgangstopographie vor der Finishbearbeitung, die in der Regel ebenfalls durch spanende Fertigungsverfahren erzielt wird, werden verschiedene Prozessketten zur gezielten Oberflächenstrukturierung vorgestellt und bewertet. Die analysierten Prozesszusammenhänge werden abschließend für die Endbearbeitung hartmetallähnlicher Verschleißschutzschichten genutzt. Die im Vergleich zu konventionell genutzten Werkstoffen wesentlich höhere Härte der Schichten bildet eine maßgebliche Herausforderung für die Finishbearbeitung. Durch die gezielte Abstimmung mehrerer aufeinanderfolgender Prozessschritte lassen sich werkstoffübergreifend Oberflächenstrukturen mit einer geringen Rauheit im Submikrometerbereich erzielen sowie alternativ plateauartige Strukturen, die sich durch eine erhöhte Riefentiefe auszeichnen.



# Abstract

## Surface structuring of tribologically stressed functional surfaces by microfinishing

Tribologically stressed functional surfaces are subjected to various wear mechanisms. Due to the rising demand on the performance of these tribological systems, they are increasingly used under mixed and boundary lubrication conditions resulting in at least partial contact of the functional surfaces. This raises the influence of the specific topographies of the contact surfaces on the tribological behaviour.

Honing is a machining process suitable for generating a high surface quality by reducing the surface roughness. In addition, it is possible to generate specific material bearing ratios. Conventionally, the honing process is conducted by using honing stones. The wear of the honing stone constitutes an influencing variable for the process which can hardly be predicted. Alternatively, the application of finishing belts, also called microfinishing when using a short-stroke honing process, provides several advantages concerning the reproducibility. Due to the continuous belt feed, the process is characterized by a steady use of new grains.

Within the scope of this thesis, the potential of the microfinishing process for the defined surface structuring of tribologically stressed functional surfaces is shown. The main objective is the development of process strategies allowing the machining of suitable surface topographies for specific tribological loading conditions. Based on the identification of the main process parameters with the most significant influence on the process result, the specific topographies are analyzed concerning their characteristic features. The evaluation of the different interactions of the process parameters as well as the resulting material removal mechanism form an essential aspect of the thesis.

Considering the initial surface topography prior to the finishing as influencing variable, different process chains are analyzed regarding their potential for a defined surface structuring. Furthermore, the analyzed interdependencies between the process variables are used for the machining of wear resistant tungsten carbide coatings. The superior hardness of these coatings poses a major challenge for the design of the microfinishing process strategies. Using several precisely adjusted process steps allows the generation of surface topographies with a surface roughness within the submicrometer range. Alternatively, it is possible to machine plateau-like surface topographies with an increased valley depth as well.



# Inhaltsverzeichnis

<b>Abkürzungen</b>	<b>xi</b>
<b>Formelzeichen</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Forschung</b>	<b>3</b>
2.1 Tribologische Systeme . . . . .	3
2.1.1 Verschleißarten, -mechanismen, -formen . . . . .	4
2.1.2 Entwicklung der Oberflächenrandzone über die Lebensdauer . . . . .	7
2.1.3 Kontaktsituation in Abhängigkeit der Oberflächentopographie . . . . .	10
2.2 Verschleißschutzschichten . . . . .	14
2.2.1 Beschichtungstechnologien . . . . .	14
2.2.2 Hochgeschwindigkeitsflammspritzen - HVOF . . . . .	16
2.2.3 Spanende Bearbeitung . . . . .	21
2.3 Oberflächenfeinbearbeitung durch Honen . . . . .	23
2.3.1 Verfahrensvarianten . . . . .	25
2.3.2 Microfinishen . . . . .	27
2.3.3 Kombinationsbearbeitung . . . . .	31
2.3.4 Werkstoffabtrag - Spanbildung in der Feinbearbeitung . . . . .	33
<b>3 Zielsetzung und Aufgabenstellung</b>	<b>39</b>
<b>4 Versuchsplanung und -durchführung</b>	<b>41</b>
4.1 Werkstoffe . . . . .	41
4.2 Werkstückkonturen . . . . .	43
4.3 Werkzeugmaschinen . . . . .	44
4.4 Werkzeuge . . . . .	47
4.4.1 Andrückrollen . . . . .	47
4.4.2 Finishbänder . . . . .	47
4.4.3 Fräs- und Schleifwerkzeuge zur Probenpräparation . . . . .	48
4.5 Mess- und Analysetechnik . . . . .	49
4.6 Versuchsplanung . . . . .	50
<b>5 Prozessanalyse beim Kurzhubhonen</b>	<b>53</b>
5.1 Maßgebliche Stellgrößen für die Oberflächenqualität . . . . .	54
5.2 Oberflächenstruktur und Materialanteil . . . . .	56
5.3 Materialabtrag und Werkzeugverschleiß . . . . .	59
5.4 Formgenauigkeit . . . . .	63

---

5.5	Materialabtrag in Abhängigkeit der Werkzeug-Bindungsstruktur . . . . .	64
5.6	Gestufte Prozessführung . . . . .	67
<b>6</b>	<b>Oberflächenstrukturierung in Abhängigkeit der Prozesskette</b>	<b>71</b>
6.1	Einfluss der Vorbearbeitung auf die resultierende Oberflächenstruktur .	74
6.2	Einfluss des Werkstoffs auf die Endbearbeitung . . . . .	79
6.3	Tribologisches Verhalten unter Gleitbeanspruchung . . . . .	81
<b>7</b>	<b>Endbearbeitung von Verschleißschutzschichten</b>	<b>87</b>
7.1	Prozessauslegung . . . . .	88
7.1.1	Analyse der Kontaktbedingungen . . . . .	91
7.1.2	Gestufte Prozessführung . . . . .	93
7.1.3	Zeitspanvolumen . . . . .	95
7.1.4	Einfluss einzelner Schnittgeschwindigkeitskomponenten auf die Endbearbeitung . . . . .	97
7.1.5	Einfluss der Ausgangsrauheit auf die resultierende Oberflä- chenstruktur . . . . .	100
7.1.6	Spanbildungsmechanismen . . . . .	107
7.2	Belastungsfall in Abhängigkeit der Werkstückgeometrie . . . . .	109
7.2.1	Analyse der Kontaktbedingungen . . . . .	112
7.2.2	Gezielte Beeinflussung der Bauteilkontur . . . . .	112
7.3	Steigerung der dynamischen Festigkeit durch das Finishen . . . . .	119
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>
	<b>Literatur</b>	<b>127</b>

# Abkürzungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Beschreibung</b>
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Aluminiumoxid
AS	Lichtbogenspritzen ( <i>Arc Spraying</i> )
B	Bor
BBD	Box-Behnken Versuchsplan ( <i>Box-Behnken Design</i> )
C	Kohlenstoff
CAD	Computer Aided Design
CBN	Kubisch kristallines Bornitrid ( <i>Cubic Boron Nitride</i> )
CCD	Zentral zusammengesetzter Versuchsplan ( <i>Central Composite Design</i> )
CNC	Computerized Numerical Control
Co	Kobalt
CoCr	Kobaltchrom
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub>	Chromkarbid
Cr <sub>3</sub> C <sub>2</sub> -NiCr	Chromkarbid-Nickelchrom
CrN	Chromnitrid
CVD	Chemische Gasphasenabscheidung ( <i>Chemical Vapour Deposition</i> )
D	Diamant (als Kornwerkstoff)
DACE	Design and Analysis of Computer Experiments
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
DIN	Deutsches Institut für Normung e. V.
DLC	Amorphe Kohlenstoffschicht ( <i>Diamond-Like Carbon</i> )
EBSD	Elektronenrückstreuung ( <i>Electron Backscatter Diffraction</i> )
ED	Einschaltdauer
EDM	Erodieren ( <i>Electro-Discharge Machining</i> )
EDX	Energiedispersive Röntgenspektroskopie ( <i>Energy Dispersive X-ray Spectroscopy</i> )
EHD	Elastohydrodynamischer Kontakt (EHD-Kontakt)
EN	Euronorm
ES	Eigenspannung
Fe	Eisen
Fe <sub>3</sub> C	Eisenkarbid (Zementit)
FEPA	Federation of the European Producers of Abrasives (europäischer Verband der Schleifmittelhersteller)
HRC	Härte nach Rockwell
HSC	Hochgeschwindigkeitsbearbeitung ( <i>High Speed Cutting</i> )

---

HV	Härte nach Vickers
HVOF	Hochgeschwindigkeitsflammspritzen ( <i>High Velocity Oxygen-Fuel</i> )
ISF	Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund
ISO	International Organisation for Standardization
krz	Kubisch raumzentrierte Gitterstruktur
KSS	Kühlschmierstoff
kfz	Kubisch flächenzentrierte Gitterstruktur
LHD	Latin Hypercube Design
LWT	Lehrstuhl für Werkstofftechnologie, TU Dortmund
MHP	Machine Hammer Peening
MMS	Minimalmengenschmierung
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
N	Stickstoff
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
PKB	Polykristallines Bornitrid
PKD	Polykristalliner Diamant
PVD	Physikalische Gasphasenabscheidung ( <i>Physical Vapour Deposition</i> )
REM	Rasterlektronenmikroskop
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid ( <i>Silicon Carbide</i> )
Ti	Titan
TiAlN	Titanaluminiumnitrid
TiC	Titankarbid
TiN	Titannitrid
VC	Vanadiumkarbid
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
W	Wolfram
WC	Wolframkarbid
WC-Co	Wolframkarbid-Kobalt
WC-CoCr	Wolframkarbid-Kobaltchrom
Zr	Zirkon

# Formelzeichen

## Großbuchstaben

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$A_k$	$\text{mm}^2$	Kontaktfläche
$A_R$	$\text{mm}^2$	Ausgehobenes Material im Querschnitt
$E$	$\text{N/mm}^2$	Elastizitätsmodul ( <i>E-Modul</i> )
$F$	N	Kraft
$F_a$	N	Axialkraft
$F_{\max}$	N	Maximalkraft
$F_N$	N	Normalkraft
$F_R$	N	Reibungskraft
$F_t$	N	Tangential-/Schnittkraft
$P$	W	Leistung
$P_t$	$\mu\text{m}$	Profiltiefe
$Q_w$	$\text{mm}^3/\text{s}$	Zeitspanvolumen
$Q'_w$	$\text{mm}^3/\text{mm s}$	Bezogenes Zeitspanvolumen
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
$Ra$	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittenrauwert
$Rk$	$\mu\text{m}$	Kernrautiefe
$Rpk$	$\mu\text{m}$	Reduzierte Spitzenhöhe
$Rvk$	$\mu\text{m}$	Reduzierte Riefentiefe
$Rz$	$\mu\text{m}$	Gemittelte Rautiefe
$Rz_{\text{ini}}$	$\mu\text{m}$	Ausgangsrauheit
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$V_w$	$\text{mm}^3$	Zerspanvolumen/Spannungsvolumen

## Kleinbuchstaben

<b>Zeichen</b>	<b>Einheit</b>	<b>Bedeutung</b>
$a_e$	mm	Arbeitseingriff beim Schleifen
$a_p$	mm	Schnitttiefe beim Fräsen
$b_{WZ}$	mm	Werkzeugbreite
$d$	mm	Durchmesser
$d_k$	mm	Korngröße
$d_{WS}$	mm	Werkstückdurchmesser
$f_{\text{ab}}$		Verhältnis von verdrängtem zu abgetragenen Material
$f_K$	$\mu\text{m}$	Kreis-/Rundheitsabweichung

$f_{os}$	Hz	Oszillationsfrequenz
$f_Z$	mm	Zahnvorschub
$f_{Zyl}$	$\mu\text{m}$	Zylindrizitätsabweichung
$h_{cu}$	$\mu\text{m}$	Spanungsquerschnitt
$l_{os}$	mm	Oszillationsweite
$l_B$	m	Bearbeitungslänge
$n$	$\text{min}^{-1}$	Drehzahl
$p_N$	$\text{N/mm}^2$	Druckspannung
$r$	mm	Radius
$t$	s	Zeit
$v_c$	$\text{m s}^{-1}$	Schnittgeschwindigkeit
$v_a$	$\text{m min}^{-1}$	Axialgeschwindigkeit
$v_f$	$\text{m min}^{-1}$	Vorschubgeschwindigkeit
$v_{fb}$	$\text{mm min}^{-1}$	Bandvorschubgeschwindigkeit
$v_{os}$	$\text{m min}^{-1}$	Oszillationsgeschwindigkeit
$v_t$	$\text{m min}^{-1}$	Tangentialgeschwindigkeit

### Griechische Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$\alpha$	$^\circ$	Freiwinkel
$\alpha_h$	$^\circ$	Honwinkel
$\alpha_U$	$^\circ$	Umschlingungswinkel
$\beta$	$^\circ$	Keilwinkel
$\gamma$	$^\circ$	Spanwinkel
$\gamma_{eff}$	$^\circ$	Effektiver Spanwinkel
$\mu_G$		Gleitreibungskoeffizient
$\mu_H$		Haftreibungskoeffizient
$\nu$	$\text{mm}^2/\text{s}$	Viskosität
$\sigma_N$	MPa	Normalspannung

# 1 Einleitung

Die Relativbewegung zwischen zwei sich kontaktierenden Oberflächen erzeugt einen Reibungszustand, der die Bewegung hemmt und in Abhängigkeit der Materialpaarung, der Art des Kontaktes und den wirkenden Relativgeschwindigkeiten variieren kann. Bei technischen Anwendungen, die sich durch eine Relativbewegung verschiedener Bauteile und -komponenten zueinander auszeichnen, ist der Reibungszustand oft ein ungewolltes Nebenprodukt bei der Erfüllung der Funktionseigenschaft [Bow59, CH10].

Studien zum globalen Kraftstoffverbrauch, der sich allein aufgrund der Reibungsverluste im PKW ergibt, belegen, dass ein Drittel der aus dem Kraftstoff gewonnenen Energie benötigt wird, um Reibung im Verbrennungsmotor, im Getriebe sowie an den Reifen und Bremsen zu überwinden. Umgerechnet auf den weltweiten Anteil an Fahrzeugen entsprach dies über 200 000 Millionen Litern Kraftstoff im Jahr 2009 [HAE12]. Ähnliche Ergebnisse ergaben eine Studie zum globalen Kraftstoffverbrauch bei Schwerlast-Nutzfahrzeugen und Bussen. 2012 wurden hier 180 000 Millionen Liter Kraftstoff benötigt, um Reibungsverluste zu überwinden [HAN<sup>+</sup>14]. Allein durch die Reduktion der Motorreibung ergibt sich ein großes Potenzial zur Verbesserung des Wirkungsgrads und der Gesamteffizienz, da neben dem geringeren Ressourcenaufwand zur Überwindung der Reibleistung zusätzlich die entstehende Abwärme sowie der dafür notwendige Kühlaufwand reduziert werden [SSHB13]. Diese Ergebnisse zu Verbrennungskraftmaschinen finden sich in äquivalenter Form auch bei technischen Systemen mit elektrischen Antrieben. Für die Überwindung der Reibung in Gleit-, Wälz- oder Rollkontakten werden beispielsweise in der Papier- und Druckindustrie 15 bis 25 Prozent der elektrischen Energie benötigt [HSL<sup>+</sup>13].

Wesentliche Einflussgröße für die Funktionseigenschaften eines tribologischen Systems ist neben den Werkstoffeigenschaften die Topographie der sich kontaktierenden Oberflächen [Bow59, CH10]. In der Natur auftretende Oberflächen weisen in der Regel eine an die spezifische Funktion angepasste Topographie auf, die sich insbesondere durch eine gezielte Adaption der Mikro- und Nanostruktur auszeichnet. In Abhängigkeit der Strukturierung ergeben sich diverse funktionelle Eigenschaften, die beispielsweise eine Schutzfunktion gegen die Festsetzung von Mikroorganismen auf der Haut von Haifischen gewährleisten oder eine Selbstreinigungsfunktion durch den Lotoseffekt ermöglichen [SUCC11, MRS<sup>+</sup>13]. Angelehnt an die offensichtlich große Bedeutung des mikrostrukturellen Aufbaus für die Funktionserfüllung und in Anpassung an das spezifische tribologische System wird auch bei technischen Systemen zunehmend eine gezielte Oberflächenstrukturierung angestrebt. Dabei lassen sich die in der Natur evolutionär entwickelten Strukturen allerdings nur durch eine präzise Anpassung und Abstimmung der einzelnen Fertigungsprozesse erzielen [BCLL08].

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird anhand des Feinbearbeitungsverfahrens Kurzhubhonen, auch Microfinishes, Superfinishes oder einfach Finishes genannt,

aufgezeigt, welche Möglichkeiten der gezielten Oberflächenstrukturierung gegeben sind. Im Gegensatz zur konventionellen Bearbeitung mit Honsteinen erfolgten die experimentellen Untersuchungen unter Verwendung von Finishbändern. Besonderer Fokus liegt in diesem Zusammenhang auf der Reproduzierbarkeit des Verfahrens, da durch die einmalige Verwendung des Bandes in Kombination mit den homogenen Bindungsstrukturen ein kontrollierbarer Verschleißzustand des Werkzeugs einstellbar ist.

Abhängig von den Prozessstellgrößen, den verwendeten Werkstoffen sowie unterschiedlicher Bindungssysteme, Kornarten und -größen des Finishbandes werden in Grundlagenuntersuchungen die Möglichkeiten und Grenzen einer gezielten Oberflächenstrukturierung durch das Finishen analysiert. Durch eine Reduktion des Kühlschmierstoffeinsatzes bis hin zur Trockenbearbeitung wurde dabei im Rahmen der experimentellen Versuche eine möglichst ökologische Fertigung angestrebt. In Erweiterung der Grundlagenuntersuchungen erfolgt eine prozessübergreifende Betrachtung unter Berücksichtigung der Vorbearbeitung, um gezielt Strukturen zu erzeugen, die sich aus verschiedenen, für die jeweiligen spanenden Fertigungsverfahren typischen Oberflächentopographien zusammensetzen. Am Beispiel einer hartmetallähnlichen Verschleißschutzschicht wird des Weiteren die Übertragbarkeit der Prozessstrategien zur Bearbeitung von konventionellen Werkstoffen auf die zunehmende Nutzung von wesentlich härteren Beschichtungswerkstoffen analysiert. Bedingt durch die erhöhte Beständigkeit gegen abrasiven Verschleiß stellen diese Beschichtungen gleichfalls erhöhte Anforderungen an den spanenden Fertigungsprozess.

## 2 Stand der Forschung

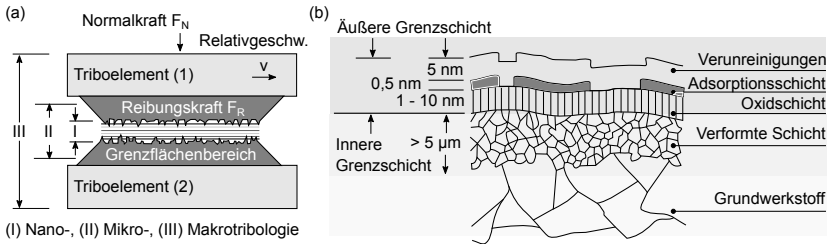
Die mechanische Interaktion zwischen zwei Oberflächen und der daraus resultierende Verschleiß sind bereits seit Jahrzehnten im Fokus der Forschung [Rab65, Sch90, CH10]. Anhand verschiedener Werkstoffcharakteristika wie beispielsweise dem Elastizitätsmodul und der Härte sowie der Kontaktbedingungen zwischen den Oberflächen wurde und wird versucht, die Eigenschaften des tribologischen Systems zu beschreiben und vorherzusagen [Rab65]. Durch die angepasste Auslegung der Kontaktflächen wurde ebenso früh begonnen, die Fertigung unter dem Aspekt zu optimieren, Bauteileigenschaften zu generieren, die einen geringen Verschleiß und eine möglichst geringe Reibung zwischen den Kontaktflächen ermöglichen [SC40, Hem47]. Dabei nimmt die zielgerichtete Auslegung dieser tribologisch beanspruchten Funktionsflächen zunehmend einen zentralen Aspekt der wissenschaftlichen Betrachtung ein [dCKPL03, BCLL08].

### 2.1 Tribologische Systeme

Tribologie, mit der wörtlichen Bedeutung „Reibungslehre“, wurde erstmals 1966 als „[...] science and technology of interacting surfaces in relative motion and of related subjects and practices“ definiert [Jos06]. Übertragen auf den ingenieurwissenschaftlichen Charakter der Tribologie ergibt sich daraus eine abgewandelte Definition als „[...] interdisziplinäres Fachgebiet zur Optimierung mechanischer Technologien durch Verminderung reibungs- und verschleißbedingter Energie- und Stoffverluste“ [CH10].

Die Interdisziplinarität der Tribologie ergibt sich aus ihrer Schnittstellenfunktion zwischen der Werkstofftechnologie, der Physik, der Chemie sowie der mechanischen Bearbeitung. Der technologische Fortschritt in jedem einzelnen Fachgebiet ermöglichte neben dem besseren Verständnis der fachspezifischen Inhalte einen zunehmenden Fokus auf die Abhängigkeiten der einzelnen Fachgebiete [Jos06]. Wie in **Abbildung 2.1** dargestellt, lässt sich ein tribologisches System in charakteristische Größenordnungen unterteilen. Während für die Ingenieurwissenschaften insbesondere die Makro- und Mikrotribologie von Interesse sind, beziehen sich die Materialwissenschaften, die Physik und die Chemie größtenteils auf die Mikro- und Nanotribologie [CH10].

Eine technische Oberfläche ist in der Randzone, wie in **Abbildung 2.1 (b)** veranschaulicht, durch einen komplexen Aufbau mit verschiedenen Schichten und Zonen gekennzeichnet, die sich in ihrer Ausdehnung teilweise um mehrere Größenordnungen unterscheiden [CH10]. Die in dieser Arbeit angestrebte Oberflächenstrukturierung durch das Finishen beeinflusst sowohl die Makro- als auch die Mikrotribologie und bildet analysierte Größenordnungen im Mikrometerbereich ab. Durch eine gezielte Anpassung der Oberflächentopographie werden direkt Kenngrößen, wie die Größe der



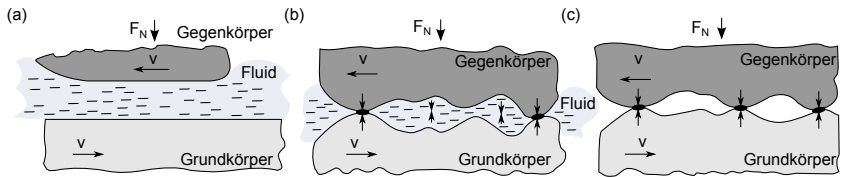
**Abbildung 2.1:** Charakterisierung tribologischer Systeme nach [CH10] (a) Tribologischer Kontakt mit spezifizierten Dimensionsbereichen (b) Werkstückrandzone einer technischen Oberfläche

Kontaktfläche, die im Kontakt entstehenden Kräfte und die Verschleißmechanismen beeinflusst.

### 2.1.1 Verschleißarten, -mechanismen, -formen

Der Verschleiß in tribologischen Systemen tritt in verschiedenen Arten auf. Diese Verschleißarten variieren in ihrer jeweiligen Intensität und Kombination. Die häufigste Ursache von Verschleiß in technischen tribologischen Systemen ist die Reibung zwischen zwei Kontaktflächen. In Abhängigkeit der Dicke des Schmierfilms zwischen diesen Oberflächen ergeben sich, wie in **Abbildung 2.2** dargestellt, unterschiedliche Reibungszustände. Die vollständige Trennung der beiden Kontaktkörper, in der Regel durch ein Fluid, wird mit dem Begriff Flüssigkeitsreibung beschrieben. Bei abnehmender Schmierfilmdicke durch unzureichende Schmierung gelangen die Körper in Kontakt, wobei die resultierende Misch- bzw. Festkörperreibung in einer Erhöhung des Reibungskoeffizienten resultiert. Insbesondere durch eine erhöhte Flächenpressung, geringe Relativgeschwindigkeiten und erhöhte Oberflächenrauheiten der Kontaktpartner ergibt sich eine Abnahme bzw. partielle Unterbrechung des Schmierfilms, sodass vermehrt Mischreibungszustände im System auftreten [Zum92]. Durch eine reduzierte Schmierfilmdicke steigt der Einfluss der jeweiligen Werkstoffeigenschaften. Weitere Einflussgrößen wie die Wärmebehandlung und die Oberflächentopographie der Kontaktflächen gewinnen bei abnehmenden Schmierfilmdicken an Bedeutung für das Verhalten des tribologischen Systems [Gle09].

Verschleiß ist nach dem *GfT Arbeitsblatt 7 Tribologie* definiert als „der fortschreitende Materialverlust aus der Oberfläche eines festen Körpers, hervorgerufen durch mechanische Ursachen, d. h. Kontakt und Relativbewegung eines festen, flüssigen oder gasförmigen Gegenkörpers“. Der Verschleiß in tribologischen Systemen wird nach der Art, dem Mechanismus und der Erscheinungsform charakterisiert. Die Verschleißart kennzeichnet die tribologische Beanspruchung. Es wird zwischen Gleit-, Roll-, Wälz-, Prall-, Schwingungs- und Furchungverschleiß unterschieden. Diese Verschleißarten



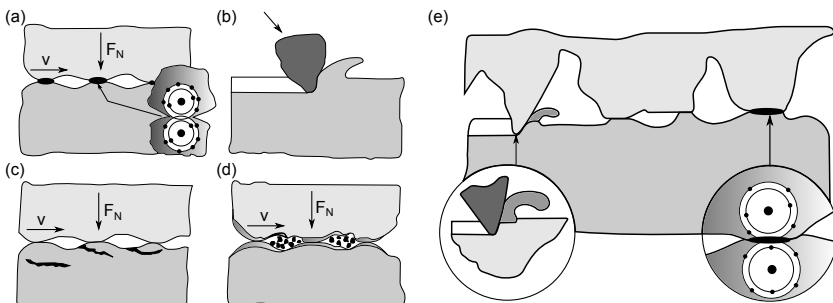
**Abbildung 2.2:** Reibungszustände im tribologischen Kontakt nach [Zum92], (a) Flüssigkeitsreibung, (b) Mischreibung, (c) Festkörperreibung

können, unter anderem in Abhängigkeit des Zwischenstoffs und des Umgebungsmediums, einzeln oder auch kombiniert auftreten [Zum81].

Ein typisches tribologisches System ist ein metallisches Wälzlager. Die Elemente der Wälzlager sind einer ständigen Zug-Druck-Wechselbelastung ausgesetzt, die aus den wiederholten Überrollvorgängen resultiert. Oft sind diese Überrollvorgänge durch hohe Flächenpressungen bis zu  $3\,000\text{ Nmm}^{-2}$  gekennzeichnet, die wiederum in plastischen Verformungen unterhalb der Werkstückoberfläche resultieren. Durch diese Verformungen werden mit steigender Anzahl der Überrollvorgänge Eigenspannungen aufgebaut. Die zusätzliche Erweichung des martensitischen Randgefüges führt zu oberflächennahen Rissen, die sich bis in eine Tiefe des Hertzschen Spannungsmaximums oder ausgehend von diesem bis zur Oberfläche ausbilden können und dort zu Ausbrüchen führen. Der hauptsächlich auftretende Verschleißmechanismus ist Wälzverschleiß in Kombination mit Oberflächenzerrüttung. Bei Sonderfällen ergibt sich auch Verschleiß infolge von korrosiver bzw. thermischer Beanspruchung. Durch zusätzlich auftretenden Prallverschleiß können ebenfalls Abplatzungen auf der metallischen Oberfläche entstehen [BT06, Gle09, Wei12].

In Abhängigkeit der spezifischen Werkstoffkennwerte der beiden Kontaktpartner, wie beispielsweise Härte und Festigkeit, ergibt sich durch die Relativbewegung eine Anpassung der Werkstückrandzone. Die energetischen und stofflichen Wechselwirkungen zwischen den Kontaktflächen unter Berücksichtigung des Zwischenmediums sowie der Umgebung werden durch die Verschleißmechanismen beschrieben. Innerhalb des tribologischen Kontakts ergeben sich diverse Verschleißmechanismen, die sich, wie in **Abbildung 2.3** dargestellt, nach *Zum Gahr* in vier Kategorien einteilen lassen: Adhäsion, Abrasion, Oberflächenzerrüttung und Tribochemische Reaktion [Zum81]. Bei der Adhäsion findet ein Materialübertrag zwischen den beiden kontaktierenden Tribopartnern statt. Adhäsive Vorgänge können infolge von zu hohem Kontaktdruck bzw. Kräfteinflüssen oder zu hohen Temperaturen entstehen. Es treten sogenannte Mikroverschweißungen auf. Bei der Abrasion handelt es sich um eine Zerspanung im Mikrobereich. Durch eine unterschiedliche Härte der kontaktierenden Körper dringt der härtere Körper in den weicheren ein und furcht diesen. Abhängig von der Härte­differenz zwischen den beiden Körpern ergibt sich der Anteil des abgetragenen Materials [Hop06]. Bei der Oberflächenzerrüttung erfolgt eine Ermüdung in Form von

Wechselbelastungen. Durch die Relativbewegung ergibt sich eine plastische Verformung der Werkstückrandzone, die bei wiederholten Überläufen zu der Ausbildung von dünnen Verschleißplättchen führt, die sich von der Oberfläche ablösen [Joh95]. Des Weiteren führen die Wechselbelastungen in der Werkstückoberfläche zu Rissbildung und -wachstum, sodass die Bildung weiterer Verschleißpartikel begünstigt wird. Die Tribochemische Reaktion hat eine Strukturschwächung des Körpers zur Folge, die durch eine chemisch-physikalische Reaktion der Oberfläche mit dem jeweiligen Umgebungsmedium hervorgerufen wird. Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass passivierende Schichten abgetragen werden und es zu einer Aktivierung der Oberfläche kommt [Lim92].



**Abbildung 2.3:** Verschleißmechanismen nach [Zum92], (a) Adhäsion, (b) Abrasion, (c) Oberflächenzerrüttung, (d) Tribochemische Reaktion, (e) Realer Verschleiß am Beispiel der Mikrofurchung durch unterschiedliche Verschleißmechanismen

In Abhängigkeit des Verschleißmechanismus wiederum ergeben sich unterschiedliche Verschleißerscheinungsformen. Bei der Adhäsion bilden sich auf den Kontaktflächen Schuppen mit resultierendem Materialübertrag zwischen den beiden Körpern. Furchen, Kratzer und Ausbrüche sind die Folge von abrasivem Verschleiß. Oberflächen, die vornehmlich durch Oberflächenzerrüttung verschlissen sind, weisen Risse und Grübchen auf, während sich bei der Tribochemischen Reaktion Schichten sowie Partikel auf der Oberfläche bilden [Zum81].

Um die Reibungsverluste in tribologischen Systemen und den Verschleiß von tribologisch beanspruchten Funktionsflächen zu reduzieren, erfolgt eine an den Anwendungsfall angepasste Auslegung der Bauteile. Dies beinhaltet sowohl die passende Wahl des Werkstoffs als auch die angepasste Bearbeitung des Bauteils. Die gezielte Anpassung der werkstofftechnischen Eigenschaften bildet eine weitere Möglichkeit, den Verschleiß der Oberflächen zu reduzieren. Bei metallischen Werkstücken wird der mikrostrukturelle Gefügebau der Werkstückrandzone durch eine Wärmebehandlung angepasst. Das Ziel der Wärmebehandlung ist eine Härtesteigerung durch Martensitbildung. Der Werkstoff wird auf eine Temperatur erhitzt, die oberhalb der Austenitisierungstemperatur liegt, sodass sich das Gefüge vom kubisch-raumzentrierten Zustand in den

kubisch-flächenzentrierten Zustand wandelt. Durch die gezielte Abkühlung in Wasser, Öl, Druckgas oder Luft erfolgt eine Verzerrung der kristallinen Gitterstruktur, und es kommt zur Martensitbildung. Der Kohlenstoff wird zunächst im Eisengitter eingelagert, wodurch eine geringfügige Verzerrung des Ordnungszustands der Eisenatome erzielt wird. Enthält der Werkstoff mehr Kohlenstoff als im Mischkristall gelöst werden kann, wird der Überschuss als Graphit oder Eisenkarbid  $\text{Fe}_3\text{C}$  (Zementit) mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 6,7 Prozent ausgeschieden [BT06]. Diese gezielte Veränderung der Gefügestruktur des Werkstoffes bildet insbesondere bei tribologischen Systemen, die unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen betrieben werden, einen erheblichen Einfluss auf den resultierenden Reibungskoeffizienten sowie die Verschleißrate. So ermittelte *Gleiß* beispielsweise, dass insbesondere bei geringen Schmierfilmdicken unter zunehmender Mischreibung ein Wälzlagerstahl (100Cr6) mit martensitischer Gefügestruktur in der Randzone, geringere Verschleißerscheinungen aufweist als mit einer bainitischen Gefügestruktur und damit reduzierter Härte [Gle09]. Weitere Möglichkeiten, insbesondere abrasivem Verschleiß entgegen zu wirken, bestehen in der massiveren Ausführung des Bauteils oder dem Beschichten mit Schichtwerkstoffen. Durch die Erhöhung der Härte der kontaktierenden Körper ist es möglich, den abrasiven Verschleiß zu senken, während ein niedrigerer Reibungskoeffizient zu einem geringeren Adhäsionsverschleiß führt [Lim92].

### 2.1.2 Entwicklung der Oberflächenrandzone über die Lebensdauer

Die gezielte Anpassung der Werkstoff-Gefügestruktur durch eine Wärmebehandlung ermöglicht günstige Eingangsvoraussetzungen für das Verhalten der Kontaktfläche unter tribologischer Beanspruchung. Ein technisches tribologisches System zeichnet sich über die Lebensdauer allerdings durch komplexe Anpassungen der Kontaktpartner aus. Um die Vielfältigkeit der aus den Verschleißvorgängen resultierenden Änderungen zu verdeutlichen, erfolgt im folgenden Kapitel eine Darstellung der wissenschaftlich belegten Wechselwirkungen zwischen den Kontaktpartnern.

In der Vergangenheit wurde das tribologische Verhalten von Gleitflächen vielfach durch die Adhäsion zwischen diesen erklärt. Durch das Gleiten werden die Werkstoffe durch plastische Deformation geschert, wobei insbesondere die physikalischen Eigenschaften der Werkstoffe, die Adhäsion und die Scherfestigkeit das tribologische Verhalten beeinflussen. Vergleichsweise weiche Metalle wie Blei, Aluminium und Silber, die durch eine schwache Atombindung sowie eine Tendenz, die Atombindung schon bei geringen Temperaturen zu verlieren, gekennzeichnet sind, zeichnen sich durch eine erhöhte Neigung zu adhäsiven Verschleißmechanismen aus. Metalle mit höherer Härte und starken Atombindungen wie Nickel und Chrom sind durch eine geringere Adhäsionsneigung gekennzeichnet und weisen im artgleichen Kontakt tendenziell geringere Reibungskoeffizienten auf. Sich ungleich verhaltende Metalle zeigen ein Reibungsverhalten, welches analog zu dem des weicheren Materials ist [MZS80]. Ein Großteil der im trockenen tribologischen Kontakt auftretenden Kräfte zwischen

den Gleitflächen basiert auf einer mechanischen Interaktion zwischen den Oberflächen. Verschleißpartikel, die durch diese Interaktion entstehen, können durch Ploughing-Effekte die Reibung und das Verschleißverhalten beeinflussen. Der Ploughing-Effekt ist insbesondere von der Härte der Kontaktflächen abhängig. Durch strukturierte Oberflächen können Verschleißpartikel in entsprechenden Kavitäten gezielt aus dem Kontakt geführt werden, sodass die mechanischen Interaktionen reduziert werden und sich der Reibungskoeffizient sowie die Verschleißbeständigkeit verbessern [SS87, SM94].

Durch die Forschung der letzten Jahrzehnte wandelte sich der Begriff Tribologie von dem Versuch, Reibungs- und Verschleißgesetze für verschiedene Materialkombinationen zu erstellen, über die Tribologie der Oberflächenanalyse zur Tribologie der Grenzflächen, die den Fokus auf die Grenzfläche und die dort entstehende Reibung bzw. den dort entstehenden Verschleiß legt. Die zwischen den Kontaktpartnern entstehende Grenzfläche, oft auch als „Dritter Körper“ oder „Tribomaterial“ bezeichnet, kann als Zone verstanden werden, die sowohl aus dem Material der sich kontaktierenden Oberflächen sowie dem Umgebungsmedium besteht [Sch90]. Durch die mechanische Interaktion ergibt sich bei metallischen Oberflächen eine intensive Vermischung, wobei hohe Flächenpressungen diesen Vorgang begünstigen. Als Ergebnis dieser Beanspruchung ändert sich sowohl das Material der Oberfläche als auch die oberflächennahe Randzone der Bauteile [SSP03, RK10]. Diese Randzone ist durch eine komplexe und streng inhomogene Schichtstruktur gekennzeichnet, wobei sich die oberste Schicht durch eine nanokristalline Struktur auszeichnet, die häufig durch eine erhebliche Kristallverzerrung gekennzeichnet ist. Unter dieser Schicht befindet sich ein Material, welches durch die Bearbeitung und plastische Deformationen verhärtet und fein strukturiert ist [SGB<sup>+</sup>07].

Beispiele für die Veränderung der mikrokristallinen Gefügestruktur in der Randzone bei tribologisch beanspruchten Werkstücken finden sich bei unterschiedlichsten Anwendungen. *Binkowski* ermittelte in der Werkstückrandzone an verschlissenen 100Cr6-Lagern eine Härte von 900 HV. Dies stellte eine deutliche Steigerung im Vergleich zu der ursprünglichen Härte von 720 HV nach dem Härteprozess dar. Aufgrund hoher Reibleistungen änderte sich das Werkstoffgefüge der harten Randzone zu einer feinkörnigeren Gefügestruktur. Dieses nanokristalline Gefüge entsteht durch schnelle Temperaturwechsel und hohe plastische Verformungen. Der Härteanstieg ergibt sich aus der Umwandlung von Restaustenit zu Martensit [BWD05]. Tribologische Untersuchungen an Gusseisen haben ergeben, dass die Kombination aus nanokristalliner Oberflächenschicht und einer durch die Bearbeitung gehärteten bzw. deformierten Randzone unterhalb dieser Schicht verantwortlich ist für eine hohe Verschleißbeständigkeit und eine geringe Reibung. Allerdings ist eine ausreichende Reibkraft erforderlich, um eine intensive plastische Verformung sowie eine Reduzierung der Korngröße zu erzielen [SGB<sup>+</sup>07]. Das Verschleißverhalten im eingelaufenen Zustand hängt zudem von der Intensität der Einlaufbelastung und dem damit verbundenen Energieeintrag zusammen. *Kehrwald* ermittelte in experimentellen Versuchsreihen zur

Analyse von Reibung und Verschleiß in Verbrennungsmotoren, dass sich tendenziell höhere Verschleißgeschwindigkeiten bei einer dickeren veränderten Werkstoffrandzone ergeben als bei dünnen gegenüber dem Grundwerkstoff veränderten Zonen [Keh98]. *Büscher* analysierte die wirkenden Verschleißmechanismen sowie die tribologisch induzierten Änderungen des oberflächennahen Gefüges an explantierten Metall-Metall-Hüftgelenkspaarungen. Das sich ergebende Gefüge in der Randzone unterteilte *Büscher* in charakteristische Grenzschichten. Ausgehend vom unbeeinflussten Grundwerkstoff ergeben sich Schichten mit ein- bzw. zweidimensionalen Gitterdefekten und streng lokalisierter Gleitung sowie dynamisch rekristallisierenden Schichten direkt in der Kontaktzone. Die Entwicklung der Mikrostruktur von einem groben kubischflächenzentrierten Gussgefüge zu einer nanokristallinen Randschicht mit überwiegend martensitischem Anteil führte zu einer Steigerung der Festigkeit. Die tribologischen Eigenschaften wurden durch die sukzessive Zunahme von Gitterdefekten und einer stetigen Abnahme der Korngröße verbessert [Büs05]. Das in der Randzone entstehende Tribomaterial ist zudem gekennzeichnet durch eine mechanische Vermischung mit organischem Material in einer Tiefe von 50 bis 200 nm. Durch diese veränderte Randzone wird der direkte Kontakt zwischen den metallischen Kontaktpartnern verhindert und beschränkt so den entstehenden Verschleiß. Die Mechanismen sind vergleichbar mit der Wirkung von Antiverschleiß-Additiven in Hochleistungsölen. Diese Additive bilden Oberflächenschutzfilme, die das darunter liegende Material vor Verschleiß schützen [WFB<sup>+</sup>10].

Die Beschaffenheit des Schmierstoffs bildet eine weitere Einflussgröße für das Verhalten des tribologischen Systems, wobei in diesem Fall insbesondere chemische Reaktionen das Systemverhalten beeinflussen. Durch die Untersuchung der Grenzschmierung zwischen Kolbenring und Zylinderbuchse ermittelte *Baumgarten*, dass in Abhängigkeit der zwischen den Tribopartnern entstehenden Wärme Polymerisationsprodukte im Öl gebildet werden. Durch deren Ablagerung auf den Gleitflächen trennen sie die beiden kontaktierenden Körper. Die Reibung entsteht also nicht zwischen den metallischen Kontaktpartnern, sondern auf den kunststoffähnlichen Überzügen. Dies resultiert in einer erheblichen Reduzierung des Verschleißes an den metallischen Körpern. Lediglich dort, wo diese Schichten nicht zu finden sind, ergibt sich ein signifikant erhöhter Verschleiß. Die Folge sind stark erhöhte Reibkräfte sowie Fresserscheinungen [Bau68]. Der durch die Verbrennung entstehende Ruß hat einen ebenso signifikanten Einfluss auf den entstehenden Verschleiß. Durch einen erhöhten Anteil an Rußpartikeln ergibt sich tendenziell eine Erhöhung der Verschleißrate. Dabei bilden die Morphologie, die Oberflächenchemie sowie die Reaktivität der Rußpartikel wichtige Einflussfaktoren. Die Partikel ermöglichen chemische Verbindungen mit mechanischen Partikeln, sodass abhängig von der Art des Rußes chemische Adsorptionsmechanismen der Öladditive auf den Gleitflächen ermöglicht werden. Dies kann den Verschleiß signifikant erhöhen [ADN<sup>+</sup>10].

Ein alternativer Ansatz zur Reduzierung des an der Zylinderwand bzw. des Kolbenrings entstehenden Verschleißes von *Lenauer et al.* besteht in der Verwendung von

künstlich gealtertem Öl. Im Rahmen der Studie wurde der Alterungsprozess durch die gezielte Zugabe von chemischen Elementen abgebildet, die bei der Verbrennung von Ethanol entstehen. Diese zusätzliche Additivierung sollte die während des Betriebes entstehenden Blow-By-Produkte abbilden. Im Gegensatz zu neuem Öl, das einen vergleichsweise geringen Verschleiß im Einlauf ermöglichte, zeichnete sich das künstlich gealterte Öl durch eine wesentlich geringere Verschleißrate im eingelaufenen Zustand aus. Der über die gesamte Laufzeit entstehende Verschleiß konnte durch die Nutzung des künstlich gealterten Öls auf diese Weise erheblich reduziert werden [LTWJ15].

Basierend auf dem großen Einfluss der beschriebenen Effekte hinsichtlich der Entwicklung und Veränderung des Verschleißverhaltens eines tribologischen Systems, ist die Berücksichtigung dieser Aspekte auch zunehmend ins Zentrum der Forschung und Weiterentwicklung spanender Fertigungsverfahren gerückt. Die Verschleißbeständigkeit der durch verschiedene spanende Fertigungsverfahren erzielten Funktionsoberflächen wird allgemein als „Surface Integrity“ bezeichnet. Die erzielte Oberflächenqualität sowie die Gefügestruktur der Werkstückrandzone haben einen erheblichen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit gegen eine Vielzahl an Verschleißarten, wie beispielsweise abrasiven und korrosiven Verschleiß sowie die Ermüdungsfestigkeit. Durch die gezielte Anpassung der Stellgrößen im spanenden Fertigungsprozess, wie beispielsweise Schnittgeschwindigkeit, Vorschub und Schnitttiefe sowie der Werkzeugart und -beschaffenheit, lassen sich sowohl die Oberflächenqualität als auch die Gefügestruktur und die Eigenspannungen beeinflussen. Beispiele in der Literatur finden sich sowohl für die Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide, wie beispielsweise das Drehen und Fräsen, als auch mit geometrisch unbestimmter Schneide, wie das Schleifen und Honen [JRE08, LTZ<sup>+</sup>14, KTBS14]. Die Analyse des thermo-mechanischen Belastungskollektivs mit den resultierenden Auswirkungen auf die Werkstückrandzone bildet dabei einen Kernaspekt [BCK<sup>+</sup>82, LBG98, JBM<sup>+</sup>11].

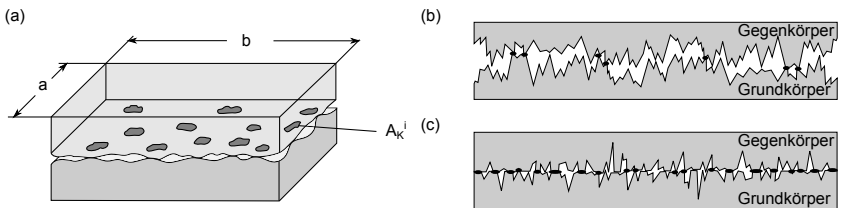
Um die Oberflächenintegrität der beanspruchten Funktionsflächen zu steigern, werden zunehmend auch alternative Fertigungsverfahren, wie das Glatt- und Festwalzen, hinsichtlich der resultierenden Werkstückrandzoneigenschaften analysiert. Durch die Substitution der finalen Honprozessstufe zur Endbearbeitung von Zylinderlaufflächen konnten *Karpuschewski et al.* so eine für die tribologische Beanspruchung verbesserte Oberflächenqualität in Form eines höheren Materialtraganteils erzielen, ohne nachteilige chemische Veränderungen in die Werkstückrandzone einzubringen [KPWR12, KWR14].

### 2.1.3 Kontaktsituation in Abhängigkeit der Oberflächentopographie

Die Bildung des verschleißmindernd wirkenden Tribomaterials mit einer an die tribologische Beanspruchung angepassten Werkstückrandzone ist in großem Maße von den im Einlauf des Systems vorliegenden Systembedingungen abhängig. In der Regel ergibt sich über die Lebensdauer eine Abnahme des Reibungskoeffizienten sowie eine geringere Verschleißrate, die insbesondere auf der Adaption der Oberflächentopo-

graphien der Kontaktflächen basiert [GPS10]. In diesem Zusammenhang kommt der fertigungstechnisch hergestellten Oberfläche der Werkstücke eine große Bedeutung zu, da diese in Abhängigkeit der jeweiligen Strukturierung direkten Einfluss auf den Einlaufprozess hat. Der Einlauf einer schlecht vorkonditionierten Oberfläche tendiert zu einer ähnlichen Oberflächentopographie nach dem Einlauf wie eine zuvor angepasste Topographie, allerdings benötigt der Einlaufprozess dann länger [Fuh80]. Das Einlaufverhalten kann jedoch auch über den Einlauf hinaus von entscheidender Bedeutung sein. Studien aus verschiedenen Industriebereichen belegen, dass ein günstiges Einlaufverhalten mit niedrigen Verschleißraten über den Einlauf hinaus korreliert [Fuh85].

Entscheidend für die in der Kontaktzone wirkenden Belastungen ist die reale Kontaktfläche. Diese ist, wie in **Abbildung 2.4** dargestellt, wesentlich kleiner als die maximal mögliche Kontaktfläche, die sich aus den Bauteilabmessungen ergibt. Jede Oberfläche zeichnet sich in ihrer Mikrostruktur durch eine Vielzahl an Profilspitzen und -riefen aus. Beim Kontakt der Oberflächen ergibt sich die reale Kontaktfläche größtenteils aus den hervorstehenden Profilspitzen, während die anderen Stellen nicht belastet sind. Die Oberflächenstruktur der beiden Kontaktflächen ist daher maßgeblich für die Größe der realen Kontaktfläche [Zum81].



**Abbildung 2.4:** Kontaktfläche in Abhängigkeit der Oberflächentopographie, (a) Reale Kontaktfläche als Summe der Mikrokontakte nach [CH10]; Mikrokontakte bei (b) gleichmäßigem Anteil von Profilspitzen und -riefen bzw. (c) bei einer Plateaustruktur

Die Analyse der Oberflächentopographie wurde in den letzten Jahrzehnten zunehmend detaillierter, wobei die Differenzierung zwischen unterschiedlichen Kenngrößen der Topographie, wie der Welligkeit, der Rauheit und verschiedenen Materialanteilkenngrößen, zunehmend in den Fokus gerückt wurde. Anfang der 70er Jahre basierte die Analyse der Oberflächentopographie häufig auf einem rein visuellen Abgleich der Oberflächen, ungeachtet der Tatsache, dass verschiedene Materialien unter zusätzlich variierenden Lichtbedingungen eine unterschiedliche Oberflächenerscheinungsform zeigen. Inhomogene Oberflächenstrukturen, wie sie beispielsweise bei porösen Materialien vorliegen, wurden in Ihrer Rauheit genauso bewertet wie alle anderen Oberflächen, die sich durch eine homogene Oberflächenstruktur auszeichneten. Insofern taktile Vermessungen der Oberflächentopographie durchgeführt wurden, bestand keine Einigkeit

über die Art und Weise, wie das Profil gefiltert werden sollte, um beispielsweise Welligkeit und Rauheit zu separieren [DFK76].

Diverse Untersuchungen zum Verschleißverhalten an tribologisch beanspruchten Funktionsflächen belegen, dass eine erhöhte Rauheit zu einem höheren Reibungskoeffizienten sowie einer erhöhten Verschleißrate insbesondere im Einlauf führt. Unter trockenen Bedingungen tendieren raue Oberflächen zu abrasiven Effekten und Verschleißerscheinungen, die die Reibung im Kontakt erhöhen [BRT10]. Zunächst verschleßen die hervorstehenden Profilspitzen, sodass sich eine hohe Verschleißrate ergibt [GPS10]. Im Gegensatz dazu weist eine möglichst glatte Topographie vergleichbar schlechte Voraussetzungen für den Einsatz als tribologisch beanspruchte Funktionsfläche auf. Eine Studie von *Brinksmeier et al.* zu Gleit- und Reibeigenschaften mikrostrukturierter Oberflächen von Mikro-Umformwerkzeugen belegt, dass äußerst glatte, polierte Oberflächen unter trockenen Reibungsbedingungen eine höhere Reibung aufweisen als feinstrukturierte Oberflächen, die durch Mikrofräsen bzw. Mikroschleifen erzielt wurden. Die polierten Oberflächen tendieren zu Adhäsionseffekten, durch die die Reibung höher ist [BRT10].

Eine allgemeine Abhängigkeit zwischen der Feingestalt der Oberflächentopographie und der Schmierfilmdicke stellte *Kreil* auf. Durch die steigende Höhe des Profils ergibt sich eine partielle Reduzierung der Schmierfilmdicke. Diese funktionale Abhängigkeit wird allerdings in erheblichem Maße davon beeinflusst, wie die Oberflächenstruktur zur Bewegungsrichtung im Kontakt ausgerichtet ist. Zusätzlichen Einfluss hat die Höhe der Relativgeschwindigkeit zwischen den Oberflächen. Rauheitsriefen, die quer zur Bewegungsrichtung verlaufen, führen im Allgemeinen zu einer größeren Schmierfilmdicke als Riefen, die parallel verlaufen. Dieser Effekt ist unabhängig von der Oberflächenstruktur bei steigenden Relativgeschwindigkeiten zunehmend ausgeprägter [Kre09]. Zusätzlich ergibt sich ein asymmetrisches Verhalten der Schmierfilmdicke bei variierenden Relativgeschwindigkeiten. Insofern die Kontaktflächen relativ zueinander beschleunigt werden, ergeben sich geringere Schmierfilmdicken, als bei einer Verzögerung [CH07]. Insbesondere bei geringen Schmierfilmdicken im tribologischen Kontakt erhöht sich der Einfluss der Oberflächenrauheit auf die resultierende Lebensdauer. Durch die zunehmende Mischreibung bei abnehmenden Schmierfilmdicken ergeben sich hohe lokale Spannungen in den Rauheitskontakten, die zu einer Beschädigung des Bauteils führen können [Gle09].

Unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen sind glatte Topographien im Gegensatz zu strukturierten Oberflächen nur bedingt in der Lage, einen Fluiddruck zu generieren, der die beiden Oberflächen voneinander separiert. Die Texturierung einer Oberfläche ermöglicht den Aufbau von Druckzuständen im Fluid, sofern eine Relativbewegung zwischen den Oberflächen vorliegt. Durch die daraus folgende Trennung der beiden Körper stellt sich ein geringerer Reibungskoeffizient ein. Der positive Effekt auf den Reibungskoeffizienten ergibt sich aus der Wechselwirkung zwischen Mikrorauheit und der regelmäßigen Makrotexturierung. Durch die gezielte Oberflächenstrukturierung werden die Abhängigkeiten zwischen Oberflächenrauheit und Reibungskoeffizienten

verringert [BT12]. Eine Oberflächentopographie, die beispielsweise durch Mikro-Grübchen charakterisiert ist, verbessert das Reibungsverhalten im Roll- sowie Gleitkontakt [XRAN03]. Die Verschleißbeständigkeit einer Zylinderlaufbahn beispielsweise ist neben der absoluten Rauheit von der Verteilung der einzelnen Materialanteilskenngößen abhängig. Eine erhöhte Rauheit hat einen erhöhten Einlaufverschleiß zur Folge, wobei durch eine Plateaustruktur die Reibung bei gleicher Rauheit gesenkt werden kann. Durch eine größere Riefentiefe ergibt sich ein erhöhtes Ölrückhaltevolumen, das einen erheblichen Einfluss auf die Gleiteigenschaften des tribologischen Systems aus Kolbenring und Zylinderwand hat. Zylinderoberflächen mit einer erhöhten Ölrückhaltekapazität zeigen ein günstigeres Einlaufverhalten als solche mit geringerem Ölrückhaltevolumen [Paw94, Paw96]. Der geringere Reibungskoeffizient resultiert in einem geringeren Öl- und Kraftstoffverbrauch [Bri02]. Abhängig von der jeweiligen Strukturierung ist zudem eine Änderung im zeitlichen Verschleißverlauf möglich. *Rehl et al.* ermittelten signifikante Unterschiede bei der Verschleißentwicklung von mechanisch freigelegten und struktur-gehonten Aluminium-Zylinderlaufflächen [RKS13].

Um den beiden gegensätzlichen Anforderungen einer möglichst glatten Oberflächentopographie mit zusätzlich definierter Strukturierung gerecht zu werden, wird zunehmend der Fokus auf die gezielte Mikrostrukturierung der Oberflächen gerichtet [EB99, DBK08, DKK<sup>+</sup>08]. Sowohl für die spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide als auch für die Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide existieren diverse Forschungsansätze, eine Oberflächenstruktur mit unterschiedlichen Texturierungen bei definierten Profiltiefenabständen zu generieren.

Durch die Verwendung von Mikrofräswerkzeugen mit Durchmessern von  $d < 0,2$  mm in Kombination mit einer 5-Achs-Kinematik lassen sich flexibel Strukturen und Texturierungen auf gehärteten Stählen generieren. Eine Abbildung diverser in der Natur auftretender Oberflächentopographien, die sich durch ein besonders günstiges Verhalten unter tribologischer Beanspruchung auszeichnen, ist dabei ebenso möglich wie beispielsweise die Fertigung von Strukturen für Umformwerkzeuge, bei denen in spezifischen Oberflächenbereichen erhöhte Reibwiderstände realisiert werden sollen. Als Alternative oder auch in Kombination zum Mikrofräsen eignet sich das Hochvorschubfräsen um diverse Oberflächenstrukturen bei einem höheren Zeispanvolumen zu generieren. Die gezielte Abstimmung des Vorschubs, der Zustellung sowie des Werkzeugneigungswinkels ermöglicht eine direkte Beeinflussung der entstehenden Topographien [KK14, BFH<sup>+</sup>15, KGM<sup>+</sup>16].

Ansätze zur Oberflächenstrukturierung durch spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide bestehen in der gezielten Strukturierung von Schleifscheiben. Die auf das Werkzeug aufgebrachte Textur bildet sich im Schleifprozess bei abgestimmter Schnitt- und Vorschubgeschwindigkeit auf dem Werkstück ab. Zur Strukturierung der Schleifscheibe entwickelten *Oliveira et al.* Prozessstrategien für den Abrichtprozess. Eine kontrollierte elektro-mechanische Anregung des Abrichterwerkzeugs ermöglichte die Generierung diverser Schleifscheibenprofile und -mikrostrukturen. Durch eine Abbildung dieser Strukturen auf das Werkstück lassen

sich Topographien generieren, die angepasst auf das Belastungskollektiv unter tribologischer Beanspruchung sind und auf diese Weise Einlaufprozesse verkürzen sowie die Reibung reduzieren können [OBF10, SOS<sup>+</sup>13].

Ein alternativer, jedoch sehr kosten- und zeitaufwändiger Ansatz ist die Einbringung der Strukturen durch Mikroschleifen, wobei auch bei diesem Prozess eine gezielte Anpassung der Schleifparameter erfolgen muss, um ungewollte Materialaufwürfe und -rückstände zu vermeiden [DKW10]. Zudem muss die Form der Schleifscheiben durch eine angepasste Abrichtstrategie auf das zu erzielende Profil eingestellt werden. In Abhängigkeit des Verschleißes der Schleifscheibe kann dies zu hohen Prozessnebenzeiten führen [DdLW09].

Weitere Ansätze bestehen in der zusätzlichen Einbringung von Mikro-Grübchen oder -Taschen durch mechanische Verfahren, wie beispielsweise das Machine-Hammer-Peening, oder thermische Prozesse, wie eine gezielte Laserstrukturierung. Die eingebrachten Vertiefungen fungieren als mikro-hydrodynamische Lager im Fall von Überflutungs- und Mischreibung oder auch als Ölreservoir bei Grenzreibungsbedingungen [Ets04, GKPO13]. *Braun et al.* erzielten mit laserstrukturierten Oberflächen an Wälzlagerstahl Potenziale zur Reibungsreduzierung im tribologischen Kontakt von bis zu 80 Prozent [BGS14].

## 2.2 Verschleißschutzschichten

Zur Erzielung einer hohen Verschleißbeständigkeit, insbesondere gegen abrasiven Verschleiß, werden für Verschleißschutzschichten in der Regel Werkstoffe mit einem höheren Härtewert verwendet. Hier eignen sich Metalle aus den Nebengruppen IV, V, VI und VII des Periodensystems, wie beispielsweise Titan (Ti), Chrom (Cr), Zirkon (Zr), Molybdän (Mo), Silizium (Si) und Wolfram (W). In Kombination mit den chemischen Elementen Bor (B), Kohlenstoff (C), Stickstoff (N) und Sauerstoff (O) ergeben sich Hartstoffe wie zum Beispiel Wolframkarbid (WC), Chromkarbid ( $\text{Cr}_3\text{C}_2$ ) oder Chromnitrid (CrN). Durch die Einlagerung von Nichtmetallatomen in die Lücken dichtgepackter Metallgitter können die Härteeigenschaften erhöht werden. Durch die Einlagerung von Kohlenstoff entstehen Karbide, die sich durch einen hohen Metallbindungsanteil auszeichnen. Durch die Anreicherung mit Stickstoff entstehen Nitride, die gekennzeichnet sind durch einen hohen Atombindungsanteil. Im Falle einer Anreicherung mit Sauerstoff entstehen Oxide mit einem hohen Ionenbindungsanteil. Bei Metallkarbiden ist es möglich, diese durch Bindephasen weiterzuentwickeln. Durch die Zugabe von Kobalt, Nickel oder Chrom wird verhindert, dass sich die Karbide während des Beschichtungsvorgangs zersetzen [SWK07].

### 2.2.1 Beschichtungstechnologien

Eine Kategorisierung der vielfältigen Schichtarten und Beschichtungstechnologien ergibt sich durch die Klassifizierung anhand der Schichtdicke. Bei Schichtdicken bis

zu 10 µm werden diese in der Regel durch Dünnschichttechnologien in Form einzelner Atome, Ionen bzw. Moleküle auf das Substrat aufgebracht. Die Abscheidung des Beschichtungswerkstoffes kann durch die physikalische oder chemische Gasphasenabscheidung sowie chemische bzw. elektrochemische Verfahren erfolgen.

Bei der physikalischen (*Physical Vapor Deposition*, PVD) und der chemischen Gasphasenabscheidung (*Chemical Vapor Deposition*, CVD) erfolgt die Beschichtung über eine Dampfphase. Der Unterschied dieser beiden Verfahren besteht darin, dass bei der PVD-Beschichtung eine Überführung des Beschichtungswerkstoffes unter einem Hochvakuum in die Gasphase erfolgt, während bei der chemischen Abscheidung der Beschichtungswerkstoff durch Diffusions- und Konvektionsprozesse sowohl unter Niederdruckbedingungen als auch unter atmosphärischem Druck in einer chemischen Reaktion während des Prozesses auf das Substrat aufgebracht wird [BMLW05].

Durch PVD-Verfahren lassen sich nahezu alle technisch relevanten Substratwerkstoffe mit einer Vielzahl metallischer sowie keramischer Werkstoffe beschichten. Unter dem Aspekt des Verschleißschutzes werden tribologisch beanspruchte Funktionsflächen beispielsweise zunehmend mit einer diamantähnlichen Kohlenstoffschicht (*Diamond-Like Carbon*, DLC) versehen. Aufgrund ihrer hohen Härte und dem in Kombination mit vielen anderen Materialien geringen Reibungskoeffizienten werden DLC-Beschichtungen für verschiedene Anwendungen im Antriebsstrang eines PKWs genutzt. Eingeführt auf Hochleistungs-Einspritzdüsen wird der Anwendungsbereich dieser Beschichtungen stetig größer [BBD<sup>+</sup>09]. Die Eigenschaften des tribologischen Systems zwischen Nocke und Stößel im Ventiltrieb einer Verbrennungsmaschine lassen sich ebenfalls durch den Einsatz amorpher DLC-Schichten verbessern, sodass aufgrund der geringeren Reibung Kraftstoffeinsparungen und die gesetzlich geforderte Reduktion an CO<sub>2</sub>-Ausstoß ermöglicht werden [BBMF01]. Durch die Beschichtung von hydraulischen Verdrängereinheiten lässt sich der Verschleiß, der durch Partikel im Druckübertragungsmedium verursacht wird, um bis zu 95 Prozent reduzieren [vB03].

Neben den spezifischen Eigenschaften der jeweiligen Dünnschicht hat allerdings auch die Substrathärte einen großen Einfluss auf die Verschleißbeständigkeit der PVD-Beschichtungen. Eine geringe Substrathärte resultiert in einer geringen Tragfähigkeit des Schichtsystems, da sich eine erhöhte Tendenz zur Rissbildung zeigt, die bei weiterer Belastung zu Ausbrüchen und Abplatzungen führen kann [EO11]. Durch die Applikation einer harten, beispielsweise durch das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen aufgetragenen Zwischenschicht lässt sich diese Rissbildung signifikant reduzieren und die Verschleißbeständigkeit des Werkstoffverbunds erhöhen [BLM<sup>+</sup>08].

Kennzeichnendes Merkmal der chemischen bzw. elektrochemischen Verfahren, die als Galvanotechnik bezeichnet werden, ist die Beschichtung in flüssigen Medien. Diese bestehen aus wässrigen und nichtwässrigen Elektrolytlösungen, in denen das Substrat mit Metallen und Legierungen durch eine elektrochemische Abscheidung beschichtet wird. Ein typisches Anwendungsbeispiel für die galvanische Beschichtung ist die Verchromung, die bei Sanitäreinrichtungen oder Fahrzeugkomponenten beispielsweise zu dekorativen Zwecken durchgeführt wird, aber auch in Form einer Hartverchromung

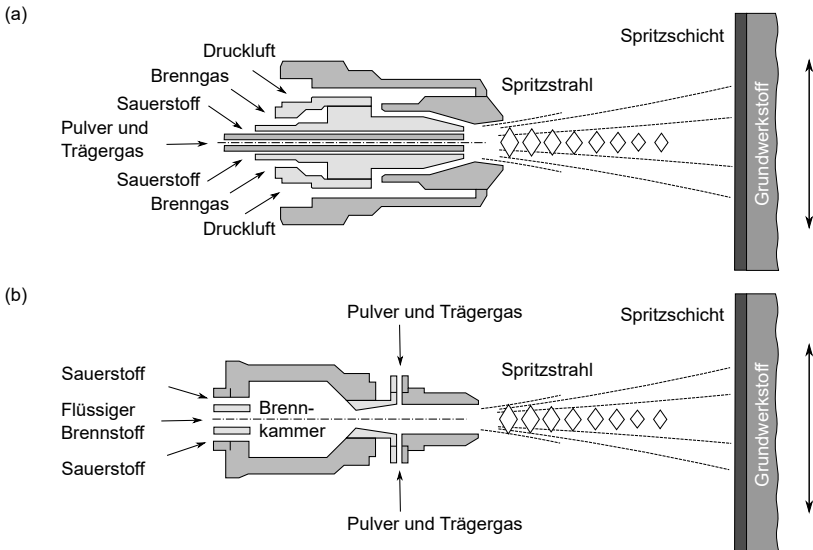
als Verschleißschutz Anwendung findet. Eine hohe Anzahl an Fahrzeugkomponenten, wie beispielsweise Nockenwellen, Ventile, Stoßdämpfer, Kolbenringe und -stangen sowie diverse Lagerstellen, sind mit Hartchrom-Layern beschichtet. Aufgrund ihrer hohen Härte von mehr als 1100 HV eignen sie sich gut zur Erhöhung der abrasiven Verschleißbeständigkeit. Ebenfalls von hoher technischer Bedeutung ist der Schutz vor Korrosion durch eine Passivierung [BMLW05, BBD<sup>+</sup>09].

Höhere Auftragsraten bis zu mehreren Millimetern lassen sich mit Verfahren des thermischen Spritzens erzielen. Nach DIN EN ISO 657 ist das thermische Spritzen als ein Verfahren definiert, "...bei denen Spritzzusätze innerhalb oder außerhalb der Spritzpistole zugeführt und bis zum plastischen oder geschmolzenen Zustand aufgeheizt und dann auf die vorbereitete Oberfläche geschleudert werden; die Oberfläche wird dabei nicht aufgeschmolzen". Eine Unterteilung der einzelnen Verfahren erfolgt nach der Art der Wärmequelle. Insbesondere die Verfahren Flammsspritzen, Hochgeschwindigkeitsflammspritzen, Lichtbogenspritzen und Plasmaspritzen haben sich unter anderem aufgrund ihrer Flexibilität hinsichtlich der Beschichtungswerkstoffe in der Industrie etabliert. Sowohl metallische und keramische Werkstoffe als auch Kunststoffe lassen sich mit den thermischen Spritzverfahren aufbringen. Die geringe thermische Beanspruchung des Substrates stellt dabei einen wesentlichen Vorteil der Verfahren dar [BMDE05, BMLW05]

### 2.2.2 Hochgeschwindigkeitsflammspritzen - HVOF

Das Hochgeschwindigkeitsflammspritzen (*High Velocity Oxygen-Fuel*, HVOF), wird hauptsächlich genutzt, um Oberflächenschutzschichten herzustellen. Die Schutzfunktion betrifft zum einen den Widerstand gegen abrasiven Verschleiß, und zum anderen soll durch angepasste Schichten eine Reduzierung der im tribologischen Kontakt auftretenden Reibung ermöglicht werden [Bob13]. Im HVOF-Prozess wird durch interne Verbrennung ein Überschallgasstrom generiert, der Geschwindigkeiten von mehr als  $2\ 100\ \text{m s}^{-1}$  erreicht. Das HVOF-Verfahren mit pulverförmigem Spritzzusatz lässt sich mit flüssigen oder gasförmigen Brennstoffen durchführen. Als Verbrennungsgase eignen sich Propylen, Acetylen, Propan, Wasserstoff und Kerosin. Die kontrollierbare Verbrennungstemperatur von ungefähr 2 700 bis 2 800 °C führt bei gleichen Materialien zu einer höheren Dichte sowie einer geringeren Oberflächenrauheit der Beschichtung verglichen mit anderen Beschichtungsprozessen wie dem Plasmaspritzen, dem konventionellen Flammsspritzen und dem Lichtbogenspritzen. Beim HVOF-Verfahren, schematisch dargestellt in **Abbildung 2.5**, ist die Pulverinjektion sowohl axial als auch radial möglich. Weitere Prozessparameter sind: Brenngaszusammensetzung, Luft- oder Wasserkühlung, Verbrennungskammerdruck und Düsenlänge. Daraus ergeben sich der Verbrennungsdruck, Flamm- und Partikeltemperatur, Partikelgeschwindigkeit, Gasraten und -geschwindigkeiten. Unabhängig von der hardwareseitigen Ausstattung führen hohe Verbrennungsdrücke zu einer hohen Gasgeschwindigkeit und damit zu einer hohen

Partikelgeschwindigkeit, die wiederum in einer geringen Porosität der Beschichtung resultieren [PK94].



**Abbildung 2.5:** Schematische Abbildung des Hochgeschwindigkeitsflamspritzens mit (a) gasförmigen Brennstoffen und (b) flüssigen Brennstoffen nach [DIN05]

### Schichtarten und -anwendungen

Traditionell werden zum Verschleißschutz häufig Hartchromschichten eingesetzt. Diese finden in diversen Industriebereichen, wie beispielsweise der Automobilindustrie, der Luftfahrt, dem Bergbau, der Land- und Agrarwirtschaft sowie der Petrochemie, Anwendung. Spezifische Anwendungsbeispiele sind Verbrennungsmaschinen, Hydraulikzylinder, Landefahrwerke, Pumpen, Kolbenringe und Werkzeuge. Die typische Schichtdicke liegt zwischen  $20\ \mu\text{m}$  und  $2\ \text{mm}$  und ist abhängig von dem spezifischen Anwendungsfall. Durch den geringen Reibungskoeffizient gegenüber vielen kontaktierenden Materialien in Kombination mit der hohen Härte eignet sich Hartchrom sehr gut für den Verschleißschutz. Die durch feine Risse gekennzeichnete Oberflächenstruktur trägt ebenfalls zu dem guten Verhalten unter tribologischer Beanspruchung bei. Allerdings hat das Hartchrom auch einige signifikante Nachteile. So tendiert die Hartchromschicht dazu, im tribologischen Kontakt vom Substrat abzuplatzen und so zu einem katastrophalen Verhalten des Gesamtsystems zu führen. Beim Ablösen von kleineren Verschleißpartikeln verbleiben diese im Ölfilm und wirken sich als abrasive Partikel negativ auf den tribologischen Kontakt aus. Im Falle eines nicht ausreichend geschmierten Tribokontaktes zeigt die Hartchromschicht wesentlich

schlechtere Reibungseigenschaften [Bol95]. Durch den Hartchromprozess werden zudem Zugeigenspannungen induziert, die wiederum zu Rissbildung führen können. Basierend auf dieser Eigenschaft ergeben sich geringere Ermüdungsfestigkeiten [IB07].

Gegenüber der Hartchrombeschichtung bietet das HVOF-Verfahren diverse Vorteile. Es lassen sich vielfältigere Arten von Substraten beschichten. Abhängig vom Substratwerkstoff sind teilweise größere Schichtdicken von über 2,5 mm möglich, der Beschichtungsprozess ist unabhängig von der Bauteilgröße, und es sind weniger Prozessschritte notwendig. Abhängig vom angestrebten Anwendungsfall und den dominierenden Verschleißmechanismen erfolgt die Auswahl der Verschleißschutzschicht. Des Weiteren gilt das Verfahren als umweltfreundlicher, da keine giftigen Stoffe entsorgt werden müssen [How94, Bol95, NPS98]. Die möglichen Pulver umfassen Metalle, Legierungen, Karbide und bestimmte Keramiken sowie Kunststoffe [PK94]. Die maximale Einsatztemperatur von Hartchrom-Beschichtungen liegt bei 400 °C, wobei Temperaturen oberhalb von 200 °C bereits zu einem Härteverlust führen. Bei HVOF-Beschichtungen ist die maximale Einsatztemperatur abhängig von der jeweiligen Beschichtung. Wolframkarbid-Kobalt (WC-Co)-Beschichtungen halten bis 550 °C, während Chromkarbid-Nickelchrom ( $\text{Cr}_3\text{C}_2\text{-NiCr}$ )-Beschichtungen Temperaturen von bis zu 950 °C bestehen können. Die WC-Co-Beschichtung zeichnet sich zusätzlich durch einen äußerst hohen abrasiven Verschleißwiderstand, eine gute Adhäsion auf dem Substratwerkstoff und eine gute Nacharbeitbarkeit auszeichnet [How94, Bol95]. Die Verschleißbeständigkeit HVOF-gespritzter WC-Co Verschleißschutzschichten unter Gleitbeanspruchung liegt tendenziell höher als die Verschleißbeständigkeit von Hartchromschichten [SMT<sup>+</sup>00].

Die möglichen Anwendungen von HVOF-Beschichtungen sind zahlreich. Im Bereich der Luftfahrtindustrie gehören zu diesen Landefahrwerke, Hochdruckventile, Landklappenführungen, Turbinen- und Gelenkwellen sowie diverse Hydraulikkomponenten, wie beispielsweise Kolbenstangen. Die Belastungen bei diesen Komponenten sind vielseitig. Landefahrwerke beispielsweise sind einem Kollektiv von Gleit-, Roll- und Prallverschleiß ausgesetzt sowie diversen Korrosions- und Scherbelastungen [NPS98, Ran02, FRT<sup>+</sup>04, KOM06]. Bei einem Einsatz im Offshore-Bereich bei Pumpen, Ventilen und Baukonstruktionen steht der Schutz vor Korrosion im Vordergrund [Bob13].

Als Alternative zum Verchromen ermöglicht der HVOF-Prozess ebenfalls die Innenbeschichtung von Zylinderlaufbahnen in Verbrennungskraftmaschinen [DDK<sup>+</sup>96]. Dieser für das konventionelle Flammgespritzen mit eisenbasierten Werkstoffen bereits etablierte Prozess wird zunehmend auch durch das HVOF-Verfahren realisiert [LCG06]. Durch entsprechend angepasste Spritzpistolen lassen sich die Beschichtungen im Inneren von Zylindern mit einem Durchmesser von  $d > 80$  mm aufbringen. Durch den geringen Abstand zur Substratoberfläche ergibt sich ein hoher thermischer Energieeintrag. Dieser muss durch die gezielte Anpassung der Prozessstellgrößen beim Beschichten reduziert werden, ohne die für den Beschichtungsprozess essentiell hohe

Geschwindigkeit der Beschichtungspartikel zu verringern bzw. die Temperatur zum Aufschmelzen zu unterschreiten [MBS<sup>+</sup>08].

Äquivalent zur Beschichtung der Zylinderlaufbahnen lassen sich ebenfalls Kolbenringe mit dem HVOF-Verfahren beschichten. Bereits dünne Cr<sub>3</sub>C<sub>2</sub>-Beschichtungen von 50 bis 100 µm ermöglichen eine Vervielfachung der Lebensdauer im Vergleich zu Chromschichten. Einhergehend mit der Steigerung der Lebensdauer des Kolbenrings ergibt sich ein erhöhter Verschleiß der Zylinderlaufbahn, die durch angepasste Beschichtungen vor der abrasiven Wirkung des harten Kolbenrings geschützt werden muss [RR97, PAM06]. Hier wirkt sich die Porosität der Beschichtung positiv auf das Funktionsverhalten aus, da die Poren als Mikroölvresoire fungieren können [CL13, MG13].

Ein weiteres Anwendungsbeispiel bildet die Lagerung von Kurbelwellen. Durch die Steigerung der Mikrohärtigkeit wird eine höhere Verschleißbeständigkeit erzielt. Die Kavitäten und Poren, die während des Beschichtungsprozesses entstehen, fungieren auch hier als Ölreservoir und verhindern einen Trockenlauf des Systems in der Startphase [NÖC08]. Auch die Beschichtung von Leichtmetall-Zylinderlaufflächen, Kurbelgehäusen sowie Spezialanwendungen bis hin zum Großdieselmotorenbereich ist möglich. Dabei können sowohl keramische, metallurgische als auch cermetische Auflageschichten für unterschiedliche Funktionen erzeugt werden. Ebenfalls möglich ist die Substitution von massivkeramischen oder hartmetallischen Einsätzen. Anwendungsbeispiele sind PKW, Sport- und Rennwagen, umweltgerechte energietechnische Anlagen sowie Leichtbauantriebe für Sportflugzeuge und Sportboote [GL07].

### **Eigenschaften HVOF-gespritzter Wolframkarbid-Schichten**

Durch die stetige Weiterentwicklung der Pulverwerkstoffe und insbesondere der Verringerung der eingesetzten Korngröße, die zu einer nano-kristallinen Schichtstruktur führt, ergibt sich eine weitere Steigerung der Verschleißbeständigkeit [KSG07]. Durch die Nutzung von agglomerierten und gesinterten Pulvern mit Karbiden mit einer Größe von weniger als 1 µm lassen sich Beschichtungen mit verbesserten mechanischen und tribologischen Eigenschaften herstellen. Dies kann allerdings nur gewährleistet werden, insofern optimierte Prozessparameterwerte beim Beschichtungsprozess angepasst an die spezifischen thermo-kinetischen Eigenschaften der Pulver angewendet werden [TBH11, TNH11]. Konventionelle Pulver mit einer Agglomeratgröße von 10 bis 50 µm können in einer porösen Beschichtungsstruktur resultieren. Daher muss oft eine ausreichende Mindest-Schichtdicke verwendet werden, um eine geforderte Verschleißbeständigkeit zu erzielen. Dies wiederum reduziert die Form- und Maßhaltigkeit, wenn diese Beschichtungen auf komplexe Bauteile aufgebracht werden. Zusätzlich lässt sich keine hohe Oberflächengüte erzielen, wenn die feinen Karbide zu großen Agglomeraten gewachsen sind [THB11]. Nachteilig bei feinen Pulvern mit Partikelgrößen von 2 bis 10 µm und Karbiden im ultrafeinen Bereich mit einer Größe von 0,4 bis 3 µm wirken sich Agglomerationseffekte im Pulverförderer aus. Diese

führen zu einer ungleichmäßigen Einbettung von WC-Partikeln in die Kobaltmatrix, die wiederum in unzureichenden Beschichtungshärten resultiert [TTH<sup>+</sup>11]. Feine Pulver sind zudem äußerst sensibel hinsichtlich der Gasrate, der Geschwindigkeit und der Temperatur der Spritzflamme. Aufgrund des geringen Gewichts ist die Geschwindigkeit der Beschichtungspartikel beeinflusst durch lokale Druckspitzen, wie sie beispielsweise bei den Schockdiamanten zu finden sind. Zusätzlich führt die vergleichsweise große Oberfläche leicht zu einer Überhitzung der Partikel und zu einer Degradation. All diese Einflüsse wirken sich letztendlich auch auf die morphologischen und mechanischen Eigenschaften der Beschichtung aus. Insgesamt zeichnen sich die Beschichtungen allerdings durch eine hohe Oberflächenqualität, geringere Porosität sowie eine höhere Härte und Verschleißbeständigkeit aus. Die Porosität kann durchaus bei weniger als 1 Prozent liegen, während die Oberflächenrauheit nicht größer als  $R_z = 10\ \mu\text{m}$  ist. Daher eignen sich feinere Pulver, um eine endkonturnahe Beschichtung zu generieren [TNH11, TNP13]. Die Konturgenauigkeit beim Beschichten bildet wiederum einen zentralen Aspekt für die Nachbearbeitung. Diese kann bei einem optimierten Beschichtungsprozess durch das Feinstbearbeitungsverfahren Microfinishen erfolgen [WWP<sup>+</sup>06].

Neben der Pulvergröße ist bei WC-Beschichtungen in Co-Bindematrix das Verhältnis zwischen Wolfram- und Kobaltanteil für die mechanischen Eigenschaften entscheidend. Durch einen erhöhten Kobaltanteil reduziert sich die Härte der Beschichtung bedingt durch eine Reduktion der WC-Phasen. Die Reduzierung der Wolframkarbid-Korngröße resultiert wiederum in einer Erhöhung der Härte [CWKS07]. Durch die Zugabe von Chrom zu WC-Co-Schichtsystemen ergibt sich eine erhöhte Erosionsbeständigkeit. Die CoCr-Bindematrix ermöglicht eine bessere Anbindung der Karbide [KVB93].

Im gespritzten Ausgangszustand weisen die Schichten in der Regel Druckeigen-  
spannungen auf. Dies liegt in der hohen Partikelgeschwindigkeit begründet, durch die die harten Wolframkarbidpartikel beim Auftreffen das vergleichsweise weiche Bindungsmaterial verformen. Die kinetische Energie wird umgewandelt in Druckeigen-  
spannungen [MMR09]. In Kombination mit einer guten Grenzflächenanbindung zwischen Substrat und Beschichtung wird sowohl für WC-Co-Schichten als auch für Beschichtungen aus WC-CoCr eine höhere Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zu unbeschichteten Proben ermöglicht, da ein Großteil der dynamisch wechselnden Belastungen durch den hohen Elastizitätsmodul und den induzierten Druckeigen-  
spannungszustand kompensiert wird [IB07, VGGCL<sup>+</sup>08].

### **Präparation der Substratoberfläche**

Neben den spezifischen Werkstoffeigenschaften der Spritz- und Substratwerkstoffe sowie der gewählten Beschichtungsparameterwerte bildet die Präparation der Substratoberfläche einen wichtigen Einflussfaktor auf die Qualität der Anbindung der Beschichtung zum Substrat. Nach derzeitigem Stand der Technik ist eine gute Schichthaftung auf dem Substratwerkstoff nur durch eine vorherige Aktivierung der Substratober-

fläche zu gewährleisten. Neben der mechanischen Verklammerung, die als primärer Mechanismus für die Schichthaftung angeführt wird, haben auch physikalische und metallurgische Bindungsmechanismen einen Anteil an der Festigkeit des Werkstoffverbundes [WLO05]. Die schmelzflüssigen Partikel dringen aufgrund der Kapillarwirkung in Unebenheiten und Hinterschneidungen der Substratoberfläche ein. Nach der Erstarrung verankern sie sich dort formschlüssig. Durch zusätzliche Rauheitsspitzen auf der Substratoberfläche kann dieser Mechanismus verstärkt werden, indem sich durch Schrumpfspannungen die Beschichtung auf der Substratoberfläche kraftschlüssig verklammert [LB02]. Weitere Mechanismen, die die Haftung der Beschichtung beeinflussen, sind Verschweißung, Diffusion und Adhäsion. Beschichtungsmaterialien, die eine poröse Oberflächenstruktur bilden, benötigen tendenziell eine geringere Oberflächenvorbereitung als Beschichtungen mit einer dichten Struktur, die eine Aufräuhung der Substratoberfläche erfordern. Grundsätzlich müssen die Oberflächen frei von Öl oder anderen Rückständen sein. Konventionelle Strahlmittel umfassen metallische Werkstoffe wie Stahl oder Gusseisen sowie keramische Werkstoffe wie Korund und Siliziumkarbid [How94, Bob13].

Untersuchungen zur Schichthaftung auf feingeschliffenen Oberflächen unter dynamischer Wechselbeanspruchung zeigten eine erhöhte Tendenz der Schicht, sich von dem Substrat abzulösen, da die mechanische Verbindung zwischen Beschichtung und Substrat schlechter als bei gestrahlten Substratoberflächen ist. Neben der besseren mechanischen Verklammerung der Beschichtungspartikel können die eingebrachten Riefen in der Oberflächenstruktur unter dynamischer Beanspruchung allerdings auch die Rissbildung begünstigen und so die Ermüdungsfestigkeit herabsetzen [GHCL<sup>+</sup>10]. In Abhängigkeit des verwendeten Substrat- und Beschichtungswerkstoffs sowie der jeweils verwendeten Prozessparameterwerte ist daher eine angepasste Abstimmung dieser Stellgrößen notwendig.

### 2.2.3 Spanende Bearbeitung

Die thermisch gespritzten Verschleißschutzschichten müssen für den Einsatz in einem tribologischen System zwingend nachbearbeitet werden, da die ursprüngliche Oberflächenstruktur nach dem Beschichten zu rau ist [CH10]. Die Bearbeitung der Beschichtungen ist sowohl durch spanende Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide als auch mit geometrisch unbestimmter Schneide möglich. Primärer Vorteil der spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide ist das höhere Zeitspanvolumen. Einhergehend mit der Erhöhung der für das Zeitspanvolumen maßgeblichen Stellgrößen wie der Zustellung und des Vorschubs ergibt sich allerdings auch eine Steigerung der Zerspankräfte. Für das Fräsen von gesintertem Hartmetall sind diese bereits bei geringen Zustellungen vergleichsweise hoch, sodass Zustellungen von  $a_p = 0,15$  mm zu einer Schädigung des Randzonengefüges führen. Die Ausprägung und Tiefe des geschädigten Gefüges ist dabei abhängig von der spezifischen Schneidengeometrie und dem Spanwinkel. Ebenso sind einzelne Kornausbrüche in

der oberflächennahen Randzone möglich [Frö11]. Durch die Verwendung angepasster Prozessparameterwerte beim Fräsen thermisch gespritzter Hartmetallschichten lassen sich Oberflächenqualitäten mit einer gemittelten Rautiefe von  $R_z = 3\ \mu\text{m}$  erzielen [NHG08]. Äquivalente Untersuchungen zum Drehen von WC-Co-Beschichtungen mit Diamant als Schneidstoff bestätigen die im Vergleich zum Schleifen höheren Materialabtragsraten bei geringerer Oberflächenqualität [Zho01]. Die hohe Härte und Warmfestigkeit der Beschichtungen führt allerdings trotz der Verwendung von CBN oder Diamant zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß, sodass der Bearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide oft wirtschaftliche Aspekte entgegenstehen [Edi97].

Das etablierteste Verfahren zur Bearbeitung von Hartstoffschichten stellt die Schleifbearbeitung dar. In Abhängigkeit der Struktur und Morphologie des Schichtsystems sowie dem späteren Anwendungsfall eignen sich Diamant-Schleifscheiben in Metall-, Kunstharz- oder keramischer Bindung, wobei Stellgrößen wie die Kühlschmierstoffzufuhr und die kinematischen Einstellgrößen gezielt an die Beschichtungseigenschaften angepasst werden müssen [Kir79, Edi97]. Die alternative Verwendung von CBN als Schneidstoff führt zu höheren Belastungen des Schichtsystems, die in einer Rissbildung resultieren und damit die Funktion der beschichteten Oberfläche beeinträchtigen [Zho01]. Durch eine angepasste Schleifbearbeitung lässt sich neben einer verbesserten Oberflächenqualität eine erhöhte Verschleißbeständigkeit der Beschichtung erzielen. Basierend auf der Einbringung von Druckeigenstressungen in der Randzone ergibt sich insbesondere bei erhöhten Zustellungen eine gesteigerte Mikrohärtigkeit, die wiederum in einer erhöhten Verschleißbeständigkeit gegen abrasiven und erosiven Verschleiß resultiert [MRV01, MMR09]. Dies stellt im Vergleich zu Verfahren wie dem Erodieren, das Zugeigenstressungen in der Randzone generiert und somit zu einem schlechteren Verhalten des Schichtsystems im tribologischen Kontakt führt, einen erheblichen Vorteil dar [BdBQ<sup>+</sup>10].

Die Materialabtragsmechanismen beim Schleifen basieren hauptsächlich auf plastischer Deformation. Die Druckeigenstressungen werden größtenteils durch die mechanische Belastung im Schleifprozess eingebracht. Die Materialabtragsrate wird dabei maßgeblich durch die Zustellung sowie die Vorschubgeschwindigkeit beeinflusst. Durch die Erhöhung der Zustellung als auch der Vorschubgeschwindigkeit erhöhen sich ebenfalls die Eigenstressungen in der Werkstückrandzone. Dieser Effekt tritt insbesondere bei vergleichsweise feinen Korngrößen verstärkt auf [DHJG08]. Durch eine erhöhte Materialabtragsrate vergrößert sich allerdings auch das Risiko einer möglichen Schädigung der Werkstückrandzone, die bis in eine Tiefe von  $50\ \mu\text{m}$  reichen kann. Die auftretenden Schädigungen sind abhängig von der Bindungsart sowie der Korngröße der Schleifscheibe. Tendenziell führt eine größere Korngröße zu größeren Schädigungen, bedingt durch die höheren Einzelkornkräfte aufgrund der erhöhten Eingriffstiefe eines einzelnen Korns [LZ02, LZD02, LZ03].

Durch die Verwendung von Schleifstiften ist es ebenso möglich, Bauteile mit komplexer geometrischer Gestalt zu bearbeiten. Durch eine angepasste Prozessauslegung auf einem 5-Achs-Bearbeitungszentrum lassen sich unter Verwendung von CBN und

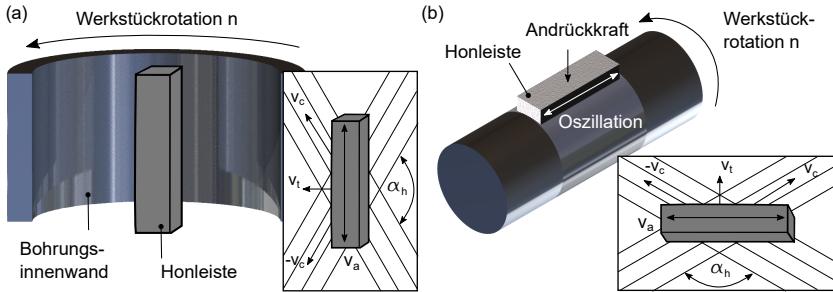
Diamant-Schleifstiften sowohl lichtbogengespritzte eisenbasierte Beschichtungen als auch HVOF-gespritzte WC-Co-Schichten auf freigeformten Oberflächen bearbeiten [Moh10, RBK14].

Eine weitere Verbesserung der Oberflächenqualität lässt sich durch eine anschließende Bearbeitung mit den Fertigungsverfahren Läppen, Polieren oder Honen erzielen [Kir79, Edi97, MRV01]. Insbesondere durch das Abtragen der aus dem Schleifprozess resultierenden Rauheitsspitzen ist es möglich, einen plateauartigen Profilcharakter zu erzeugen, der sich für einen Einsatz in einem tribologischen System als günstig erweist. Dabei ist es nach *Edinger* zielführend, die aus dem Schleifprozess resultierende Oberflächenstruktur und -rauheit für den Lappprozess als Eingangsgröße zu berücksichtigen, um gezielt an den Anwendungsfall angepasste Oberflächenstrukturen zu generieren und das Funktionsverhaltens thermisch beschichteter Bauteile hinsichtlich ihrer Gleit- und Einlaufesigenschaften zu verbessern [Edi97]. Die Oberflächenqualität der bearbeiteten Verschleißschutzschicht ist allerdings durch die Schichtmorphologie begrenzt. Poren in der Schicht lassen sich durch die spanende Endbearbeitung nur bedingt beeinflussen, sodass bei einem sehr feinen Finish die Profilliefen, die durch die Poren freigelegt werden, die letztendliche Oberflächenqualität bestimmen. Dieses Phänomen ist äquivalent bei der Bearbeitung von Keramiken, wie beispielsweise Siliziumkarbid, Siliziumnitrid und Zirkonoxid, zu beobachten [HH05].

## 2.3 Oberflächenfeinbearbeitung durch Honen

Funktionsrelevante Oberflächen, wie beispielsweise die Zylinderlaufbahnen von Verbrennungsmaschinen, die Bohrungen von Schaltzahnradern oder auch die Lager- und Gleitflächen von Kurbel-, Nocken- und Getriebewellen werden zur Herstellung der funktionsrelevanten Eigenschaften oft gehont [Rud08, FWS13]. Das Honen, eingeordnet nach DIN 8589-14 in die spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide und gebundenem Korn zeichnet sich, wie in **Abbildung 2.6** dargestellt, durch eine aus zwei Komponenten überlagerte Schnittbewegung aus. Die Tangentialbewegung des Werkzeugs oder Werkstücks wird durch eine orthogonal wirkende Axialbewegung des Werkzeugs oder Werkstücks überlagert. Je nach der geometrischen Gestalt des Bauteils bzw. der zu erzeugenden Fläche wird das Honen nach DIN 8589-14 in sechs Kategorien unterteilt: Das Planhonen, Rundhonen, Schraubhonen, Wälzhonen, Profilhonen und das Formhonen. Diese Einteilung erfolgt nach den verfahrenskennzeichnenden Merkmalen: Art der Fläche, Kinematik des Zerspanungsvorganges und der Werkzeugform [DIN03]. Abhängig von der Schnittbewegung bzw. der Größe der Amplitude der Oszillationsbewegung wird des Weiteren zwischen Langhubhonen und Kurzhubhonen unterschieden. In Abhängigkeit der Lage der Bearbeitungsstelle am Werkstück erfolgt eine Klassifizierung in Außen- oder Innenhonen. Zwei weit verbreitete Varianten sind das Langhubhonen für die Innenrund-

Bearbeitung (Abbildung 2.6 (a)) und das Kurzhubhonen für die Außenrund-Bearbeitung (Abbildung 2.6 (b)).



**Abbildung 2.6:** Honverfahren, (a) Langhubhonen für die Innenrund-Bearbeitung, (b) Kurzhubhonen für die Außenrund-Bearbeitung

Im Gegensatz zum Schleifen, das sich durch einen periodisch unterbrochenen Schnitt auszeichnet, liegt beim Honen ein konstanter Eingriff der gesamten Werkzeugoberfläche vor. In Abhängigkeit des Spanbildungsmechanismus ergibt sich hier insbesondere bei langspanenden Werkstoffen die Problematik, die Späne aus der Kontaktzone zu entfernen [Key73, Juc84, Flo92]. In diesem Zusammenhang hat der verwendete Kühlschmierstoff (KSS), der aus Öl oder Emulsion bestehen kann, als primäre Aufgabe, die Kontaktzone zu spülen. Abgetragene Werkstoffpartikel und verschlissenes Kornmaterial verbleibt aufgrund des Flächenkontaktes länger in der Kontaktzone als bei einem Schleifprozess. Wesentlich für die Erzielung einer hohen Oberflächenqualität sowie einem geringen Honleistenverschleiß ist die Schmierwirkung des KSS. Die im Vergleich zu Emulsion überlegenen Schmiereigenschaften von Honöl ermöglichen einen konstanten Werkstoffabtrag bei reproduzierbar geringem Honleistenverschleiß [Höh98].

Durch die im Vergleich zum Schleifen wesentlich geringeren Schnittgeschwindigkeiten zeichnet sich das Honen durch geringere Temperaturen in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück aus. Daher ist auch die Kühlwirkung des KSS von sekundärer Bedeutung, bildet aber im Zusammenhang mit hohen Anforderungen an die Maßhaltigkeit der Werkstücke eine Komponente, die für bestimmte Bearbeitungsaufgaben berücksichtigt werden muss [Key73]. Die in der Wärmebehandlung eingestellten Eigenspannungszustände in der Bauteilrandzone lassen sich aufgrund der geringen Prozesstemperaturen gezielt nutzen und zusätzliche Druckeigenspannungen durch die mechanische Belastung generieren [FWS13].

Konventionell werden beim Honen Honsteine verwendet, die aus Materialien wie beispielsweise Korund oder Siliziumkarbid bestehen. Durch die Verwendung von hochharten Schneidstoffen wie Diamant oder CBN wird ein wesentlich höheres bezogenes Zeitspanvolumen ermöglicht und, bedingt durch den geringeren Verschleiß der Schneidkörner, ein günstigeres Verhältnis zwischen Werkzeugverschleiß und ge-

neriertem Abtrag erzielt. Zudem lassen sich durch den geringeren Verschleiß geringere Fertigungstoleranzen realisieren, die wiederum die Automatisierbarkeit des Prozesses erleichtern [Juc84]. Aktuelle Forschungsarbeiten zur Innenrundbearbeitung von Bohrungen behandeln insbesondere die gezielte Abstimmung der verwendeten Schneidstoffe mit den genutzten Bindungssystemen. Bei der Bearbeitung anspruchsvoller Werkstoffe, wie beispielsweise Gusseisen, das sich aufgrund der Gefügestruktur bei der Bearbeitung durch eine sogenannte Blechdeckelbildung auszeichnet, ergibt sich durch die Verwendung angepasster keramischer und auf Kunstharz basierender Bindungssysteme als Alternative zu metallischen Bindungssystemen in Kombination mit feinen Diamantkorngößen ein reproduzierbareres Verschleißverhalten als bei der Nutzung von Siliziumkarbid-Honsteinen [SE09, SME10]. Die Verwendung hochharter Schneidstoffe ermöglicht ebenfalls die Bearbeitung von keramischen Werkstoffen. Diese zeichnen sich durch vorteilhafte mechanische Eigenschaften im Hochtemperaturbereich aus und bieten eine hohe Verschleiß- und Korrosionsbeständigkeit. Das Honen eignet sich ebenfalls als Substitution des Keramikschleifens und ermöglicht höhere Oberflächenqualitäten [WH92, Höh98].

### 2.3.1 Verfahrensvarianten

Zur Abgrenzung des in dieser Arbeit genutzten Außenrund-Kurzhubhonens von den anderen Honverfahren werden die wissenschaftlich und industriell bedeutsamsten Verfahrensvarianten hinsichtlich Kinematik und Anwendungsbereich im Folgenden vorgestellt. Üblicherweise werden Honprozesse genutzt, um eine für die tribologische Kontaktsituation günstige Oberflächentopographie zu generieren. Durch angepasste Werkzeug- und Maschinenkonzepte ist es jedoch auch möglich, gezielt Konturen einzustellen und Lagefehler zu reduzieren. In diesem Zusammenhang zeichnen sich insbesondere das Positions- und Formhonen durch spezifische Verfahrensmerkmale aus. Um eine hohe Positionsgenauigkeit von Bohrungen zu erzielen, werden diese in der Regel durch diverse Bohrprozesse, wie das Vor- und Feinbohren, bearbeitet, um anschließend die Oberflächenqualität durch einen Honprozess zu erzielen. Durch die Fixierung des Honwerkzeuges in Richtung der Bohrungsachse lassen sich mit angepassten Maschinenkonzepten einzelne Bohrprozesse, wie das Feinbohren, substituieren. Das Positionshonen zeichnet sich im Gegensatz zu anderen Honverfahren dadurch aus, dass die Selbstzentrierung des Werkzeugs in der Bohrung verhindert wird [FB07].

Die beim Honen erzeugte Zylinderform ist in der Regel durch geringe Formfehler gekennzeichnet. Bei der Montage können sich jedoch diverse Verspannungen der Bauteile ergeben, die zu einer Abweichung von der Idealgeometrie führen. Einen Ansatz, um diese nachträglich eingebrachten Verformungen bereits in der Fertigung zu kompensieren, bildet das Formhonen. Dabei wird durch einen nach der spezifischen Honleistenposition differierenden Abtrag ein gezielter Formfehler eingebracht, um die im Einsatz resultierenden Verspannungen zu kompensieren. Auf Basis von werkzeugintegrierten Kraftaufnehmern entwickelte *Zurin* hierzu Mess- und Steuerungsstrategien,

die eine spezifische Zustellkraft der Honsteine in Abhängigkeit des Werkzeugwinkels und der Hublage ermöglichen [Zur90]. Ein weiterer Ansatz besteht in der Verwendung piezoelektrischer Elemente, die eine unabhängige Zustellung der Honleisten ermöglichen. Durch die in Abhängigkeit der Steuerspannung variierende Zustellung lässt sich für die Honleisten ein spezifisches Zerspanvolumen realisieren. Durch die Entwicklung eines Simulationsmodells konnte *Wiens* einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Kontaktzeit von Werkzeug und Werkstück sowie den gewählten Prozessparameterwerten herstellen, um dieses im Anschluss um die Sollzustellung der Piezoaktoren zu erweitern [Wie11]. In aktuellen Studien kombinieren *Drossel et al.* die Nutzung von Piezoaktoren sowie hochentwickelten servomotorischen Antrieben mit angepassten adaptiven Regelungssystemen für Bohr- und Formhonzustellung. Neben der Steigerung von Formgenauigkeit und Oberflächenqualität ermöglicht diese Technologie eine gesteigerte Prozesseffizienz durch die gezielte Beeinflussung der Spanbildung während des Prozesses [DHS13, DBH<sup>+</sup>14].

Durch einen speziell adaptierten Schleifprozess lässt sich die Honkinematik auch auf die Bearbeitung von Zahnradflanken übertragen. Dieser Prozess wird unter anderem auch als Zahnrad- oder Verzahnungshonen bezeichnet. Vorteile gegenüber dem Schleifen sind die aus der Kinematik resultierenden hohen mechanischen Belastungen, die tendenziell zu Druckeigenspannungen führen. Die zugleich geringe Rauheit der Zahnradflanken ermöglicht höhere Lebensdauern [TM00]. Durch eine Optimierung der Antriebsdynamik konnte *Langenstein* die Bearbeitungsqualität beim Zahnradhonen erhöhen. Die phasenrichtige Erfassung von Übertragungsfehlern zwischen Werkzeug und Werkstück ermöglichte eine Verbesserung der geometrischen Genauigkeit der Werkstücke [Lan05].

Um die für eine wirtschaftliche Prozessauslegung wichtige Zerspanleistung im Honprozess zu erhöhen, werden ebenfalls Ansätze mit einer zusätzlich überlagerten Ultraschallbewegung verfolgt. Beispiele für diesen Trend finden sich in der ultraschallgestützten Dornhonzustellung, bei der der ursprünglichen Honkinematik eine zusätzliche durch Ultraschall erzeugte Schnittbewegung überlagert ist. Durch die Ultraschallunterstützung ergeben sich unter sonst gleichen Prozessbedingungen geringere Tangentialkräfte, die wiederum eine Steigerung des zu zerspannenden Aufmaßes ermöglichen. Aus dem höheren Zeitspanvolumen resultierend ergibt sich eine kürzere Prozesszeit [Kap99]. Diese Prozessanregung durch eine zusätzliche hochfrequente Schwingung wird in aktuellen Forschungsarbeiten auch beim Kurzhubhonen eingesetzt. Durch eine zusätzliche Ultraschallunterstützung lässt sich bei der Verwendung von Honsteinen der Selbstschärfeeffekt steigern. Dies führt zu einer Steigerung des Zeitspanvolumens bei gleichbleibend guten Oberflächenqualitäten [VM98]. Des Weiteren ermöglicht die zusätzliche Anregung, insbesondere bei harten Werkstoffen, eine Erzeugung von Mikrorissen in der Werkstückoberfläche, die ein höheres Zeitspanvolumen ermöglichen. Durch die unterbrochene Riefenstruktur auf der Oberflächentopographie ergibt sich zudem Potenzial einer spezifischen Strukturierung für eine tribologische Kontaktsituation [BHT11, Hil14].

### 2.3.2 Microfinishes

Das Kurzhubhonen, das in Abhängigkeit des genutzten Werkzeugkonzeptes mit diversen Begriffen, wie beispielsweise Microfinishes, Superfinishes oder einfach Finishes, bezeichnet wird, wurde erstmals in den 30er Jahren des 20. Jahrhunderts eingesetzt, um Wälzlagering in Radlagern von Automobilen nachzubearbeiten. Während des Eisenbahntransports waren die stillstehenden Lagerringe kontinuierlich Erschütterungen ausgesetzt, die zu einem Eindruck der Wälzkörper in die Oberfläche der Lagerringe führten und entsprechende Kerben hinterließen. Dies führte im späteren Betrieb zu einer ausgeprägten Geräuscentwicklung. Resultierend aus der hohen thermischen Beanspruchung beim Schleifen der Lagerringe hatte sich in der Werkstückrandzone eine mikrostrukturell veränderte Gefügestruktur gebildet, die durch Zugeigenspannungen und einer Versprödung gekennzeichnet war. Die Stöße während des Transports führten zu einer partiellen Deformation bzw. Abplatzungen dieser bereits vorgeschädigten Schicht. Die zusätzliche Bearbeitung durch das Kurzhubhonen ermöglichte einen Abtrag der geschädigten Gefügestruktur und verbesserte das Einsatzverhalten der Lagerringe [SC40].

Insbesondere in der Wälzlager- und Automobilindustrie haben sich vielfältige Anwendungen für das Kurzhubhonen etabliert. Das Anwendungsspektrum umfasst die Endbearbeitung von Wälzkörpern, die Oberflächenstrukturierung der Funktionsflächen von Kurbel- und Nockenwellen sowie von diversen Getriebekomponenten, wie beispielsweise Getriebewellen und Kegelrädern [Haa87, Rud08]. Die primäre Zielsetzung beim Einsatz des Verfahrens besteht in der Verringerung der Oberflächenrauheit, der Erhöhung des Materialanteils, der Verbesserung der Mikrogeometrie sowie dem Entfernen etwaiger Unregelmäßigkeiten, wie beispielsweise Rattermarken [SF11]. Durch die geringen Schnittgeschwindigkeiten in Kombination mit geringen Flächenpressungen zwischen Werkzeug und Werkstück ist der Materialabtrag allerdings bedeutend geringer als beim Schleifen. Pro Überlauf lässt sich lediglich ein Abtrag von wenigen Mikrometern realisieren. Daher sind für einen vollständigen Abtrag der ursprünglichen Oberflächentopographie in der Regel mehrere Überläufe erforderlich [Nag82].

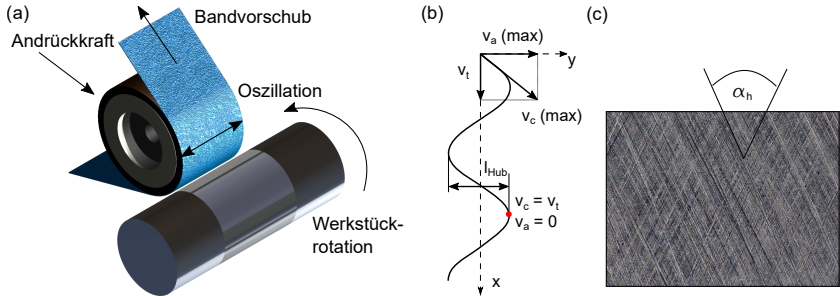
Hinsichtlich der Bearbeitungskonzepte haben sich in Abhängigkeit der jeweiligen Werkstückgeometrie vielfältige Verfahrensvarianten entwickelt. Zur Fertigung von Wälzkörpern wird häufig das spitzenlose Durchlaufverfahren verwendet. Durch zwei gleichsinnig umlaufende Transportwalzen werden die Werkstücke in Rotation versetzt und durch die entgegengesetzte Neigung der Walzenachsen unter dem oszillierenden Werkzeug hindurch bewegt. Zylindrische Formen, die als Lager- und Dichtsitze dienen, werden in der Regel durch das Einstechverfahren bearbeitet. Bei dieser Verfahrensvariante wird die Zustellbewegung in der Regel vom Werkzeug ausgeführt. Das Werkstück wird zwischen Spitzen gelagert oder spitzenlos durch angetriebene Walzen in Position gehalten. Dieses Verfahren findet insbesondere im Motorenbau bei der Bearbeitung von Ventilschäften, Kurbel- und Nockenwellen sowie bei der Fertigung von Wellen für moderne Schalt- und Automatikgetriebe Anwendung [SF11]. Die

Bearbeitung von Werkstücken mit planen, konkaven oder konvexen Oberflächen erfolgt vorwiegend durch das Planfinishen. Als Werkzeuge werden bei diesem Verfahren in der Regel Topfscheiben oder Hülsen verwendet, die durch ihre rotierende Bewegung die typische Kreuzschliffstruktur erzeugen. Abhängig von der zu bearbeitenden Oberfläche wird die Werkzeugachse parallel (Planbearbeitung) oder unter einem definierten Winkel (Bearbeitung konkaver oder konvexer Flächen) zu der Werkstückachse ausgerichtet. Anwendungsbeispiele für diese Verfahrensvariante bilden hochbeanspruchte Dichtflächen bei Einspritzsystemen von Dieselmotoren [SF11].

Das in der vorliegenden Arbeit verwendete Einstechverfahren ermöglicht sowohl eine Bearbeitung mit Honsteinen als auch mit Finishbändern. Um die wesentlichen Unterschiede zwischen den beiden Varianten darzustellen, wird im Folgenden eine Abgrenzung der Vor- und Nachteile vorgenommen. Eine wesentliche Einflussgröße für das Kurzhubhonen mit Honsteinen bildet äquivalent zum Langhubhonen der Verschleiß des verwendeten Honsteins. Dieser kann sich abhängig von den Prozessstellgrößen und Kühlschmierstoffbedingungen durch ein kontinuierliches Selbstschärfeverhalten auszeichnen oder bei ungünstig gewählten Parameterwerten bzw. unzureichender Spülwirkung des KSS zu einer Zusetzung tendieren. Ansätze, das Verschleißverhalten der Honsteine zu erfassen, bestehen in der Messung der auftretenden Prozesskräfte, wobei durch das Verhältnis der einzelnen Kräfte zueinander in Kombination mit der benötigten spezifischen Energie versucht wird, dieses Verhalten zu klassifizieren [CBC<sup>+</sup>97]. Durch eine porösere Bindungsstruktur oder alternativ die gezielte Furchung des Honsteins lässt sich eine Zusetzung mit abgeriebenen Werkstoffpartikeln aufgrund der verbesserten Spanabfuhr reduzieren [OMIS95, VM98]. Insofern ein konstantes Selbstschärfeverhalten unterstellt werden kann, ist auch die Bildung von Modellen zur Vorhersage der Oberflächenqualität und Materialabtragsrate möglich [CFC00, CFC03]. Für eine belastbare Abschätzung dieser Kenngrößen ist allerdings zunächst das Prozessverhalten des jeweiligen Honsteins mit seiner spezifischen Korn- und Bindungsstruktur in experimentellen Versuchen zu evaluieren. Zur Erzielung einer definierten Oberflächenstruktur sind die Stellgrößenwerte beim Prozess auf die spezifischen Eigenschaften des Honsteins anzupassen. Neben der Andrückkraft sowie der Schnittgeschwindigkeit, die als Haupteinflussgrößen für die resultierende Oberflächenqualität gelten, müssen ebenfalls Wechselwirkungen zwischen diesen Größen beachtet werden [Bra80]. Beträgt beispielsweise die Oszillationsfrequenz ein ganzes Vielfaches der Rotationsfrequenz des Werkstücks, kann dies zu einem wiederholten Eingriff der einzelnen Schneidkörner in bereits bestehende Riefen führen. Resultierend ergibt sich ein geringeres Zeitspanvolumen [PM95, MV00].

Als Alternative zu den konventionell genutzten Honsteinen hat sich in der Außenrundbearbeitung zunehmend die Verwendung von Finishbändern etabliert. Im Gegensatz zu Honsteinen, die sich durch einen von den Zerspanbedingungen abhängigen Verschleiß auszeichnen, ergibt sich bei der Verwendung von Finishbändern der Vorteil, reproduzierbare Eingriffsbedingungen der Schneidkörner vorliegen zu haben [Sch99a]. Der Werkzeugverschleiß lässt sich gezielt durch den Bandvorschub beeinflussen.

Die Bänder werden, wie in **Abbildung 2.7** dargestellt, mit einem kontinuierlichen oder getakteten Bandvorschub über Andrückrollen oder speziell auf den Belastungsfall angepasste Bearbeitungsschalen in Eingriff gebracht [Pau08]. Der sich aus der Überlagerung der beiden Schnittbewegungen ergebende Kreuzschliff ist auch für diese Verfahrensvariante äquivalent zu anderen Honverfahren und ermöglicht die Generierung eines Oberflächenprofils, das sich durch eine geringe Profilspitzenhöhe und einen hohen Materialanteil in geringen Profiltiefen auszeichnet.



**Abbildung 2.7:** (a) Microfinish-Prozess mit den kinematischen Stellgrößen, (b) Eingriffsbahn eines einzelnen Schneidkorns nach [Bra80], (c) Typische Oberflächenmorphologie eines durch das Microfinishen bearbeiteten Werkstücks

Die zumeist elastisch ausgelegten Andrückrollen oder -schalen garantieren die flächige Auflage des Finishbandes in der Kontaktzone zum Werkstück. Je nach Zusammensetzung des verwendeten Elastomers lassen sich die Andrückrollen in ihrer Härte variieren. Dabei ist die Härte auf die Bearbeitungsaufgabe abzustimmen. Härtere Andrückrollen führen zu einer geringeren Kontaktfläche und dementsprechend höheren Flächenpressungen in der Kontaktzone. Dies kann bei der Vorbearbeitung zielführend sein, um einen möglichst hohen Abtrag zu erzielen. Weiche Rollen zeichnen sich durch eine vergleichsweise größere Kontaktfläche und geringere Flächenpressungen aus. Insbesondere bei geringen Korngrößen zur Erzielung eines feinen Oberflächenfinishes kann die elastischere Auslegung der Kontaktrolle zielführend sein [Pau08]. Für die Bearbeitung von Lagerstellen an Wellen werden neben Andrückrollen oft auch Schalenwerkzeuge verwendet. Diese werden mit elastischen Stützleisten an das Werkstück gepresst und zeichnen sich durch einen wesentlich größeren Umschlingungswinkel von  $60^\circ$  bis  $180^\circ$  aus. Wird die axiale Schwingbewegung vom Werkstück ausgeführt, ist es möglich, mehrere Lagerstellen gleichzeitig zu bearbeiten. Des Weiteren kann durch eine entsprechende Formgebung der Andrückelemente eine gezielte Anpassung der Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück vorgenommen werden, sodass eine ballige Werkstückform entsteht. Ebenfalls möglich ist die Bearbeitung von Hohlkehlen durch eine Abrundung der Stützleistenenden oder auch die Bearbeitung der seitlich an die Lagerstellen angrenzenden Planflächen [Pau08].

Die Finishbänder zeichnen sich in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens durch unterschiedliche Bindungsstrukturen aus. Der Schneidstoff wird auf ein Gewebe oder eine Folie aufgebracht und durch Hautleim oder Kunstharz auf der Unterlage gebunden. In Abhängigkeit des Beschichtungsverfahrens können die Körner regellos verteilt oder elektrostatisch gerichtet auf die Unterlage aufgebracht werden. Bei elektrostatischer Ausrichtung werden die Körner zusätzlich durch eine Fixierungsschicht gestützt. Abgestimmt auf den zu bearbeitenden Werkstoff erfolgt die Auswahl des Schneidstoffs. Übliche Schneidstoffe sind äquivalent zu der Bearbeitung mit Honsteinen Korund, Siliziumkarbid und Diamant [Pau08].

Die Haupteinflussfaktoren für den Finishprozess mit Finishbändern sind der mittlere Anpressdruck in der Kontaktzone, die effektive Kontaktzeit zwischen den Schneidkörnern und der Werkstückoberfläche sowie die Anzahl der aktiv an der Spanbildung beteiligten Körner in der Kontaktzone. Diese Einflussgrößen sind direkt korreliert mit den Stellgrößen Andrückkraft, Prozesszeit, der Härte der Andrückrolle und der Bandvorschubgeschwindigkeit [Khe07]. Die Kontaktzeit der Schneidkörner und deren Verschleißzustand ist abhängig vom Geschwindigkeitskollektiv bestehend aus der Werkstückumfangsgeschwindigkeit, der Oszillationsfrequenz und dem Bandvorschub. Abhängig von diesen Stellgrößen ergeben sich unterschiedliche Verschleißzustände des Werkzeugs sowie daraus resultierend unterschiedliche Materialabtragsmechanismen [MSG<sup>+</sup>07].

Bei der Außenrundbearbeitung unterschiedlicher technischer Keramiken wie Siliziumkarbid, Siliziumnitrid und Zirkonoxid ermittelten *Hoffmeister et al.* eindeutige Vorteile der Bearbeitung mit Finishbändern. Durch die hohe Reproduzierbarkeit aufgrund des kontinuierlichen Bandvorschubs ergibt sich ein mit der Prozesszeit nahezu linear steigendes Zerspanvolumen sowie ein von der Korngröße abhängiges Rauheitsniveau der Oberfläche, welches nach einer spezifischen Prozesszeit nahezu stationär verläuft. Aufgrund der homogenen Struktur des Finishbandes entfällt ein zeit- und kostenaufwendiger Abrichtprozess [HG97, HH05]. Bei Schwermaschinenbauteilen, wie beispielsweise den Lagerstellen von Großkurbelwellen für Schiffsmotoren, erfolgt häufig eine manuelle Endbearbeitung. *Michel* entwickelte für das Bandfinishen Prozessstrategien zur automatisierten Bearbeitung, die neben einer Erhöhung der Oberflächenqualität insbesondere die für den Einsatz dieser Kurbelwellen entscheidende Formgenauigkeit der Lagerstellen gewährleisten [Mic95, Mic99].

Aufgrund des kontinuierlichen Vorschubs des Finishbandes lässt sich der Prozess auch ohne Kühlschmierstoffe (KSS) nutzen. Die Kühlwirkung des KSS ist aufgrund der geringen Prozesstemperaturen beim Finishen ohnehin sekundär und die primär bei der Verwendung von Honsteinen notwendige Spülwirkung verliert durch den kontinuierlichen Einsatz von neuen, unbenutzten Bandabschnitten an Bedeutung. Dies ermöglicht zum einen die Einsparung von Betriebsmitteln, da kein KSS verwendet wird. Zum anderen sind keine Säuberungs- und Trocknungsprozesse der Werkstücke erforderlich [PHB10].

### 2.3.3 Kombinationsbearbeitung

Durch die zunehmende kommerzielle Produktion kubischen Bornitrids in den 80er und 90er Jahren wurde die Bearbeitung gehärteter Stahlwerkstoffe mit einer Härte von bis zu 70 HRC durch die spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide möglich. Bei vielen Anwendungsfällen konnte durch diese Entwicklung das Schleifen substituiert werden. Voraussetzung für die Direktbearbeitung sind allerdings stabile Maschinenkonzepte, die die hohen auftretenden Kräfte kompensieren können [KKTA84]. Die Steifheit des Gesamtsystems bildet neben der im Prozess aufgebrachten Zustellkraft eine entscheidende Kenngröße. Der nominale Vorschubweg weicht aufgrund begrenzter Steifheiten im Kraftfluss vom realen Vorschubweg ab [Mus86]. Auch wenn die Endbearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide nicht komplett substituiert werden kann, so ist durchaus eine Reduzierung des Fertigungsaufwands bei den Prozessen mit geometrisch unbestimmter Schneide möglich [KCS<sup>+</sup>90].

Moderne Maschinenkonzepte ermöglichen eine Komplettbearbeitung, die aufgrund der einmaligen Aufspannung des Bauteils geringere Fertigungstoleranzen sowie geringere, zur Kompensation der Einspannfehler notwendige Aufmaße ermöglichen. *Paffrath* entwickelte diesbezüglich Prozessstrategien zur Innenrundbearbeitung von Futterteilen für unterschiedliche Fertigungsketten bestehend aus einem Dreh- und mehreren Honprozessen sowie der optionalen Nutzung eines Schleifprozesses. Der Fokus der Arbeit bestand neben der Einrichtung des zusätzlich integrierten kraftgeregelten Honprozesses in der Generierung spezifischer Oberflächenprofile, die sich insbesondere hinsichtlich der Materialanteilskenngößen unterscheiden. Basierend auf einer festgelegten Gesamtprozesszeit bestand eine weitere Vorgabe, die Prozessketten flexibel in einer industriell üblichen Taktzeit wechseln zu können [Paf11]. Ein äquivalenter Ansatz besteht in der in einem Maschinenkonzept kombinierten Außenrundbearbeitung durch Drehen und Honen. Ausgehend von feingedrehten Wälzlagerbauteilen entwickelte *Helbig* Prozessstrategien für den folgenden Honprozess, die insbesondere die ursprüngliche Topographie nach dem Drehen berücksichtigen. Unter der Voraussetzung, bei vorgegebener Korngröße des verwendeten Honsteins eine möglichst hohe Oberflächenqualität zu erzielen, leitete *Helbig* konkrete Mindestanforderungen an die Vorbearbeitung ab [Hel13]. Generell lassen sich durch das Hartdrehen hohe Oberflächenqualitäten von  $R_z < 1,5 \mu\text{m}$  erzielen, die mit der Qualität geschliffener Oberflächen vergleichbar sind. Die alternative Nutzung von Dreh- und Schleifprozessen zur Vorbearbeitung bietet, kombiniert mit einem Honprozess, großes Potenzial, vielfältige Oberflächenstrukturen zu generieren sowie durch den Vorbearbeitungsprozess generierte Randzonenzustände zu nutzen [HGW06]. Durch die Kombination eines Hartdrehprozesses mit einer anschließenden Feinbearbeitung durch das Finishen lassen sich beispielsweise die durch das Drehen erzielten Druckeigenspannungen erhalten und gleichzeitig eine für tribologische Beanspruchungen günstige Oberflächentopographie einstellen [Khe07].

Durch die Aneinanderreihung verschiedener Honschritte lässt sich des Weiteren eine plateauartige Oberflächenstruktur generieren. Die gezielte Abstimmung einzelner

Prozessstufen ermöglicht die Fertigung einer Oberflächenstruktur mit angepasster Riefentiefe. Die gezielt eingebrachten Riefen dienen in der späteren Anwendung als Ölrückhaltevolumen. Der Einsatz dieser gezielt durch eine gestufte Prozessführung erzeugten Oberflächenstrukturen auf Zylinderlaufflächen ermöglicht höhere Leistungsdichten bei geringerem Kraftstoffverbrauch. Des Weiteren lässt sich die Einlaufperiode, die in jedem tribologischen System vorhanden ist, verkürzen. Allerdings ist die Prozessabstufung insbesondere hinsichtlich der Prozesszeit sensibel einzustellen, um die Topographie der vorherigen Prozessstufe nicht vollständig abzutragen [SVG82]. Unter diesem Aspekt lässt sich insbesondere die Formgenauigkeit durch das feine Finish der nachgelagerten Prozessstufen nur noch geringfügig beeinflussen, bzw. führt es bei einer Korrektur zu einer Streuung der Oberflächenrauheiten, sodass die Form durch das Vorhonen generiert werden muss [Mus86]. Ebenfalls zu berücksichtigen sind die Fertigungsprozesse zur Vorbearbeitung mit geometrisch bestimmter Schneide. Bohrungen beispielsweise werden vor dem Honen üblicherweise feingebohrt. Durch den Verschleiß des Bohrwerkzeugs sind Schwankungen in der Oberflächenqualität möglich, die bei dem abzutragenden Aufmaß ebenfalls berücksichtigt werden müssen [Haa87].

Abgestimmt auf die spezifische Kontaktsituation in der vorgesehenen Nutzung des Bauteils ist durch die wechselseitige Anpassung der Tangential- und Axialgeschwindigkeit die Fertigung eines breiten Spektrums an Honwinkeln möglich. Konventionell wurden bis zum Ende der neunziger Jahre oft Honwinkel zwischen  $\alpha_h = 40^\circ$  und  $70^\circ$  angestrebt, um ein möglichst konstantes Verschleißverhalten der Honsteine bei gleichzeitig hohem Zeitspanvolumen zu gewährleisten. Größere Honwinkel erfordern eine höhere Axialgeschwindigkeit, die wiederum in einem höheren Verschleiß resultiert. Die aufgrund der häufigeren Richtungswechselforgänge freigelegten scharfen Körner erhöhen das Zeitspanvolumen, jedoch ist die Formgenauigkeit aufgrund des erhöhten Verschleißes beeinträchtigt [KK05].

Aktuellere Ansätze bestehen in der gezielten Auslegung der Honriefen abhängig von der Gleitbewegung im tribologischen System. Durch die Endbearbeitung von Zylinderlaufbahnen mit einem größeren Honwinkel bis zu  $\alpha_h = 140^\circ$  lässt sich beispielsweise der Ölverbrauch in Verbrennungsmotoren reduzieren. Durch die notwendige höhere Axialgeschwindigkeit zur Generierung der großen Honwinkel steigen allerdings auch die Anforderungen an die Maschinenauslegung. Basierend auf dem Plateauhonprozess gibt es zudem Ansätze, die sich durch spezifische Honwinkel für einzelne Prozessstufen auszeichnen, um die Vorteile eines hohen Zeitspanvolumens mit einer für die Kontaktsituation günstigen Oberflächentopographie zu kombinieren [HW99, Wei00]. Insbesondere bei tribologischen Systemen, die durch wechselnde Relativgeschwindigkeiten gekennzeichnet sind, wie beispielsweise der Kontakt zwischen Kolbenring und Zylinderlauffläche, wird nach aktuellem Forschungsstand eine unterschiedliche Strukturierung über verschiedene Abschnitte der Zylinderlauffläche angestrebt, um den spezifischen Anforderungen möglichst gut gerecht zu werden [GVD<sup>+</sup>13].

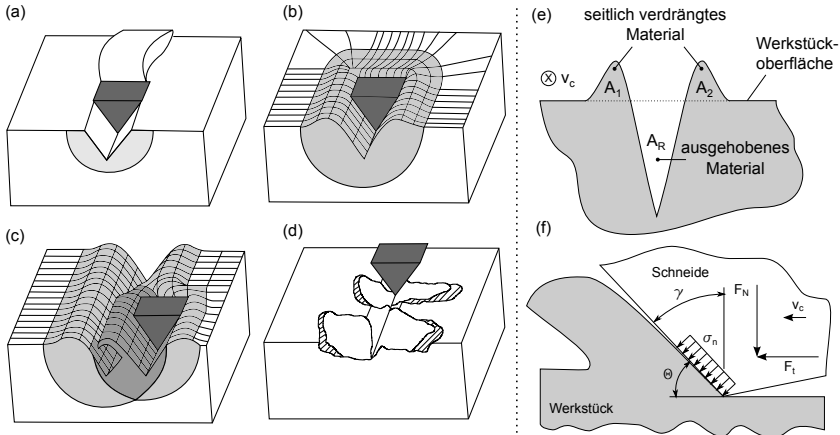
Neben der Variante, das Honverfahren in einem Maschinenkonzept mit spanenden Fertigungsverfahren mit geometrisch bestimmter Schneide zu integrieren, gibt es zunehmend innovative Ansätze, das Honen mit anderen Fertigungsverfahren zu kombinieren. Ein Beispiel für diesen Trend bildet die Laserstrukturierung von Zylinderlaufbahnen in Verbrennungsmotoren. Die eingebrachten Mikrostrukturen haben im Gegensatz zu den Honriefen den Vorteil, dass diese nicht miteinander verbunden sind. Das Öl bleibt länger in den Strukturen und ermöglicht eine bessere Schmierung des Systems. Da die Strukturen zusätzlich als Mikrodruckkammern fungieren, ergibt sich eine reduzierte Reibung zwischen Kolbenring und Zylinderwand und folglich ein geringerer Kraftstoffverbrauch und geringere Emissionen [Abe06]. Um die aus dem Honprozess resultierenden Materialaufwürfe entlang der Honriefen zu entfernen, lässt sich der finale Honprozess auch durch einen Walzprozess substituieren. Der Vorteil des Verfahrens ist, dass die dissipierte Energie so gering ist, dass sich keine chemischen Veränderungen in der Werkstückrandzone einstellen. Die Oberfläche wird rein mechanisch geglättet [KPWR12].

### 2.3.4 Werkstoffabtrag - Spanbildung in der Feinbearbeitung

Die Einordnung des Honens als spanendes Verfahren suggeriert einen Abtragsmechanismus, der dem von anderen spanenden Verfahren, wie beispielsweise dem Drehen, Fräsen oder Schleifen, entspricht. Durch eine modellhafte Betrachtung des Honprozesses unter der Annahme, dass ein Schneidkorn jeglichen auf seiner Bahn liegenden Werkstoff zerspant, wurde anhand der Differenz zwischen errechnetem Zerspanungsvolumen und tatsächlich zerspantem Volumen bereits 1970 von *Tönshoff* nachgewiesen, dass diese Annahme nicht zutrifft. Die erzielten Zerspanvolumen beim Innenrundhonen von Stahl- und Gusswerkstoffen mit Korund- und Siliziumkarbid-Honleisten betragen teilweise lediglich 0,5 Prozent des errechneten Zerspanvolumens [Tön70].

Der Werkstoffabtrag bei spanenden Feinbearbeitungsverfahren ergibt sich in der Regel durch abrasiven Werkstoffverschleiß. Die Spanbildung erfolgt nach *Zum Gahr*, wie in **Abbildung 2.8** dargestellt, durch die vier unterschiedlichen Bildungsmechanismen Mikrozerspanen, Mikropflügen, Mikroermüden und Mikrobrechen. Erfolgt der Werkstoffabtrag durch das Mikrozerspanen, werden durch den Eingriff der Schneidkörner Oberflächenfurchen und -kratzer auf der Werkstückoberfläche erzeugt. Das Werkstoffvolumen der Verschleißriefe wird vollständig in Form eines Spans abgetragen, sodass keine Werkstoffaufwürfe an den Rändern der Furche entstehen. In Abhängigkeit der Kinematik des Fertigungsverfahrens, den daraus resultierenden Eingriffsbedingungen des Schneidkeils sowie den Werkstoffeigenschaften ergeben sich unterschiedliche Spanarten. Wird im Rahmen der Werkstoffbeanspruchung der beanspruchte Bereich nicht vollständig abgetragen, sondern ist durch Aufwerfungen an den Rändern der beanspruchten Zone gekennzeichnet, handelt es sich um das Mikropflügen. Die am Schneidkeil vorliegende hohe Flächenpressung führt zu einer plastischen Verformung des Werkstoffs. Der aufgeworfene Werkstoffanteil wird durch folgende Überläufe der

Schneidkörner abgeschert, sodass die Integrität der Oberfläche sukzessive reduziert wird und es zum Mikroermüden kommt. Insbesondere bei sprödharten Werkstoffen ergeben sich durch die Belastungen am Schneidkeil derart hohe Beanspruchungen, dass einzelne Werkstoffpartikel ausbrechen. Dieser Spanbildungsmechanismus wird als Mikrobrechen bezeichnet [Zum81].



**Abbildung 2.8:** Spanbildungsmechanismen und Werkstoffabtrag beim Furchungsverschleiß nach [ZM83, Zum87] (a) Mikrospannen, (b) Mikropflügen, (c) Mikroermüden, (d) Mikrobrechen, (e) Furchungsprofil, (f) Eingriffssituation Schneidkorn bei negativem Spanwinkel

In Abhängigkeit der spezifischen Werkstoffeigenschaften ergibt sich eine mehr oder weniger große Verformung des Werkstoff, die insbesondere von der Duktilität abhängig ist. Durch den funktionalen Zusammenhang

$$f_{ab} = \frac{A_R - (A_1 + A_2)}{A_R} \quad (2.1)$$

ergibt sich eine Relation zwischen den beiden Spanbildungsmechanismen Mikrospannen und Mikropflügen. Bei  $f_{ab} = 1$  liegt ausschließlich Mikrospannen als Abtragsmechanismus vor, und das Material wird vollständig in Form eines Spans abgetragen, während bei  $f_{ab} = 0$  der Werkstoff lediglich plastisch verformt wird und von idealem Mikropflügen gesprochen wird [ZM83].

Die beschriebenen Spanbildungsmechanismen wurden von *Martin et al.* Anfang der 90er Jahre dahingehend erweitert, dass die einzelnen Schneidkörner mit der Spanfläche vielfach nicht orthogonal zur Wirkrichtung ausgerichtet sind. Durch den Eingriff der Kornspitze erfolgt eine Abdrängung des zu zerspanenden Materials über die Kornflanken, sodass weitere Materialaufwürfe entstehen und der Mechanismus des Mikropflügens begünstigt wird. Zusätzlich ist der Spanbildungsmechanismus von der

Schnittgeschwindigkeit abhängig. Insbesondere bei geringen Schnittgeschwindigkeiten ergibt sich als vorherrschender Mechanismus das Mikropflügen [MY92].

Eine Analyse der Spanbildungsmechanismen beim Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten von *Giwertzew* belegt, dass geringe Schnittgeschwindigkeiten bis zu  $v_c = 1,88 \text{ m s}^{-1}$  und geringe Korneingriffstiefen mit einer maximalen Spannungsdicke von  $h_{cu} = 3 \mu\text{m}$  am Beispiel des duktilen Werkstoffs 16MnCr5E zu allen beschriebenen Spanbildungsmechanismen führen können. Tendenziell wandelte sich der Spanbildungsmechanismus mit höheren Schnittgeschwindigkeiten und größeren Spannungsdicken vom Mikropflügen zum Mikrospanen. Wird die Schnittgeschwindigkeit auf  $v_c > 6 \text{ m s}^{-1}$  gesteigert, erfolgt der Materialabtrag überwiegend durch Mikrospanen [Giw03]. Analog wurden Schleifprozesse mit geringen Schnittgeschwindigkeiten von  $v_c = 0,3$  bis  $5 \text{ m s}^{-1}$  in einem alternativen Ansatz von *Brinksmeier* als abrasiver Verschleißprozess analysiert. Der Spanbildungsmechanismus ist neben den kinematischen Größen wie Zustellung und Vorschubgeschwindigkeit insbesondere von der geometrischen Gestalt der Schleifkörner, ihrer Größe und der Porosität der Schleifscheibe abhängig. Durch die Variation des Bindungssystems erfolgt ebenfalls eine Änderung im Spanbildungsmechanismus. Geringe Spannungsdicken bei kunstharzgebundenen Schleifscheiben führen zu einem geringen Materialabtrag, geringem Werkzeugverschleiß sowie einem geringen Reibungskoeffizienten in der Kontaktzone. Der vorherrschende Spanbildungsmechanismus ist das Mikropflügen, wodurch sich hohe Druckeigen Spannungszustände in der Werkstückrandzone ergeben. Keramisch gebundene Schleifscheiben weisen hohe effektive Spannungsdicken auf, wodurch ein hohes Zeitspanvolumen und hoher Werkzeugverschleiß entsteht. Der dominierende Zerspanungsmechanismus ist das Mikrospanen, das wiederum einen vernachlässigbaren Einfluss auf die Werkstückrandzone hinsichtlich der Eigenstressungen hat [BG05].

Insbesondere bei der Feinbearbeitung durch das Honen mit Honsteinen bildet der Verschleißzustand des eingesetzten Werkzeugs sowie der Zustand der zu bearbeitenden Oberfläche eine weitere wichtige Einflussgröße für die Spanbildung. Neue, bzw. abgerichtete Honsteine zeichnen sich zu Beginn der Bearbeitung aufgrund der aus der Bindung hervorstehenden scharfkantigen Körner durch eine kleine Kontaktfläche aus. Das Werkstück ist üblicherweise durch viele Profilspitzen gekennzeichnet, die im Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück die Auflagefläche darstellen. Es ergeben sich hohe bezogene Anpressdrücke, die zu einem schnellen Abtrag der Profilspitzen führen. Durch die erhöhten Kontaktpressungen ergibt sich ebenso ein erhöhter Kornverschleiß, sodass die Körner abstumpfen oder ausbrechen und tiefer in der Bindungsschicht liegende Körner in Eingriff gelangen. Durch die infolge dieses Prozesses steigende Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück verringert sich die Eindringtiefe der Schneidkörner. Der zeitlich bezogene Werkstoffabtrag, der Honsteinverschleiß und die Oberflächenverbesserung werden geringer. Im weiteren Verlauf der Bearbeitung streben alle drei Kenngrößen einen stationären Wert an [Bra80, PM95].

Durch den Verschleiß der Schneidkörner während der Bearbeitung ergeben sich unterschiedliche Eingriffsbedingungen während der Prozesszeit. Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass sich das Schneidkorn durch einen negativen Spanwinkel, einen nicht näher definierten Keilwinkel und einen Freiwinkel größer null Grad auszeichnet. Durch den zunehmenden Verschleiß der Schneidkörner steigt der Keilwinkel auf über  $90^\circ$ , der Spanwinkel ist nach wie vor negativ und der Freiwinkel tendiert gegen null Grad. Die Schneiden des stumpfen Kornes liegen damit in der Bearbeitungsebene und trennen den Werkstoff linienförmig ab. Im Vergleich dazu pflügt ein scharfes Korn den Werkstoff, wobei anschließend durch die scharfkantigen Flanken das aufgeworfene Material abgetrennt wird. Es ergeben sich vergleichsweise tiefe Riefen mit einer geringeren lateralen Ausprägung als bei einem abgestumpften Korn. Durch die Abstumpfung des Kornes ergibt sich trotz konstanter Andrückkraft eine geringere Schnitttiefe, da die Kraft auf eine größere Fläche wirkt. Dieser Effekt bedingt, dass sich mit neuen, scharfen Honsteinen tendenziell rauere Oberflächen erzeugen lassen [Flo92]. Insofern im Rahmen dieses Prozesses die Flächenpressung in der Kontaktzone unter einen für den spezifischen Honstein individuellen Wert fällt, kommt es zu keiner Selbstschärfung. Die Körner stumpfen soweit ab, dass der Honstein durch das KSS aufgeschwemmt wird und keine Zerspanung mehr stattfindet. Kommt es dagegen zu einem überwiegenden Splintern bzw. Ausbrechen der Körner, ergibt sich ein Gleichgewicht zwischen Verschleiß des Honsteins und abgetragenen Werkstoffvolumen pro Zeiteinheit, wobei die Oberflächenqualität und der Materialanteil der Werkstückoberfläche gleich bleiben [Bra80].

Für die Bearbeitung von gehärtetem Stahl sowie Gusseisen mittels Bandfinishen zeigten *Mezghani et al.*, dass die Spanbildung eng mit der Größe der Schneidkörner sowie dem Verschleiß der Schneidkörner korreliert ist. Für eine Korngröße  $d_K > 30 \mu\text{m}$  lässt sich durch eine höhere Zustellkraft ein höheres Zeitspanvolumen erzielen. Die spezifische Energie zur Trennung des Materials bleibt dabei annähernd konstant. Schlussfolgernd überwiegen in diesem Korngrößenbereich die Mikro-Spannungsmechanismen gegenüber dem Pflügen bzw. dem Gleiten und Reiben. Im Gegensatz dazu ergibt sich bei geringerer Korngröße  $d_K < 30 \mu\text{m}$  bei gleichem Anpressdruck eine höhere spezifische Energie zur Materialtrennung und ein geringeres Zeitspanvolumen. Der Spanbildungsmechanismus basiert hauptsächlich auf dem Pflügen und Gleitmechanismen. Eine Erhöhung des Anpressdrucks führt in diesem Fall zu keiner Steigerung der Materialabtragsrate [MES09].

Ansätze zur Analyse der Spanbildungsmechanismen beim Microfinishen bestehen darüber hinaus von *Jourani et al.* und *Khellouki et al.*. Der Eingriff einzelner Schneidkörner wurde dabei durch Ritzversuche mit einem Indenter abgebildet. Insbesondere die auf das Einzelkorn wirkenden Normalkräfte sowie der durch unterschiedliche Anstellungen variierte Spanwinkel zeigten einen hohen Einfluss auf die Spanbildungsmechanismen sowie den resultierenden Verschleiß am Schneidkorn [JHB<sup>+</sup>13, KRZ13].

Eine wissenschaftliche Betrachtung der funktionalen Zusammenhänge zwischen dem Einfluss der Stellgrößen des Finishprozesses auf diverse Zielgrößen wie Ober-

flächenqualität, Zeitspanvolumen und Kornverschleiß erfolgte durch *Michel*. Bei der Entwicklung einer automatisierten Bandfinishtechnologie für Schwermaschinenbauteile, im Speziellen Schiffskurbelwellen, bestand die primäre Zielsetzung der Arbeit allerdings darin, die für den Einsatz entscheidende Formgenauigkeit der Lagerstellen zu gewährleisten [Mic99]. *Khellouki* analysierte, inwiefern die aus einem Drehprozess resultierende Oberflächentopographie durch das Finishen beeinflusst und der Zustand der Werkstückrandzone erhalten werden können. Die Untersuchungen erfolgten an gehärtetem Wälzlagerstahl, wobei neben dem Einfluss der Oberflächentopographie auch der Einfluss der Eigenspannungen im Ausgangszustand auf das nach der Endbearbeitung resultierende Prozessergebnis exemplarisch berücksichtigt wurden [KRZ07a].



### 3 Zielsetzung und Aufgabenstellung

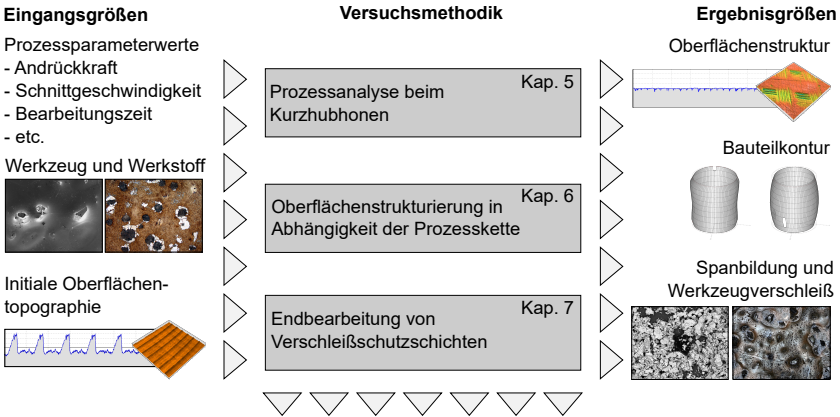
Die Endbearbeitung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch das Honen bildet für viele Anwendungen, insbesondere bei rotationssymmetrischen Bauteilen, eine effiziente und kostengünstige Möglichkeit, die Oberflächentopographie des Werkstücks gezielt auf die spezifische tribologische Kontaktsituation anzupassen. Konventionell wird die Endbearbeitung durch das Honen unter Verwendung von Honsteinen durchgeführt. Um eine Zusetzung des Honsteins mit Abrasivpartikeln zu vermeiden, wird beim Prozess oft eine Überflutungsschmierung mit niedrigviskosem Honöl genutzt.

Ein alternativer Ansatz zur Verwendung von Honsteinen besteht in der Außenrundbearbeitung durch das Kurzhubhonen mit Finishbändern. Da durch den kontinuierlichen Bandvorschub ständig neue Abschnitte des Finishbandes dem Prozess zugeführt werden, ergibt sich hinsichtlich des Verschleißzustands des Werkzeugs eine äußerst reproduzierbare Eingriffssituation der Schneidkörner. Das zerspannte Material wird zu einem Großteil mit dem verschlissenen Finishband durch den kontinuierlichen Bandvorschub aus der Kontaktzone transportiert, sodass die Spülwirkung des Kühlschmierstoffs (KSS) eine geringere Bedeutung als bei der Verwendung von Honsteinen hat. Der insbesondere bei kleinen Korngrößen geringe Abtrag ermöglicht in Kombination mit den reproduzierbaren Eingriffsverhältnissen die gezielte Nutzung der aus Vorbearbeitungsprozessen resultierenden Oberflächentopographie.

Bei industrieller Nutzung des Verfahrens beruht die Abstimmung der Prozessparameterwerte häufig auf Erfahrungen. Die ursprüngliche, aus Vorbearbeitungsprozessen resultierende Oberflächentopographie wird meist vollständig abgetragen, um durch eine gestufte Prozessführung die Oberflächenqualität sukzessive zu verbessern. Die wissenschaftlichen Untersuchungen, insbesondere von *Michel, Khellouki* und *Mezghani et al.* ermöglichen unter Berücksichtigung des jeweiligen Anwendungsfalls und der damit einhergehenden unterschiedlichen Zielsetzung der Forschungsarbeiten die Identifikation der maßgeblich beeinflussenden Prozessstellgrößen [Mic99], [KRZ07a], [MES09]. Insbesondere die komplexen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Stellgrößen unter Berücksichtigung der ursprünglichen Oberflächentopographie als Eingangsgröße sind allerdings nur in Ansätzen bekannt.

Die übergeordnete Zielsetzung der vorliegenden Arbeit besteht in der gezielten Oberflächenstrukturierung durch das Microfinishen zur Verbesserung des Einsatzverhaltens unter tribologischer Beanspruchung. Dazu wird, wie in **Abbildung 3.1** dargestellt, zunächst der Einfluss maßgeblicher Prozessstellgrößen, wie beispielsweise Andrückkraft und Schnittgeschwindigkeit, auf das resultierende Prozessergebnis mithilfe der statistischen Versuchsplanung und -auswertung untersucht. Durch den Einsatz unterschiedlicher Bindungsstrukturen in Kombination mit einer gestuften Prozessführung bei sukzessive abnehmender Korngröße werden unterschiedliche Oberflächenstrukturen mit verschiedenen Zielperspektiven, wie beispielsweise einer möglichst geringen

Rauheit oder der gezielten Einstellung von Profilliefen mit spezifischer Riefentiefe, generiert (Kapitel 5). Aufbauend auf den Erkenntnissen erfolgt eine Analyse zur Oberflächenstrukturierung anhand unterschiedlicher Prozessketten, wobei der Einfluss der Vorbearbeitung - realisiert durch einen Fräs- und einen Schleifprozess - gezielt genutzt wird, um Strukturen zu generieren, die sich durch ein günstiges Verhalten im tribologischen Kontakt auszeichnen (Kapitel 6). Die ermittelten Prozessstrategien werden abschließend auf ihre Übertragbarkeit für die Strukturierung von hochharten Verschleißschutzschichten untersucht. Um ein Beurteilungskriterium für die in der Kontaktzone wirkenden Prozesskräfte zwischen Werkzeug und Werkstück zu erhalten, das unabhängig von der Werkstückgeometrie ist, werden zusätzlich die aus der geometrischen Werkstückgestalt und der Andrückkraft resultierenden Flächenpressungen in der Kontaktzone analysiert (Kapitel 7).



**Zielgrößen**

- Hohe Oberflächenqualitäten mit gezielt eingestellten Materialanteilskenngößen
- Geringe Formabweichungen durch angepasste Flächenpressungen in der Kontaktzone
- Effiziente Prozessauslegung durch mehrstufige Finishstrategien

**Abbildung 3.1:** Versuchsmethodik

Die maßgeblichen Zielgrößen für die Analyse und Bewertung der experimentellen Versuche bilden die Fertigung hoher Oberflächenqualitäten mit spezifisch eingestellten Materialanteilskenngößen bei geringen Formabweichungen zur Realisierung einer möglichst großen Kontaktfläche unter tribologischer Beanspruchung. Durch die Analyse der Spanbildungsmechanismen und des Werkzeugverschleißes wird für die verschiedenen Werkzeugarten zudem eine möglichst effiziente Prozessauslegung durchgeführt.

## 4 Versuchsplanung und -durchführung

Die Ermittlung der funktionalen Zusammenhänge zwischen Stell- und Ergebnisgrößen bei der Endbearbeitung durch das Finishen erfolgt sowohl an konventionellen Stahl- und Gusswerkstoffen als auch an hochharten Verschleißschutzschichten auf Wolframkarbid-Basis. Die Verwendung variierender Bauteilgeometrien ermöglicht die Analyse unterschiedlicher Belastungskollektive bei der Endbearbeitung durch das Finishen. Im Folgenden sind die genutzten Werkstoffe, Werkzeuge und Werkzeugmaschinen, die Mess- und Analysetechnik sowie die zur effizienten Versuchsdurchführung notwendige Versuchsplanung beschrieben.

### 4.1 Werkstoffe

Für den Einsatz in einem tribologischen System werden häufig wärmebehandelte Stahl- und Gusswerkstoffe genutzt. Diese unterscheiden sich, abhängig von den spezifischen Anforderungen, hinsichtlich der Legierungselemente sowie der Wärmebehandlung, um gezielt Werkstoffeigenschaften, wie die Härte und die Festigkeit, zu beeinflussen. Die Ermittlung der funktionalen Zusammenhänge bei der Endbearbeitung durch das Finishen erfolgt sowohl an dem Wälzlagerstahl 100Cr6, dem Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 und dem Gusseisen GJS-HB-265. Dabei kommen die Stahl- und Gusswerkstoffe ausschließlich in gehärtetem Zustand zum Einsatz.

Der Wälzlagerstahl 100Cr6 lässt sich durch eine Wärmebehandlung auf 58 bis 64 HRC härten. Mit einem Kohlenstoffgehalt von ca. 1 Prozent (**Tabelle 4.1**) eignet sich der Werkstoff zum Durchhärten. Die hohe Dauerfestigkeit des 100Cr6 basiert auf der hohen Reinheit. Einschlüsse von Schlacketeilchen senken die Dauerfestigkeit signifikant, da sie als Rissinitiatoren fungieren [BT06, Wei12].

**Tabelle 4.1:** Chemische Zusammensetzung des Wälzlagerstahls 100Cr6 nach DIN EN ISO 683-17

Element	C	Si	Mn	Cr
Gewichtsprozent	0,93-1,05	0,15-0,35	0,25-0,45	1,35-1,60

Alternativ zum durchhärtbaren Wälzlagerstahl 100Cr6 wird bei großen Lagern, Zahnradern und Getriebeteilen, die in der Anwendung hohen Belastungen durch Gleit- und Wälzvorgänge ausgesetzt sind, häufig Einsatzstahl verwendet. Dieser lässt sich aufgrund des wesentlich geringeren Kohlenstoffanteils (**Tabelle 4.2**) nur durch eine Aufkohlung in der Randzone härten. Beim Aufkohlen werden die Bauteile in der Randschicht auf einen Kohlenstoffgehalt zwischen 0,6 und 0,9 Prozent erhöht [BS12]. Durch die gezielte Einstellung des Kohlenstoffanteils kann das Gefüge hinsichtlich einer Restaustenitbildung gezielt beeinflusst werden. Im Gegensatz zu der Randschichthärtung wird beim Einsatzhärten das gesamte Volumen erhitzt [BT06]. Im

Rahmen der Arbeit wurden die experimentellen Versuche an dem Cr-Ni-Mo-legierten Einsatz- und Wälzlagerstahl 18CrNiMo7-6 durchgeführt.

**Tabelle 4.2:** Chemische Zusammensetzung des Einsatz- und Wälzlagerstahls 18CrNiMo7-6 nach DIN EN 10084

Element	C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni
Gewichtsprozent	0,15-0,21	max. 0,4	0,50-0,90	1,50-1,80	0,25-0,35	1,40-1,70

Die Eisengusswerkstoffe werden in mehrere Sorten unterteilt. Die Einteilung des Gusseisens erfolgt nach der überwiegend im Gefüge auftretenden Graphitform. Gusseisen mit Lamellengraphit und Gusseisen mit Kugelgraphit sowie den Temperguss. Von dem Gefügebau sowie den eingebetteten Graphitkristallen abhängig sind die Eigenschaften des Bauteils. Gusseisen mit Kugelgraphit wird auch als sphärolithisches Gusseisen bezeichnet. Im Gegensatz zu lamellarem Gusseisen ergibt sich durch die Kugelform des Graphits eine geringere Kerbwirkung, die wiederum zu einer gesteigerten Festigkeit und Zähigkeit des Gusseisens führt. Aufgrund der größeren Oberfläche der Lamellen zeichnet sich lamellares Gusseisen allerdings durch eine erhöhte Dämpfungsfähigkeit bei Schwingungsbeanspruchung und im Vergleich zur Kugelform durch eine erhöhte elektrische Leitfähigkeit aus. Eine weitere Untergliederungsmöglichkeit bildet die Einteilung nach der Art des Grundgefüges. Dieses hat erheblichen Einfluss auf die Zähigkeit sowie die Festigkeit und kann äquivalent zu den Stahlsorten ferritisch, perlitisch, etc. ausgeprägt sein. Insofern der C-Gehalt zwischen 2,5 und 4 Prozent liegt, ergibt sich ein heterogenes Grundgefüge [TW78, Wei12].

Ein alternativer Ansatz, tribologisch beanspruchte Funktionsflächen vor abrasivem Verschleiß zu schützen, besteht in der zusätzlichen Aufbringung von Beschichtungen. Im Rahmen der experimentellen Versuche wurden zwei Beschichtungssysteme auf Wolframkarbid-Basis genutzt. Auf die Substratwerkstoffe aus weichgeglühtem 100Cr6 bzw. vergütetem 42CrMo4QT wurden im Vorfeld durch einen HVOF-Prozess die Wolframkarbidsschicht 12WC-88Co in Kobalt-Bindematrix und alternativ die Beschichtung 86WC-10Co4Cr in einer Kobalt-Chrom-Bindematrix aufgebracht. Der Wolframkarbidanteil im Pulvermaterial variierte dementsprechend in einem geringen Intervall zwischen 86 und 88 Gewichtsprozent [BGTN13, TSL13]. Die Parameterwerte der HVOF-Prozesse sind zusammenfassend in **Tabelle 4.3** aufgelistet.

**Tabelle 4.3:** Beschichtungsparameterwerte beim HVOF-Prozess nach [BGTN13, TSL13]

Beschichtung	Pulver Korngröße [µm]	Sauerstoff [l min <sup>-1</sup> ]	Wasserstoff [l min <sup>-1</sup> ]	Kerosin [l h <sup>-1</sup> ]	Stickstoff [l min <sup>-1</sup> ]
88WC-12Co	2-10	650	70	15,3	0
86WC-10Co4Cr	2-15	485	140	16	450

Die Beschichtungen wurden mit einer CJS-Spritzpistole und einem CPF2-Pulverförderer der Firma *Thermico GmbH* aufgebracht. Die Korngröße des agglomeriert und gesinteren Pulvers lag zwischen 2 und 15  $\mu\text{m}$ , wobei die Größe der Wolframkarbidpartikel ca. 400 nm betrug. Durch die zusätzliche Eindüsung von Stickstoff im Falle der WC-CoCr-Beschichtung lässt sich die Partikeltemperatur senken und eine höhere Partikelgeschwindigkeit erzielen. Diese lag bei ca.  $950 \text{ m s}^{-1}$  bei einer Temperatur von  $1450 \text{ }^\circ\text{C}$ . Durch diese Prozessvariation ergibt sich eine höhere Bindungsstärke [BGTN13, TSL13].

Beide Beschichtungssysteme sind durch eine geringe Porosität und eine homogene Schichtmorphologie gekennzeichnet. Alle Einschlüsse sind durch eine geringere Ausdehnung von weniger als  $2 \mu\text{m}^2$  gekennzeichnet und gleichmäßig in der Beschichtung verteilt. Im Vergleich zu den Stahl- und Gusswerkstoffen zeichnen sich die Beschichtungen, wie in **Tabelle 4.4** dargestellt, durch eine wesentlich höhere Härte aus.

**Tabelle 4.4:** Kennwerte der Verschleißschutzschichten nach [BGTN13, TSL13]

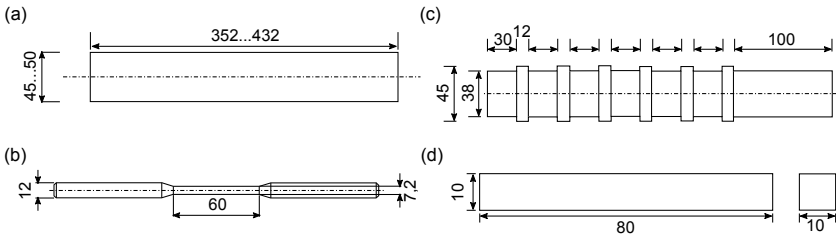
Beschichtung	Ausgangsrauheit $R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Porosität %	Härte HV 0.1
88WC-12Co	14-16	< 1	$1150 \pm 120$
86WC-10Co4Cr	10-30	$1,2 \pm 0,4$	$1250 \pm 50$

## 4.2 Werkstückkonturen

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit werden sowohl rotationssymmetrische Bauteile als auch plane Werkstücke durch das Finishen endbearbeitet. Die in **Abbildung 4.1** dargestellten Werkstückkonturen zeichnen sich hinsichtlich der Stellgrößenvariation durch spezifische Vorteile aus. Die Grundlagenuntersuchungen zum Belastungskollektiv beim Kurzhubhonen (Kapitel 5) erfolgten an rotationssymmetrischen Bauteilen mit einem Durchmesser von  $d = 50 \text{ mm}$ . Durch den im Vergleich zu den anderen Proben erhöhten Durchmesser lässt sich eine hohe Tangentialgeschwindigkeit realisieren. Diese wird hauptsächlich durch die maximale Drehzahl der Drehmaschine begrenzt und ist damit insbesondere bei geringen Werkstückdurchmessern hinsichtlich hoher Tangentialgeschwindigkeiten schnell limitiert.

Um den Einfluss der Oberflächentopographie vor der Finishbearbeitung auf die resultierende Struktur analysieren zu können (Kapitel 6), wird die in **Abbildung 4.1** (d) dargestellte plane Probengeometrie verwendet. Die im Vergleich zu rotationssymmetrischen Bauteilen vereinfachte Geometrie ermöglicht eine Bearbeitung durch die Verfahren Planfräsen und Flachsleifen. Die auf diese Weise generierten Strukturen werden als Eingangsgröße für den Finishprozess genutzt. Die plane, strukturierte Oberfläche eignet sich des Weiteren, um den Einfluss der generierten Oberflächenstruktur auf das Verhalten im tribologischen Kontakt in einem Gleitverschleißtest zu analysieren.

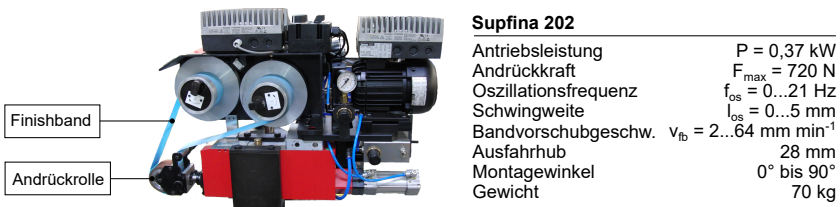
Die Bearbeitung der Verschleißschuttschichten erfolgte an drei unterschiedlichen rotationssymmetrischen Werkstückkonturen (Kapitel 7). Die Übertragbarkeit der in den Grundlagen zum Belastungskollektiv beim Kurzhubhonen entwickelten Prozessstrategien wird ebenfalls auf Vollwellen analysiert. Diese zeichnen sich durch zwei unterschiedliche Durchmesser aus. Die Proben mit einem in der Mitte verjüngten Durchmesser eignen sich aufgrund des geringen abzutragenden Werkstoffvolumens zur effizienten Analyse des erzielten Zeitspanvolumens sowie zusätzlich für einen Umlaufbiegewechseltest zum Test der dynamischen Festigkeit des Werkstoffverbundes. Zusätzlich wird durch die Nutzung von Absatzwellen ein anderer Belastungsfall getestet, bei dem die Werkzeugbreite größer ist als die Werkstückbreite. Die gezielte Anfasung der einzelnen Absätze ermöglicht die Analyse des Einflusses der Werkstückkontur vor dem Finishen auf das Endergebnis.



**Abbildung 4.1:** Werkstückkonturen (a) zylindrische Rundproben, (b) Rundproben mit in der Mitte verjüngtem Durchmesser, (c) Rundproben mit Absätzen, (d) plane Werkstücke

### 4.3 Werkzeugmaschinen

Sämtliche Stellgrößen, ausgenommen der Tangentialgeschwindigkeit, werden beim Finishen durch das genutzte Aufsatzgerät generiert. Das Finishaufsatzgerät *Supfina 202* von der Firma *Supfina*, dargestellt in **Abbildung 4.2**, zeichnet sich durch eine hohe Spannweite an Einstellmöglichkeiten hinsichtlich der Stellgrößen Andrückkraft, Oszillationsfrequenz, Bandvorschubgeschwindigkeit und Schwingweite aus.



**Abbildung 4.2:** Finish-Aufsatzgerät vom Typ *Supfina 202* der Firma *Supfina*

Die Andrückkraft wird über einen Druckluftanschluss durch einen Pneumatikzylinder realisiert. Durch ein stufenlos einstellbares Ventil lässt sich ein Druck von bis zu 6 bar erzielen, der über einen Stempel auf das Werkzeug übertragen wird. Ein Druck von 1 bar entspricht einer am Werkzeug wirkenden Andrückkraft von  $F = 120\text{ N}$ . Die Oszillation des adaptierten Werkzeugs wird durch ein doppelt exzentrisches Antriebssystem realisiert. Bei einer Leistung von  $P = 0,37\text{ kW}$  ermöglicht dies eine Oszillationsfrequenz von maximal  $f_{\text{os}} = 21\text{ Hz}$ . Dabei ist die Schwingweite zwischen  $l_{\text{os}} = 0$  und 5 mm stufenlos einstellbar. Eine weitere integrierte Antriebseinheit ermöglicht einen kontinuierlichen Bandvorschub von  $v_{\text{fb}} = 0$  bis  $64\text{ mm min}^{-1}$ .

Der Finishprozess ist, wie in **Abbildung 4.3** dargestellt, nur durch die Adaption des Finishaufsatzgerätes an eine weitere Maschine möglich. Die Tangentialgeschwindigkeit wird durch die rotatorische bzw. lineare Bewegung des Werkstücks generiert und lässt sich nicht von der Finisheinheit beeinflussen.



**Außenrundfinishen Boehringer M670**

Antriebsleistung	$P = 11 \dots 25\text{ kW}$
Drehzahl	$n = 7,1 \dots 1400\text{ min}^{-1}$
Vorschub	$f = 0,04 \dots 2,8\text{ mm U}^{-1}$

**Planfinishen Ixion TLF 1004**

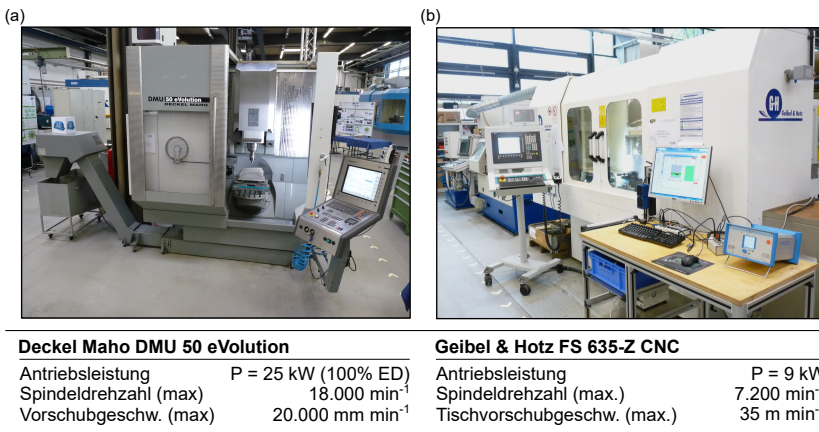
Antriebsleistung	$P = 11\text{ kW}$
Tischgröße	$1500 \times 1000\text{ mm}$
max. Vorschubgeschw. Z-Achse	$5\text{ m min}^{-1}$

**Abbildung 4.3:** Verwendete Werkzeugmaschinen zur Aufnahme des Finish-Aufsatzgerätes und Realisierung der kinematischen Stellgrößen (a und c) *Böhrringer M670*, (b und d) *Ixion TLF 1004*

Die rotationssymmetrischen Bauteile wurden auf einer Drehmaschine des Herstellers *MAG Boehringer Werkzeugmaschinen GmbH* gefinisht. Für die Bearbeitung planer Bauteile erfolgte eine Integration des Finishaufsatzgeräts in das 4-achsige Bearbeitungszentrum *TLF 1004* der Firma *Ixon*. Das Bearbeitungszentrum verfügt über einen vergleichsweise großen Arbeitsbereich mit bis zu 2 000 mm Ausdehnung in Richtung der X und Z-Achse. Der 1 500 x 1 000 mm große Maschinentisch ermöglichte die Montage des Finishaufsatzgeräts in dem Bearbeitungszentrum. Durch die vollständige Rotierbarkeit des Maschinentischs ließ sich die Finisheinheit präzise zur Spindel des Bearbeitungszentrums ausrichten und über die Vorschubachse die für das Finishen erforderliche Tangentialbewegung abbilden. Dabei war die maximale Vorschubgeschwindigkeit auf  $v_t = 5 \text{ m min}^{-1}$  beschränkt.

Die in Kapitel 6 als Eingangsgrößen genutzten Oberflächentopographien wurden durch einen Fräs- bzw. alternativ einen Schleifprozess generiert. Bei der für den Fräsprozess genutzten Werkzeugmaschine, dargestellt in **Abbildung 4.4**, handelt es sich um ein 5-Achs-Bearbeitungszentrum der Firma *Deckel Maho GmbH* mit der Bezeichnung *DMU 50 eVolution*. Durch die hohe maximale Spindeldrehzahl von  $18\,000 \text{ min}^{-1}$  bei einer Leistung von 25 kW (100 % ED) bzw. 35 kW (40 % ED) ist das Bearbeitungszentrum für die Hochgeschwindigkeitszerspanung (HSC) ausgelegt. Die maximale Vorschubgeschwindigkeit der CNC-gesteuerten Achsen beträgt  $20\,000 \text{ mm min}^{-1}$ .

Der alternativ genutzte Schleifprozess zur Probenpräparation erfolgte auf einer CNC-Flachschleifmaschine des Typs *Geibel & Hotz FS 635-Z CNC* der Firma *Geibel & Hotz GmbH*. Bei einer maximalen Antriebsleistung von 9 kW lässt sich eine Spindeldrehzahl bis zu  $7\,200 \text{ min}^{-1}$  bei einer Werkstückvorschubgeschwindigkeit bis zu  $v_w = 35 \text{ m min}^{-1}$  realisieren.



**Abbildung 4.4:** Verwendete Werkzeugmaschinen zur Probenvorbereitung (a) *Deckel Maho DMU eVolution*, (b) *Geibel & Hotz FS 635-Z CNC*

## 4.4 Werkzeuge

Die Finisheinheit eignet sich aufgrund der flexiblen Werkzeugaufnahme sowohl zur Fertigung mit Honsteinen als auch mit Finishbändern. Bei der Verwendung von Finishbändern werden diese bei der Einstechbearbeitung häufig über sogenannte Andrückrollen mit einer definierten Andrückkraft an das Werkstück gedrückt. Alternativ werden Schalenwerkzeuge verwendet, die einen größeren Umschlingungswinkel gewährleisten. Der Einfluss des Werkzeugs auf den Prozess ist daher bei der Nutzung von Finishbändern getrennt für das Andrückelement und das jeweilige Finishband zu bewerten.

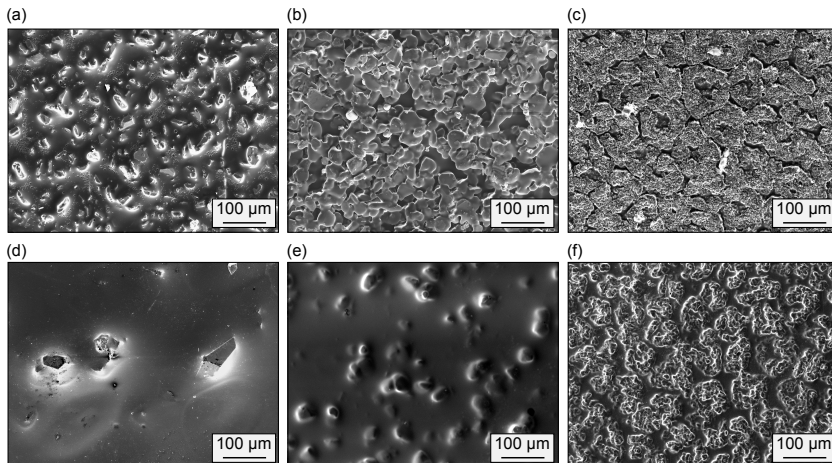
### 4.4.1 Andrückrollen

Die im Rahmen der Untersuchungen verwendeten Andrückrollen bestehen aus einem Aluminium-Grundkörper, der mit einer Vulkollan-Ummantelung versehen ist. Durch zwei Kugellager, die gleichzeitig als Verbindung zum Werkzeughalter dienen, wird eine Rotationsbewegung der Andrückrolle ermöglicht, um während des Prozesses einen kontinuierlichen Bandvorschub zu gewährleisten. Abgesehen von der Kornart, -größe und der Bindungsstruktur des verwendeten Finishbandes lässt sich der Prozess durch unterschiedliche Härten der Andrückrollen variieren. Dies wird durch unterschiedliche Gummimischungen der Vulkollanummantelung erzielt. Vulkollan ist ein von Bayer entwickeltes Polyurethan-Elastomer, das die charakteristischen Eigenschaften von Kautschuk, wie beispielsweise eine hohe Festigkeit, eine hohe Bruchdehnung und eine hohe Stoßelastizität besitzt. Durch die günstige Kombination von physikalischen und chemischen Eigenschaften haben sich Polyurethan-Elastomere in vielen Anwendungsbereichen, vor allem im Maschinen- und Fahrzeugbau, dem Bauwesen und der Elektrotechnik bewährt.

### 4.4.2 Finishbänder

Für die Versuche wurden zwei unterschiedliche Kornarten verwendet. Die Bearbeitung der Stahl- und Gusswerkstoffe erfolgte durch den Schneidstoff Aluminiumoxid. Dieser wurde in den Korngrößen  $d_K = 30, 9, 3$  und  $2 \mu\text{m}$  verwendet. In Abhängigkeit der gewünschten Oberflächenqualität und zu erzielenden Oberflächentopographie kamen diese Körnungen gestuft in aufeinanderfolgenden Prozessstufen zum Einsatz. Die Bearbeitung der Verschleißschutzschichten erfolgte mit dem Schneidstoff Diamant. Die hohe Härte der Verschleißschutzschicht machte es erforderlich, einen Schneidstoff zu verwenden, der einen abrasiven Abtrag ermöglicht. Aufgrund der hohen Ausgangsrauheit der Verschleißschutzschicht mit einer gemittelten Rautiefe von  $R_z > 10 \mu\text{m}$  wurde für die Bearbeitung neben den Korngrößen  $d_K = 30, 9$  und  $3 \mu\text{m}$  eine vergleichsweise große Korngröße mit  $d_K = 125 \mu\text{m}$  eingesetzt, um einen ausreichend großen Abtrag zu generieren. Unabhängig vom Schneidstoff erfolgten die experimentellen Untersuchungen durch die Nutzung von zwei unterschiedlichen Bindungsarten.

Die Bindungssysteme unterscheiden sich hinsichtlich der Art und Weise, wie die Körner auf den Polyesterfilm aufgebracht sind. Einerseits ist es möglich, die Körner durch ein Dispersionsverfahren auf das Trägermaterial aufzubringen. Dabei werden die Körner zufällig auf die Filmunterlage gestreut und mit einer Kunstharzbindung überzogen. Daher ist es möglich, dass einzelne Körner aus der Bindung herausstehen oder aber auch mit Bindungsmaterial überzogen sind. Diese Bindungsart wird auch als geschlämmte Bindung bezeichnet. Die zweite mögliche Variante sind elektrostatisch gerichtete Finishbänder. Bei der Aufbringung der Körner werden diese elektrostatisch ausgerichtet, sodass insbesondere die scharfkantigen Kornspitzen aus der Bindung hervorstehen. Da diese ausgerichteten Körner bei der Bearbeitung erhöhten Belastungen ausgesetzt sind, besteht die Bindung aus einem Träger- und einem Fixierungslayer. Die zusätzliche Bindungsschicht sichert die Körner gegen einen frühzeitigen seitlichen Ausbruch, bevor das Korn abgestumpft ist. In **Abbildung 4.5** sind beispielhaft die Unterschiede in der Bindungsstruktur sowie den Korngrößen dargestellt.



**Abbildung 4.5:** REM-Aufnahmen der eingesetzten  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - und Diamant-Finishbänder, (a)  $d_K = 30 \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  elektrostatisch gerichtet, (b)  $d_K = 30 \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  Dispersionsbeschichtung, (c)  $d_K = 3 \mu\text{m}$   $\text{Al}_2\text{O}_3$  Dispersionsbeschichtung, (d)  $d_K = 125 \mu\text{m}$  Diamant elektrostatisch gerichtet, (e)  $d_K = 30 \mu\text{m}$  Diamant Dispersionsbeschichtung (f)  $d_K = 9 \mu\text{m}$  Diamant Dispersionsbeschichtung.

#### 4.4.3 Fräs- und Schleifwerkzeuge zur Probenpräparation

Die in Kapitel 6 genutzten planen Werkstücke wurden vor der Finishbearbeitung durch einen Fräs- bzw. Schleifprozess strukturiert. Die Fräsbearbeitung erfolgte mit einem Messerkopf der Firma *Pokolm-Frästechnik GmbH & Co. KG*, der mit Titanaluminiumnitrid ( $\text{TiAlN}$ ) beschichteten Wendschneidplatten, ebenfalls von der Firma *Pokolm-*

*Frästechnik GmbH & Co. KG* bestückt wurde. Die Beschichtung zeichnet sich durch eine hohe Warmhärte sowie eine hohe Verschleißbeständigkeit aufgrund der geringen Oxidationsneigung aus. Aufgrund dieser Eigenschaften eignen sich die Wendeschneidplatten sowohl für einen Einsatz bei der Hochgeschwindigkeitszerspanung als auch für die Hartbearbeitung und die Trockenzerspanung [KK08]. Die Probenpräparation durch das Schleifen erfolgte mit einer kunstharzgebundenen CBN-Schleifscheibe der Firma *Wendt GmbH* mit einer Korngröße von  $d_K = 46 \mu\text{m}$ .

## 4.5 Mess- und Analysetechnik

Zur Beurteilung des Prozessergebnisses des Finishprozesses werden im Rahmen der Arbeit Rauheits- bzw. Materialanteilskenngößen betrachtet, die eine detaillierte Analyse der generierten Oberflächenstrukturen ermöglichen. Da sich gehobene Profile vielfach durch eine plateauartige Oberfläche auszeichnen, ist die alleinige Auswertung der gemittelten Rautiefe  $R_z$  nicht ausreichend, um die Auswirkungen einer geänderten Prozessstrategie umfassend beschreiben zu können. Der Kennwert  $R_z$  wird nach DIN EN ISO 4287 als Mittelwert aus den fünf größten Abständen zwischen Profilspitzenhöhe und Riefentiefe gebildet. Die Anteile und Verteilungen der Spitzen bzw. Riefen im Profil werden durch den Kennwert nicht berücksichtigt. Zur detaillierteren Analyse der Oberflächentopographie ermöglicht die Bildung des Materialanteils, der wiederum aus dem Rauheitsprofil resultiert, eine gezielte Aufschlüsselung der Spitzenhöhen und Riefentiefen des Profils [SVG82]. Die Materialtraganteilskenngößen, reduzierte Profilspitzenhöhe  $R_{pk}$ , Kernrautiefe  $R_k$  und reduzierte Profiliriefentiefe  $R_{vk}$ , werden daher parallel zu der Oberflächenrauheit ausgewertet. Zur Vermessung der Oberflächenprofile wurde das taktile Rauheitsmessgerät *MarSurf XR 20* mit der Vorschubeinheit *GD 120* von der Firma *Mahr* verwendet.

Um neben den Rauheitskenngößen, die sich auf 2D-Profilen beziehen, eine Auswertung der flächigen Topographie zu erhalten, wurden durch die konfokale Weißlichtmikroskopie Pseudo-3D-Aufnahmen der Oberflächentopographie erstellt. Die Messungen erfolgten mit dem konfokalen Weißlichtmikroskop *microsurf* der Firma *nanofocus*. Zur detaillierten Analyse einzelner Ausschnitte der generierten Oberflächenstruktur sowie der Charakterisierung des Verschleißes beim Finishband wurde zusätzlich die Rasterelektronenmikroskopie (REM) verwendet. Bei dieser Messtechnik wird ein gebündelter Elektronenstrahl rasterförmig über die Probenoberfläche geführt. Durch die Detektion der dabei entstehenden Sekundär- und Rückstreuerelektronen wird ein topographischer Kontrast ermöglicht. Abhängig von der Ordnungszahl der streuenden Atome zeichnen sich die Rückstreuerelektronen durch eine unterschiedliche Intensität aus, die wiederum eine Unterscheidung verschiedener Phasen ermöglicht [HS09]. Die bei der Messung emittierten Elektronen erzeugen beim Auftreffen auf die einzelnen Kristalle des Werkstoffgefüges, abhängig von der Orientierung des Kristalls, ein spezifisches Streumuster. Durch die Detektion dieses Streumusters für alle Gitterflä-

chen des Kristalls lassen sich sogenannte Beugungsbilder generieren, durch die sich wiederum die Kristallsymmetrie als auch die Orientierung der einzelnen Kristalle bestimmen lassen. Diese im Deutschen als Orientierungsmikroskopie bezeichnete Messtechnik, bzw. besser bekannt im Englischen als Electron Backscatter Diffraction (EBSD) ermöglicht als Erweiterung zur Charakterisierung der Oberflächentopographie durch das REM eine Analyse des randzonennahen Werkstoffgefüges [Kat02, Sch14].

Neben der Charakterisierung der Oberflächentopographie erfolgt eine Analyse der Formgenauigkeit. Die taktile Vermessung der Werkstücke mit dem Formmessgerät *MMQ 40* der Firma *Mahr* ermöglichte eine Auswertung des resultierenden Zylindrizitätsfehlers sowie der Rundheitsabweichung. Des Weiteren wurde zur Analyse der Konturgenauigkeit bearbeiteter Wellenabsätze das Konturmessgerät *MarSurf XC 20* genutzt.

## 4.6 Versuchsplanung

Das Bearbeitungsergebnis beim Finishen ist wie bei jedem anderen Fertigungsprozess bestimmt durch Einflussgrößen, die sich gezielt beeinflussen lassen, und Störgrößen, die ebenfalls einen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis ausüben, aber nicht oder nur bedingt kontrolliert werden können. Zur gezielten Einstellung des Prozessergebnisses ist die Kenntnis des funktionalen Zusammenhangs zwischen Einflussgrößen, Störgrößen und Bearbeitungsergebnis von entscheidender Bedeutung. Die im Rahmen der Arbeit variierten Einflussgrößen des Finishprozesses sind die Andrückkraft  $F$ , die Tangentialgeschwindigkeit  $v_t$ , die Oszillationsgeschwindigkeit  $v_{os}$ , die Prozesszeit, die Geometrie der Werkstücke sowie die Beschaffenheit des Werkzeugs. Aufgrund der Vielzahl an Stellgrößen würde sich bei vollfaktorieller Abbildung ein immenser Versuchsaufwand ergeben. Um diesen Aufwand zu reduzieren, wurden die experimentellen Untersuchungen mithilfe der statistischen Versuchsplanung durchgeführt.

Grundlegendes Ziel jedes Versuchsplans ist es, die Datenbasis zu schaffen, um ein vorgegebenes Modell so effizient und genau wie möglich zu approximieren [MBC79, Mon97]. Ausgehend davon, dass die jeweils zu untersuchenden Einflussgrößen nicht in einem linearen Zusammenhang mit der Zielgröße stehen und ebenfalls diverse Wechselwirkungen auftreten, wird zur Beschreibung des funktionalen Zusammenhangs oft ein quadratisches Modell, das um Produktterme erweitert wird, zur empirischen Beschreibung genutzt [Kle06]. Passende Versuchspläne bilden das Central-Composite-Design (CCD) und das Box-Behnken-Design (BBD). Das CCD zeichnet sich durch die Kombination aus einer würfel- und einer sternförmigen Anordnung der Versuchspunkte aus. Jeder Einflussfaktor wird auf fünf Stufen variiert, sodass auf diese Weise die Abbildung nichtlinearer Effekte möglich ist [Mon97, SvBH10]. Die mehrfache Ausführung des Center-Points ermöglicht zudem eine Aussage der Wiederholgenauigkeit und damit der statistischen Bestimmtheit des Modells [MMAC09]. Sollte eine fünfstufige Faktorvariation nicht möglich sein, lässt sich durch die Projektion der Sternpunkte auf

die Würfelebene die Anzahl der Faktorstufen auf drei reduzieren. Hier spricht man vom face centered CCD. Hinsichtlich der Aussage über den funktionalen Zusammenhang ergeben sich beim face centered CCD allerdings schlechtere Eigenschaften im Vergleich zum normalen CCD, da keine Orthogonalität besteht [SvBH10].

Das Box-Behnken-Design (BBD) ermöglicht als Alternative zum CCD eine effiziente Versuchsplanung für nichtlineare Zusammenhänge, insofern die experimentellen Randbedingungen eine Durchführung von Versuchen in den Ecken des Faktorraums verhindern. Wie bei jedem Versuchsplan ist allerdings zu beachten, dass die funktionalen Zusammenhänge nicht über die Versuchspunkte hinaus extrapoliert werden dürfen [SvBH10]. Sowohl das Box-Behnken-Design als auch das Central-Composite-Design sind für die Approximation eines quadratischen funktionalen Zusammenhangs entwickelt worden. Die Modellbildung für den funktionalen Zusammenhang erfolgt in der Regel auf Basis einer Regressionsanalyse

$$y(\vec{x}) = \vec{\beta}f(\vec{x}) + \varepsilon(\vec{x}). \quad (4.1)$$

Über die Anpassung des Koeffizientenvektors  $\vec{\beta}$  erfolgt eine Minimierung der Abweichungen  $\varepsilon(\vec{x})$  zwischen den gemessenen und den durch das Regressionsmodell vorhergesagten Werten. Die Erhöhung der Anzahl der Regressionsfunktionen ermöglicht die Modellierung komplexerer Zusammenhänge, allerdings ist hierfür eine größere Anzahl an Experimenten notwendig [Kle06, BZGW08, SvBH10].

Zur Analyse nichtlinearer Zusammenhänge bei unbekanntem funktionalem Zusammenhang bildet das Latin-Hypercube-Design (LHD) mit anschließender Modellierung durch die Methode des Design and Analysis of Computer Experiments (DACE) eine Möglichkeit, den Parameterwerterraum vollständig zu erfassen und ein Modell zu ermitteln, das nicht auf Polynome zweiter Ordnung beschränkt ist. Das Latin-Hypercube-Design ist ein raumfüllendes Design. Es zeichnet sich dadurch aus, dass alle Versuchspunkte einen minimalen bzw. maximalen Abstand voneinander haben, unter der Voraussetzung, dass jede Faktorstufe genau einmal im Versuchsplan enthalten ist. Dazu wird der Parameterraum, abhängig vom Gesamtumfang der Versuche, in eine festgelegte Anzahl an disjunkten Intervallen unterteilt und die Versuchspunkte den Intervallen so zugeordnet, dass jedes Intervall genau einen Wert enthält. Die Reihenfolge der Versuchspunkte wird randomisiert, um systematische Effekte der Versuchsdurchführung ausschließen zu können [MBC79, BZGW08].

LHDs sind sehr gut geeignet für die DACE-Modellierung. Diese basiert auf dem Kriging-Verfahren, das in den Geowissenschaften entwickelt wurde, um den Funktionswert einer unbekanntem Faktorkombination durch Messdaten der lokalen Umgebung zu approximieren. Der Einfluss dieser Messdaten ist dabei abhängig von der Entfernung. Punkte mit einer geringeren Entfernung üben einen größeren Einfluss aus als Punkte mit einer größeren Entfernung [SvBH10]. Als grundlegender Funktionszusammenhang  $f(\vec{x})$  wird der Mittelwert der Versuchsergebnisse genutzt, und die Vorhersage der Funktionswerte wird durch die räumliche Korrelation des Fehlers  $\varepsilon(\vec{x})$  vorgenommen.

Die anschließende Interpolation der Versuchsergebnisse erfolgt durch lokale Kompensation der Fehler. Basierend auf der Annahme, dass bei ähnlichen Parameterwerten auch äquivalente Abweichungen beim Funktionswert auftreten, wird die allgemeine Korrelationsfunktion  $Corr(\vec{x}, \vec{y})$  mit der gewichteten Distanz der Parameter  $d(\vec{x}, \vec{y})$  beschrieben [SWMW89, BZGW08].

$$Corr(\vec{x}, \vec{y}) = \exp(-d(\vec{x}, \vec{y})) \quad (4.2)$$

Der in **Tabelle 4.5** dargestellte raumfüllende Versuchsplan bildet ein Beispiel für eine gezielte Variation der unterschiedlichen Stellgrößen des Finishprozesses. In diesem Fall wird die Andrückkraft  $F$  und die Tangentialgeschwindigkeit  $v_t$  unter Berücksichtigung der Ausgangsrauheit variiert. Insbesondere bei der Analyse eines gestuften Finishprozesses bildet die Ausgangsrauheit eine Kenngröße, die ebenfalls zu berücksichtigen ist.

**Tabelle 4.5:** LHD-Versuchsplan

Versuch	$F$ (N)	$v_t$ (m min <sup>-1</sup> )	$Rz_{ini}$ ( $\mu\text{m}$ )	Versuch	$F$ (N)	$v_t$ (m min <sup>-1</sup> )	$Rz_{ini}$ ( $\mu\text{m}$ )
1	365	36	1,45	11	243	63	1,83
2	339	85	1,24	12	152	104	1,77
3	78	91	1,37	13	393	77	1,74
4	285	120	1,27	14	432	30	1,65
5	138	48	1,27	15	94	44	1,45
6	218	9	1,43	16	328	25	1,45
7	545	100	1,36	17	272	75	1,45
8	451	111	1,71	18	559	16	1,39
9	180	22	1,72	19	501	58	1,39
10	579	66	1,69	20	467	118	1,51

**Andrückkraft  $F$ ; Tangentialgeschwindigkeit  $v_t$ ; Ausgangsrauheit  $Rz_{ini}$**

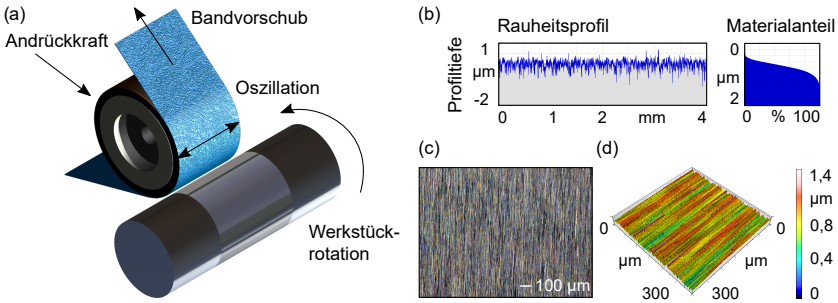
## 5 Prozessanalyse beim Kurzhubhonen

Die Analyse des funktionalen Zusammenhangs zwischen den Stellgrößen und der generierten Oberflächentopographie sowie der resultierenden Formgenauigkeit beim Außenrund-Kurzhubhonen erfolgte an Wellen aus dem Wälzlagerstahl 100Cr6. Die durch Induktionshärten wärmebehandelte Randzone der Wellen zeichnete sich durch eine Härte von 63 HRC bis in eine Tiefe von 2 mm aus.

Die kinematischen Stellgrößen des Finishprozesses sind in **Abbildung 5.1** (a) dargestellt. Besonderer Fokus der grundlegenden Untersuchungen lag auf dem Einfluss der in Kapitel 4 beschriebenen Bindungsstruktur des Finishbandes auf die Ergebnisgrößen. Um den Einfluss der Bindung möglichst ohne Wechselwirkungen mit anderen Stellgrößen zu evaluieren, wurden die Versuche mit derselben Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  für beide Bindungssysteme durchgeführt. Neben der Beschaffenheit des Werkzeugs bezüglich der Kornart, -größe und des verwendeten Bindungssystems bilden die Stellgrößen Andrückkraft, Schnittgeschwindigkeit und Bearbeitungszeit wesentliche Einflussgrößen beim Kurzhubhonen. Diese stehen in direktem Zusammenhang mit der in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück vorliegenden Flächenpressung, der Anzahl im Eingriff befindlicher Schneidkörner sowie der jeweiligen Kontaktzeit zwischen dem einzelnen Schneidkorn und der Werkstückoberfläche [Bra80, KRZ07b]. Die Bearbeitungszeit ist in der Regel so kurz wie möglich zu halten, bzw. auf einen der Fertigungskette entsprechenden Taktzyklus einzustellen. Für die grundlegenden Versuche wurde eine Bearbeitungszeit von  $t = 20 \text{ s}$  gewählt. Die Variation der Andrückkraft erfolgte in einem Intervall von  $F = 80$  bis  $600 \text{ N}$ , während die Tangentialgeschwindigkeit in einem Intervall von  $v_t = 10$  bis  $120 \text{ m min}^{-1}$  variiert wurde. Um einen möglichen Einfluss der initialen Rautiefe zu analysieren, wurde die Ausgangsrauheit ebenfalls als Einflussgröße in dem raumfüllenden Versuchsplan berücksichtigt. Die Oszillationsfrequenz sowie der Oszillationsweg wurden bei  $f_{os} = 17 \text{ Hz}$  und  $l_{os} = 5 \text{ mm}$  konstant gehalten. Ausgehend von den generierten Oberflächentopographien erfolgte anschließend die Analyse einer gestuften Bearbeitung mit sukzessive abnehmender Korngröße, wobei die Korngröße in der zweiten Prozessstufe auf  $d_K = 9 \mu\text{m}$  und in der dritten Prozessstufe auf  $d_K = 3 \mu\text{m}$  reduziert wurde.

Die Vorbearbeitung der Wellen durch einen Außenrundscheifprozess garantierte eine hohe Form- und Maßhaltigkeit der Werkstücke sowie eine homogene Oberflächentopographie. Der Schleifprozess wurde mit einer konventionellen Korund-Schleifscheibe bei einer Schnittgeschwindigkeit von  $v_c = 30 \text{ m s}^{-1}$  durchgeführt. Eine vergleichsweise geringe Zustellung von  $a_e = 0,005 \text{ mm}$  und eine Vorschubgeschwindigkeit von  $v_f = 1$  bis  $1,5 \text{ mm min}^{-1}$  ermöglichten eine hohe Oberflächenqualität mit einer gemittelten Rautiefe von  $R_z = 1,2$  bis  $1,9 \mu\text{m}$ . Die für den Schleifprozess charakteristische Oberflächenstruktur mit in Schleifrichtung verlaufenden Schleifriefen und stochastischer Verteilung der Profilspitzen und -riefen ist in **Abbildung 5.1** (b)

dargestellt. Die Profilspitzen mit einer Höhe bis zu  $R_p = 0,75 \mu\text{m}$  führen zu einem geringen Materialanteil in der oberflächennahen Randzone von  $P_t = 1 \mu\text{m}$ . Der vollständige Materialanteil liegt in einer Profiltiefe von  $P_t = 2 \mu\text{m}$  vor.

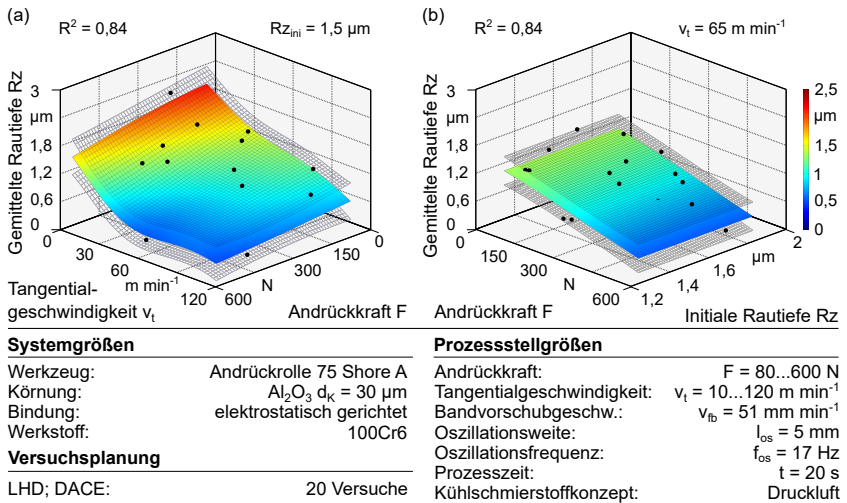


Systemgrößen		Prozessstellgrößen	
Werkzeug:	Andrückrolle 75 Shore A	Andrückkraft:	$F = 80 \dots 600 \text{ N}$
Körnung:	$\text{Al}_2\text{O}_3$ $d_K = 30; 9; 3 \mu\text{m}$	Tangentialgeschwindigkeit:	$v_t = 10 \dots 120 \text{ m min}^{-1}$
Bindung:	gerichtet und geschlämmt	Bandvorschubgeschw.:	$v_b = 51 \text{ mm min}^{-1}$
Werkstoff:	100Cr6	Oszillationsweite:	$l_{os} = 5 \text{ mm}$
<b>Versuchsplanung</b>		Oszillationsfrequenz:	$f_{os} = 17 \text{ Hz}$
LHD; DACE		Prozesszeit:	$t = 20 \text{ s}$
		Kühlschmierstoffkonzept:	Druckluft

**Abbildung 5.1:** (a) Schematische Prozessdarstellung des Bandfinishens mit Kennzeichnung der kinematischen Stellgrößen, (b) Rauheitsprofil und Materialanteilkurve der geschliffenen Oberfläche, (c) Lichtmikroskopische Aufnahme der geschliffenen Topographie (d) Konfokale Weißlichtaufnahme der geschliffenen Topographie

## 5.1 Maßgebliche Stellgrößen für die Oberflächenqualität

Wie in **Abbildung 5.2** dargestellt, variieren die erzielten Oberflächenqualitäten in Abhängigkeit der Stellgrößen Andrückkraft und Tangentialgeschwindigkeit zwischen  $R_z = 0,39$  bis  $2,3 \mu\text{m}$ . Sowohl durch eine Erhöhung der Andrückkraft als auch der Tangentialgeschwindigkeit ergibt sich eine Verringerung der Oberflächenrauheit. Die Erhöhung der Andrückkraft bei einer Tangentialgeschwindigkeit kleiner als  $v_t = 50 \text{ m min}^{-1}$  führt zu einer linearen Reduzierung der Rautiefe. Durch eine Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit auf Werte  $v_t > 50 \text{ m min}^{-1}$  bei gleichzeitig hoher Andrückkraft von  $F > 300 \text{ N}$  nimmt die Verbesserung der Oberflächenqualität ab und tendiert gegen einen Grenzwert von  $R_z = 0,4 \mu\text{m}$ . Der regressive Verlauf ist symptomatisch für die jeweilige Leistungsfähigkeit eines Finishbandes. Basierend auf der Bindungsart, der Korngröße und den Stellgrößen des Prozesses zeichnet sich jedes Band durch einen bestmöglichen Rauheitswert aus, der mit diesem Band zu erzielen ist. Eine weitere Reduzierung der Oberflächenrauheit ist dann nur durch die Wahl einer geringeren Korngröße zu realisieren [Khe07, KRZ07b].



**Abbildung 5.2:** Oberflächenqualität beim Finishen mit elektrostatisch gerichtetem Finishband der Korngröße  $d_K = 30 \mu\text{m}$  in Abhängigkeit der Stellgrößen (a) Tangentialgeschwindigkeit und Andrückkraft sowie (b) Andrückkraft und Ausgangsrauheit

Die zusätzliche Berücksichtigung der aus dem Schleifprozess resultierenden Oberflächenqualität, dargestellt in Abbildung 5.2 (b), ermöglicht eine Auswertung des funktionalen Einflusses der Ausgangsrauheit. Da das Spektrum der erzielten Rauheiten mit  $R_z = 0,39$  bis  $2,3 \mu\text{m}$  eine größere Variation darstellt als die ursprünglichen Rauheiten nach dem Schleifen, erfolgte in Abhängigkeit der Stellgrößenwerte eine Aufrauung oder Glättung des Oberflächenprofils. Für das in diesem Fall verwendete elektrostatisch gerichtete Finishband ergibt sich allerdings kein Einfluss der initialen Rautiefe auf die Rauheit nach dem Prozess. Die aus dem Vorbearbeitungsprozess resultierende Oberflächentopographie wird vollständig abgetragen und durch eine für das Honen typische Kreuzschliff-Struktur ersetzt.

Da der Bandvorschub während der Versuche konstant bei  $v_{fb} = 51 \text{ mm min}^{-1}$  gehalten wurde, sind die Körner bei allen Versuchen der gleichen Eingriffszeit ausgesetzt. Durch die Variation der Tangentialgeschwindigkeit ergibt sich allerdings eine proportional variierende Fläche, die während eines Zeitinkrements überlaufen wird. Resultierend aus diesem Zusammenhang steigt mit erhöhter Tangentialgeschwindigkeit die Beanspruchung des Finishbandes. Körner, die sich kurz vor dem Austritt aus der Kontaktzone befinden, sind bei gesteigerter Schnittgeschwindigkeit stärker verschliffen. Durch den Verschleiß der Kornspitzen ergibt sich eine größere Auflagefläche der einzelnen Körner, die wiederum zuträglich für eine hohe Oberflächenqualität ist. Zusätzlich führt die infolge einer erhöhten Andrückkraft gesteigerte Flächenpressung im Kontakt zwischen Finishband und Werkstück ebenfalls zu einer erhöhten Beanspruchung.

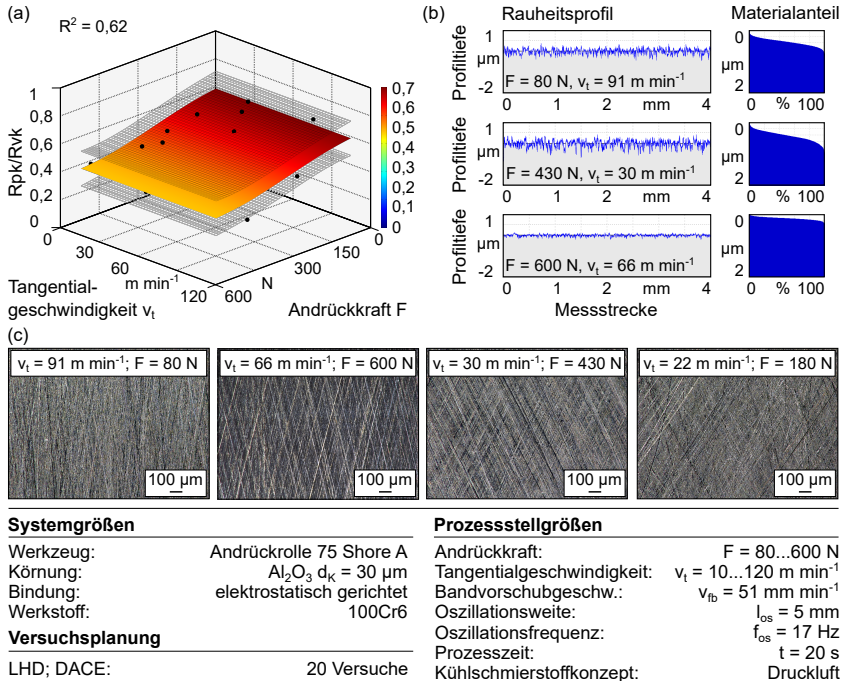
Während einzelne aus der Bindung herausstehende Schneidkörner infolge des höheren Anpressdrucks bei gesteigerter Andrückkraft verschleifen, kommen tiefer in der Bindung liegende Körner in Eingriff. Durch eine gesteigerte Andrückkraft steigt daher die Anzahl der an der Zerspanung beteiligten Schneidkörner, wobei die tiefer liegenden Körner aufgrund des geringen Kornüberstands keine zusätzliche Furchung der Oberfläche zur Folge haben. Dies führt zu einem vermehrten Abscheren der Profilspitzen, wodurch die Oberflächenqualität steigt bzw. die Rauheit reduziert wird [Khe07].

Die Ergebnisse korrelieren zum Teil mit der zur Außenrund-Bearbeitung mit Honsteinen von Stahlwerkstoffen vorhandenen Literatur. *Brandin* ermittelte zum Außenrund-Kurzhubhonen mit Honsteinen zwei gegensätzliche Einflüsse der Andrückkraft auf die resultierende Oberflächenqualität. Zunächst wird durch eine Erhöhung der Kraft das Abstumpfen der Schneidkörner gefördert, sodass auch tiefer in der Bindung liegende Körner in Eingriff kommen. Dies bewirkt einen effizienteren Abtrag der Rauheitsspitzen und damit eine bessere Oberflächenqualität. Sobald allerdings ein von den Kornhaltekräften der Bindung des Honsteins abhängiger Kraftwert überschritten ist, kommt es vermehrt zu Kornausbrüchen, sodass die verbleibenden Körner einer erhöhten Flächenpressung unterliegen und tendenziell zu einer Furchung der Oberfläche führen. Durch diesen Effekt stellt sich wiederum eine schlechtere Oberflächenqualität ein [Bra80]. *Varghese et al.* ermittelten, dass es einen kritischen Anpressdruck gibt, bei dem das maximal mögliche Zeitspanvolumen sowie die niedrigste spezifische Energie vorliegen. Oberhalb dieses Anpressdrucks wird das Zeitspanvolumen negativ durch die Zusetzung des Honsteins beeinflusst [VM98].

## 5.2 Oberflächenstruktur und Materialanteil

Die ausschließliche Betrachtung des Kennwertes  $R_z$  ermöglicht keine Erfassung der Anteile und Verteilungen von Spitzen bzw. Riefen im Oberflächenprofil. Durch die Bildung des Materialanteils in unterschiedlichen Profiltiefen ergeben sich die Materialanteilskenngößen: Reduzierte Spitzenhöhe  $R_{pk}$ , Kernrautiefe  $R_k$  und reduzierte Riefentiefe  $R_{vk}$ , die im Folgenden zur detaillierten Auswertung der Oberflächentopographie genutzt werden. Der in **Abbildung 5.3** (a) dargestellte funktionale Zusammenhang zwischen dem Quotienten aus reduzierter Spitzenhöhe  $R_{pk}$  und reduzierter Riefentiefe  $R_{vk}$  sowie den Stellgrößen Tangentialgeschwindigkeit und Andrückkraft ermöglicht eine Analyse des Einflusses der Stellgrößen auf einzelne Materialanteilskenngößen. Durch eine geringe Schnittgeschwindigkeit in Kombination mit einer geringen Andrückkraft ergibt sich eine vergleichsweise unregelmäßige und raue Oberflächentopographie. Während durch die Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit zwar eine Reduzierung der Rauheit möglich ist, bleibt das Verhältnis zwischen Profilspitzenhöhe und Profiliriefentiefe über den Parameterraum konstant. Spitzen und Riefen werden in gleichem Maße abgetragen. Die Erhöhung der Andrückkraft hingegen führt zu einer zunehmend

ausgeprägteren Plateaustruktur. Durch die Steigerung der Andrückkraft ergibt sich eine Topographie mit geringerer Profilspitzenhöhe und -riefentiefe, wobei die Reduzierung der Profilspitzen anteilmäßig größer ist als die Reduzierung der Riefentiefe. Das Verhältnis zwischen Profilspitzen und -riefen reduziert sich von  $Rpk/Rvk > 0,6$  bei geringer Andrückkraft auf einen Wert von  $Rpk/Rvk < 0,4$  bei hoher Andrückkraft.



**Abbildung 5.3:** Oberflächentopographie beim Finishen mit elektrostatisch gerichtetem Finishband der Korngröße  $d_K = 30 \mu\text{m}$  in Abhängigkeit der Stellgrößen Tangentialgeschwindigkeit und Andrückkraft (a) Resultierender Quotient aus Profilspitzenhöhe und -riefentiefe, (b) Rauheitsprofile und Materialtraganteile (c) Mikroskopische Aufnahmen der Oberflächentopographie

Die in Abbildung 5.3 (c) veranschaulichten Oberflächentopographien zeichnen sich in Abhängigkeit der Tangentialgeschwindigkeit durch unterschiedliche Winkel zwischen den sich kreuzenden Bearbeitungsspuren aus. Zur Beschreibung des Kreuzschliffwinkels, der auch Schnittwinkel oder Honwinkel genannt wird, gibt es für das Außenrund-Kurzhubhonen in der Literatur zwei Definitionen, die sich allerdings lediglich durch die unterschiedlich gerichtete Auswertung der Oberflächenstruktur unterscheiden. In Analogie zum Langhubhonen wird für die Analyse des Kreuzschliffwinkels der funktionale Zusammenhang

$$\alpha_h = 2 \arctan \frac{v_a}{v_t} = 2 \arctan \frac{\pi l_{os} f_{os} \cos(2\pi f_{os} t)}{\pi n d} \quad (5.1)$$

genutzt.

Da die Oszillationsfrequenz als auch der Oszillationsweg konstant gehalten werden, ergibt sich die Variation der Schnittgeschwindigkeit allein aus der veränderten Tangentialgeschwindigkeit. Der Honwinkel variiert für den gewählten Parameterwerteraum zwischen  $\alpha_{h \min} = 15,2^\circ$  und  $\alpha_{h \max} = 116^\circ$ , wobei für die Berechnung die maximale Axialgeschwindigkeit genutzt wurde. Die Axialgeschwindigkeit ist im Gegensatz zu der Tangentialgeschwindigkeit während des Prozesses nicht konstant. In den Umkehrpunkten der Oszillationsbewegung ergibt sich eine Axialgeschwindigkeit von  $v_a = 0 \text{ m min}^{-1}$ . Insofern das Werkzeug nicht ausgelenkt ist, liegt die maximale Axialgeschwindigkeit

$$v_{a \max} = \pi l_{os} f_{os} \quad (5.2)$$

vor.

Bei einer Frequenz von  $f_{os} = 17 \text{ Hz}$  und einer Oszillationsweite von  $l_{os} = 5 \text{ mm}$  ergibt sich eine maximale Axialgeschwindigkeit von  $v_{a \max} = 16 \text{ m min}^{-1}$ . Zur Vergleichbarkeit wird im Folgenden ausschließlich mit der maximalen Axialgeschwindigkeit gerechnet.

Aufgrund des abnehmenden Einflusses der gesteigerten Tangentialgeschwindigkeit auf die Oberflächenqualität bei hohen Andrückkräften bildet sich in diesem Parameterwertebereich Potenzial, den Honwinkel auch bei geringer Rauheit zwischen  $\alpha_{h \min} = 15,2^\circ$  und  $\alpha_{h \max} = 30^\circ$  gezielt einzustellen. In Abhängigkeit des Anwendungsfalls und insbesondere der wirkenden Relativbewegungen bei einer tribologischen Beanspruchung lässt sich die Ausrichtung der Riefen in Richtung der Relativbewegung oder quer zu dieser auslegen.

In Abhängigkeit der Funktion des Bauteils ist es sinnvoll, von dem, bezüglich des Zeitspanvolumens optimalen Kreuzungswinkel zwischen  $40^\circ$  und  $70^\circ$  abzuweichen (s. Kapitel 2.3.3). Angepasst an die vorgesehene Relativbewegung der Bauteile ist eine Vergrößerung des Honwinkels auf  $\alpha_h = 120^\circ$  bis  $150^\circ$  bei einer Relativbewegung in Richtung der Werkstückachse bzw. eine Verringerung auf  $\alpha_h = 15^\circ$  bis  $30^\circ$  bei einer Relativbewegung tangential zur Werkstückachse sinnvoll.

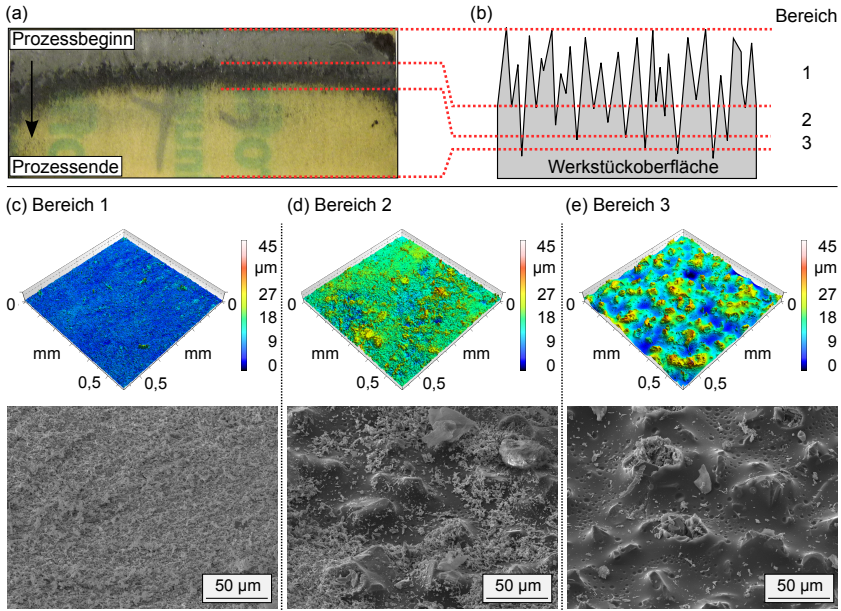
Beispielsweise wird bei der Fertigung von Zylinderlaufbahnen ein großer Honwinkel angestrebt, um durch die an die Funktion angepasste Honstruktur das Einlaufverhalten des Motors zu verbessern [Wei00]. Analog zur Fertigung größerer Honwinkel beim Langhubhonen bzw. Spiralgleithonen von Zylinderlaufbahnen im Verbrennungsmotor und der damit einhergehenden Auslegung der Honriefen in Richtung der Relativbewegung zwischen Kolbenring und Zylinderlaufbahn, lässt sich durch kleinere Kreuzungswinkel beim Kurzhubhonen eine Struktur mit zunehmender Ausrichtung der Honriefen in Umfangsrichtung und damit in Richtung der im Tribokontakt wirkenden Relativbewegung der kontaktierenden Oberflächen erzielen. Relativbewegungen in tangentialer

Ausrichtung zur Werkstückachse, wie sie an den Nocken einer Nockenwelle oder den Lagerstellen einer Kurbelwelle auftreten, erfordern kleine Honwinkel. Dient die Honstruktur nur als Auflagefläche, ist die Fertigung mit herkömmlichen Parameterwerten, die sich bezüglich Zerspanvolumen, Formgenauigkeit und Oberflächengüte als optimal erwiesen haben, anzustreben. Die Bearbeitung eines Pleuel, in das Lagerschalen fest integriert werden, ist ein Beispiel für eine solche Anwendung [Wei05a, Wei05b].

### 5.3 Materialabtrag und Werkzeugverschleiß

Da sich die genutzten Finishbänder im Gegensatz zu Honsteinen lediglich durch eine Kornlage auszeichnen, ist ein Selbstschärfeneffekt, wie er bei Honsteinen und Schleifscheiben üblich ist, in diesem Fall nicht möglich. Durch den Bandvorschub werden kontinuierlich neue, nicht verschlissene Abschnitte des Finishbandes dem Prozess zugeführt. Über die Prozesszeit zeichnet sich das Finishband, wie in **Abbildung 5.4** dargestellt, dennoch durch unterschiedliche Verschleißzustände aus, die, neben den Stellgrößen Andrückkraft und Schnittgeschwindigkeit, insbesondere von der sich im Prozess verändernden Oberflächentopographie des Werkstücks abhängig sind.

Der Verschleiß des Finishbandes lässt sich in mehrere charakteristische Bereiche einteilen. Zu Beginn des Prozesses werden, wie in **Abbildung 5.4 (b)** schematisch dargestellt, die auf der Werkstückoberfläche hervorstehenden Profilsitzen abgetragen. Aufgrund der vergleichsweise hohen Flächenpressungen zwischen den einzelnen Profilsitzen und den Schneidkörnern des Finishbandes ergibt sich ein hoher Materialabtrag zu Beginn des Prozesses, der, wie in **Abbildung 5.4 (c)** dargestellt, zu einer erheblichen Zusetzung des Finishbandes mit Mikrospänen und abgetragenen Werkstoffpartikeln führt. Im weiteren Prozessverlauf stellt sich zunehmend eine Plateaustruktur auf der Werkstückoberfläche ein, und der Materialtraganteil steigt, sodass die Flächenpressung zwischen den Schneidkörnern und der Werkstückoberfläche sinkt. Resultierend ergibt sich eine geringere Eingrifftiefe der Schneidkörner und ein geringerer zeitlich bezogener Materialabtrag. Der in **Abbildung 5.4 (e)** dargestellte Verschleißzustand des Finishbandes zum Prozessende zeichnet sich nur noch durch vereinzelte, abgetragene Werkstoffpartikel zwischen den Schneidkörnern aus, sodass hier von einem wesentlich geringeren Zeitspanvolumen ausgegangen werden kann. Über die gesamte Prozesszeit betrachtet resultiert dieser Zusammenhang in einer kontinuierlich abnehmenden Prozesseffizienz. *Brandin* ermittelte in experimentellen Untersuchungen zum Abtragsverhalten beim Außenrund-Kurzhubhonen mit Honsteinen vergleichbare Zusammenhänge [Bra80].



**Systemgrößen**

Werkzeug: Andrückrolle 75 Shore A  
 Körnung:  $Al_2O_3$   $d_K = 30 \mu m$   
 Bindung: elektrostatisch gerichtet  
 Werkstoff: 100Cr6

**Versuchsplanung**

LHD; DACE: 20 Versuche

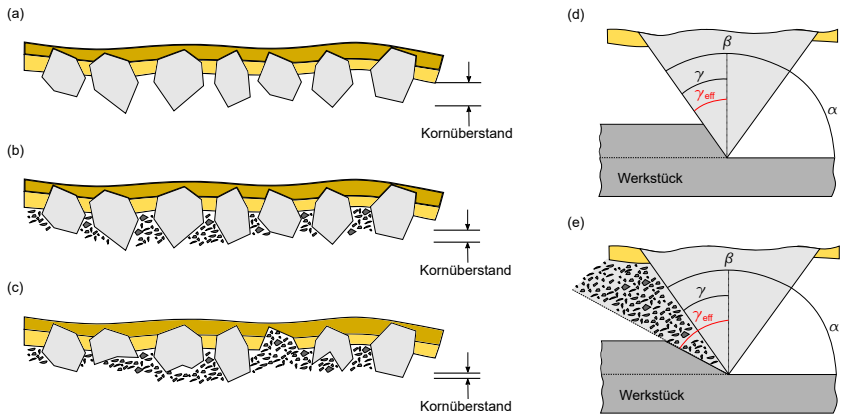
**Prozessstellgrößen**

Andrückkraft:  $F = 243 N$   
 Tangentialgeschwindigkeit:  $v_t = 63 m \cdot min^{-1}$   
 Bandvorschubgeschw.:  $v_{fb} = 51 mm \cdot min^{-1}$   
 Oszillationsweite:  $l_{os} = 5 mm$   
 Oszillationsfrequenz:  $f_{os} = 17 Hz$   
 Prozesszeit:  $t = 20 s$   
 Kühlschmierstoffkonzept: Druckluft

**Abbildung 5.4:** Charakteristische Verschleißzustände des Finishbandes, (a) verschlissenes Finishband, (b) vom Werkstück abgetragene Materialanteile, (c-e) Verschleißzustände des Finishbandes abgebildet durch Weißlicht- und REM-Aufnahmen: (c) vollständig zugesetzt, (d) teilweise zugesetzt, (e) ohne Zusetzung

Durch die Zusetzung des Finishbandes mit abgetragenen Werkstoff ändert sich der Eingriff der einzelnen Schneidkörner. Die Ablagerung von abgetragenen Werkstoff zwischen den Schneidkörnern sowie der Verschleiß der einzelnen Schneidkörner resultieren, wie in **Abbildung 5.5** dargestellt, in einem geringeren Kornüberstand sowie einhergehend einem kleineren effektiven Spanwinkel. Bei nahezu vollständiger Zusetzung tendiert dieser gegen einen Wert von  $\gamma_{eff} = -90^\circ$ , sodass die einzelnen Körner nicht mehr in die Werkstückoberfläche eindringen können und kein Materialabtrag mehr generiert wird.

Basierend auf einem tribo-energetischen Ansatz ermittelten *Mansori et al.* charakteristische Zustände für die Spanbildungsmechanismen beim schmiermittelfreien Finishen. Zunächst wird der Werkstoff durch die scharfkantigen Körner zerspannt,

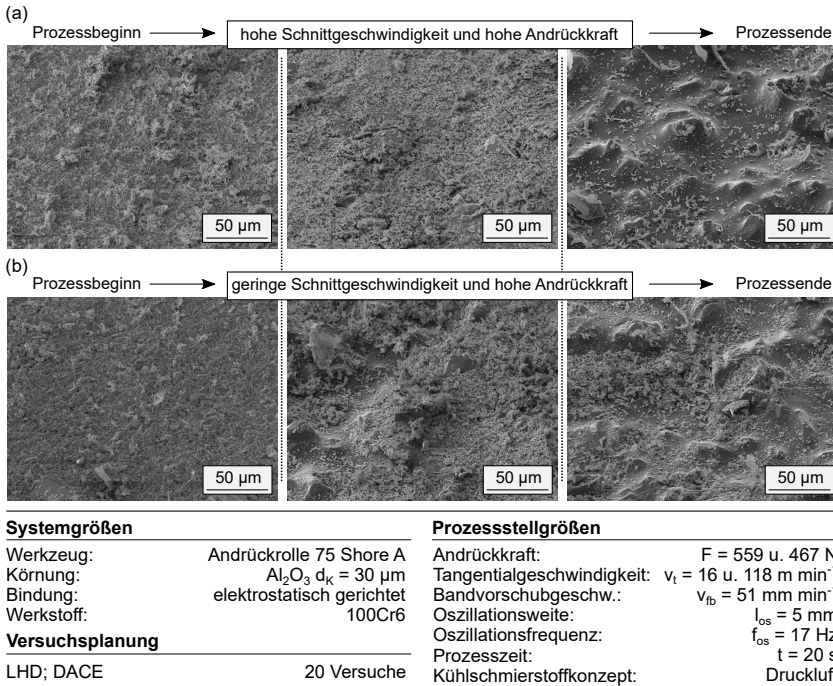


**Abbildung 5.5:** Schematische Darstellung der Verschleißzustände des Finishbands, (a) Ugenutztes Finishband, (b) Zugewetztes Finishband, (c) Verschlissenes und zugewetztes Finishband, (d) Korneingriff bei nicht verschlissenem Finishband, (e) Korneingriff bei zugewetztem Finishband

sodass sich infolge die Bindung mit zerspantem Werkstoffmaterial zusetzt. Die in der Bindung gehaltenen Mikrospäne bilden eine Zwischenschicht, vergleichbar mit dem „Dritten Körper“ in einem tribologischen System (s. Kapitel 2.1), die zu einer Reduzierung des Materialabtrags führt [MSG<sup>+</sup>07]. Diese Beobachtungen werden gestützt durch Untersuchungen von *Jourani et al.*, in denen auf Basis von Ritzversuchen mit einem Indenter die Spanbildungsmechanismen beim Finishen abgebildet wurden. Durch eine vergleichsweise hohe Flächenpressung zwischen Schneidkorn und Werkstückoberfläche sowie einem großen effektiven Spanwinkel, der sich insbesondere bei hervorstehenden Profilsitzen einstellt, ergibt sich als dominanter Spanbildungsmechanismus das Mikrospanen. Einhergehend wird ein vergleichsweise hoher Materialabtrag generiert, der wiederum in einem hohen Verschleiß der einzelnen Schneidkörner resultiert. Der Verschleiß der Schneidkörner und die Zusetzung des Finishbandes mit zerspantem Werkstückmaterial führen zu geringeren effektiven Spanwinkeln und einem Wechsel des dominanten Spanbildungsmechanismus vom Mikrospanen zum Mikropflügen [JHB<sup>+</sup>13].

Die Zusetzung des Finishbandes wird neben der im Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück vorliegenden Flächenpressung zusätzlich von der Schnittgeschwindigkeit beeinflusst. Wie in **Abbildung 5.6** dargestellt, ergibt sich insbesondere zu Beginn des Prozesses durch eine hohe Schnittgeschwindigkeit ein erhöhter Materialabtrag, da innerhalb eines Zeitinkrements eine größere Werkstückoberfläche bearbeitet wird.

Mit dem erhöhten Materialabtrag stellt sich die für den Honprozess typische Werkstückoberflächentopographie in kürzerer Prozesszeit ein. Zum Prozessende hat sich die Oberflächentopographie des Werkstücks bereits derart angepasst, dass eine äußerst



**Abbildung 5.6:** Verschleiß und Zusetzung des Finishbandes in Abhängigkeit der Schnittgeschwindigkeit, (a) hohe Schnittgeschwindigkeit und hohe Andrückkraft, (b) geringe Schnittgeschwindigkeit und hohe Andrückkraft

geringe Korneingriffstiefe, bedingt durch die geringen Flächenpressungen in der Kontaktzone, und eine vergleichsweise geringe Materialabtragsrate vorliegt. Abgetragenes Werkstückmaterial ist daher nur noch vereinzelt zwischen den Schneidkörnern zu finden. Durch die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit ergibt sich Potenzial die Prozesszeit zu verkürzen, da die mit der jeweiligen Korngröße minimale Oberflächenrauheit bereits vor Prozessende erzielt ist (s. Kapitel 5.1).

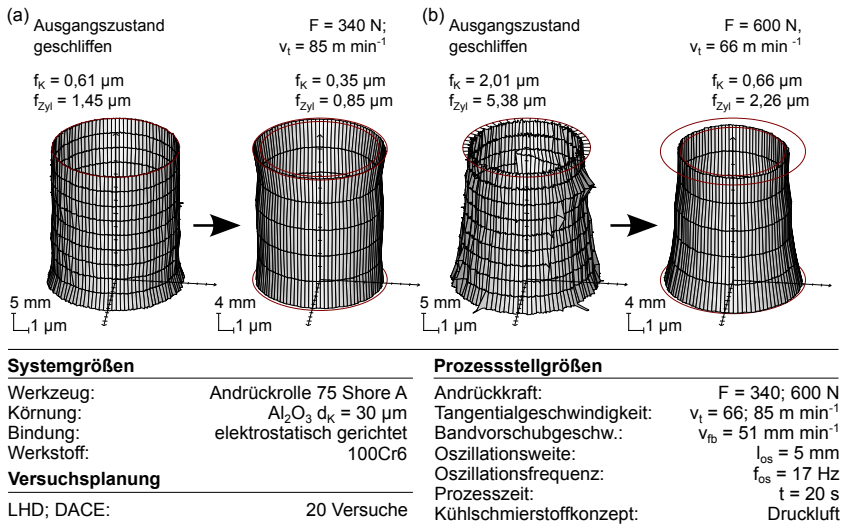
Ist aufgrund der Anforderungen an die Oberflächenstruktur und im Speziellen an den zu erzeugenden Honwinkel (s. Kapitel 5.2) nur eine Bearbeitung mit geringer Tangentialgeschwindigkeit möglich, muss die Prozesszeit erhöht werden, um eine vergleichbar geringe Rautiefe zu erzielen. Wie in Abbildung 5.6 (b) dargestellt, wird bei geringer Tangentialgeschwindigkeit in diesem Beispiel auch zum Prozessende hin ein Materialabtrag generiert, der sich in Form von zerspantem Werkstoffmaterial in der Bindung des Finishbandes abgelagert.

In experimentellen Untersuchungen zum Honen mit Honsteinen ermittelten *Chang et al.*, dass sich durch die Verwendung einer höheren Schnittgeschwindigkeit sowie

durch einen höheren Anpressdruck ein höherer Materialabtrag und ein besseres Oberflächenfinish in kürzerer Prozesszeit erzielen lassen. Allerdings tendiert auch der mit einem Honstein ausgeführte Prozess zu einer für den spezifischen Honstein typischen Endrauheit, die durch die Kornart, -größe und Bindungsstruktur bestimmt ist [CFC08].

## 5.4 Formgenauigkeit

Neben der Oberflächenqualität lässt sich durch den Honprozess die Formgenauigkeit verbessern. Die Möglichkeiten, die auftretenden Formfehler durch den folgenden Honprozess zu reduzieren, sind abhängig von der Art der Formabweichungen. Die in **Abbildung 5.7** dargestellten Beispiele belegen das Potenzial einer Formverbesserung durch den Honprozess. Zylindrische Bauteile, die nach dem Schleifprozess durch einen geringen Zylindritätsfehler sowie einen geringen Rundheitsfehler gekennzeichnet sind, werden durch den Finishprozess hinsichtlich beider Kennwerte geringfügig verbessert. Das in **Abbildung 5.7 (a)** dargestellte Beispiel mit einem Rundheitsfehler von  $f_K = 0,61 \mu\text{m}$  und einem Zylindritätsfehler von  $f_{Zyl} = 1,45 \mu\text{m}$  kann durch den Finishprozess geringfügig auf  $f_K = 0,35 \mu\text{m}$  und  $f_{Zyl} = 0,85 \mu\text{m}$  verbessert werden. Hinsichtlich der Rundheit basiert diese Verbesserung allerdings zu einem großen Anteil auf der Verringerung der Rautiefe. Diese hat bei derart geringen Rundheiten ebenfalls einen entscheidenden Einfluss.



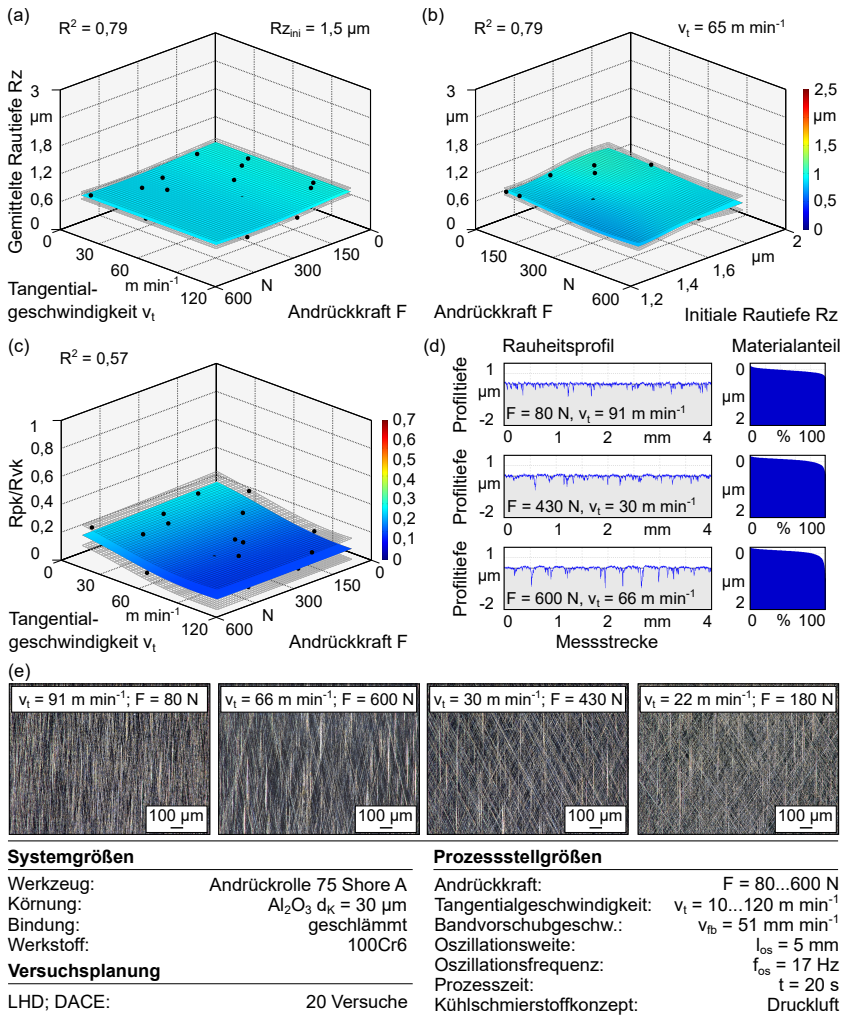
**Abbildung 5.7:** 3D-Zylinderformen der bearbeiteten Absätze vor und nach dem Finishen bei (a) zylindrischer Ausgangsform und (b) konischer Ausgangsform

Besteht allerdings eine systematische Formabweichung in Form einer Konizität, so lässt sich diese nicht vollständig durch den Finishprozess abtragen. Da der Abtrag beim Kurzhubhonen so gering ist, dass lediglich wenige Mikrometer von der Oberfläche abgetragen werden und der Prozess aufgrund der Nachgiebigkeit der Andrückrolle dazu tendiert, einer vorgegebenen Form zu folgen, lässt sich nur bedingt eine Änderung der ursprünglichen Form erzielen. Die in **Abbildung 5.7 (b)** dargestellte konische Form im Ausgangszustand ist auch nach der Finishbearbeitung vorhanden. Während die gemittelte Rundheitsabweichung von  $f_K = 2 \mu\text{m}$  auf  $f_K = 0,66 \mu\text{m}$  erheblich reduziert werden kann, ergibt sich bei der Zylindrizitätsabweichung nur eine Verbesserung auf  $f_{Zyl} = 2,3 \mu\text{m}$  für den gefinishten Abschnitt. Da die Messung des gefinishten Absatzes nur einen Ausschnitt der Messung des geschliffenen Absatzes darstellt, um den Einfluss des Oszillationsbereichs nicht ebenfalls zu erfassen, beruht die Verbesserung der Zylinderform zum Teil auf der geringeren Messstrecke. Das Verfahren ist lediglich zur Formverbesserung, nicht zur Formgebung geeignet.

## 5.5 Materialabtrag in Abhängigkeit der Werkzeug-Bindungsstruktur

Wird der Versuchsplan unter Variation derselben Stellgrößen in den gleichen Intervallen mit einem Finishband durchgeführt, das sich durch eine regellos verteilte Anordnung der  $30 \mu\text{m}$  großen Aluminiumoxidkörner auszeichnet, ergibt sich der in **Abbildung 5.8** dargestellte, funktionale Zusammenhang. Nach einer Bearbeitungsdauer von  $t = 20 \text{ s}$  stellt sich für sämtliche Stellgrößenwertkombinationen eine Rautiefe von  $Rz = 0,6$  bis  $0,7 \mu\text{m}$  ein. Dieser Wert wird weder von der Andrückkraft noch von der Tangentialgeschwindigkeit positiv oder negativ beeinflusst. Auch die initiale Rautiefe hat nur einen geringfügigen Einfluss auf die resultierende Rautiefe. Je nach Beschaffenheit der Ausgangstopographie wird die Rautiefe um bis zu  $\Delta Rz = 1,3 \mu\text{m}$  unabhängig von der gewählten Andrückkraft oder Tangentialgeschwindigkeit verbessert. Das Bestimmtheitsmaß und damit die Aussagekraft des ermittelten funktionalen Zusammenhangs ist mit  $R^2 = 0,79$  annähernd so hoch wie bei der Bearbeitung mit elektrostatisch gerichtetem Finishband.

Die Analyse der Oberflächenstruktur belegt, dass sich bei Verwendung des geschlammten Finishbandes und der zuvor spezifizierten Werte für die Stellgrößen kein sicherer Abtrag der ursprünglich geschliffenen Struktur realisieren lässt. Bei allen Parameterwertkombinationen bleiben Artefakte der Schleifriefen auf der Oberfläche erhalten. Durch das Honen mit geschlammtem Finishband werden lediglich die Profilspitzen abgetragen, während die Profiliriefen erhalten bleiben. Der Quotient, gebildet aus Profilspitzen und -riefen, ist mit einem Wert von  $Rpk/Rvk < 0,2$  für alle Parameterwertkombinationen wesentlich geringer als bei der Bearbeitung mit elektrostatisch gerichtetem Band. Die aus den Rauheitsprofilen resultierenden Materialanteilscurven zeichnen sich bis zu einem Materialanteil von 80 Prozent durch



**Abbildung 5.8:** Oberflächentopographie und -qualität beim Finishen mit regellos verteilter Körnung in der Bindungsstruktur in Abhängigkeit der Stellgrößen Tangentialgeschwindigkeit und Andrückenkraft (a) Oberflächenrauheit  $R_z$ , (b) Einfluss der Ausgangsrauheit (c) Resultierender Quotient aus Profilspitzenhöhe und -riefentiefe, (d) Rauheitsprofile und Materialtraganteile (e) Mikroskopische Aufnahmen der Oberflächentopographie

einen flachen Verlauf aus. Unabhängig von den Stellgrößen des Honprozesses, stellt sich nach der Bearbeitung eine Plateaustruktur ein, deren Profil durch vergleichsweise tiefe Riefen und nur minimal ausgeprägte Profilspitzen gekennzeichnet ist. Die für

das elektrostatisch gerichtete Finishband zielführende Kombination aus maximaler Andrückkraft  $F = 600 \text{ N}$  und erhöhter Tangentialgeschwindigkeit  $v_t = 66 \text{ m min}^{-1}$  zur Glättung der Oberfläche bildet unter dem Aspekt, ein möglichst homogenes, glattes Oberflächenprofil zu erzielen, für dieses Werkzeug eine vergleichsweise ungünstige Konstellation, da nach der Bearbeitung ausgeprägte Schleifriefen in der Topographie zurückbleiben. Dieses Ergebnis korreliert mit dem Ergebnis bei der Bearbeitung mit elektrostatisch gerichtetem Band insofern, dass unter erhöhter Andrückkraft bzw. erhöhter Tangentialgeschwindigkeit ebenfalls das Leistungsmaximum des Bandes erreicht ist und tendenziell eine Zusetzung der Bindungsstruktur erfolgt, die wiederum den Materialabtrag beeinträchtigt. Doch auch bei den anderen Parameterwertkombinationen sind die Schleifriefen nach wie vor vorhanden und beeinträchtigen den funktionalen Zusammenhang zwischen Stellgrößen und Zielgröße insofern, dass die maximal zu erzielende Oberflächenqualität nicht durch die Anpassung der Andrückkraft oder der Tangentialgeschwindigkeit zu beeinflussen ist.

Unter der Zielsetzung, die durch den Schleifprozess beeinträchtigte Randzone im Rahmen des Honprozesses abzutragen, führt diese Konstellation aus Vorbearbeitung und dem verwendeten Werkzeug bei keiner Parameterwertkombination zu einem ausreichenden Prozessergebnis. Soll hingegen die Randzone des Werkstücks nur geglättet werden, um etwaige positiv wirkende Druckspannungen aus Vorbearbeitungsprozessen zu erhalten, wäre ein vollständiger Abtrag der Vorbearbeitung wiederum nicht zielführend. Insbesondere bei der Kombination eines Dreh- und anschließenden Finishprozesses kann die Strategie der ausschließlichen Glättung des Oberflächenprofils durchaus zielführend sein [RKC<sup>+</sup>08, RKG<sup>+</sup>08].

Im Vergleich zu anderen spanenden Verfahren mit geometrisch bestimmter Schneide wie beispielsweise dem Drehen oder Fräsen, sowie mit geometrisch unbestimmter Schneide, wie dem Schleifen, zeichnet sich das Honen durch wesentlich geringere Zeitspanvolumina aus. Das abgetragene Werkstoffvolumen berechnet sich nach

$$V_W = \pi(r_{max})^2 b_{WZ} - \pi(r_{min})^2 b_{WZ} \quad (5.3)$$

Durch die Bearbeitung mit ungerichtetem Finishband wurden die aus dem Schleifprozess resultierenden, maximal  $Pt = 2 \mu\text{m}$  tiefen Profiliriefen nicht abgetragen. Für die gesamte Eingriffsbreite des Werkzeugs ergibt sich damit ein abgetragenes Werkstoffvolumen von  $V_W < 16 \text{ mm}^3$ . Wird zusätzlich die Prozesszeit berücksichtigt, ergibt sich das erzielte Zeitspanvolumen. Bei einer Prozesszeit von  $t = 20 \text{ s}$  entspricht dies einem Wert von  $Q_W < 0,8 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$  bei einer Werkzeugbreite von  $b_{WZ} = 50 \text{ mm}$ . Um einen von der geometrischen Gestalt des Werkzeugs unabhängigen Wert für die Leistungsfähigkeit des Prozesses zu ermitteln, lässt sich durch die Berücksichtigung der Breite des Werkzeugs das bezogene Zeitspanvolumen ermitteln. Ausgehend von einer Breite von  $b_{WZ} = 50 \text{ mm}$  beträgt das bezogene Zeitspanvolumen lediglich  $Q'_W = 0,016 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ . Dieser geringe Wert ist typisch für einen spanenden Prozess mit geometrisch unbestimmter Schneide und vergleichbar geringen Schnittge-

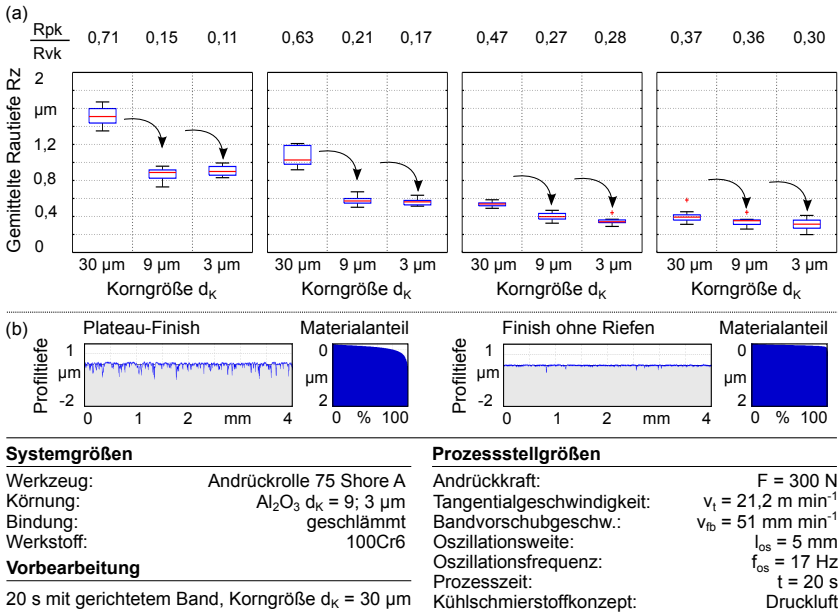
schwindigkeiten. *Schneider* ermittelte in Modellprozessen zum Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten von  $v_c = 0,3$  bis  $3,5 \text{ m s}^{-1}$  bezogene Zeitspanvolumina  $Q'_W = 0,03$  bis  $0,3 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1} \text{ s}^{-1}$  [Sch99b]

## 5.6 Gestufte Prozessführung

Oberflächen, die tribologischen Beanspruchungen ausgesetzt sind, werden zur Verbesserung der Eigenschaften oft durch einen mehrstufigen Honprozess bearbeitet. Die folgenden Prozessstufen dienen einerseits dazu, die Oberflächenqualität in Form einer reduzierten Rautiefe zu verbessern. Des Weiteren bietet ein gestufter Honprozess die Möglichkeit, einzelne Materialanteilskenngößen, wie die Spitzenhöhe und die Riefentiefe, gezielt einzustellen. Abhängig von der Bearbeitungsqualität, resultierend aus vorgelagerten Prozessstufen, können sich direkte Auswirkungen auf die Oberflächenqualität des Endzustands ergeben. Zur Ermittlung dieser funktionalen Abhängigkeit erfolgt eine Analyse eines dreistufigen Honprozesses. Die Vorbearbeitung erfolgte mit elektrostatisch gerichtetem Band mit einer Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$ . Abhängig von den Stellgrößen Andrückkraft und Tangentialgeschwindigkeit wurden Topographien generiert mit einem  $Rz$  zwischen  $0,2$  bis  $1,7 \mu\text{m}$ . Die zwei folgenden Prozessstufen wurden mit geschlammten Finishbändern in den Korngrößen  $d_K = 9$  und  $3 \mu\text{m}$  unter Verwendung der gleichen Prozessparameterwerte durchgeführt. Neben einer mittleren Andrückkraft von  $F = 300 \text{ N}$  wurde eine geringe Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t = 21,2 \text{ m min}^{-1}$  gewählt und eine vergleichsweise hohe Bandvorschubgeschwindigkeit  $v_{fb} = 51 \text{ mm min}^{-1}$  genutzt, um ein frühzeitiges Zusetzen des Finishbandes und damit eine störende Beeinflussung des Prozesses auszuschließen.

In **Abbildung 5.9** ist anhand von vier unterschiedlichen Ausgangstopographien der Einfluss der Vorbearbeitung auf die resultierende Endqualität dargestellt. Ausgehend von einer Oberflächentopographie mit einer gemittelten Rautiefe von  $Rz = 1,5 \mu\text{m}$  lässt sich die Oberflächenqualität durch die zwei folgenden Prozessstufen auf eine gemittelte Rautiefe von  $Rz < 1 \mu\text{m}$  verbessern. Liegt nach der ersten Prozessstufe stattdessen eine Topographie mit geringerer Ausgangsrauheit vor, ist eine Reduzierung der Oberflächenrauheit ebenfalls möglich, allerdings nimmt die absolute Verbesserung ab. Eine ursprüngliche Rauheit von  $Rz = 0,4$  bis  $0,6 \mu\text{m}$  lässt sich durch die beiden folgenden Prozessstufen auf einen Wert von  $Rz = 0,2$  bis  $0,3 \mu\text{m}$  reduzieren.

Die zusätzliche Betrachtung des Quotienten, gebildet aus der Profilspitzenhöhe  $Rpk$  und der Profiliriefentiefe  $Rvk$ , ermöglicht eine Aussage zur Beschaffenheit der gefinishten Topographie. Oberflächentopographien mit einer vergleichsweise rauen Ausgangsstruktur ( $Rz = 1,5 \mu\text{m}$ ) lassen sich durch die folgenden Prozessstufen sowohl in ihrer absoluten Rauheit beeinflussen als auch im Verhältnis zwischen Profilspitzen und -riefen. Das ursprüngliche Verhältnis von  $Rpk/Rvk = 0,71$  wird im Rahmen der folgenden Prozessschritte auf einen Wert von  $Rpk/Rvk = 0,11$  reduziert. Die Oberflächenstruktur ist durch einen ausgeprägten Plateaucharakter gekennzeichnet. Im Vergleich dazu

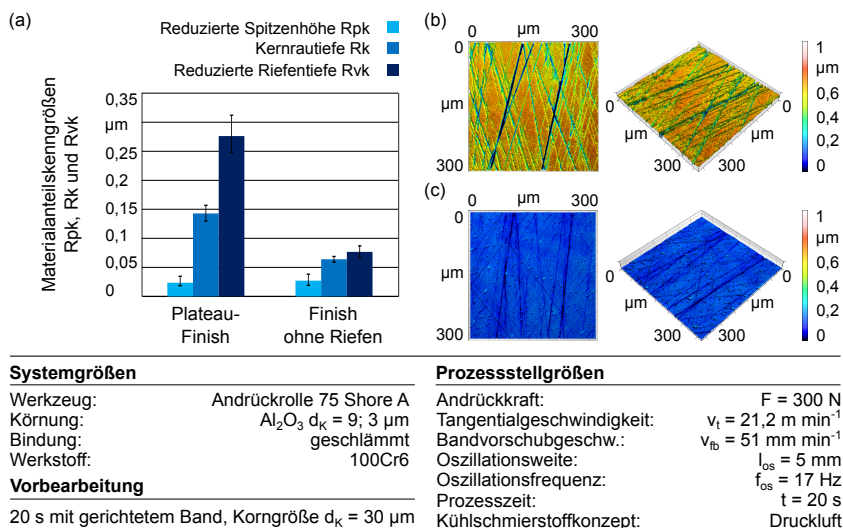


**Abbildung 5.9:** Resultierende Oberflächenqualität nach dreistufigem Finishprozess, (a) Finale Oberflächenqualität in Abhängigkeit der Ausgangsrauheit, (b) Rauheitsprofil einer plateau-gefinishten Oberfläche bzw. einer glatt gefinishten Oberfläche

zeichnet sich eine Oberflächenstruktur, die nach der ersten Prozessstufe eine Rauheit von  $Rz = 0,4 \mu\text{m}$  aufweist, durch einen homogenen Abtrag der Werkstückoberfläche aus. Das Verhältnis zwischen Profilsitzen und -riefen bleibt annähernd konstant bei  $Rpk/Rvk = 0,3$  bis  $0,37$ , während die Oberflächenqualität schrittweise verbessert wird.

Das eingeschränkte Verbesserungspotenzial im Falle einer schlechteren Vorbearbeitung basiert auf dem Charakter des Finishprozesses. Zu Beginn des Prozesses werden, wie in **Abbildung 5.10** dargestellt, die Profilsitzen abgetragen, die einen geringeren Materialanteil verglichen mit der bearbeiteten Fläche darstellen und daraus resultierend hohen Flächenpressungen unterliegen sind. Durch den zunehmenden Abtrag der Profilsitzen ergibt sich ein höherer Materialtraganteil, der auch ein zunehmend größeres Volumen darstellt, das abgetragen werden muss. Unter Beibehaltung der restlichen Prozessparameterwerte sind die beiden folgenden Finishstufen mit feinerer Körnung nicht in der Lage, genügend Werkstoffmaterial abzutragen, um die durch die Vorbearbeitung eingebrachten Profilliefen zu erreichen. Es ergibt sich ein ausgeprägter Plateaucharakter mit einem geringen Verhältnis von Profilsitzenhöhe zu Profilliefentiefe.

Insofern durch die Vorbearbeitung keine derartig tiefen Profilliefen in die Topographie eingebracht wurden, können auch die folgenden Prozessstufen die Oberfläche



**Abbildung 5.10:** Varianten zur Auslegung der Prozesskette beim Finishen zur Erzeugung einer plateauartigen oder einer homogenen Oberflächenstruktur (a) Materialanteilskenngößen (b) Konfokale Weißlichtaufnahme einer plateau-gefinishten Oberfläche bzw. (c) einer glatt gefinishten Oberfläche

des Werkstoffs soweit zerspanen, dass auch die Profiliriefen erreicht werden. Über die gesamte Prozesskette ergibt sich dann ein ausgeglichenes Verhältnis zwischen Profilspitzen und -riefen. Abhängig vom späteren Anwendungsfall haben beide Prozessstrategien ihre Berechtigung. Während eine Plateaustruktur im Vergleich zu einer glatten Oberfläche ein erhöhtes Ölrückhaltevolumen zur Verfügung stellt, zeichnet sich eine Oberfläche mit geringer Rauheit und ausgewogenem Verhältnis zwischen Profilspitzen und -riefen beispielsweise durch eine geringere Kerbwirkung und daraus resultierend oftmals eine höhere dynamische Belastbarkeit aus.

Bei der gestuften Prozessführung muss neben den prozessspezifischen Stellgrößen die Vorbearbeitung als Einflussgröße mit berücksichtigt werden. Die Art und Qualität der Vorbearbeitung wird in vielen, vor allem älteren Quellen als Störgröße betrachtet und soll durch die folgende Prozessstufe vollständig abgetragen werden. Um eine lediglich von der letzten Prozessstufe abhängende Oberflächentopographie zu erzielen, ist die Rauheit des vorherigen Prozesses bzw. der vorherigen Prozessstufe an die Eigenschaften der folgenden Stufe anzupassen. Dieses Vorgehen ist für die gesamte Prozesskette, beginnend mit dem ersten Honprozess, zu berücksichtigen [Flo92]. Diese Einschätzung lässt sich unter Berücksichtigung der neuesten Erkenntnisse zum Teil widerlegen, da sinnvolle Einflüsse der Vorbearbeitung durchaus gewünscht sind und gezielt genutzt werden können.



## 6 Oberflächenstrukturierung in Abhängigkeit der Prozesskette

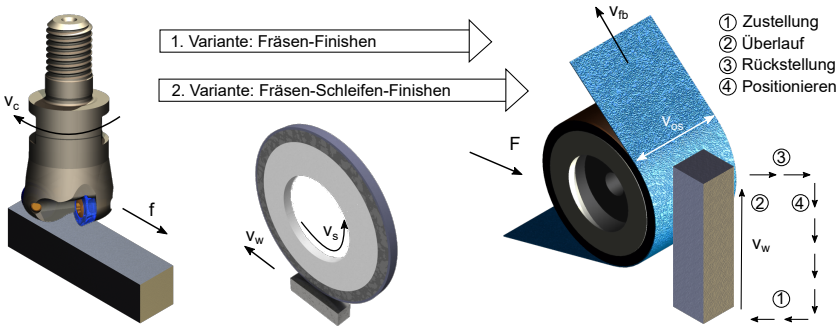
Das Honen stellt häufig den letzten spanenden Fertigungsprozess in einer Reihe von aufeinanderfolgenden Fertigungsschritten mit unterschiedlichen Fertigungsverfahren dar. Üblicherweise werden spanende Prozesse mit geometrisch bestimmter Schneide für die Erzeugung der Form- und Maßhaltigkeit genutzt. Diese zeichnen sich im Vergleich zu den Prozessen der Endbearbeitung in der Regel durch ein höheres Zeitspanvolumen bei schlechteren Oberflächenqualitäten aus. Zudem kann sich aufgrund der thermischen und mechanischen Belastung eine mikrostrukturelle Veränderung der Randzone ergeben, deren Ausprägung unter anderem abhängig von der Höhe der sich ergebenden Temperaturen und den wirkenden Prozesskräften ist. Abhängig von der Beanspruchung im Zerspanprozess können allerdings auch gezielt Eigenschaften, wie beispielsweise Druckeigenspannungen, eingebracht werden, die bei einer tribologischen Beanspruchung tendenziell zu einer Lebensdauersteigerung führen [JBM<sup>+</sup>11].

Im folgenden Kapitel wird der Einfluss der aus den Vorbearbeitungsprozessen resultierenden Oberflächentopographien auf die aus der Feinbearbeitung resultierende Oberflächenstruktur analysiert. Dabei werden anhand unterschiedlicher Prozessketten die Grenzen und Möglichkeiten einer Beeinflussung durch den abschließenden Finishprozess vorgestellt. Bei der Analyse wird zum Teil auf Ergebnisse, insbesondere zur Probenvorbereitung, durch das Fräsen und Schleifen zurückgegriffen, die von Herrn Dipl.-Ing. Meik Tilger im Rahmen seiner Diplomarbeit erarbeitet wurden [Til14].

Die Analyse der Oberflächenstrukturierung durch unterschiedliche Prozessketten erfolgt dabei anhand der in **Abbildung 6.1** dargestellten Prozesse. Die in der Randzone gehärteten Proben aus dem Einsatzstahl 18CrNiMo7-6 und dem Sphäroguss GJS-HB-265 wurden im ersten Prozessschritt zunächst gefräst, um sie anschließend unter Variation der Stellgrößen Andrückkraft, Bearbeitungsdauer und Korngröße des Finishbandes zu finishen. Alternativ zu dieser Bearbeitungsfolge wurde für den Einsatzstahl ebenfalls die Prozesskette Fräsen-Schleifen-Finishen betrachtet. Der Fokus der Analyse lag dabei auf der durch das Finishen erzielbaren Modifikationen der Oberflächenstrukturen, sodass die durch das Fräsen und Schleifen erzielten Topographien als Eingangsgrößen betrachtet werden und hier keine separate Prozessanalyse erfolgt.

Für die abschließende Feinbearbeitung durch das Finishen wurden Bänder mit Aluminiumoxid-Körnung in einer Dispersionsbeschichtung genutzt. Um durch den Finishprozess keine gänzlich neue Topographie zu generieren, erfolgte die Bearbeitung mit Finishbändern mit einer geringen Korngröße von  $d_K = 30, 9, 3$  und  $2\ \mu\text{m}$ . Um die Kinematik des Honens unter Verwendung von Flachproben abbilden zu können, wurde die Bearbeitung durch mehrere Überläufe, wie in **Abbildung 6.1 (c)**

dargestellt, durchgeführt. Das Planfinishen erfolgte unter Minimalmengenschmierung mit Ölen, die typischerweise zur Schmierung beim Einsatz der Werkstoffe verwendet werden. Der Einsatzstahl wurde mit dem niedrigviskosen Öl *MobilGear SHC XMP 320* endbearbeitet, während für die Endbearbeitung des Sphäroguss herkömmliches Motorenöl des Typs *10W-40* verwendet wurde.

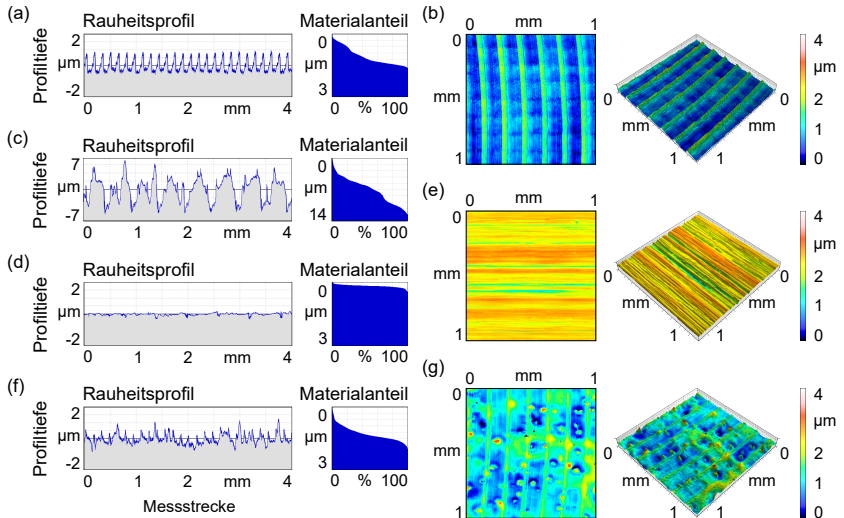


**Abbildung 6.1:** Schematische Darstellung der Fertigungsprozesse (a) Stirn-Planfräsen, (b) Planschleifen, (c) Planfinishen

Die unterschiedlichen Ausgangstopographien wurden beim Fräsen durch eine Variation des Zahnvorschubs zwischen  $f_z = 0,05$  und  $0,2$  mm generiert, wobei sich durch den erhöhten Zahnvorschub ein signifikanter Verschleiß an den genutzten Wendeschneidplatten eingestellt hat. Die generierten Strukturen für den Einsatzstahl sind in **Abbildung 6.2** (a-c) dargestellt. Resultierend aus dem periodischen Eingriff der einzelnen Wendeschneidplatten mit der von der Drehzahl abhängigen Zahneingriffsfrequenz zeichnen sich alle generierten Oberflächenprofile durch periodisch wiederkehrende Profilspitzen und -riefen aus. Durch die Nutzung des geringen Zahnvorschubs von  $f_z = 0,05$  mm ergeben sich Oberflächenstrukturen mit einer geringen Oberflächenrauheit von  $R_z < 1,5 \mu\text{m}$ , die durch regelmäßige Profilspitzen mit einer Höhe bis zu  $1 \mu\text{m}$  gekennzeichnet sind. Diese Topographien bieten für den folgenden Feinbearbeitungsprozess den Vorteil, dass lediglich ein geringes Zerspanvolumen erforderlich ist, um die Profilspitzen abzutragen.

Im Vergleich dazu bildet sich bei Nutzung des hohen Zahnvorschubs, dargestellt in **Abbildung 6.2** (c), ein wesentlich raueres Oberflächenprofil mit einer gemittelten Rautiefe von  $R_z = 14 \mu\text{m}$  und ausgeprägten Profilspitzen mit einer Höhe von bis zu  $7 \mu\text{m}$  aus. Die periodische Struktur des Oberflächenprofils ist verglichen mit dem geringen Zahnvorschub gekennzeichnet durch größere Abstände zwischen den einzelnen Profilspitzen und -riefen sowie durch eine stärkere Ausprägung.

Alternativ zu den gefrästen Profilen wurden mithilfe des Flachsleifens Profile erzeugt, die sich durch eine Oberflächentopographie mit stochastisch verteilten Profilspitzen und -riefen auszeichnet. Um eine möglichst hohe Oberflächenqualität von



#### Systemgrößen

Werkstoff: 18CrNiMo7-6

#### Systemgrößen - Fräsen

Beschichtung WSP: TiAlN

Anzahl WSP: 3

#### Systemgrößen - Schleifen

Kornart: CBN  $d_k = 46 \mu\text{m}$

Bindung: Kunstharz

#### Prozessstellgrößen - Fräsen

Schnittgeschwindigkeit:  $v_c = 160$  u.  $640 \text{ m min}^{-1}$

Zahnvorschub:  $f_z = 0,05$  u.  $0,2 \text{ mm/Z}$

Schnitttiefe:  $a_p = 0,2 \text{ mm}$

Spanwinkel:  $\gamma = 0^\circ$

Kühlschmierstoffkonzept: Trocken

#### Prozessstellgrößen - Schleifen

Schleifscheibengeschw.:  $v_s = 30 \text{ m min}^{-1}$

Werkstückvorschubgeschw.:  $v_w = 2 \text{ m min}^{-1}$

Prozessstrategie: Gleichlauf

Kühlschmierstoffkonzept: Überflutung, Öl

**Abbildung 6.2:** Als Eingangsgrößen genutzte Oberflächenstrukturen (a) Rauheitsprofil und (b) Oberflächentopographie nach dem Fräsen von Einsatzstahl mit  $f_z = 0,05 \text{ mm}$ , (c) Rauheitsprofil nach dem Fräsen von Einsatzstahl mit  $f_z = 0,2 \text{ mm}$ , (d) Rauheitsprofil und (e) Oberflächentopographie nach dem Schleifen, (f) Rauheitsprofil und (g) Oberflächentopographie nach dem Fräsen von Sphäroguss mit  $f_z = 0,05 \text{ mm}$

$R_z \approx 1,3 \mu\text{m}$  zu erzielen, wurde eine vergleichsweise geringe Werkstückvorschubgeschwindigkeit von  $v_w = 2 \text{ m min}^{-1}$  bei einer Schleifscheibengeschwindigkeit von  $v_s = 30 \text{ m s}^{-1}$  genutzt. Das in Abbildung 6.2 (d) dargestellte Rauheitsprofil nach dem Schleifen wurde in Richtung der Schleifriefen aufgenommen, um für alle Proben einen einheitlichen Charakterisierungszustand zu erhalten, der eine Abbildung der Veränderungen nach dem folgenden Finishprozess ermöglicht.

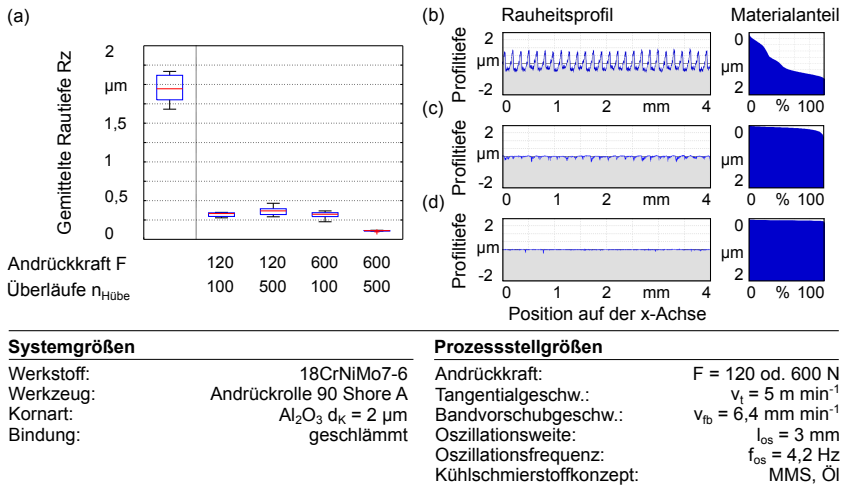
Zusätzlich zu den erzeugten Frässtrukturen wurden äquivalent zum Einsatzstahl Proben aus Sphäroguss mit geringem Zahnvorschub von  $f_z = 0,05 \text{ mm}$  bearbeitet. Die für globulare Guss-Werkstoffe charakteristische Einlagerung von Graphitnestern in der Gefügestruktur beeinflusst die Oberflächentopographie nach der spanenden

Bearbeitung. Wie in Abbildung 6.2 (f) und (g) dargestellt, werden die Graphitnester im Rahmen der Bearbeitung teilweise freigelegt, so dass an den Rändern dieser Einschlüsse Materialaufwürfe - so genannte Blechdeckel - entstehen. Diese Blechdeckel beeinflussen die Oberflächenstruktur in Form von partiell erhöhten Profilsitzen- und -riefen.

## 6.1 Einfluss der Vorbearbeitung auf die resultierende Oberflächenstruktur

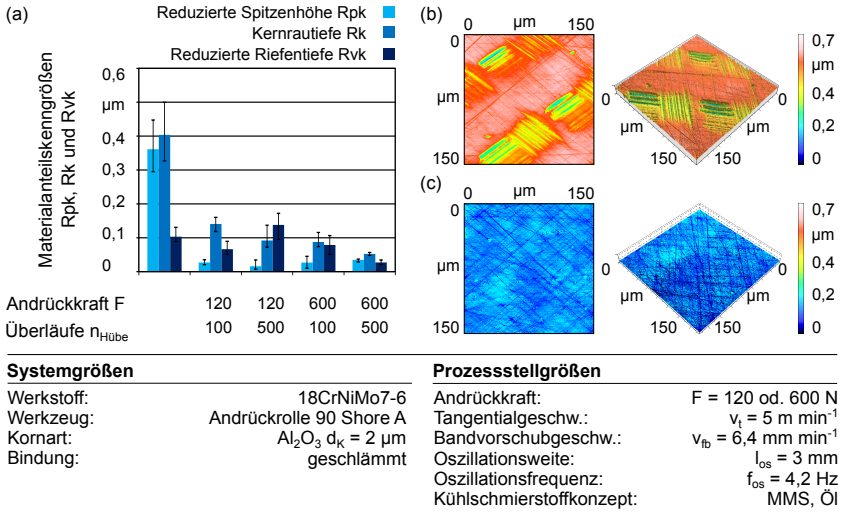
Ausgehend von der gefrästen Topographie des Einsatzstahls mit geringer Oberflächenrauheit von  $R_z = 1,4 \mu\text{m}$  kann durch die Finishbearbeitung für alle Kombinationen von Stellgrößenwerten eine Reduzierung der Oberflächenrauheit erzielt werden. Wie in **Abbildung 6.3** dargestellt, ist die Oberflächenqualität nach der Finishbearbeitung abhängig von der Anzahl der Überläufe sowie von der eingestellten Andrückkraft. Durch 100 Überläufe bei einer Andrückkraft von  $F = 120 \text{ N}$  ergibt sich eine Reduzierung auf  $R_z = 0,3 \mu\text{m}$ . Die Erhöhung der Andrückkraft in Kombination mit einer längeren Bearbeitungsdauer durch eine erhöhte Anzahl an Überläufen ermöglicht eine Verbesserung auf eine gemittelte Rautiefe  $R_z < 0,1 \mu\text{m}$ . Ungeachtet der für beide Strukturen vorliegenden hohen Oberflächenqualität ergeben sich, wie in Abbildung 6.3 (b-d) dargestellt, unterschiedliche Profilverläufe hinsichtlich der Mikrostruktur. Durch die kürzere Bearbeitungszeit und die geringere Andrückkraft wird ein Profil erzeugt, das durch beide Fertigungsprozesse beeinflusst ist. Die im Fräsprozess generierten Profiltriefen sowie die für den Prozess typische periodische Oberflächenstruktur sind auch nach der Finishbearbeitung vorhanden. Lediglich die Höhe der Profilsitzen wird reduziert, sodass eine Plateaustruktur entsteht, deren Riefen aus der Vorbearbeitung durch das Fräsen resultieren. Im Gegensatz dazu ergibt sich durch die Erhöhung der Bearbeitungszeit sowie der Andrückkraft ein Oberflächenprofil, das nur durch die Stellgrößen des Finishprozesses bestimmt ist. Die ursprüngliche Topographie wird vollständig abgetragen.

Die dargestellten Profilveränderungen durch die Feinbearbeitung ermöglichen Rückschlüsse auf den Ablauf des Materialabtrags. Durch den Finishprozess werden zunächst die hervorstehenden Profilsitzen abgetragen. Diese haben einen volumenmäßig geringen Anteil, sind allerdings hauptsächlich für die erhöhte Rauheit verantwortlich. Daher lässt sich mit wenigen Überläufen bereits eine signifikante Verbesserung der Oberflächenqualität erzielen. Da durch den Abtrag der Profilsitzen ein zunehmend höherer Materialtraganteil in geringerer Profiltiefe vorliegt, ist für eine weitere Reduzierung der Rautiefe eine vergleichsweise längere Prozesszeit erforderlich, da ein größeres Volumen abgetragen werden muss. Durch eine ausreichend lange Prozesszeit werden zunehmend die Kernrauheit sowie die Riefentiefe reduziert. Es entsteht eine glatte Topographie, die weder durch Profilsitzen noch durch Profiltriefen gekennzeichnet ist.



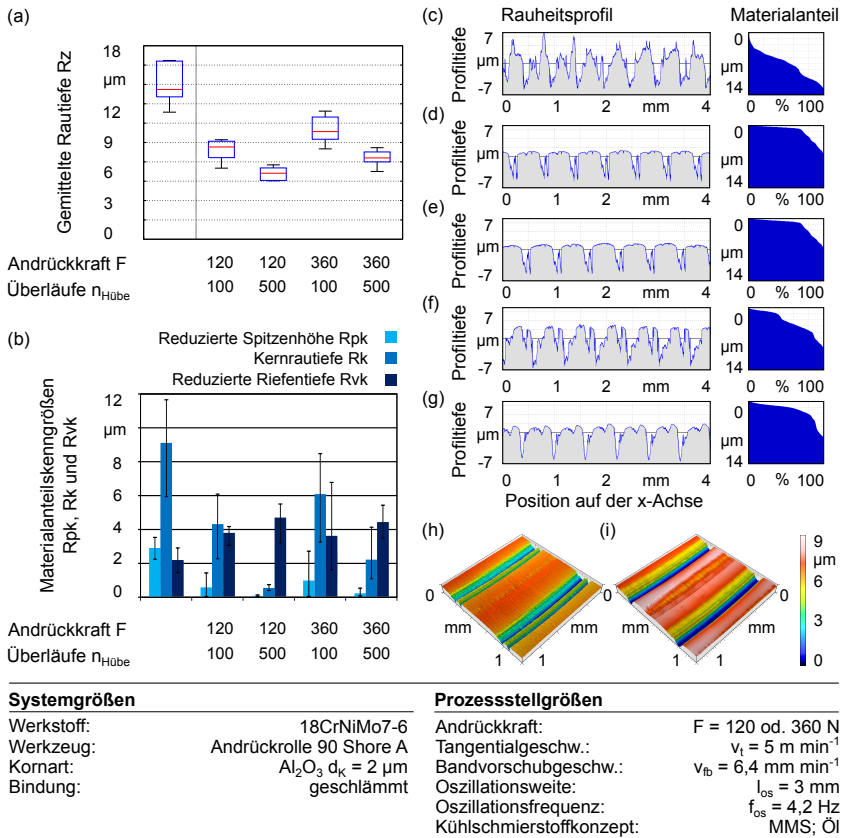
**Abbildung 6.3:** Oberflächenstruktur beim Fräsen-Finishen in Abhängigkeit der Stellgrößen Andrückkraft und Anzahl der Überläufe beim Finishprozess, (a) gemittelte Rautiefe  $R_z$ , (b) Ausgangsprofil resultierend aus dem Fräsprozess, Rauheitsprofile der gehonten Werkstücke mit (c) 100 Überläufen bei geringer Andrückkraft und (d) 500 Überläufen bei hoher Andrückkraft.

Diese anhand der Oberflächenprofile beobachtete Veränderung spiegelt sich auch in den Materialanteilskenngößen, dargestellt in **Abbildung 6.4** wieder. Die ursprüngliche Spitzenhöhe von  $Rpk = 0,35 \text{ }\mu\text{m}$  wird bereits bei geringer Andrückkraft von  $F = 120 \text{ N}$  und geringer Bearbeitungszeit auf einen Wert von  $Rpk < 0,05 \text{ }\mu\text{m}$  reduziert. Auch die Kernrautiefe wird erheblich reduziert. Vor der Finishbearbeitung weist die Kernrautiefe einen Wert von  $Rk = 0,4 \text{ }\mu\text{m}$  auf, während nach der Feinbearbeitung dieser Wert auf  $Rk = 0,15 \text{ }\mu\text{m}$  reduziert wurde. Die Riefentiefe bleibt abgesehen von den toleranzbedingten Streuungen mit einem Wert von  $Rvk = 0,5$  bis  $1,2 \text{ }\mu\text{m}$  erhalten. Im Vergleich dazu ergibt sich durch eine längere Bearbeitung mit höherer Andrückkraft ein Oberflächenprofil mit geringeren Profiltiefen. Alle Materialtraganteilskenngößen liegen bei Werten unterhalb von  $Rpk$ ,  $Rk$ ,  $Rvk = 0,05 \text{ }\mu\text{m}$ . Damit weist die Oberfläche keinen Plateaucharakter auf. Das durch die Profiltiefen bereitgestellte Ölrückhaltevolumen ist signifikant reduziert.



**Abbildung 6.4:** Durch die Prozesskette Fräsen-Finishen generierte Oberflächenstrukturen in Abhängigkeit der Stellgrößen Finishen (a) Materialanteilskenngößen, (b) Plateaustruktur generiert durch geringe Andrückkraft und geringe Bearbeitungs-dauer, (c) Ebene Topographie generiert durch eine hohe Andrückkraft und eine erhöhte Prozesszeit

Äquivalent zur Bearbeitung der feinen Oberflächenstrukturen ist auch bei hoher Ausgangsrauheit eine Verbesserung der Oberflächenqualität möglich. Wie in **Abbildung 6.5** veranschaulicht, wird die ursprüngliche Rautiefe von  $R_z = 14 \mu\text{m}$  durch den Finishprozess auf Werte zwischen  $R_z = 6$  bis  $10 \mu\text{m}$  reduziert. Im Gegensatz zu der feinen Strukturierung führt eine erhöhte Andrückkraft unabhängig von der Bearbeitungszeit zu erhöhten Rautiefen. Dieser scheinbar im Gegensatz zu den vorherigen Ergebnissen (s. Kapitel 5) stehende Zusammenhang ist in der Leistungsfähigkeit des Finishbandes begründet. Aufgrund der geringen Kontaktfläche bedingt durch die geometrische Gestalt der Versuchsprobe und insbesondere der aus der Topographie hervorstehenden einzelnen Profilsitzen ergibt sich bereits bei einer Andrückkraft von  $F = 120$  N in den einzelnen Kontaktstellen eine hohe Flächenpressung, sodass die Belastungsgrenze des Finishbandes erreicht ist. Eine weitere Steigerung der Andrückkraft beeinträchtigt den Prozess durch ein teilweises Abscheren der Kunstharzbindung vom Polyesterträger. Der geringere Abtrag bei einer Andrückkraft von  $F = 360$  N resultiert in einer höheren gemittelten Rautiefe von  $R_z = 9 \mu\text{m}$  bei 100 Überläufen bzw.  $R_z = 8 \mu\text{m}$  bei 500 Überläufen. Die anteilmäßige Verteilung der Materialanteilskenngößen wiederum ist äquivalent zu der Bearbeitung mit geringer Andrückkraft, wobei die einzelnen Werte absolut höher sind.



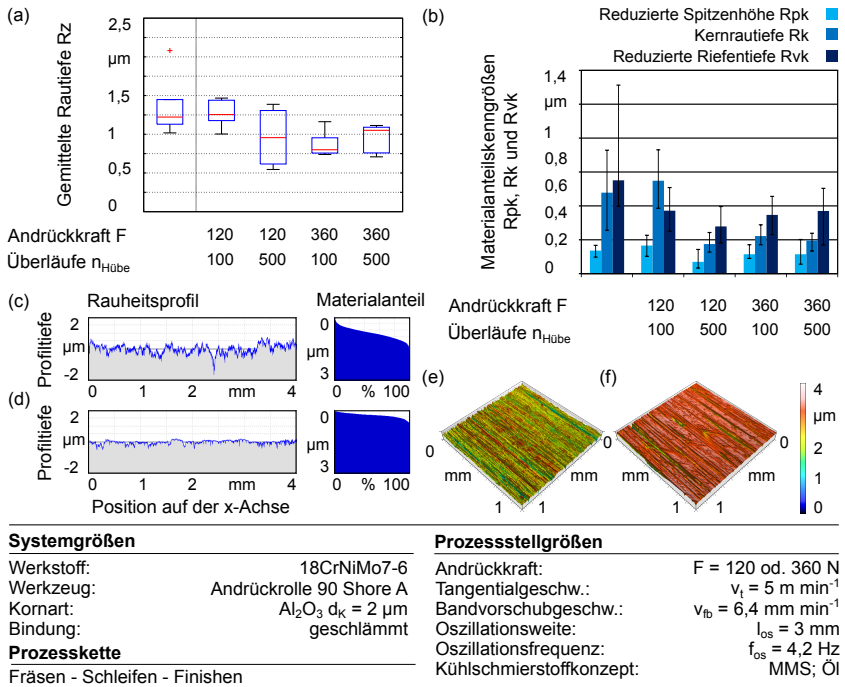
**Abbildung 6.5:** Oberflächenstruktur beim Fräsen-Finishen in Abhängigkeit der Stellgrößen Andrückkraft und Anzahl der Überläufe beim Finishen bei erhöhter Ausgangsrauheit, (a) gemittelte Rautiefe  $R_z$ , (b) Materialanteilskenngößen, (c) Ausgangsprofil resultierend aus dem Fräsprozess, Rauheitsprofile der gehonten Werkstücke mit (d) 100 Überläufen bzw. (e) 500 Überläufen bei geringer Andrückkraft und (f) 100 Überläufen bzw. (g) 500 Überläufen bei hoher Andrückkraft, (h) Oberflächentopographie nach dem Finish mit geringer Andrückkraft und (i) hoher Andrückkraft

Zu Beginn des Finishprozesses werden, wie in Abbildung 6.5 (b) und (d) dargestellt, sowohl bei geringer als auch hoher Andrückkraft die Profilspitzen reduziert. Während die Struktur vor der Feinbearbeitung eine Profilspitzenhöhe von  $R_{pk} = 3 \text{ µm}$  hat, wird diese im Rahmen der ersten 100 Überläufe auf eine Spitzenhöhe kleiner als  $R_{pk} = 1 \text{ µm}$  reduziert. Infolge des geringeren Materialabtrags, bedingt durch den größeren Verschleiß bei erhöhter Andrückkraft, ergibt sich eine vergleichsweise geringere Reduzierung der Kernrauheit. Dies bedingt eine schlechtere Oberflächenqualität bei erhöhter

Andrückkraft. Dieser tendenzielle Unterschied ergibt sich auch bei erhöhter Prozesszeit. Die Profilspitzen werden für beide Zustellkräfte fast vollständig abgetragen. Dennoch ergibt sich, wie in Abbildung 6.5 (e) und (g) veranschaulicht, auch bei erhöhter Prozesszeit eine größere Kernrautiefe nach dem Finishen mit erhöhter Andrückkraft.

Dass gleichzeitig durch die Erhöhung der Prozesszeit die reduzierte Riefentiefe anteilmäßig steigt, ist in der Definition der Kennwerte begründet. Die Kennwerte ergeben sich aus der Materialtraganteilskurve, die wiederum eine Aufsummierung der Materialanteile über die Profiltiefe darstellt. Zur Bildung der drei Kenngrößen reduzierte Spitzenhöhe  $R_{pk}$ , Kernrautiefe  $R_k$  und reduzierte Riefentiefe  $R_{vk}$  wird eine Ausgleichsgerade in die Materialanteilskurve gelegt. Diese Ausgleichsgerade ist eine Verlängerung der Sekanten, die 40 Prozent des Materialanteils einschließt und dabei die geringste Steigung annimmt. Durch den Abtrag der Profilspitzen sowie des Kernrautheitsprofils ergibt sich ein flacherer Verlauf der Materialtraganteilskurve. Dies hat direkten Einfluss auf die Materialtraganteilskenngößen. Durch die geringere Steigung der Sekanten zählen auch Materialanteile zur reduzierten Riefentiefe, die in der vorigen Prozessstufe zur Kernrautiefe gezählt haben. Resultierend ergibt sich eine Steigerung der reduzierten Riefentiefe. Wird die Prozesszeit weiter gesteigert, werden auch die eigentlichen Profiltriefen abgetragen und die reduzierte Riefentiefe verringert. Daher ist die Materialtraganteilskurve immer in Kombination mit dem jeweiligen Rauheitsprofil zu betrachten.

Wird anstelle eines Fräsprozesses zur Vorbearbeitung ein Schleifprozess genutzt, ergibt sich hinsichtlich der Oberflächenrauheit ein vergleichbarer Ausgangswert wie beim Fräsen mit geringem Zahnvorschub und hoher Schnittgeschwindigkeit. Durch die anschließende Finish-Bearbeitung lässt sich, wie in **Abbildung 6.6** dargestellt, dieser Wert allerdings maximal auf eine gemittelte Rautiefe von  $R_z = 1 \mu\text{m}$  verbessern. Ein funktionaler Zusammenhang zwischen Andrückkraft, Prozesszeit und erzielter Oberflächenqualität lässt sich im Gegensatz zu der Prozesskette aus Fräsen und Finishen nicht herstellen. Vielmehr ist es so, dass unabhängig von den Stellgrößen eine Reduzierung der Profilspitzen erfolgt, die Kernrauheit und die Profiltriefen allerdings nicht abgetragen werden. Dies liegt hauptsächlich darin begründet, dass das Profil, gemessen in Richtung der Schleifriefen, dem Profil nach dem Finishen hinsichtlich der Materialtraganteile recht ähnlich ist. Aufgrund der geringen Korngröße beim Finishen ist die Abtragsleistung eingeschränkt. Das geringe Materialvolumen, welches sich durch die Profilspitzen beim Fräsprozess ergibt, lässt sich vergleichsweise schneller abtragen als ein Profil, das sich bereits durch wenige Profilspitzen auszeichnet. Der Unterschied zwischen den gefräst-gefinishten Oberflächenstrukturen und den geschliffen-gefinishten besteht zudem in der Ausrichtung der Profiltriefen. Während diese beim Fräsprozess quer zur Richtung des Vorschubs liegen, sind sie beim Schleifprozess in Richtung des Vorschubs orientiert.



**Abbildung 6.6:** Oberflächenstruktur beim Fräsen-Schleifen-Finishen in Abhängigkeit der Stellgrößen Andrückkraft und Anzahl der Überläufe beim Finishen, (a) Gemittelte Rautiefe  $R_z$ , (b) Materialanteilskenngößen  $R_{pk}$ ,  $R_k$  und  $R_{vk}$  Rauheitsprofile der gehonten Werkstücke mit (c) 100 Überläufen bei geringer Andrückkraft und (d) 500 Überläufen bei hoher Andrückkraft, Konfokale Weißlichtaufnahmen der gehonten Werkstücke mit (e) 100 Überläufen bei geringer Andrückkraft und (f) 500 Überläufen bei hoher Andrückkraft

## 6.2 Einfluss des Werkstoffs auf die Endbearbeitung

Anhand des alternativ genutzten Sphäroguss wird im Folgenden der Einfluss des Werkstoffs auf die Oberflächenstruktur nach der Endbearbeitung bei ansonsten gleichen Prozessparameterwerten analysiert. Die gefräste Ausgangstopographie wurde analog zu den bisherigen Versuchen mit einer geringen Zahnvorschubgeschwindigkeit von  $f_Z = 0,05 \text{ mm}$  erzeugt, um ein Oberflächenprofil mit möglichst geringer Ausgangsrauheit zu erhalten.

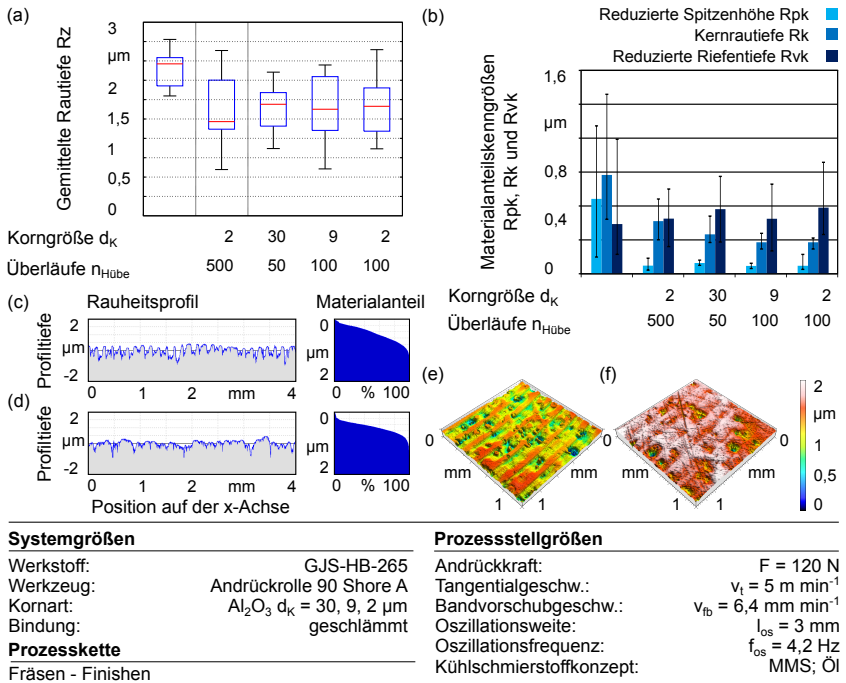
Die gemittelte Rautiefe der gefrästen Proben liegt in einem Intervall zwischen  $R_z = 1,8$  bis  $2,8 \mu\text{m}$  und ist damit höher als die Rautiefe in den Versuchen zum Einsatzstahl. Durch die auf den Fräsprozess folgende Finishbearbeitung lässt sich äquivalent zu der Bearbeitung des Einsatzstahls auch beim Gusseisen eine Reduzie-

nung der Oberflächenrauheit erzielen. In **Abbildung 6.7** sind zwei unterschiedliche Prozessstrategien zur Feinbearbeitung dargestellt. Durch die direkte Bearbeitung mit einer geringen Korngröße von  $d_K = 2\ \mu\text{m}$  und einer Andrückkraft von  $F = 120\ \text{N}$  lässt sich durch eine Bearbeitung mit 500 Überläufen die ursprüngliche Rauheit auf  $R_z = 1,5\ \mu\text{m}$  reduzieren. Im Gegensatz zum Einsatzstahl ist das Rauheitsprofil sowie die Topographie des GJS auch nach der hohen Anzahl an Überläufen durch zumindest ansatzweise vorhandene Fräsriefen gekennzeichnet.

Ein alternativer Ansatz zur Reduzierung der vergleichsweise hohen Ausgangsrauheit in kürzerer Prozesszeit besteht in der Wahl einer größeren Korngröße. Diese eignet sich aufgrund der größeren Spanräume zur Erzielung höherer Zeitspanvolumina. Durch die Bearbeitung mit einer Korngröße von  $d_K = 30\ \mu\text{m}$  lässt sich bei einer wesentlich verkürzten Bearbeitungszeit eine äquivalente Reduzierung der Rauheit erzielen. Der ursprüngliche Rauheitswert liegt nach der Feinbearbeitung nur noch bei  $R_z = 1,6\ \mu\text{m}$ . Werden die in **Abbildung 6.7** (b) dargestellten Materialanteilskenngößen berücksichtigt, ist eine hohe Übereinstimmung zwischen den mit unterschiedlicher Korngröße generierten Topographien festzustellen. Sowohl die Spitzenhöhe als auch die Kernrautiefe und die Riefentiefe befinden sich auf ähnlichen Niveaus.

Ausgehend von der mit größerem Korndurchmesser generierten Topographie wurde die Möglichkeit untersucht, durch sukzessive feiner werdende Körnung eine Reduzierung der Rauheit zu erzielen. Die Materialtraganteile belegen die Grenzen für eine weitere Veränderung der Oberflächentopographie durch eine erweiterte dreistufige Prozesskette mit schrittweise abnehmender Körnung von  $d_K = 30\ \mu\text{m}$  auf  $d_K = 9\ \mu\text{m}$  und  $d_K = 2\ \mu\text{m}$ . Die aus der ersten Prozessstufe resultierende Spitzenhöhe ist mit  $R_{pk} < 0,1\ \mu\text{m}$  bereits äußerst gering und lässt sich im Rahmen der folgenden Stufen nur unwesentlich reduzieren. Die Kernrautiefe sowie die Riefentiefe bleiben über alle drei Prozessstufen mit  $R_{pk} = 0,25$  bis  $0,3\ \mu\text{m}$  sowie  $R_{vk} = 0,4$  bis  $0,55\ \mu\text{m}$  nahezu auf dem gleichen Niveau.

Diese geringen Änderungen sind in der Gefügestruktur des Gusseisens begründet. Aufgrund der eingeschlossenen Graphitnester, die im Rahmen der Finishbearbeitung freigelegt werden, lässt sich kein zum Einsatzstahl vergleichbares Oberflächenprofil erzielen. Die Graphitnester sind anhand der konfokalen Weißlichtaufnahmen sowohl nach der Bearbeitung mit 100 Überläufen und geringer Andrückkraft von  $F = 120\ \text{N}$  (**Abbildung 6.7** (e)) als auch nach der Bearbeitung mit 500 Überläufen und hoher Andrückkraft von  $F = 360\ \text{N}$  (**Abbildung 6.7** (f)) deutlich zu erkennen.



**Abbildung 6.7:** Oberflächenstruktur beim Fräsen-Finishen in Abhängigkeit der Stellgrößen Andrückkraft und Anzahl der Überläufe beim Finishen des GJS, (a) Gemittelte Rautiefe Rz, (b) Materialteilkenngrößen RpK, Rk und RvK Rauheitsprofile der gehonten Werkstücke mit (c) 100 Überläufen bei geringer Andrückkraft und (d) 500 Überläufen bei hoher Andrückkraft, Konfokale Weißlichtaufnahmen der gehonten Werkstücke mit (e) 100 Überläufen bei geringer Andrückkraft und (f) 500 Überläufen bei hoher Andrückkraft

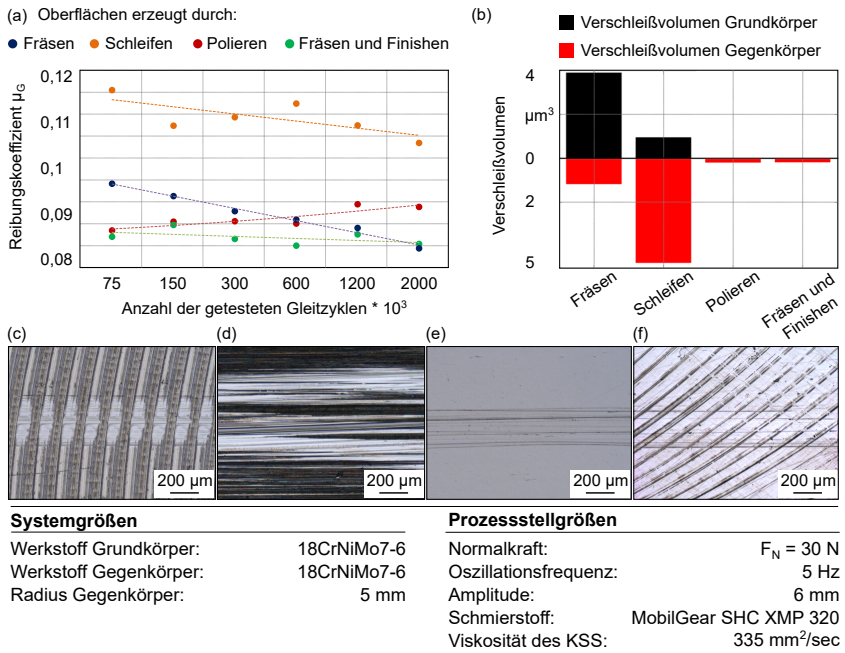
## 6.3 Tribologisches Verhalten unter Gleitbeanspruchung

Nach der gezielten Strukturierung wurden die Proben durch den Lehrstuhl für Werkstofftechnik der Universität Duisburg-Essen in einem unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen ausgeführten Gleitverschleißtest auf ihre Verschleißbeständigkeit geprüft. Die Relativbewegung zwischen Grund- und Gegenkörper erfolgte in Richtung der Längsachse der Versuchswerkstücke, in der auch die Rauheits-Charakterisierung der Oberflächentopographien vorgenommen wurde. Der in den tribologischen Untersuchungen verwendete artgleiche kugelförmige Gegenkörper mit einem Radius von  $r = 5 \text{ mm}$  wurde mit einer konstanten Normalkraft von  $F_N = 30 \text{ N}$  auf die strukturierte Oberfläche des Probenkörpers zugestellt. Der Verschleißweg in Richtung der Längsachse des Probenkörpers betrug 6 mm bei einer Oszillationsfrequenz von

$f = 5$  Hz. Im Fokus der Analyse stand der Einfluss der Oberflächenstruktur auf den sich ergebenden Reibungskoeffizienten und dem auf der Oberfläche und an dem Gegenkörper entstandenen Verschleißvolumen. Der Reibungskoeffizient wurde aus der kontinuierlichen Messung der Normal- und Tangentialkraft ermittelt.

Die in **Abbildung 6.8** am Beispiel des Einsatzstahls dargestellten Ergebnisse zum tribologischen Verhalten unter Gleitbeanspruchung verdeutlichen die Auswirkungen der Strukturierung auf das Einlaufverhalten. In den Untersuchungen zeichneten sich alle Oberflächentopographien durch ein unterschiedliches Verschleißverhalten sowie einen teilweise erheblich differierenden Reibungskoeffizienten aus. Allen Oberflächentopographien gemeinsam war ein mehr oder minder stark ausgeprägtes Einlaufverhalten, also ein sich über die Anzahl der Verschleißzyklen verändernder Reibungskoeffizient. Der größte Reibungskoeffizient zu Beginn des Verschleißtests ergab sich für die geschliffene Oberflächentopographie. Diese wurde im Versuch in Richtung der Schleifriefen beansprucht. Der in den ersten 75 Tausend Verschleißzyklen vorliegende Reibungskoeffizient von  $\mu_G = 0,12$  reduzierte sich nach 2 Millionen Verschleißzyklen auf einen Wert von  $\mu_G = 0,11$  und war damit wesentlich höher als für die anderen Oberflächentopographien. Aufgrund der in Verschleißrichtung verlaufenden Riefen kann das Schmiermedium im Versuch aus dem Kontakt entweichen, sodass eine geringere Schmierfilmdicke entsteht. Äquivalente Untersuchungen von *Singh et al.* belegen den hohen Einfluss der Ausrichtung der Schleifriefen auf den Reibungskoeffizienten. Durch eine Änderung der Ausrichtung ergeben sich signifikante Änderungen im Verschleißverhalten. Liegt die Verschleißrichtung in Richtung der Schleifriefen ergibt sich ein bis zu 45 Prozent höherer Reibungskoeffizient als durch eine Ausrichtung senkrecht zu den Schleifriefen, da das Schmiermedium einen geringeren Widerstand überwinden muss, um den Kontaktbereich zu verlassen, folglich entsteht ein geringerer Schmierstoffdruck. Für den Fall, dass die Schleifriefen senkrecht zur Verschleißrichtung liegen, wird der Schmierstofffluss durch die einzelnen Schleifriefen gehemmt, und es entsteht ein höherer Schmierstoffdruck. Dieser erhöhte Schmierstoffdruck ist in der Lage, einen Teil des Drucks, der zwischen den Oberflächen wirkt, zu kompensieren und den Druck in einem Festkörperkontakt zu reduzieren bzw. ihn komplett zu vermeiden. Dies wiederum kann sich dann reibungsmindernd auswirken [SMH05].

Die gefräste Oberflächentopographie weist ein vergleichbares Einlaufverhalten bei geringerem Reibungskoeffizienten auf. Der zu Beginn des Verschleißtests vorliegende Reibungskoeffizient ist mit  $\mu_G < 0,1$  bereits geringer als der Reibungskoeffizient der geschliffenen Struktur nach 2 Millionen Verschleißzyklen. Zudem ergibt sich ein wesentlich konstanterer Verlauf des Reibungskoeffizienten, aufgetragen über die Anzahl der Verschleißzyklen. Dies spricht für ein insgesamt gleichmäßigeres Einlaufverhalten mit einem konstanten Abtrag der Profilspitzen. Die geringste Änderung im Einlaufverhalten bei gleichzeitig niedrigem Reibungskoeffizienten zeigte die gefräst-gefinishte Oberflächentopographie. Der Reibungskoeffizient lag über die Anzahl der Verschleißzyklen konstant in einem Intervall zwischen  $\mu_G = 0,085$  und  $0,09$ . Diese im Vergleich zu den anderen Topographien geringe Veränderung legt nahe, dass bereits

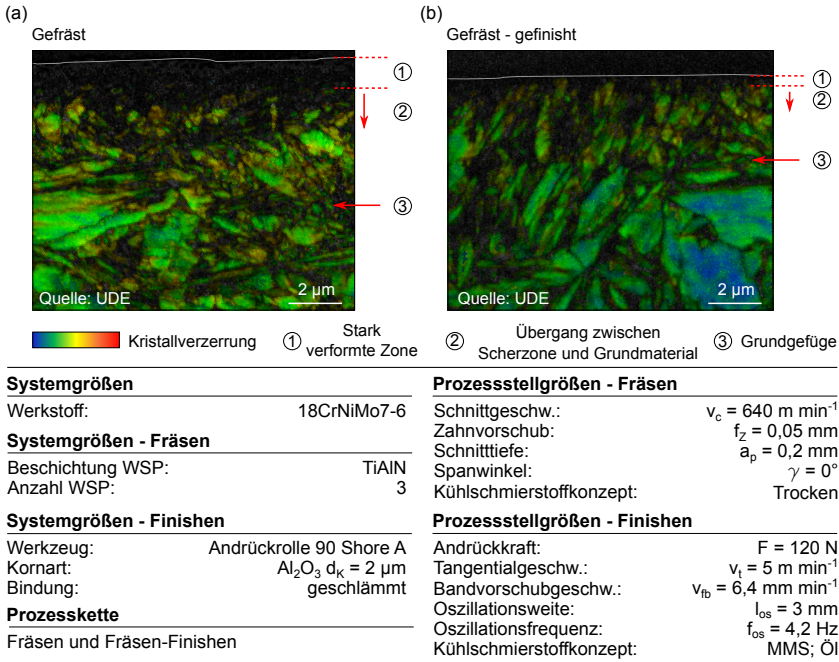


**Abbildung 6.8:** Verschleißverhalten strukturierter 18CrNiMo7-6 Proben nach [GBS<sup>+</sup>14, SFB15, SFB15] (a) Reibungskoeffizient, (b) Verschleißvolumen, Oberflächentopographie nach 2 Millionen Verschleißzyklen bei (c) gefräster, (d) geschliffener, (e) polierter und (f) gefräst-gefinishter Struktur

durch die Fertigung der Einlauf der Struktur vorweggenommen werden konnte und der, wie an der Abbildung 6.8 (b) zu erkennende Verschleiß der Oberfläche nahezu vollständig vermieden wird bzw. unterhalb des messbaren Grenzwertes lag. Abweichend von der gefrästen, der geschliffenen und der gefräst-gefinishten Struktur ergab sich für eine als Referenz genutzte polierte Oberflächentopographie ein Einlaufverhalten mit kontinuierlich steigendem Reibungskoeffizienten. Über die gesamte Anzahl an Verschleißzyklen erhöhte sich der Reibungskoeffizient von  $\mu_G = 0,088$  auf  $0,094$

In der Randzonenanalyse der gefertigten Proben zeigten sich, wie in **Abbildung 6.9** dargestellt, insbesondere nach dem Fräsprozess teilweise erhebliche Änderungen der Mikrostruktur. Durch die hohe mechanische Belastung ergeben sich Verformungen, die zu einer feinkörnigeren Randzone führen. Aufgrund des geringen Abtrags mit feiner Korngröße beim Finishen, bleibt diese Randzonenveränderung auch nach der Endbearbeitung erhalten (Abbildung 6.9 (b)). Verglichen mit Bauteilrandzonen, die nach dem Einlauf in einem tribologischen System zu finden sind, kann diese mikrostrukturelle Veränderung als zielführend für einen kurzen Einlauf des tribologischen Systems bewertet werden. Durch den konventionell angestrebten vollständigen Abtrag

der Randzone durch die Endbearbeitung muss sich diese Deformationszone im Einlauf erst neu bilden und bewirkt eine Verlängerung des Einlaufs.



**Abbildung 6.9:** EBSD-Analysen des Lehrstuhls für Werkstofftechnologie der Universität Duisburg-Essen (a) Gefräste Randzone, (b) Gefräst-gefinishte Randzone (Mit freundlicher Genehmigung von Frau Dipl.-Ing. P. Stemmer, Universität Duisburg-Essen, Werkstofftechnik)

Äquivalente Untersuchungen für unterschiedliche Topographien beim Gusseisen zeigten einen konträren Verlauf hinsichtlich des Verschleißvolumens und des sich ergebenden Reibungskoeffizienten. Da die aus dem Fräsprozess resultierende Rauheit aufgrund der Blechdeckelbildung höher war und auch durch das Finishen nicht signifikant reduziert werden konnte, ergab sich sowohl für die gefräste Topographie als auch für die gefräst-gefinishte Topographie ein vergleichsweise erhöhter Reibungskoeffizient. Die geschliffene Struktur sowie die als Referenz genutzte, polierte Oberfläche wiesen einen wesentlich geringeren Reibungskoeffizienten auf. Diese Ergebnisse korrelieren mit Untersuchungen von *Keller et al.* zum tribologischen Verhalten unterschiedlicher Oberflächentopographien auf Gusseisen unter Grenz- und Mischreibungsbedingungen. Gehonte Oberflächen wiesen in den Untersuchungen eine höhere Reibung bedingt durch die von Beginn an vorhandenen Unebenheiten (Profilspitzen und -riefen) auf. Die Entstehung eines Tribofilms wird nach *Keller et al.* beschleunigt durch sehr glatte

Oberflächen mit geringen Spitzenhöhen, wodurch sich geringe Flächenpressungen in der Kontaktzone bereits zu Beginn einstellen. Aufgrund dieser Unterschiede bei der Bildung des schützenden Tribomaterials ergibt sich eine Differenz hinsichtlich des Verschleißzustandes anhand des absoluten gemessenen Verschleißes nach dem Test [KFKH09].

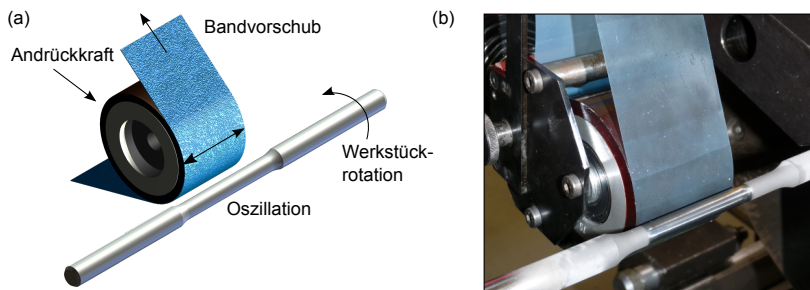
Zusammenfassend bildet die Oberflächenstruktur für den Einlauf eines tribologischen Systems eine maßgebliche Stellgröße, um die im Kontakt entstehenden Flächenpressungen und Kräfte sowie das resultierende Verschleißverhalten zu beeinflussen. Durch die abgestimmte Anpassung der Stellgrößen in der Endbearbeitung auf die Eigenschaften der ursprünglichen Topographie und Werkstoffrandzone ergeben sich diverse Möglichkeiten hinsichtlich einer gezielten Oberflächenkonditionierung. Eine ganzheitliche Betrachtung der spanenden Prozesskette zur Herstellung funktionaler Oberflächen ermöglicht die Nutzung der Ausgangstopographie vor der Endbearbeitung durch das Finishen, um spezifische Oberflächenstrukturen zu generieren, die sowohl durch Merkmale der Vorbearbeitung als auch durch die für den Honprozess typische Oberflächenstruktur gekennzeichnet sind. Eine gestufte Anwendung der Feinbearbeitung in Kombination mit einem Prozess mit geometrisch bestimmter Schneide ermöglicht zudem die Nutzung von positiven Struktureigenschaften der Randzone bei zugleich auf eine tribologische Beanspruchung optimierte Oberflächenstruktur. Zwingende Voraussetzung für die Abstimmung der Prozesse ist allerdings eine hohe Fertigungsgenauigkeit bereits in der ersten Prozessstufe. Die Auswirkungen einer veränderten Ausgangstopographie, beispielsweise durch erhöhten Werkzeugverschleiß in der Vorbearbeitung, können durch die Feinbearbeitung nur bedingt kompensiert werden. Insbesondere bei der Verwendung von geringen Korngrößen ist der Materialabtrag oft zu gering, um erhöhte Oberflächenrauheiten aus der Vorbearbeitung abzutragen (s. Kapitel 6.1). Des Weiteren bildet die Ausprägung der einzelnen Materialanteilkenngrößen eine wichtige Einflussgröße. Oberflächentopographien, die sich nach der Vorbearbeitung bereits durch einen Plateaucharakter, also eine geringe Spitzenhöhe bei vergleichsweise großer Riefentiefe auszeichnen, lassen sich durch das Finishen schlechter strukturieren als Topographien, bei denen insbesondere die Profilspitzen abgetragen werden sollen.



# 7 Endbearbeitung von Verschleißschutzschichten

Als Alternative zu herkömmlichen wärmebehandelten Stahl- und Gusswerkstoffen werden für tribologisch hochbeanspruchte Funktionsflächen zunehmend Komposit-Werkstoffe bestehend aus einem leichten, kostengünstigen Substratwerkstoff sowie einer auf diesen Substratwerkstoff aufgetragenen Verschleißschutzschicht eingesetzt. Diese Verschleißschutzschicht zeichnet sich im Vergleich zu konventionellen Werkstoffen durch eine wesentlich höhere Härte aus und stellt aufgrund der daraus resultierenden erhöhten Beständigkeit gegen einen abrasiven Materialabtrag eine größere Herausforderung an die spanenden Bearbeitungsverfahren. Im folgenden Kapitel werden Prozessstrategien für die Endbearbeitung von Verschleißschutzschichten auf Wolframkarbid-Basis durch das Finishen vorgestellt. Die in den Kapiteln 7.1.4, 7.1.5 und 7.2 vorgestellten Analysen und Auswertungen basieren dabei zum Teil auf Ergebnissen von Frau Dipl.-Wirt.-Ing. Rebecca Urania Folle, die sie im Rahmen ihrer Diplomarbeit erarbeitet hat [Fol14].

Der Versuchsaufbau zur Endbearbeitung der Verschleißschutzschichten durch das Finishen sowie die kinematischen Stellgrößen sind in **Abbildung 7.1** dargestellt. Die Bearbeitung erfolgte an zwei Beschichtungsvarianten, wobei sich eine der Varianten durch einen zusätzlichen Chrom-Anteil auszeichnete. Die Schichtdicke betrug, abhängig von der geometrischen Gestalt des Bauteils, zwischen 140 und 200  $\mu\text{m}$ .



Systemgrößen		Prozessstellgrößen	
Werkzeug:	Andrückrolle 90; 75; 50 Shore A	Andrückkraft:	$F = 60 \dots 600 \text{ N}$
Körnung:	Diamant $d_k = 125; 30; 9; 3 \mu\text{m}$	Tangentialgeschw.:	$v_t = 5 \dots 125 \text{ m min}^{-1}$
Substrat:	100Cr6 u. 42CrMo4	Bandvorschubgeschw.:	$v_{fb} = 2 \dots 64 \text{ mm min}^{-1}$
Beschichtung:	86WC-10Co4Cr u. 88WC-12Co	Oszillationsweite:	$l_{os} = 3 \text{ mm}$
<b>Versuchsplanung</b>		Oszillationsfrequenz:	$f_{os} = 2 \dots 21 \text{ Hz}$
LHD u. CCD; DACE		Prozesszeit:	$t = 12 \dots 408 \text{ s}$
		Kühlschmierstoffkonzept:	MMS; Öl

**Abbildung 7.1:** Finishbearbeitung HVOF-gespritzter Verschleißschutzschichten (a) Prozesskinematik, (b) realer Prozess

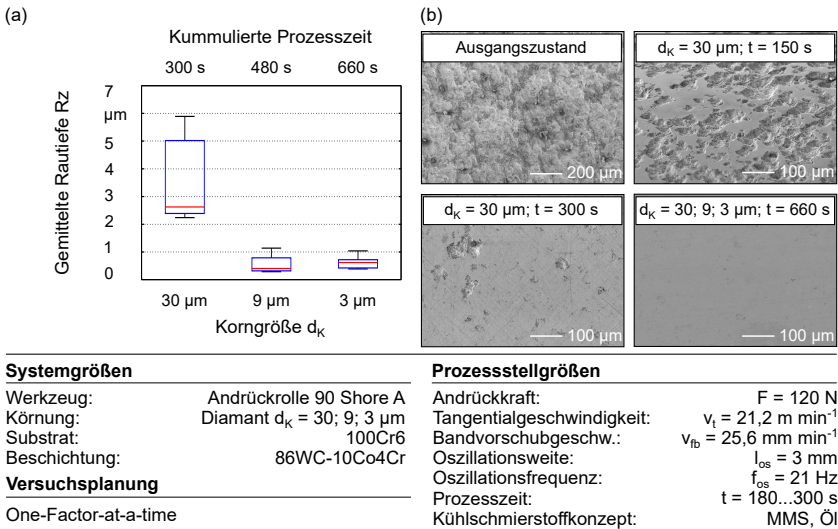
Aufgrund der hohen Härte der Verschleißschutzschichten von  $1300 \pm 50$  HV 0.3 wurden für die spanende Bearbeitung ausschließlich Finishbänder mit Diamantkörnung eingesetzt. Diese kamen sowohl in elektrostatisch gerichteter Bindungsart in einer Korngröße von  $d_K = 125 \mu\text{m}$  als auch in geringerer Korngröße von  $d_K = 30, 9$  und  $3 \mu\text{m}$  in regellos verteilter Bindungsstruktur zum Einsatz. Durch die Verwendung variierender Wellendurchmesser war es möglich, unterschiedliche Kontaktsituationen zu realisieren, wobei die in der Kontaktzone wirkenden Flächenpressungen durch die Nutzung von speziellen Druckmessfolien abgebildet wurden. Um ein möglichst gutes Oberflächenfinish zu erzielen, wurden die Versuche unter Minimalmengenschmierung mit Öl durchgeführt. Diese Strategie der Kühlschmierstoffversorgung zeichnet sich durch einen im Vergleich zur Überflutungsschmierung wesentlich geringeren Verbrauch aus, da die Kontaktzone lediglich mit dem Öl benetzt wird. Dennoch sind die Vorteile des Öls, in diesem Fall insbesondere die Schmierung der Kontaktzone, gegeben.

Die Analyse des funktionalen Einflusses der Stellgrößen auf die resultierende Oberflächenstruktur beim Finishen erfolgte, wie in Kapitel 4.6 beschrieben, mithilfe der statistischen Versuchsplanung durch zum Teil variierende Versuchspläne. In Abhängigkeit der Variationsmöglichkeit der Stellgrößen wurden sowohl zentralzusammengesetzte Versuchspläne in Kombination mit dem Box-Behnken-Design, als auch raumfüllende Versuchspläne genutzt. Die Auswertung der Versuchspläne erfolgt durch die DACE-Modellierung.

## 7.1 Prozessauslegung

Die aus den Grundlagen zum Finishen des Wälzlagerstahls (s. Kapitel 5) bekannten Zusammenhänge lassen sich nicht ohne Weiteres auf die Bearbeitung der Verschleißschutzschichten übertragen. Durch die in **Abbildung 7.2** dargestellten Ergebnisse nach unterschiedlichen Prozessstufen, die unter ausschließlicher Verwendung von Finishbändern mit geschlammter Bindung durchgeführt wurden, zeigen sich diverse Unterschiede hinsichtlich der erzielbaren Oberflächenqualität. Ausgehend von einer hohen Ausgangsrauheit von  $R_z = 10 \mu\text{m}$ , galt es, diese in der ersten Prozessstufe so weit zu reduzieren, dass ein ebenes und vor allem homogenes Oberflächenfinish mit möglichst geringer Rautiefe entsteht. Durch das Vorfinish mit einer Diamant-Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  in ungerichteter Bindungsstruktur sind nach einer Prozesszeit von  $t = 150$  s, wie in **Abbildung 7.2** (b) dargestellt, deutliche Krater auf der Oberfläche topographisch zu erkennen. Diese Profiltäler resultieren aus der vergleichsweise hohen Ausgangsrauheit nach dem Beschichten. Durch die geringe Korngröße lassen sich im Rahmen der Prozesszeit von  $t = 150$  s lediglich die Profilspitzen abtragen. Eine Erhöhung der Prozesszeit auf  $t = 300$  s führt zwar zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität durch eine Reduzierung der verbleibenden Täler und Riefen, einzelne tiefe Profiltäler bleiben allerdings erhalten. Da die Oberfläche nach dem Prozess nur noch partiell durch verbleibende Riefen gekennzeichnet ist, ergibt sich,

wie in Abbildung 7.2 (a) dargestellt, insgesamt eine im Vergleich zur ursprünglichen Oberflächentopographie reduzierte Rautiefe, die allerdings durch einzelne Ausreißer gekennzeichnet ist. Während der Median der aufgenommenen Messstrecken bei einer gemittelten Rautiefe von  $R_z = 2,6 \mu\text{m}$  liegt, sind ebenfalls einzelne Ausreißer mit erheblich erhöhter Rautiefe bis zu  $R_z = 6 \mu\text{m}$  erkennbar. Diese Ausreißer entstehen durch die einzelnen tiefen Profilliefen und -täler, die im Rahmen der ersten Prozessstufe nicht abgetragen werden konnten. Durch die weitere Bearbeitung in einer folgenden Prozessstufe mit geringerer Korngröße von  $d_K = 9 \mu\text{m}$  lässt sich die Oberflächenqualität durch den Abtrag der verbliebenen Profilliefen auf eine gemittelte Rautiefe von  $R_z = 0,5 \mu\text{m}$  verbessern. Eine weitere Reduzierung der Rauheit durch eine noch kleinere Korngröße von  $d_K = 3 \mu\text{m}$  ist allerdings nicht möglich (s. Kapitel 7.1.7).

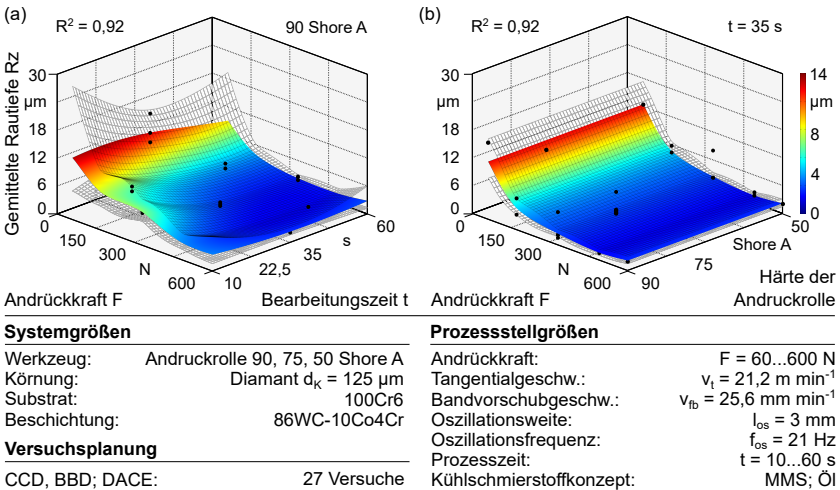


**Abbildung 7.2:** Oberflächenqualität nach 3-stufiger Prozesskette mit feiner Körnung zur Bearbeitung einer 86WC-10Co4Cr Verschleißschicht, (a) gemittelte Rautiefe  $R_z$ , (b) Oberflächentopographie

Ausgehend von diesen Ergebnissen zur Bearbeitung der Verschleißschichten wurde in den folgenden Versuchen die Prozesskette durch eine Variation der Korngröße modifiziert. Äquivalent zu den Ergebnissen aus Kapitel 5, in denen sich insbesondere die Bindungsstruktur maßgeblich für die Höhe des Zeitspanvolumens zeigte, erfolgte das Vorfinish der Verschleißschichten mit einem Finishband in elektrostatisch gerichteter Bindung und einer Korngröße von  $d_K = 125 \mu\text{m}$ . Eine Erhöhung des Korndurchmessers resultiert in einem höheren Zeitspanvolumen, so dass bereits in der ersten Prozessstufe genügend Material abgetragen wird, um oberflächennahe Fehlstellen in der Beschichtung bereits im Vorfinish zu entfernen. Da die Oberflächen-

qualität in den grundlegenden Versuchen zur Bearbeitung konventioneller Werkstoffe insbesondere von der Andrückkraft abhängig war, bildete diese auch für die Analyse der Oberflächenstrukturierung der Verschleißschutzschichten eine zu berücksichtigende Stellgröße. In Kombination mit der Prozesszeit sowie der Härte der Andrückrolle wurde die funktionale Abhängigkeit zu der generierten Oberflächentopographie beim Vorfinish analysiert. In Abhängigkeit der Härte der Andrückrolle entstehen bei gleicher Andrückkraft unterschiedlich große Kontaktzonen zwischen Werkzeug und Werkstück, die im Rahmen der Analyse ebenfalls zu berücksichtigen sind. Basierend auf unterschiedlichen Zusammensetzungen des Polyurethan-Elastomers, mit denen die Aluminiumgrundkörper der Andrückrollen beschichtet sind, ergeben sich drei unterschiedliche Härtegrade von 50, 75 und 90 Shore A.

Durch die Variation der Andrückkraft und der Prozesszeit lassen sich die in **Abbildung 7.3** dargestellten funktionalen Zusammenhänge auf die Oberflächenqualität ermitteln. Die generierte Oberflächentopographie variiert hinsichtlich der Rauheit in Abhängigkeit der Prozessparameterwerte zwischen  $R_z = 2$  und  $14 \mu\text{m}$ , wobei eine erhöhte Andrückkraft in Kombination mit einer geringen Prozesszeit von  $t < 30$  s im gesamten Wertebereich tendenziell zu einer Reduzierung der Rauheit führt. Gleiches gilt für den Einfluss der Prozesszeit in Kombination mit einer geringen Andrückkraft von  $F < 250$  N. Durch eine Erhöhung der Prozesszeit auf  $t > 30$  s sowie der Andrückkraft auf  $F > 250$  N nimmt der Einfluss einer Veränderung der Parameterwerte ab. Die Oberflächenqualität tendiert regressiv gegen einen Grenzwert von  $R_z = 2 \mu\text{m}$ .



**Abbildung 7.3:** Oberflächenqualität nach dem Vorfinish von 86WC-10Co4Cr mit Diamantkörnung  $d_K = 125 \mu\text{m}$  in Abhängigkeit (a) der Andrückkraft und Bearbeitungszeit bzw. (b) der Andrückkraft und der verwendeten Andrückrolle

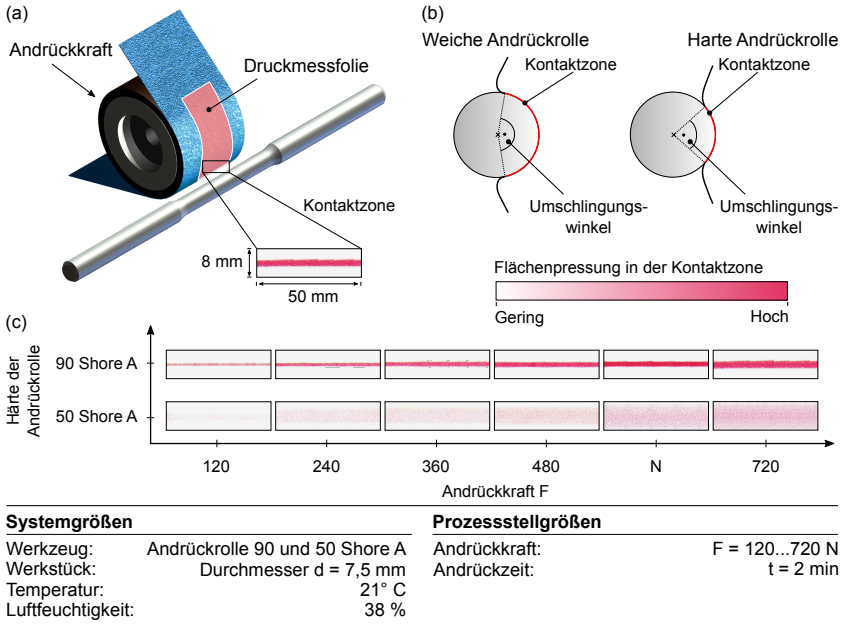
Der funktionale Zusammenhang zwischen Andrückkraft und Oberflächenqualität korreliert mit den in Kapitel 5 ermittelten Abhängigkeiten dieser Kenngrößen. Durch eine gesteigerte Andrückkraft und daraus resultierend höhere Flächenpressungen in der Kontaktzone ergibt sich eine geringere Oberflächenrauheit bei konstanter Prozesszeit bzw. Schnittgeschwindigkeit. Die Verbesserung der Oberflächenqualität durch eine erhöhte Prozesszeit ist wiederum übereinstimmend mit den bereits bekannten Zusammenhängen für Stahlwerkstoffe [Bra80, KRZ07b].

Die im Rahmen des Versuchsplans zusätzlich variierte Härte der Andrückrolle zwischen den Härtegraden 50, 75 und 90 Shore A hat auf die resultierende Oberflächenqualität nahezu keinen Einfluss. Da sich durch eine härtere Andrückrolle tendenziell eine geringere Kontaktfläche und daraus resultierend größere Flächenpressungen in der Kontaktzone zwischen Werkzeug und Werkstück ergeben, besteht hier eine widersprüchliche Aussage zum Prozessverhalten. Um die in der Kontaktzone vorliegenden Spannungsverhältnisse zu analysieren, wird im folgenden Kapitel mithilfe von Druckmessfolien die Höhe der Flächenpressung abgebildet.

### 7.1.1 Analyse der Kontaktbedingungen

Die Höhe der Andrückkraft ist immer in Abhängigkeit der geometrischen Gestalt des Werkstücks, der Härte der Andrückrolle und dem Belastungsfall zwischen Werkzeug und Werkstück auszulegen. Entscheidend für die Spanbildungsmechanismen und die sich ergebende Oberflächenstruktur ist die resultierende Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück. Mithilfe spezieller Druckmessfolien, die wie in **Abbildung 7.4** (a) dargestellt, zwischen Werkzeug und Werkstück gespannt wurden, lässt sich die Flächenpressung in der Kontaktzone auswerten. Abhängig von der Härte der Andrückrolle ergeben sich aufgrund des unterschiedlichen Verformungsverhaltens, wie in **Abbildung 7.4** (b) veranschaulicht, variiierende Kontaktzonen und einhergehend unterschiedliche Flächenpressungen. Insbesondere bei geringen Werkstückdurchmessern, wie im vorliegenden Fall, lässt sich mit einer vergleichsweise weichen Andrückrolle eine wesentlich größere Kontaktfläche bedingt durch einen größeren Umschlingungswinkel erzielen. Die Größe der Kontaktzone und die Höhe der Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück sind in Abhängigkeit von der Andrückkraft und der Härte der verwendeten Andrückrolle in **Abbildung 7.4** (d) veranschaulicht.

Anhand der Größe der Kontaktzone lassen sich sowohl die gemittelte Flächenpressung als auch der Umschlingungswinkel errechnen. Zur Berechnung der in der Kontaktzone wirkenden Flächenpressung wird vereinfachend ein über den Umfang des Werkstücks gleichmäßig wirkender Druck angenommen. Da es sich bei dem Polyurethan-Elastomer der Andrückrolle um einen nicht linearen Vorformungsverlauf handelt, ist diese Annahme zwar nicht vollständig zutreffend, bildet aber für die Vergleichbarkeit der wirkenden Flächenpressungen unter Verwendung unterschiedlich harter Andrückrollen einen Anhaltswert. Ausgehend von der durch die geometrische Gestalt der Andrückrolle mit  $b_{WZ} = 50$  mm vorgegebenen Breite der Kontaktzone sowie



**Abbildung 7.4:** Flächenpressung in der Kontaktzone in Abhängigkeit der Andrückkraft und der Härte der Andrückrolle, (a) Versuchsaufbau, (b) schematische Darstellung der Größe der Kontaktzone, (c) funktionaler Zusammenhang zwischen Andrückkraft, Härte der Andrückrolle und Flächenpressung

der variierenden Höhe  $h$ , mit der die Rolle flächig am Werkstück anliegt, ermöglicht der funktionale Zusammenhang

$$p_N = \frac{F}{A} = \frac{F}{b_{WZ} * h} \quad (7.1)$$

eine näherungsweise Berechnung der wirkenden Flächenpressungen.

Während sich bei Verwendung der weichen Andrückrolle mit einer Härte von 50 Shore A Flächenpressungen zwischen  $p_N = 1$  und  $2 \text{ N mm}^{-2}$  ergeben, lässt sich bei Verwendung der harten Andrückrolle mit 90 Shore A eine wesentlich höhere Druckspannung von  $p_N = 2,5$  bis  $6 \text{ N mm}^{-2}$  realisieren. Unter Berücksichtigung weiterer Härtegrade des Werkzeugs ermöglicht die gezielte Variation der Andrückkraft sowie der Härte der Andrückrolle eine angepasste Größe der Kontaktzone unabhängig von der wirkenden Druckspannung. Die Variationsmöglichkeiten hinsichtlich der Kontaktfläche wird im Folgendem am Beispiel des Umschlingungswinkels analysiert. Der Umschlingungswinkel berechnet sich nach

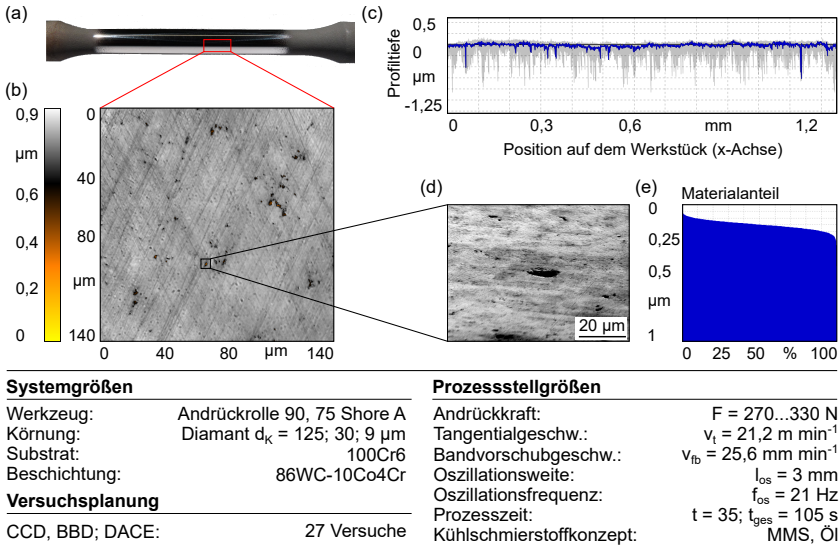
$$\alpha_U = \frac{h}{\pi d_{WS}} 360^\circ \quad (7.2)$$

Ausgehend von einem Werkstückradius von  $d_{WS} = 7,5$  mm und einer variabel einstellbaren Höhe der Kontaktfläche von  $h = 1$  bis 8 mm lassen sich Umschlingungswinkel von  $\alpha_U = 15^\circ$  bis  $122^\circ$  realisieren. Ein größerer Umschlingungswinkel ist gleichbedeutend mit einer längeren Eingriffszeit der Schneidkörner, die, wie bereits dargestellt, zu einer Verbesserung der Oberflächenqualität führt. Die Andrückkraft und die daraus resultierende Flächenpressung wirkt sich bei einer Steigerung ebenfalls positiv auf die Oberflächenqualität aus. Durch die gegenläufige Wechselwirkung der erhöhten Eingriffszeit resultierend aus dem größeren Umschlingungswinkel in Kombination mit der geringeren Flächenpressung in der Kontaktzone werden zumindest für diesen Werkstückdurchmesser und das verwendete Finishband die Auswirkungen hinsichtlich der resultierenden Oberflächenqualität aufgehoben.

### 7.1.2 Gestufte Prozessführung

Die bisherigen Betrachtungen und Ergebnisse wurden in weiteren Versuchen genutzt, um eine effiziente gestufte Prozessstrategie bei der Endbearbeitung der Verschleißschichten durch das Finishen zu entwickeln. Als Erweiterung der bisherigen Analysen bestand die Zielsetzung in der Fertigung einer Oberflächentopographie, die sich neben einer geringen Rauheit durch keine Artefakte der vorherigen Prozessstufe auszeichnet. Zur Erzielung einer möglichst hohen Oberflächenqualität wurde ein dreistufiger Finishprozess mit sukzessive abnehmender Korngröße genutzt. Die Andrückkraft variierte in Abhängigkeit der Prozessstufe nur geringfügig zwischen  $F = 270$  und  $300$  N auf vergleichsweise hohem Niveau, sodass durch die ebenfalls hohen Flächenpressungen ein effizienter Abtrag der Beschichtung gewährleistet war. Für die Prozesszeit wurde für jede der drei Prozessstufen  $t = 35$  s gewählt. Aufgrund des geringen Werkstückdurchmessers von  $d_{WS} = 7,5$  mm ergibt sich bei dieser Prozessstrategie eine maximale Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t = 21,2$  m min<sup>-1</sup>.

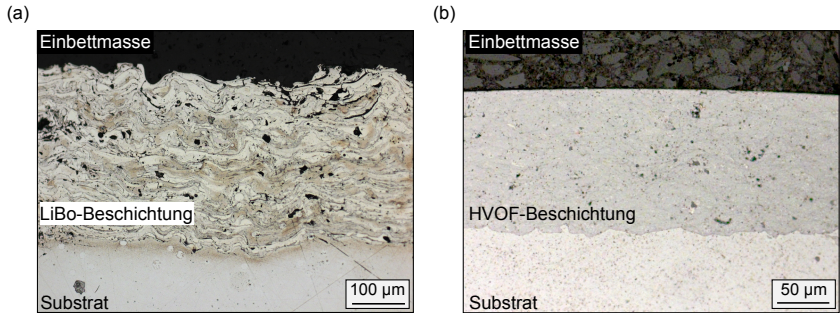
Wie in **Abbildung 7.5** dargestellt, lässt sich durch den dreistufigen Finishprozess die ursprünglich hohe Ausgangsrauheit von  $R_z = 10$  µm auf eine gemittelte Rautiefe von  $R_z = 0,3$  µm reduzieren. Bereits in einer Profiltiefe von  $Pt < 0,5$  µm liegt nahezu der vollständige Materialanteil vor. Vereinzelt ergeben sich im Rauheitsprofil, dargestellt in **Abbildung 7.5 (b)**, einzelne bis zu  $Pt = 0,75$  µm tiefe Riefen, die allerdings nicht aus dem Finishprozess resultieren.



**Abbildung 7.5:** Oberflächentopographie nach 3-stufigem Finishprozess nach [BGTN13], (a) Gefiniste WC-CoCr-Probe, (b) Weißlichtaufnahme der Oberflächentopographie, (c) Rauheitsprofil, (d) REM-Aufnahme einer Fehlstelle, (e) Materialanteil

Neben dem Einfluss der Prozessstrategie beim Finishen müssen bei der Analyse der Oberflächentopographie bei derart geringen Rauheiten zusätzlich weitere Aspekte betrachtet werden, die ebenfalls Einfluss auf das Prozessergebnis nehmen. Thermisch gespritzte Beschichtungen sind, wie in **Abbildung 7.6** anhand von Querschliffen dargestellt, durch eine prozessbedingte Porosität gekennzeichnet. Abhängig von dem Beschichtungswerkstoff und dem zur Beschichtung genutzten Verfahren ergibt sich eine Porosität zwischen 0,01 und 15 Prozent. Im Gegensatz zum Lichtbogenspritzen zeichnet sich das HVOF-Verfahren durch eine vergleichsweise geringe Porosität bei ebenfalls geringer Porengröße aus.

Es gibt durchaus Anwendungsfälle, für die eine erhöhte Porosität zielführend sein kann. Bei einer geschmierten tribologischen Beanspruchung können die oberflächlichen Poren als Ölreservoir fungieren und auf diese Weise einen trockenen Kontakt der sich kontaktierenden Oberflächen verhindern. Durch die beim Beschichtungsprozess angewandten Stellgrößen lässt sich die Porosität in gewissen Grenzen kontrolliert einstellen [How94]. Die Poren werden im Rahmen der spanenden Bearbeitung freigelegt und zeichnen sich in Rauheitsmessungen, ähnlich wie die eingebrachten Honriefen, durch Profiltäler aus. Da sich die Ausprägung dieser Profiltäler allerdings nicht durch die spanende Bearbeitung beeinflussen lässt, ist für eine zielgerichtete Auslegung der Struktur zusätzlich die Berücksichtigung der funktionalen Zusammenhänge zwischen Stell- und Zielgrößen beim Beschichten erforderlich.



**Abbildung 7.6:** Querschliff einer (a) WSC-Fe-Beschichtung, die durch Lichtbogenspritzen (Arc-Spraying) aufgebracht wurde und einer (b) HVOF-gespritzten WC-CoCr-Beschichtung

Des Weiteren besteht die Möglichkeit, dass einzelne WC-Partikel aus der Kobalt-Matrix ausbrechen und nicht zerspannt werden. Durch den Abtrag der im Vergleich weicheren Bindungsphase reduzieren sich die Haltekräfte der WC-Partikel, sodass sich diese aus der Bindung lösen [Edi97, MMR09, CH10]. Die Qualität der Oberflächentopographie lässt sich daher nicht weiter durch folgende Prozessstufen mit feinerer Körnung steigern. Eine detaillierte Analyse der Spanbildungsmechanismen erfolgt in Kapitel 7.1.7.

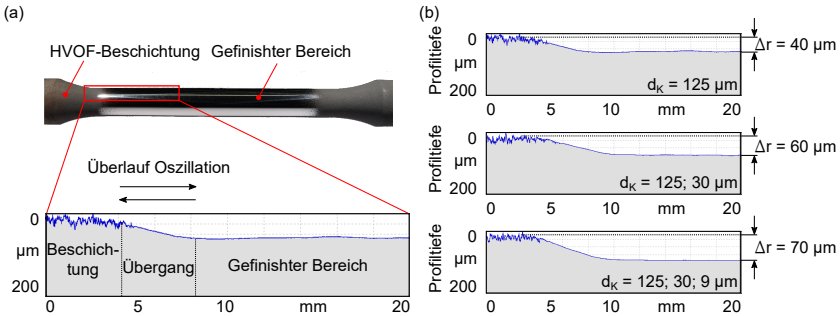
### 7.1.3 Zeitspanvolumen

Aufgrund des variierenden Einflusses der Ausgangstopographie auf die Qualität der Endbearbeitung, der sich insbesondere bei der gestuften Bearbeitung mit geringer Korngröße zeigte, wurde mithilfe von Konturmessungen die Abtragsleistung der einzelnen Finishbänder bestimmt. Durch die partielle Bearbeitung der Verschleißschutzschichten ergibt sich aus der Differenz zwischen Ausgangsdurchmesser und dem Durchmesser nach der Bearbeitung das abgetragene Werkstoffvolumen. Für die Untersuchungen wurden wiederum die Werkstücke mit geringem Durchmesser von  $d_{WS} = 7,5$  mm genutzt. Der geringe Durchmesser garantierte eine hohe Anzahl an Überläufen, sodass im Rahmen der Prozesszeit von  $t = 35$  s für jede der drei Prozessstufen die ursprüngliche Topographie resultierend aus der vorgelagerten Prozessstufe abgetragen wird.

Die im Rahmen der Bearbeitung erzielten Konturveränderungen sind in **Abbildung 7.7** veranschaulicht. Durch das Vorfinish wurde eine Verringerung im Durchmesser von  $\Delta d = 80$  µm erzielt. Dies entspricht bei einer Eingriffsbreite von  $b_{WZ} = 50$  mm einem zerspannten Werkstoffvolumen von  $V_w \approx 47$  mm<sup>3</sup>. Unter Berücksichtigung der Prozesszeit ergibt sich ein Zeitspanvolumen von  $Q_w < 1,343$  mm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>. Übertragen auf eine Werkzeugbreite von  $b_{WZ} = 50$  mm ergibt sich ein bezogenes Zeitspanvolumen von weniger als  $Q'_w = 0,03$  mm<sup>3</sup> mm<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>. Im Vergleich dazu erreichen

Schleifprozesse bei der Bearbeitung von Hartmetallen bezogene Zeitspanvolumina von  $Q'_w > 10 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1} \text{ s}^{-1}$  [Bre96, Hey15].

Durch die Verwendung von kleineren Korngrößen reduziert sich das Zerspanvolumen. Bei Verwendung einer Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  ergibt sich eine Reduzierung des Durchmessers von  $\Delta d = 40 \mu\text{m}$  und bei einer Korngröße von  $d_K = 9 \mu\text{m}$  werden ca.  $\Delta d = 20 \mu\text{m}$  abgetragen. Dies entspricht bezogenen Zeitspanvolumina von  $Q'_w < 0,014 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1} \text{ s}^{-1}$  bzw.  $Q'_w < 0,008 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1} \text{ s}^{-1}$ .



#### Systemgrößen

Werkzeug: Andrückrolle 75 Shore A  
 Körnung: Diamant  $d_K = 125, 30, 9 \mu\text{m}$   
 Substrat: 100Cr6  
 Beschichtung: 86WC10Co-4Cr

#### Versuchsplanung

CCD, BBD, DACE 27 Versuche

#### Prozessstellgrößen

Andrückkraft:  $F = 270 \dots 330 \text{ N}$   
 Tangentialgeschw.:  $v_t = 21,2 \text{ m min}^{-1}$   
 Bandvorschubgeschw.:  $v_{fb} = 25,6 \text{ mm min}^{-1}$   
 Oszillationsweite:  $l_{os} = 3 \text{ mm}$   
 Oszillationsfrequenz:  $f_{os} = 21 \text{ Hz}$   
 Prozesszeit:  $t = 35 \text{ s}$   
 Kühlschmierstoffkonzept: MMS; Öl

**Abbildung 7.7:** Zeitspanvolumen in Abhängigkeit der Korngröße, (a) Konturmessung an beschichteten zylindrischen Proben, (b) Verringerung des Bauteilradius für jeden Prozessschritt

Durch eine Vergrößerung des Durchmessers, der bearbeitet wird, sinkt der durchmesserbezogene Abtrag aufgrund der größeren Fläche. Abhängig von der gewünschten Oberflächenstruktur ist dieser Zusammenhang bei der Auslegung der einzelnen Prozessstufen zu berücksichtigen. Wird vereinfachend von einem 100-prozentigen Materialanteil in der Werkstückrandzone ausgegangen, ergibt sich für Wellen mit einem Durchmesser von  $d = 45 \text{ mm}$  folgender Zusammenhang zwischen dem zerspannten Volumen und der Rautiefe:

Ausgehend von einer Profiltiefe von  $Pt = 10 \mu\text{m}$ , die mindestens zerspannt werden muss, um die ursprüngliche Rautiefe aus dem Beschichtungsprozess abzutragen, entspricht dies einem Volumen von  $V_w \approx 90 \text{ mm}^3$ . Wird das für die erste Prozessstufe ermittelte Zeitspanvolumen  $Q_w \approx 1,3 \text{ mm}^3 \text{ s}^{-1}$  gegenübergestellt, müsste die Prozesszeit annähernd doppelt so hoch ausfallen, um die ursprüngliche Struktur abzutragen.

Im folgenden Kapitel werden daher durch die Variation der Tangentialgeschwindigkeit  $v_t$ , der Oszillationsgeschwindigkeit des Werkzeugs  $v_{os}$  und der Bandvorschubge-

schwindigkeit  $v_{fb}$  optimierte Prozessstrategien entwickelt, die eine erhöhte Effizienz des Finishprozesses ermöglichen.

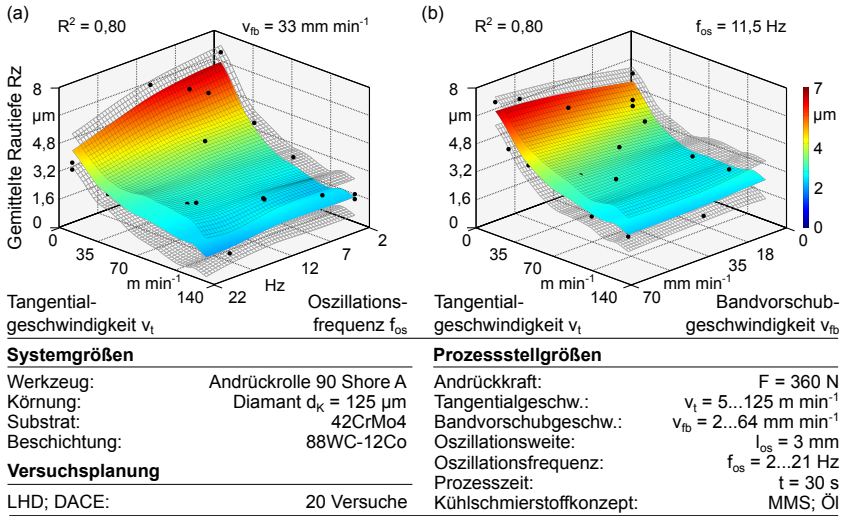
#### 7.1.4 Einfluss einzelner Schnittgeschwindigkeitskomponenten auf die Endbearbeitung

Da im Rahmen der Versuche zum Einfluss der Andrückkraft, der Bearbeitungsdauer und der Härte der Andrückrolle aufgrund des geringen Werkstückdurchmessers und der beschränkten Drehzahl der Drehmaschine lediglich geringe Tangentialgeschwindigkeiten von  $v_t < 22 \text{ m min}^{-1}$  möglich waren, wurde für die folgenden Untersuchungen eine Werkstückkontur mit größerem Durchmesser von  $d = 45 \text{ mm}$  gewählt. Die Anpassung des Werkstückdurchmessers ermöglichte eine Variation der Tangentialgeschwindigkeit zwischen  $v_t < 5$  bis  $125 \text{ m min}^{-1}$  bei einer konstanten Andrückkraft von  $F = 360 \text{ N}$ . In der ersten Prozessstufe, die mit einer Korngröße von  $d_K = 125 \mu\text{m}$  ausgeführt wurde, zeigte sich der in **Abbildung 7.8** dargestellte Einfluss von Tangentialgeschwindigkeit und zusätzlich variiertes Oszillationsfrequenz auf das Bearbeitungsergebnis. Basierend auf der Oszillationsweite von  $l_{os} = 3 \text{ mm}$  in Kombination mit differierenden Oszillationsfrequenzen von  $f_{os} = 2$  bis  $21 \text{ Hz}$ , variierte die Axialgeschwindigkeit zwischen  $v_a = 1,13$  und  $11,88 \text{ m min}^{-1}$ . Die resultierende Schnittgeschwindigkeit ergibt sich als vektorielle Summe der beiden Geschwindigkeitsvektoren  $\vec{v}_t$  und  $\vec{v}_a$ :

$$v_c = \sqrt{v_t^2 + v_a^2} \quad (7.3)$$

Anhand der Zielgröße der gemittelten Rautiefe  $Rz$  zeigt sich der erhebliche Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die resultierende Oberflächenqualität. Durch die Variation der beiden Stellgrößen Tangentialgeschwindigkeit und Oszillationsgeschwindigkeit bei konstanter Andrückkraft und Prozesszeit ließen sich Oberflächenqualitäten zwischen  $Rz = 1,74$  und  $7 \mu\text{m}$  erzielen. Sowohl die Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit als auch die Erhöhung der Axialgeschwindigkeit durch eine gesteigerte Oszillationsfrequenz ermöglichten höhere Oberflächenqualitäten durch geringere Rauheiten. Bei geringen Tangentialgeschwindigkeiten hat die Oszillationsgeschwindigkeit einen verhältnismäßig größeren Anteil an der Schnittgeschwindigkeit. Ab einer Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t = 50 \text{ m min}^{-1}$  ergibt sich im Rahmen des Modells keine signifikante Veränderung der gemittelten Rautiefe durch eine Variation der Oszillationsgeschwindigkeit. Wird die Tangentialgeschwindigkeit reduziert, steigt der Einfluss der Oszillationsfrequenz und ermöglicht bei einer geringen Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t < 35 \text{ m min}^{-1}$  eine Reduzierung der Rautiefe. Durch die Variation zwischen  $f_{os} = 2$  bis  $21 \text{ Hz}$  beträgt diese Reduzierung bis zu  $\Delta Rz = 3,2 \mu\text{m}$  bei gleichbleibend geringer Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t = 5 \text{ m min}^{-1}$ . Eine weitere Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit im Wertebereich  $v_t > 70 \text{ m min}^{-1}$  hat einen vergleichsweise geringen Einfluss auf die Reduzierung der Rautiefe. Diese tendiert äquivalent zur Analyse in Kapitel 7.1 regressiv gegen einen Grenzwert von  $Rz = 2 \mu\text{m}$ . Dieser Grenzwert ist nicht durch die gewählten Stellgrößenwerte bestimmt sondern

vielmehr durch die Beschaffenheit des Werkzeugs hinsichtlich Kornart, Korngröße und Bindungsstruktur.



**Abbildung 7.8:** Einfluss einzelner Schnittgeschwindigkeitskomponenten auf die resultierende Oberflächenqualität beim Vorfinish von 88WC-12Co mit Diamantkörnung  $d_K = 125 \mu\text{m}$ , (a) Tangentialgeschwindigkeit und Oszillationsfrequenz, (b) Tangentialgeschwindigkeit und Bandvorschub

In Abbildung 7.8 (b) ist der Einfluss der Vorschubgeschwindigkeit des Finishbandes in Abhängigkeit der Tangentialgeschwindigkeit dargestellt. Die Bandvorschubgeschwindigkeit wurde in dem raumfüllenden Versuchsplan mit einer Variation von  $v_{fb} = 2$  bis  $64 \text{ mm min}^{-1}$  vorgesehen. Verglichen mit dem Einfluss der Tangentialgeschwindigkeit zeichnet sich die Variation der Bandvorschubgeschwindigkeit durch einen wesentlich geringeren Einfluss auf die resultierende Oberflächenqualität aus. Lediglich bei geringen Tangentialgeschwindigkeiten von  $v_t < 35 \text{ m min}^{-1}$  ermöglicht eine geringere Bandvorschubgeschwindigkeit tendenziell bessere Oberflächenqualitäten, wobei die Unterschiede durch die Variation des Bandvorschubs bis zu  $\Delta Rz = 2 \mu\text{m}$  betragen.

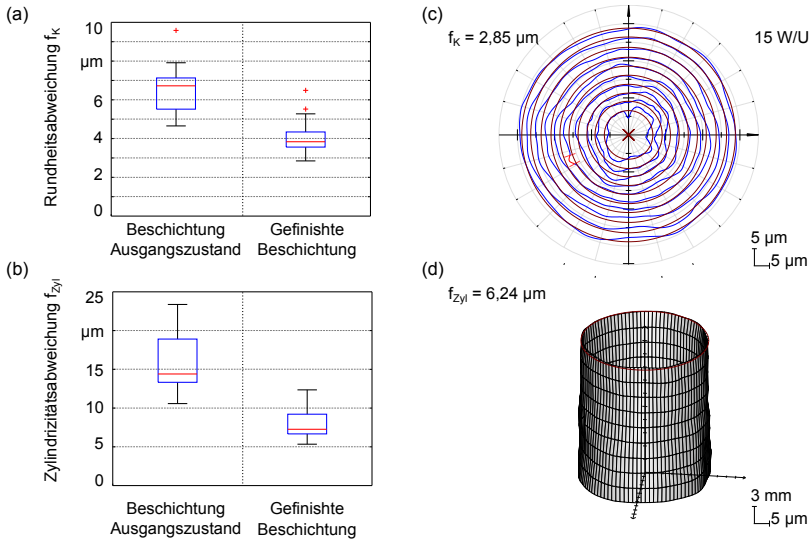
Die Ergebnisse der Analyse zum Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die Oberflächenqualität korrelieren mit dem Einfluss der Prozesszeit. Eine geringe Schnittgeschwindigkeit bedingt eine vergleichsweise kleinere Fläche, die während eines Zeitinkrements zerspannt wird. Ausgehend von der erhöhten Ausgangsrauheit der Verschleißschutzschichten im Vergleich zu vorgeschliffenen Werkstücken ist, wie bereits in Kapitel 7.1 dargestellt, eine gewisse Prozesszeit erforderlich, um die raue Ausgangstopographie abzutragen.

Durch die vergleichbar hohe Oberflächenqualität ab einer Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t = 70 \text{ m min}^{-1}$  unabhängig von der Oszillationsfrequenz ergibt sich hinsichtlich des erzielbaren Honwinkels ein Bereich von  $\alpha_{h \text{ min}} = 1^\circ$  bis  $\alpha_{h \text{ max}} = 19,3^\circ$  bei äquivalenter Oberflächenqualität. Hinsichtlich des spezifischen Belastungsfalls in der späteren Anwendung kann dieser gezielt eingestellt werden. Durch eine Erhöhung der Oszillationsweite von  $l_{os} = 3 \text{ mm}$  auf  $5 \text{ mm}$  ließe sich die Axialgeschwindigkeit bei Nutzung der maximalen Frequenz auf  $v_a = 19,8 \text{ m min}^{-1}$  erhöhen. Dies würde eine Vergrößerung des Honwinkels auf  $\alpha_{h \text{ max}} = 31,6^\circ$  bei einer Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t = 70 \text{ m min}^{-1}$  ermöglichen.

Unter Berücksichtigung des Bandvorschubs lässt sich der Verschleiß der Körner während des Prozesses beeinflussen. Bei geringem Bandvorschub sind die Körner einer längeren Eingriffszeit ausgesetzt, die wiederum zu einem höheren Verschleiß der Schneidkörner führt. Der Verschleiß der Kornspitzen resultiert in einer geringeren Furchung der Werkstückoberfläche, sodass eine geringere Riefentiefe erzeugt wird. Dieser Effekt ist insbesondere bei geringen Tangentialgeschwindigkeiten zu beobachten. Ein zu hoher Verschleiß des Finishbandes ist hingegen über den gesamten Wertebereich nicht festzustellen. Das Band ist bei keiner Stellgrößenkombination überlastet, sodass kontinuierlich die gleichen Zerspanungsbedingungen vorliegen und die Bindung in der Lage ist, die Körner lange genug in der Bindung zu halten, ohne dass sie vorzeitig ausbrechen. Dies würde äquivalent zur Zusetzung der Bindung mit Abrasivpartikeln zu einem eingeschränkten Materialabtrag führen.

Neben der angepassten Oberflächentopographie ist eine hohe Formgenauigkeit des Werkstücks Voraussetzung, um die Vorteile einer strukturierten Oberfläche für den Kontakt im tribologischen System nutzen zu können. Dazu wurde die Zylinderform der Wellenabsätze vor und nach der Finishbearbeitung vermessen. Die Charakterisierung der Formgenauigkeit erfolgte, wie in **Abbildung 7.9** dargestellt, anhand der resultierenden Rundheitsabweichung als auch des Zylindrizitätsfehlers. Ausgehend von einer initialen Rundheitsabweichung von  $f_K = 4,7$  bis  $8 \mu\text{m}$  ermöglichte die Finishbearbeitung eine Reduzierung auf ein Intervall zwischen  $f_K = 2,9$  und  $5,4 \mu\text{m}$ . Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aller Absätze reduzierte sich der Median der Rundheitsabweichungen von  $f_K = 6,7 \mu\text{m}$  auf  $f_K = 3,8 \mu\text{m}$ . Zusätzlich zu der geringeren Rundheitsabweichung, die sich definitionsgemäß nur auf einzelne Kreisabschnitte des Wellenabsatzes bezieht, wird ebenfalls eine Verbesserung der gesamten Form des zylindrischen Wellenabsatzes ermöglicht.

Neben einer deutlichen Verbesserung des Medians der Zylindrizitätsfehler von  $f_{Zyl} = 14,4 \mu\text{m}$  auf  $f_{Zyl} = 7,3 \mu\text{m}$  reduzierte sich ebenfalls die Streuung. Ausgehend von einem Zylindrizitätsfehler zwischen  $f_{Zyl} = 11$  und  $23,4 \mu\text{m}$  der beschichteten Absätze ermöglichte die Finishbearbeitung eine Reduzierung auf ein Intervall von  $f_{Zyl} = 5,3$  bis  $12,4 \mu\text{m}$ . Für beide Kenngrößen ließ sich allerdings kein funktionaler Zusammenhang zu den Einflussgrößen Tangentialgeschwindigkeit, Oszillationsgeschwindigkeit und Bandvorschub ermitteln. Der Prozess des Kurzhubhonens ist in der Literatur allgemein als formverbessernd beschrieben. Durch die kraftgeregelte Zustellung der Andrückrolle

**Systemgrößen**

Werkzeug: Andrückrolle 90 Shore A  
 Körnung: Diamant  $d_k = 125 \mu\text{m}$   
 Substrat: 42CrMo4  
 Beschichtung: 88WC-12Co

**Versuchsplanung**

LHD; DACE 20 Versuche

**Prozessstellgrößen**

Andrückkraft:  $F = 360 \text{ N}$   
 Tangentialgeschw.:  $v_t = 5 \dots 125 \text{ m min}^{-1}$   
 Bandvorschubgeschw.:  $v_{fb} = 2 \dots 64 \text{ mm min}^{-1}$   
 Oszillationsweite:  $l_{os} = 3 \text{ mm}$   
 Oszillationsfrequenz:  $f_{os} = 2 \dots 21 \text{ Hz}$   
 Prozesszeit:  $t = 30 \text{ s}$   
 Kühlschmierstoffkonzept: MMS; Öl

**Abbildung 7.9:** Formgenauigkeit der beschichteten und gefinigten Wellenabsätze, (a) Rundheitsabweichung, (b) Zylindrizitätsfehler, (c) Rundheitsmessschrieb nach dem Finishen, (d) gefinihte Zylinderform

lässt sich keine spezifische Kontur erzielen. Diese muss in Vorbearbeitungsprozessen erzeugt werden [Rud08]. Der in Abbildung 7.9 (c-d) beispielhaft veranschaulichte Rundheitsmessschrieb sowie die dargestellte Zylinderform belegen, dass es sich um keine systematischen Formabweichungen in Form einer Konizität oder Koaxialität handelt. Eine zylindrische Ausgangsform ist insbesondere für folgende Prozessstufen Voraussetzung, um eine gleichmäßige Bearbeitung zu ermöglichen. Durch den geringeren Abtrag aufgrund der feineren Körnung in folgenden Prozessstufen ist das Potential zur Verbesserung der Formgenauigkeit zunehmend eingeschränkt.

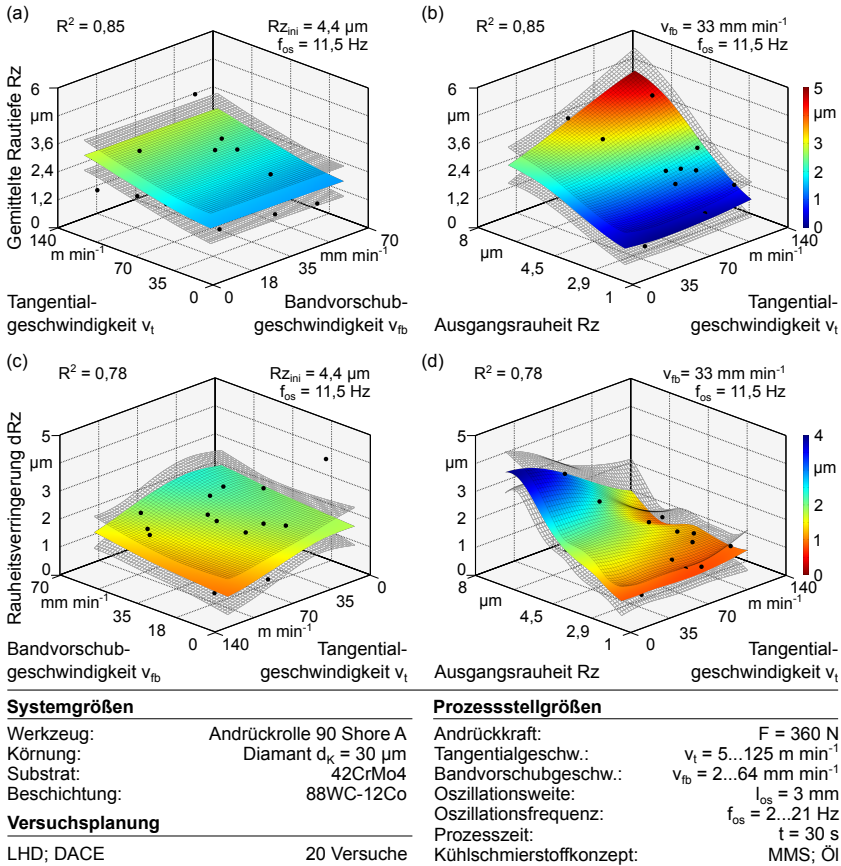
### 7.1.5 Einfluss der Ausgangsrauheit auf die resultierende Oberflächenstruktur

Sowohl die erzielbare Oberflächenqualität als auch das Zeitspanvolumen sind von der Bindung und Korngröße des Finishbandes abhängig. Durch eine feinere Körnung lassen sich aufgrund des geringeren Schneideneingriffs tendenziell bessere Oberflächen mit

geringeren Rauheiten generieren. Das Zeitspanvolumen nimmt bei feinerer Körnung aufgrund des geringeren Schneideneingriffs und des geringeren Spanraums ab. Um eine hohe Oberflächenqualität bei vertretbaren Prozesszeiten zu realisieren, wird bei der Endbearbeitung durch das Honen daher oft eine gestufte Bearbeitung mit sukzessive abnehmender Korngröße durchgeführt. Die Anzahl der Prozessstufen und die Wahl der Stellgrößenwerte sind abhängig von der angestrebten Oberflächentopographie. Durch die gezielte Abstimmung der einzelnen Prozessstufen ist es möglich, sowohl plateauartige Oberflächen zu generieren sowie Oberflächen mit geringen Profilliefen und einer geringen Oberflächenrauheit. Um die Übertragbarkeit der bereits ermittelten Zusammenhänge für das Vorfinish mit grobem Korn von  $d_K = 125 \mu\text{m}$  und elektrostatisch gerichtetem Finishband auf Finishbänder mit schwerkraftgestreuten Bindungen und geringeren Korngrößen zu analysieren, wurde der gleiche Versuchsplan in der zweiten Prozessstufe mit einem Finishband mit einer Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  genutzt. Die in der ersten Prozessstufe generierte Oberflächenrauheit bildet eine zusätzliche Einflussgröße für die Auswertung der funktionalen Zusammenhänge zwischen Stell- und Zielgrößen. Die Ausgangsrauheit variierte zwischen  $R_z = 2$  bis  $8 \mu\text{m}$ .

Durch die zweite Prozessstufe mit einer Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  lassen sich Oberflächenqualitäten in einem Intervall zwischen  $R_z = 0,94$  bis  $4,6 \mu\text{m}$  erzielen. Der Einfluss von Tangentialgeschwindigkeit und Bandvorschubgeschwindigkeit auf die resultierende Rautiefe ist, wie in **Abbildung 7.10** (a) dargestellt, wesentlich geringer als beim Vorfinish. Bemerkenswert in diesem Zusammenhang ist allerdings, dass eine erhöhte Tangentialgeschwindigkeit tendenziell in größeren Rautiefen resultiert. Dieses Ergebnis steht damit in klarem Gegensatz zu den Ergebnissen beim Vorfinish. Durch die Berücksichtigung der Ausgangsrauheit in Kombination mit der Tangentialgeschwindigkeit als Einflussgröße ergibt sich der in **Abbildung 7.10** veranschaulichte Zusammenhang. Ausgehend von einer hohen Ausgangsrauheit sind in Kombination mit einer hohen Tangentialgeschwindigkeit nur geringfügige Verbesserungen auf eine Oberflächenqualität von  $R_z = 4,6 \mu\text{m}$  möglich. Eine reduzierte Tangentialgeschwindigkeit hingegen führt auch bei erhöhter Ausgangsrauheit zu einem vergleichsweise guten Oberflächenfinish. Dieser funktionale Zusammenhang nimmt mit geringerer Ausgangsrauheit allerdings ab. Bei geringer Ausgangsrauheit führt sowohl eine geringe als auch eine hohe Tangentialgeschwindigkeit zu einer hohen Oberflächenqualität.

Um diese komplexen Einflüsse detaillierter zu betrachten, ist in **Abbildung 7.10** (c-d) zusätzlich der Einfluss der Stellgrößen auf die Reduzierung der Rautiefe dargestellt. Die Zielgröße ergibt sich aus der Differenz von resultierender Rautiefe und Ausgangsrauheit. Das Modell zum Einfluss der Tangentialgeschwindigkeit und der Höhe des Bandvorschubs auf die Reduzierung der Rautiefe belegt, dass die erzielbare Verbesserung der Oberflächenqualität in dieser Prozessstufe nicht nur von der Tangentialgeschwindigkeit abhängig ist sondern zusätzlich auch von der Bandvorschubgeschwindigkeit. Diese beiden Stellgrößen sind gezielt aufeinander abzustimmen, um eine frühzeitige Zusetzung des Finishbandes zu verhindern. Bei hoher Tangentialgeschwindigkeit und geringem Bandvorschub ist das Finishband mit einer Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  überlastet und



**Abbildung 7.10:** Oberflächenqualität nach 2-stufiger Finishbearbeitung von 88WC-12Co mit Diamantkörnung  $d_K = 125$  und  $30 \mu\text{m}$  in Abhängigkeit der (a) Tangential- und Bandvorschubgeschwindigkeit sowie der (b) Ausgangsrauheit und Tangentialgeschwindigkeit. Reduzierung der Rautiefe in Abhängigkeit der (a) Bandvorschub- und Tangentialgeschwindigkeit sowie der (d) Ausgangsrauheit und Tangentialgeschwindigkeit

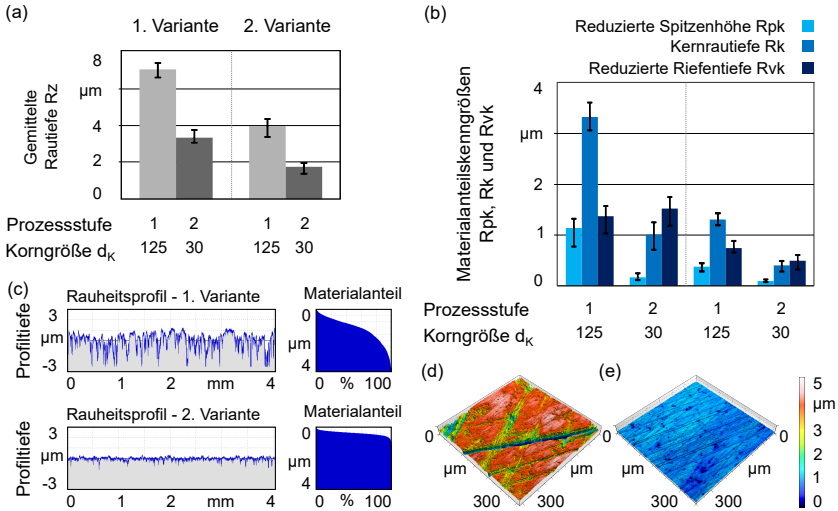
ermöglicht keine effiziente Zerspaltung mehr. Insbesondere bei schwerkraft-gesteuerten Finishbändern entstehen teilweise übereinanderliegende Kornschichten. Der in diesen Bereichen reduzierte Spanraum setzt sich bei gesteigerter Schnittgeschwindigkeit bzw. reduziertem Bandvorschub zu und verringert die Korneindringtiefe und damit das zerspante Werkstoffvolumen. Dies bedingt eine geringere Verbesserung der Oberflächenqualität [Hah13]. Da der Prozess mit Kühlschmierstoff durchgeführt wurde, besteht ebenso die Gefahr, dass durch eine zu hohe Tangentialgeschwindigkeit die

Schneidkörner aufgrund der Bildung eines trennenden hydrodynamischen Schmierfilms außer Kontakt kommen [Key73]. Die reduzierte Zerspanleistung bedingt einen unzureichenden Abtrag der Oberflächenstruktur und resultiert in Artefakten, die aus der ursprünglichen Oberflächenstruktur erhalten bleiben.

Hauptsächlich entscheidend für die Qualität der Oberfläche nach dem zweistufigen Finish ist allerdings die Vorbearbeitung. Liegt hier eine hohe Ausgangsrauheit vor, ist es nicht möglich, diese bei vergleichbarer Prozesszeit auf einen angestrebten niedrigen Wert zu reduzieren. Der große Einfluss der Ausgangsqualität ist für die analysierte Prozessstrategie vor allem dadurch bedingt, dass die Korngröße der zweiten Prozessstufe wesentlich geringer als die der Vorbearbeitung ist. Zudem zeichnet sich die Bindungsstruktur des Finishbandes in der zweiten Prozessstufe durch regellos verteilte Schneidkörner aus, sodass ein geringeres Zeitspanvolumen realisiert wird. Dies bietet allerdings den Vorteil, gezielt Plateau-Strukturen generieren zu können.

In **Abbildung 7.11** ist zusätzlich zu der absoluten Rauheit der Einfluss der Prozessstrategie auf die Oberflächentopographie sowie die resultierenden Materialanteile anhand von zwei Beispieloberflächen veranschaulicht. Um ausschließlich den Einfluss der aus der ersten Prozessstufe resultierenden Struktur zu analysieren, wurden Oberflächen ausgewählt, die sich durch ähnliche Prozessparameterwerte in der zweiten Finishstufe auszeichneten. Die aus der ersten Prozessstufe resultierenden Oberflächen mit einer Ausgangsrauheit von  $R_z = 4$  und  $7 \mu\text{m}$  wurden im Folgenden mit einer Diamantkorngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  bearbeitet. Trotz der unterschiedlichen Ausgangsrauheit zeichnen sich beide Oberflächen, wie in **Abbildung 7.11 (b)** dargestellt, nach der ersten Prozessstufe durch eine äquivalente Verteilung der einzelnen Materialanteilskenngößen aus. In beiden Fällen ist die Größe der Kernrautiefe im Vergleich zu den anderen beiden Kenngrößen dominierend. Sowohl die Profilspitzen als auch die Profiltriefen sind durch einen wesentlich geringeren Anteil gekennzeichnet.

Ausgehend von einer Vorbearbeitung mit einer gemittelten Rautiefe von  $R_z = 7 \mu\text{m}$  wird durch die anschließende Bearbeitung mit feinerer Körnung lediglich eine Reduzierung der Rauheit auf  $R_z = 3,5 \mu\text{m}$  erzielt, während eine geringere Ausgangsrauheit von  $R_z = 4 \mu\text{m}$  durch die zweite Prozessstufe bei vergleichbaren Prozessparameterwerten eine Verbesserung der Oberflächenqualität auf eine gemittelte Rautiefe  $R_z < 2 \mu\text{m}$  ermöglicht. Infolge der zweiten Finishstufe werden bei beiden Oberflächen insbesondere die Profilspitzen abgetragen, sodass die Oberflächen ungeachtet des Ausgangszustands durch eine Spitzenhöhe von  $R_{pk} < 0,1 \mu\text{m}$  gekennzeichnet sind. Der wesentliche Unterschied beider Profile besteht in der Kernrautiefe sowie der Riefentiefe. Während sich bei der ersten Variante die hohe Kernrautiefe von  $R_k < 3 \mu\text{m}$  auf einen Wert von  $R_k = 1 \mu\text{m}$  reduzieren lässt, ergibt sich bei der Riefentiefe praktisch keine Änderung in der Ausprägung der Profiltriefen. Die Profiltriefen bleiben, wie in **Abbildung 7.11 (c)** anhand der Rauheitsprofile veranschaulicht, nahezu vollständig erhalten. Im Vergleich dazu lässt sich bei geringer Ausgangsrauheit neben einer erheblichen Reduzierung der ohnehin schon geringen Ausgangs-Kernrautiefe von  $R_k = 1,2 \mu\text{m}$  auf  $R_k < 0,4 \mu\text{m}$  ebenfalls eine Verringerung der Riefentiefe von  $R_{vk} = 0,8 \mu\text{m}$  auf

**Systemgrößen**

Werkzeug: Andrückrolle 90 Shore A  
 Körnung: Diamant  $d_k = 125; 30 \mu\text{m}$   
 Substrat: 42CrMo4  
 Beschichtung: 88WC-12Co

**Versuchsplanung**

One-factor-at-a-time

**Prozessstellgrößen**

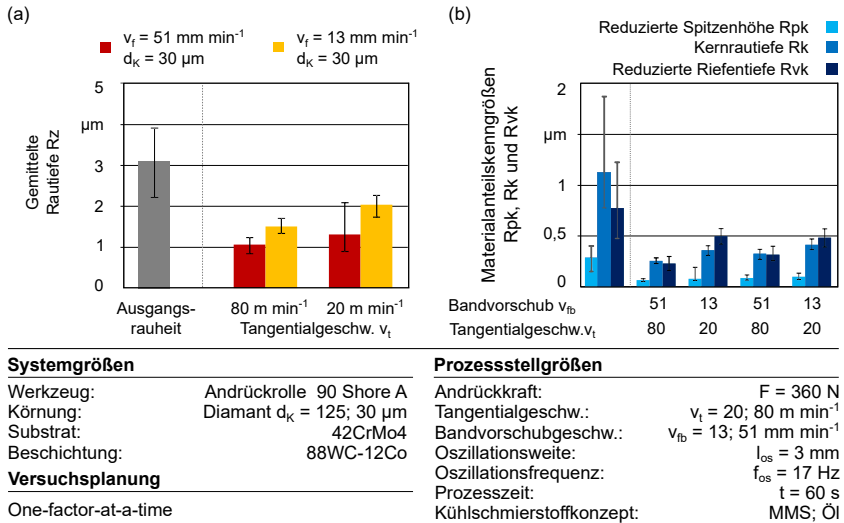
Andrückkraft:  $F = 360 \text{ N}$   
 Tangentialgeschw.:  $v_t = 62; 56 \text{ m min}^{-1}$   
 Bandvorschubgeschw.:  $v_{fb} = 35; 41 \text{ mm min}^{-1}$   
 Oszillationsweite:  $l_{os} = 3 \text{ mm}$   
 Oszillationsfrequenz:  $f_{os} = 11; 20 \text{ Hz}$   
 Prozesszeit:  $t = 30 \text{ s}$   
 Kühlschmierstoffkonzept: MMS; Öl

**Abbildung 7.11:** Oberflächenstruktur einer WC-Co-Beschichtung nach 2-stufiger Finishbearbeitung in Abhängigkeit der Ausgangstopographie, (a) gemittelte Rautiefe  $R_z$ , (b) Materialteilkenngrößen Spitzenhöhe, Kernrautiefe, Riefentiefe, (c) Rauheitsprofile, (d) Weißlichtdarstellungen

$Rvk < 0,5 \mu\text{m}$  erzielen. In diesem Fall ist das Profil durch eine glatte Oberflächenstruktur mit hohem Materialtraganteil in geringen Profiltiefen gekennzeichnet. Wie an den Rauheitsprofilen und den Weißlichtdarstellungen in Abbildung 7.11 (d-e) zu erkennen, ergibt sich für die Prozesskette in der ersten Variante eine ausgeprägte Plateaustruktur, während die Oberfläche bei der zweiten Variante durch feine Riefen gekennzeichnet ist. Abhängig von der gewünschten Topographie sind die Stellgrößen daher bereits in der ersten Bearbeitungsstufe so anzupassen, dass durch die folgenden Prozessstufen eine zielführende Strukturierung möglich ist.

Ausgehend von einer konstanten Oberflächenqualität und -struktur der Vorbearbeitung ergibt sich durch die Variation der Parameterwerte in der zweiten Prozessstufe eine weitere Möglichkeit, die resultierende Topographie zu beeinflussen. Vier Wellenabsätze mit einer Rautiefe  $R_z = 3,1 \mu\text{m}$  wurden exemplarisch bei variierender Schnittgeschwindigkeit in der zweiten Prozessstufe bearbeitet. In dem vollfaktoriellen zweistufigen Versuchsplan wurde die Tangentialgeschwindigkeit zwischen  $v_t = 20$  und  $80 \text{ m min}^{-1}$

bei einer Bandvorschubgeschwindigkeit von  $v_{fb} = 13$  und  $51 \text{ mm min}^{-1}$  variiert. Die Ausgangstopographie zeichnet sich, wie in **Abbildung 7.12** dargestellt, durch eine erhöhte Kernrautiefe von  $R_k = 1,1 \mu\text{m}$  und eine geringe Spitzenhöhe von  $R_{pk} = 0,29 \mu\text{m}$  sowie eine Riefentiefe von  $R_{vk} = 0,76 \mu\text{m}$  aus.

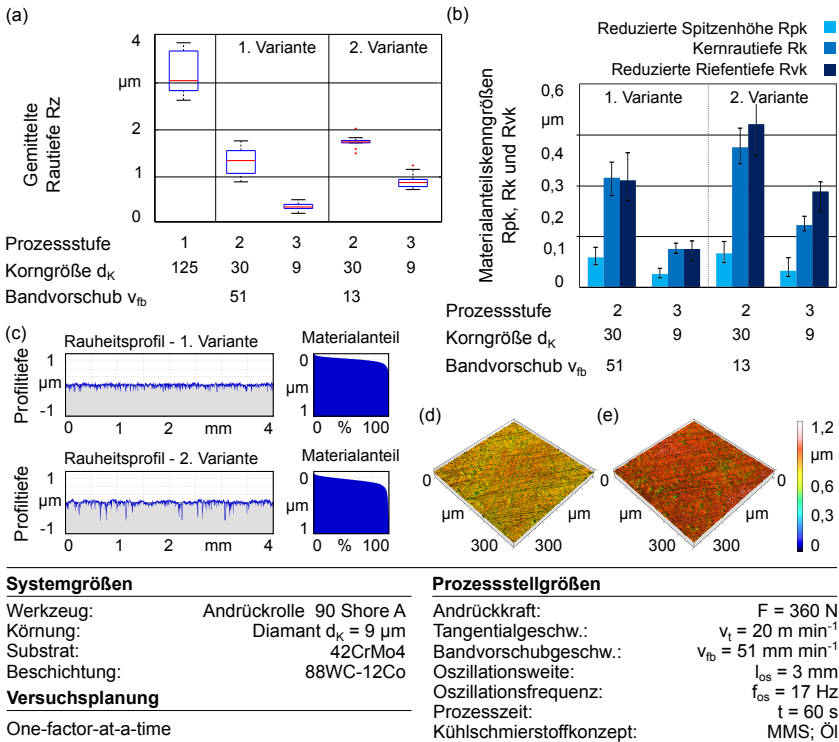


**Abbildung 7.12:** Oberflächenstruktur einer WC-Co Beschichtung nach zweistufiger Finishbearbeitung in Abhängigkeit der Stellgrößen Tangentialgeschwindigkeit und Bandvorschubgeschwindigkeit in der 2. Prozessstufe, (a) Gemittelte Rauiefe  $R_z$ , (b) Materialteilskenngrößen

Durch die folgende Prozessstufe mit der Korngröße  $d_K = 30 \mu\text{m}$  lassen sich in allen Fällen die Rauheiten im Vergleich zum Ausgangszustand reduzieren. Allerdings ergeben sich in Abhängigkeit des gewählten Bandvorschubs sowie der Tangentialgeschwindigkeit Differenzen in der resultierenden Oberflächenqualität von  $\Delta R_z = 1 \mu\text{m}$ . Die Erhöhung der Bandvorschubgeschwindigkeit führt sowohl bei geringer als auch bei erhöhter Tangentialgeschwindigkeit zu einer größeren Reduzierung der Oberflächenrauheit. Im Gegensatz zu der Vorbearbeitung mit elektrostatisch gerichtetem Band und grober Körnung von  $d_K = 125 \mu\text{m}$  ist das Abtragsverhalten der regellos verteilten feinen Körnung von  $d_K = 30 \mu\text{m}$  nicht konstant bei variierender Bandvorschubgeschwindigkeit. Durch eine geringe Bandvorschubgeschwindigkeit von  $v_{fb} = 13 \text{ mm min}^{-1}$  bleiben sowohl bei geringer als auch bei hoher Tangentialgeschwindigkeit erheblich mehr Profiltriefen aus der Vorbearbeitung erhalten als bei erhöhter Bandvorschubgeschwindigkeit von  $v_{fb} = 51 \text{ mm min}^{-1}$ . Basierend auf der jeweiligen Bindungsstruktur und Korngröße des verwendeten Finishbandes in Kombination mit der initialen Oberflächentopographie, die ebenfalls als Eingangsgröße berücksichtigt werden muss, sind

die Parameterwerte für die einzelnen Stellgrößen gezielt anzupassen, um eine vorher definierte Strukturierung zu erzielen.

Ausgehend von zwei Oberflächentopographien, die mit Bandvorschubgeschwindigkeiten in der zweiten Prozessstufe generiert wurden, erfolgte eine Analyse, inwieweit sich die Oberflächenqualität durch ein feines Endfinish mit wiederum reduzierter Korngröße von  $d_K = 9 \mu\text{m}$  verbessern lässt, bzw. welchen Einfluss die ursprüngliche Oberflächentopographie aus den ersten beiden Prozessstufen auf die Endbearbeitung hat. Der Einfluss der Endbearbeitung auf die Veränderung der Oberflächentopographie ist in **Abbildung 7.13** veranschaulicht.



**Abbildung 7.13:** Oberflächenstruktur einer WC-Co-Beschichtung nach dreistufiger Finishbearbeitung in Abhängigkeit der Ausgangstopographie, (a) Gemittelte Rautiefe  $R_z$ , (b) Materialanteilkenngrößen Spitzenhöhe, Kernrautiefe, Riefentiefe, (c) Rauheitsprofile, (d) Topographie mit geringer Riefentiefe, (e) Topographie mit erhöhter Riefentiefe

Die Werkstücke wurden bei einer Andrückkraft von  $F = 360 \text{ N}$  und einer Prozesszeit von  $t = 60 \text{ s}$  mit einer Tangentialgeschwindigkeit von  $v_t = 20 \text{ m min}^{-1}$  und einer Bandvorschubgeschwindigkeit von  $v_{fb} = 51 \text{ mm min}^{-1}$  bearbeitet. Der hohe Bandvor-

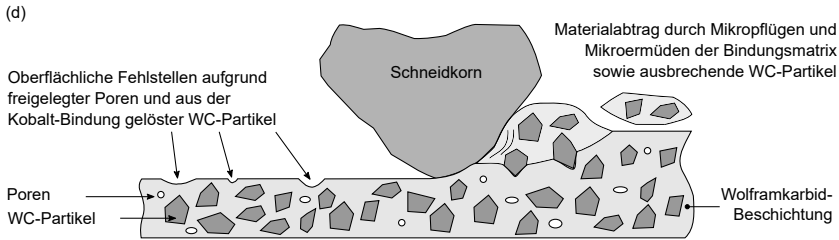
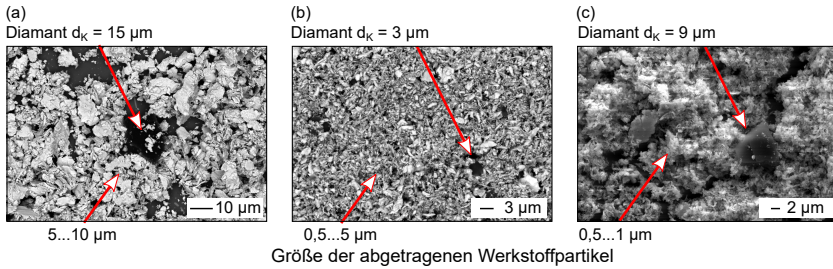
schub bei vergleichsweise geringer Schnittgeschwindigkeit wurde basierend auf den Ergebnissen der zweiten Prozessstufe gezielt gewählt, um einer frühzeitigen Zusetzung des Finishbandes vorzubeugen. Ausgehend von den unterschiedlichen Topographien resultierend aus der zweiten Prozessstufe ergibt sich für die dritte Prozessstufe ein Qualitätsunterschied von  $\Delta R_z = 0,6 \mu\text{m}$ , der nahezu gleich dem Unterschied nach der zweiten Prozessstufe ist.

Die in Abbildung 7.13 (b) veranschaulichten Materialanteilskenngößen belegen, dass selbst bei derart hohen Oberflächenqualitäten eine gezielte Abstimmung der einzelnen Prozessschritte erforderlich ist, um eine an die jeweiligen Anforderungen angepasste Oberflächentopographie zu generieren. Die erhöhte Ausgangsrauheit bei der 2. Variante resultiert nach der dritten Prozessstufe in einer Topographie, die durch eine erhöhte Kernrautiefe und eine erhöhte Riefentiefe gekennzeichnet ist. Durch die Berücksichtigung dieser Zusammenhänge lässt sich eine homogene, ebene Struktur mit feinen Honriefen, wie in Abbildung 7.13 (c) und (d) dargestellt, erzielen; oder alternativ eine Plateaustuktur mit ausgeprägteren Profiliriefen.

### 7.1.6 Spanbildungsmechanismen

Die in der **Abbildung 7.14** veranschaulichten REM-Aufnahmen von Partikeln, die aus dem zur Bearbeitung genutzten Öl gewonnen wurden, geben Aufschluss über den vorherrschenden Spanbildungsmechanismus. Bei allen drei Finishbändern zeichnet sich der Werkstofffabrieb durch feine Werkstoffpartikel und -plättchen aus, die in Abhängigkeit der verwendeten Korngröße zwischen  $d_K = 0,5$  und  $10 \mu\text{m}$  variieren. Vereinzelt sind ebenfalls ausgebrochene Diamantkörner bzw. Kornfragmente zu finden, wobei der Anteil an zerspantem Material eindeutig überwiegt. Die Größe der ebenfalls im Öl enthaltenen Diamantkörner ermöglicht Aufschluss über den Verschleißmechanismus beim Finishband. Während bei der Körnung von  $d_K = 125 \mu\text{m}$  hauptsächlich verschlissene Kornfragmente mit einer Größe von  $d_K < 15 \mu\text{m}$  in dem genutzten Öl zu finden sind (Abbildung 7.14 (a)), ergeben sich bei der feinen Körnung von  $d_K = 9 \mu\text{m}$  durchaus vollständige Kornausbrüche, die nahezu dieselbe Größe nach der Bearbeitung haben wie im ursprünglichen Zustand (Abbildung 7.14 (c)).

Die unterschiedliche Bindungsstruktur der Finishbänder sowie die daraus resultierenden Kornhaltekräfte bilden einen möglichen Erklärungsansatz. Im Falle der elektrostatisch ausgerichteten Bindungsart erhöht sich durch eine zusätzlich aufgebrachte Fixierungsschicht die Haltekraft für die einzelnen Körner. Dies bedingt, dass die Körner hauptsächlich durch Mikrosplittern bzw. eine kontinuierliche Abstumpfung verschleifen. Das Herauslösen von ganzen Körnern ließ sich nicht nachweisen. Im Gegensatz dazu zeichnet sich die durch das Dispersionsverfahren aufgebrachte Bindungsstruktur lediglich durch eine Bindungsschicht aus, wobei es zusätzlich möglich ist, dass Körner übereinander liegen. Dies begünstigt ein frühzeitiges Ausbrechen einzelner Körner. Dieser Verschleißmechanismus muss allerdings immer in Kombination mit den Prozessstellgrößen betrachtet werden. Bei der Nutzung des Finishbandes mit einer

**Systemgrößen**

Werkzeug: Andrückrolle 90 Shore A  
 Körnung: Diamant  $d_K = 125; 30; 9 \mu\text{m}$   
 Substrat: 42CrMo4  
 Beschichtung: 88WC-12Co

**Versuchsplanung**

One-factor-at-a-time

**Prozessstellgrößen**

Andrückkraft:  $F = 360 \text{ N}$   
 Tangentialgeschwindigkeit:  $v_t = 20 \dots 80 \text{ m min}^{-1}$   
 Bandvorschubgeschw.:  $v_b = 13 \dots 51 \text{ mm min}^{-1}$   
 Oszillationsweite:  $l_{OS} = 3 \text{ mm}$   
 Oszillationsfrequenz:  $f_{OS} = 17 \text{ Hz}$   
 Prozesszeit:  $t = 30 \dots 60 \text{ s}$   
 Kühlschmierstoffkonzept: MMS; Öl

**Abbildung 7.14:** REM-Analyse der Partikel im KSS nach jeder Prozessstufe, (a) 1. Prozessstufe mit  $d_K = 125 \mu\text{m}$ , (b) 2. Prozessstufe mit  $d_K = 30 \mu\text{m}$ , (c) 3. Prozessstufe mit  $d_K = 9 \mu\text{m}$  (Mit freundlicher Genehmigung von Frau Dipl.-Ing. P. Stemmer, Universität Duisburg-Essen, Werkstofftechnik), (d) Spanbildungsmechanismen beim Finishen der Wolframkarbid-Beschichtung

Korngröße von  $d_K = 30 \mu\text{m}$ , das sich durch dieselbe Bindungsart wie das Finishband mit einer Korngröße von  $d_K = 9 \mu\text{m}$  auszeichnet, ergeben sich tendenziell weniger Kornausbrüche.

Da in dem zerspannten Material keine Spanform zu erkennen ist und die Partikel durch eine im Vergleich zum Korndurchmesser des Finishbandes wesentlich geringere Größe gekennzeichnet sind, die mitunter in ihrem Durchmesser um eine Größenordnung differieren, handelt es sich bei den vorherrschenden Spanbildungsmechanismen, wie in Abbildung 7.14 (d) dargestellt, um das Mikrobrechen bzw. das Mikroermüden, das wiederum in einer Oberflächenzerrüttung resultiert. Die duktilen Anteile des Werkstückwerkstoffs werden so lange verformt, bis durch die zunehmende Verfestigung des Werkstoffs die Materialtrennung durch Abscheren einzelner Partikel einsetzt, während die wesentlich härteren WC-Partikel agglomeriert mit Anteilen der Kobalt-Bindungsmatrix herausbrechen. Durch die Reduzierung der Korngröße des Finishbandes ergibt sich ebenfalls eine Reduzierung der Größe der abgetragenen Werkstoffpar-

tikel. Diese ist allerdings insofern begrenzt, dass die Korngröße des Wolframkarbids nicht unterschritten wird.

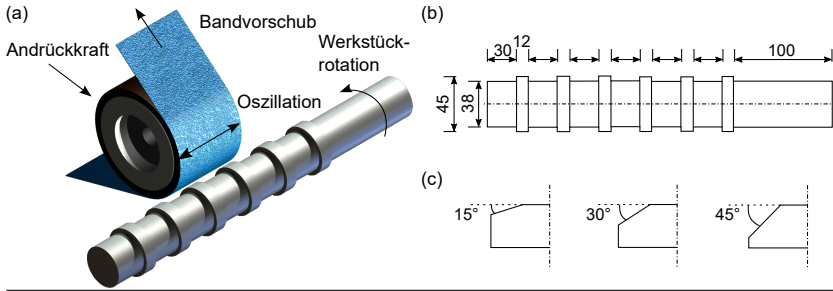
Der Ausbruch einzelner Kornfragmente ist nicht grundlegend negativ zu beurteilen, da diese durch das temporäre Verbleiben in der Kontaktzone zu einer höheren Oberflächenqualität beitragen können. Aufgrund der geringeren Korngröße der einzelnen Fragmente werden lediglich die Profilspitzen abgetragen, ohne eine zusätzliche Furchung der Oberfläche zu bedingen. Dieser Effekt tritt insbesondere dann auf, wenn der Prozess durch eine Minimalmengenkühlschmierung geschmiert wird. In diesem Fall können die Körner aufgrund der fehlenden Spülwirkung länger im Kontaktsplatt verbleiben [KRZ10].

## 7.2 Belastungsfall in Abhängigkeit der Werkstückgeometrie

Insbesondere in der Automobilindustrie ergeben sich beispielsweise bei der Bearbeitung von Lagerstellen oder den Nocken einer Nockenwelle unterschiedliche Belastungsfälle zwischen Werkzeug und Werkstück. Bei den bisherigen Betrachtungen wurde die Kontaktzone ausschließlich durch die geometrische Gestalt des Werkzeugs bestimmt. Dieses lag mit der vollen Breite auf, sodass die Flächenpressungen in der Kontaktzone gleich verteilt waren. Für die Analyse des Einflusses der Werkstückgeometrie wurden die in **Abbildung 7.15** dargestellten Werkstückkonturen verwendet. Im Rahmen des Finishprozesses führen unterschiedliche Flächenpressungen in der Kontaktzone zu einem variierenden Abtragsverhalten, sodass eine gezielte Anpassung der Stellgrößen für ein definiertes Bearbeitungsergebnis nicht möglich ist. Um den Einfluss dieser Störgröße zu analysieren, wurden die Absätze der Welle, wie in **Abbildung 7.15** (b) und (c) dargestellt, mit unterschiedlichen Anfasungen versehen. Die Fase von wahlweise  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  und  $45^\circ$  wurde vor dem Beschichtungsprozess durch einen Drehprozess eingestellt.

Basierend auf den Voruntersuchungen wurde für den ersten Prozessschritt wiederum das elektrostatisch gerichtete Finishband mit einer Körnung von  $d_K = 125 \mu\text{m}$  verwendet. Der Versuchsplan enthielt neben der Variation der Werkstückkontur eine Variation der Andrückkraft, der Bearbeitungsdauer und der Tangentialgeschwindigkeit. Durch die gleichzeitige Variation der Bearbeitungsdauer sowie der Tangentialgeschwindigkeit war es möglich, die im Rahmen der Prozesszeit bearbeitete Fläche ebenfalls als Einflussgröße zu analysieren. Die über die einzelnen Überläufe kumulierte Bearbeitungslänge wurde zwischen  $l_B = 20$  und  $100\text{m}$  variiert, um zu evaluieren, inwieweit sich die Prozesszeit bei hoher Tangentialgeschwindigkeit und gleich hoher Oberflächenqualität reduzieren lässt.

Analog zu den Voruntersuchungen ergab sich die tangential wirkende Schnittgeschwindigkeit als Haupteinflussfaktor hinsichtlich der erzielbaren Oberflächenqualität. Durch die Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit auf  $v_t > 60\text{m min}^{-1}$  ließen sich Oberflächenqualitäten mit einer gemittelten Rautiefe  $Rz < 3 \mu\text{m}$  erzielen, die bei



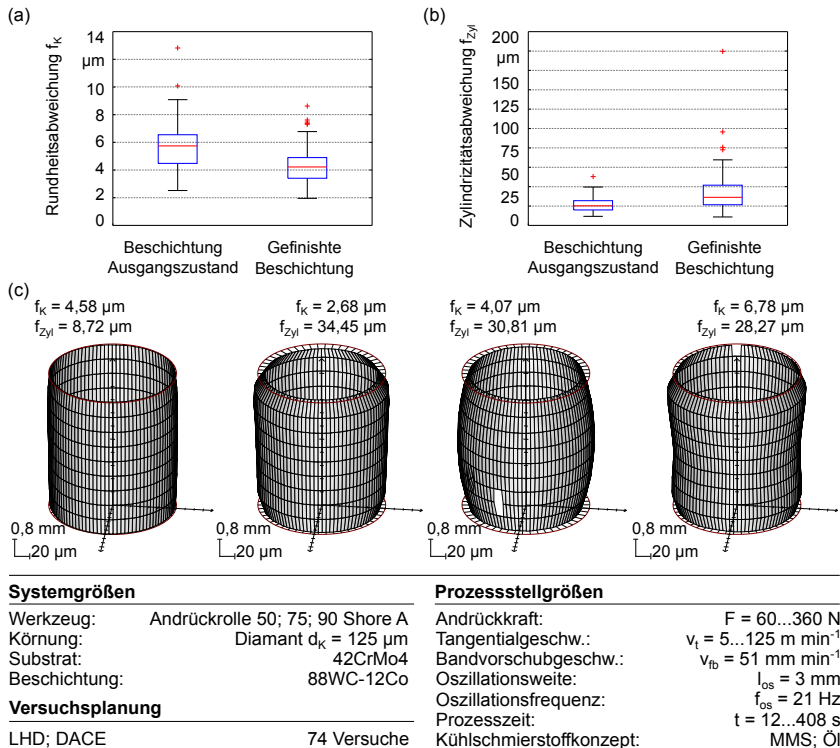
Systemgrößen		Prozessstellgrößen	
Werkzeug:	Andrückrolle 90; 75; 50 Shore A	Andrückkraft:	$F = 60 \dots 360 \text{ N}$
Körnung:	Diamant $d_k = 125 \mu\text{m}$	Tangentialgeschw.:	$v_t = 5 \dots 125 \text{ m min}^{-1}$
Substrat:	42CrMo4	Bandvorschubgeschw.:	$v_{fb} = 51 \text{ mm min}^{-1}$
Beschichtung:	88WC-12Co	Oszillationsweite:	$l_{os} = 3 \text{ mm}$
<b>Versuchsplanung</b>		Oszillationsfrequenz:	$f_{os} = 21 \text{ Hz}$
LHD; DACE:	74 Versuche	Prozesszeit:	$t = 12 \dots 408 \text{ s}$
		Kühlschmierstoffkonzept:	MMS; Öl

**Abbildung 7.15:** Finishen von Wellenabsätzen, (a) schematische Prozessdarstellung, (b) geometrische Gestalt der Werkstücke, (c) Variation der Kontaktzone Werkzeug-Werkstück durch eine Anfasung der Wellenabsätze

weiterer Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit wiederum gegen einen Grenzwert von  $R_z = 2 \mu\text{m}$  tendierten. Die im Rahmen der Voruntersuchungen nicht betrachtete abgewinkelte Bearbeitungslänge, die zwischen  $l_B = 20$  und  $100 \text{ m}$  variiert wurde, hatte in diesem Parameterfenster nahezu keinen Einfluss auf die resultierende Oberflächenqualität. Damit ist die Möglichkeit einer geringen Tangentialgeschwindigkeit bei langer Prozessdauer zur Verbesserung der Oberflächenqualität als nicht zielführend anzusehen. Soll hingegen ein möglichst großer Honwinkel realisiert werden, wäre eine geringe Tangentialgeschwindigkeit Voraussetzung. Die Oberflächenqualität müsste dann durch folgende Prozessstufen erzielt werden. Insofern allerdings auch kleine Honwinkel für den späteren Anwendungsfall zielführend sind, ließe sich durch eine Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit auf  $v_t = 120 \text{ m min}^{-1}$  die Prozesszeit auf  $t = 10 \text{ s}$  reduzieren und würde trotzdem die Mindestbearbeitungslänge von  $l_B = 20 \text{ m}$  erzielen. Da die Bearbeitungslänge in dem variierten Intervall keinen Einfluss auf die Oberflächenqualität zeigte, ließe sich mit dieser Parameterwertkombination ebenfalls eine hohe Oberflächenqualität erzielen.

Unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen liegt aufgrund der wesentlich geringeren Eingriffsbreite eine höhere Flächenpressung vor. Diese übersteigt den in Kapitel 7.1 ermittelten kritischen Wert für die Andrückkraft, sodass eine weitere Steigerung nicht zu verbesserten Oberflächenqualitäten führt. Analog zu Kapitel 7.1.4 wurde auch für die Bearbeitung der Wellenabsätze eine Analyse der Formgenauigkeit vor und nach dem Finishprozess vorgenommen. Wie in **Abbildung 7.16** dargestellt, zeichnen sich die Wellenabsätze vor der Bearbeitung durch

einen Zylindrizitätsfehler zwischen  $f_{Zyl} = 10$  bis  $40 \mu\text{m}$  aus, wobei der Median bei  $f_{Zyl} = 20 \mu\text{m}$  liegt.



**Abbildung 7.16:** Formgenauigkeit beschichteter Wellenabsätze vor und nach dem Finishen, (a) Rundheitsabweichung, (b) Zylindrizitätsfehler, (c) Zylinderprofile nach dem Finishen

Im Gegensatz zur Bearbeitung der Vollwellen ist nach der Bearbeitung der Absätze der Zylindrizitätsfehler zum Teil deutlich auf bis zu  $f_{Zyl} = 70 \mu\text{m}$  erhöht. Im Mittel steigt der Zylindrizitätsfehler für alle Absätze von  $f_{Zyl} = 20 \mu\text{m}$  auf  $f_{Zyl} = 30 \mu\text{m}$ . Bei der Bearbeitung der Absätze zeigt sich also ein gegenläufiges Verhalten im Vergleich zu der Bearbeitung der Vollwellen hinsichtlich der erzielten Formgenauigkeit.

Durch eine detailliertere Betrachtung der sich nach dem Finishprozess einstellenden Formen, dargestellt in Abbildung 7.16 (c), wird deutlich, dass sich neben einer Zylinderform auch ballige oder hohle Formen auf den Wellenabsätzen ausbilden. Um diese Formabweichung zu beschreiben, ist eine ausschließliche Angabe des Zylindrizitätsfehlers nicht ausreichend. In Bezug auf den späteren Anwendungsfall kann es durchaus zielführend sein, eine spezifische Balligkeit des Wellenabsatzes zu generieren,

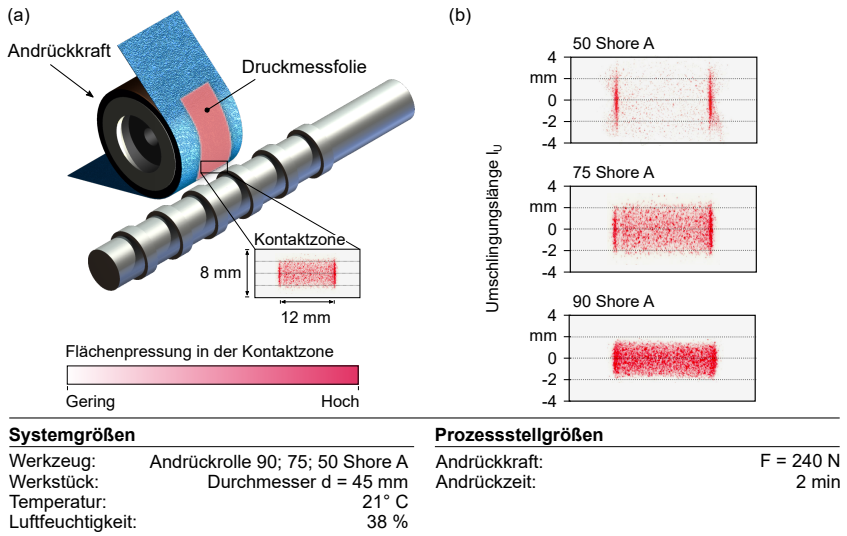
die sich dann unter entsprechender Belastung zu einer Zylinderform im Einsatz elastisch verformt. Eine ähnlich stark ausgeprägte Hohlform, auch Wannenform genannt, ist für einen Einsatz als tribologisch belastete Gleit- oder Wälzfläche ungeeignet. Die Kontaktfläche würde sich auf die äußeren Bereiche des Wellenabsatzes beschränken und so zu wesentlich höheren Flächenpressungen führen, die wiederum die Lebensdauer der Gleit- oder Lagerfläche beeinträchtigen.

### 7.2.1 Analyse der Kontaktbedingungen

Aufgrund der erheblich variierenden Formabweichungen erfolgte eine Analyse der in der Kontaktzone zwischen Andrückrolle und Wellenabsatz vorliegenden Flächenpressungen. Die Versuche wurden mit nicht rotierendem Werkstück bei einer Andrückkraft von  $F = 240 \text{ N}$  durchgeführt. Wie in **Abbildung 7.17** dargestellt, ergeben sich in Abhängigkeit der verwendeten Andrückrolle sowohl hinsichtlich der Größe der Kontaktzone, als auch der vorliegenden Druckspannung erhebliche Differenzen. Die drei unterschiedlichen Härtegrade der Andrückrollen zeichnen sich, wie bereits in Kapitel 7.1.1 analysiert, durch eine unterschiedlich große Kontaktzone aus. Bei der harten Andrückrolle mit einer Härte von 90 Shore A ergibt sich eine Kontaktfläche von  $A_k = 48 \text{ mm}^2$ . Durch die Verwendung einer weicheren Andrückrolle mit einer Härte von 50 Shore A ist die Größe der Kontaktzone auf  $A_k = 96 \text{ mm}^2$  erhöht. Würden in der Kontaktzone homogene Flächenpressungen vorliegen, ergäbe sich eine mittlere Druckspannung von  $p_N = 5$  und  $2,5 \text{ N mm}^{-2}$ . Diese errechnete Flächenpressung wird allerdings insbesondere bei der weichen Andrückrolle partiell erheblich überschritten. Insbesondere an den Kanten der Wellenabsätze ergeben sich erheblich höhere Druckspannungen im Vergleich zur restlichen Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Dieser Bereich ist durch die zwei dunkelrot gefärbten Striche gekennzeichnet. Im Gegensatz zur weichen Andrückrolle ergibt sich für das Werkzeug mit einer Härte von 90 Shore A ein vergleichsweise homogener Verlauf der Druckspannung gemessen in axialer Richtung zum Wellenabsatz.

### 7.2.2 Gezielte Beeinflussung der Bauteilkontur

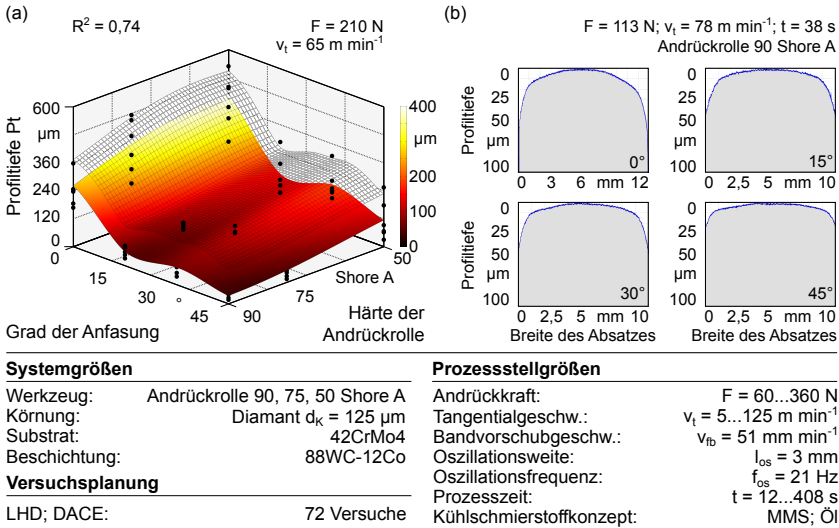
Um die Formabweichungen im Detail zu analysieren, wurde die Kontur der Absätze aufgenommen. Die Ausprägung der Profiltiefe  $P_t$  ermöglicht in diesem Zusammenhang eine Bewertung der Formhaltigkeit. Im Falle eines optimal zylindrischen Wellenabsatzes würde sich bei der Konturmessung eine Gerade mit der Profiltiefe  $P_t = 0 \mu\text{m}$  ergeben. Je verrundeter die Kanten bzw. je balliger oder hohler der Wellenabsatz, desto größer die Profiltiefe. Als Referenzfläche dient bei den nicht angefasten Absätzen eine Absatzbreite von 12 mm, während bei den angefasten Absätzen die Profiltiefe über eine Absatzbreite von 10 mm analysiert wird, da dies nach der Anfasung durch den Drehprozess die in der Anwendung nutzbare Kontaktlänge darstellt. Der in **Abbildung 7.18** (a) dargestellte funktionale Zusammenhang zwischen der Härte der Andrückrolle und dem



**Abbildung 7.17:** Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück auf einem Wellenabsatz in Abhängigkeit der Härte der Andrückrolle

Grad der Anfasung verdeutlicht die Auswirkungen der ungünstigen Belastungssituation bei einem scharfkantigen Wellenabsatz. Die Kantenverrundung beträgt bei einem nicht angefasenen Wellenabsatz, der mit weicher Andrückrolle bearbeitet wurde, bis zu  $P_t = 400 \mu\text{m}$ .

Unabhängig von der aus dem Finishprozess resultierenden Mikrostruktur ergibt sich allein durch die Formabweichung eine erheblich reduzierte Auflagefläche. Die Verrundung der Kante des Wellenabsatzes lässt sich allerdings durch eine entsprechende Anfasung erheblich reduzieren. Bereits eine Anfasung von  $15^\circ$  ermöglicht eine Verringerung der Formabweichung auf eine Profiltiefe von  $P_t < 200 \mu\text{m}$ . Durch die Kombination aus einem angefasenen Wellenabsatz sowie der Verwendung einer harten Andrückrolle lässt sich diese Verrundung unabhängig von den weiteren Stellgrößen sogar auf  $P_t < 50 \mu\text{m}$  reduzieren. Durch die höhere Steifigkeit der härteren Andrückrolle ergibt sich eine geringere Anpassung des Werkzeugs an die Werkstückgeometrie. Die homogenere Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück resultiert in geringeren Formabweichungen. Die in Abbildung 7.18 (b) dargestellten Profile gemessen in axialer Richtung zum Wellenabsatz verdeutlichen die Änderung der Bauteilkontur durch den Finishprozess. Durch eine Anfasung von  $45^\circ$  bei Verwendung einer harten Andrückrolle mit geringer Andrückkraft lassen sich die Formabweichungen auf eine Profiltiefe von  $P_t < 25 \mu\text{m}$  reduzieren.

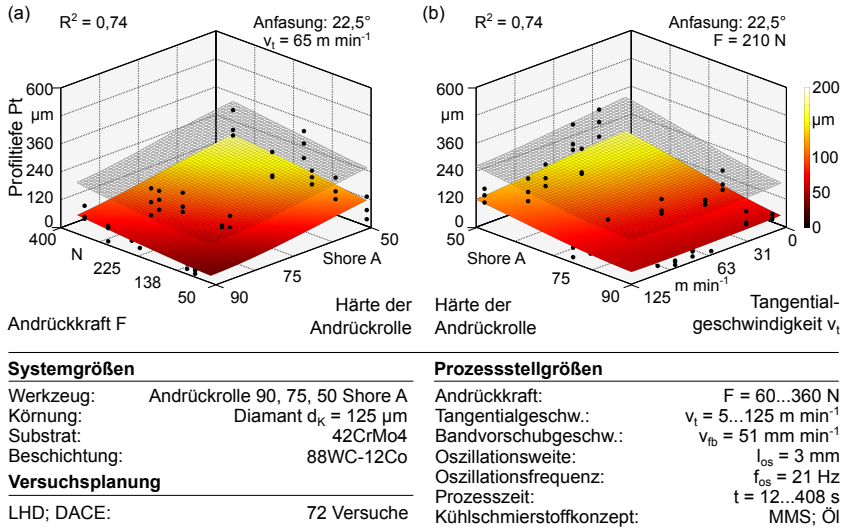


**Abbildung 7.18:** Konturabweichung des Wellenabsatzes nach der Finishbearbeitung, (a) Profiltiefe in Abhängigkeit von der Anfasung und der Härte der Andrückrolle, (b) Profilmessschriebe zur Darstellung des Einflusses der Anfasung auf die Konturgenauigkeit

Die zusätzliche Berücksichtigung weiterer Stellgrößen des Finishprozesses, wie der Andrückkraft und der Tangentialgeschwindigkeit, dargestellt in **Abbildung 7.19**, ermöglicht eine weitere Reduzierung der Kantenverrundung. Da die Andrückkraft in direktem Zusammenhang mit der in der Kontaktzone vorliegenden Flächenpressung steht, bildet diese auch einen Einflussfaktor für die Formabweichung. Durch eine reduzierte Andrückkraft ergibt sich tendenziell auch eine geringere Formabweichung.

Unter Berücksichtigung des nichtlinearen Materialverhaltens der Andrückrolle ist dieses Ergebnis durchaus plausibel. Bei zunehmender Verformung wirkt die betroffene Stelle der Rolle härter und büßt an Verformungsvermögen ein. Insbesondere in diesen Bereichen, die sich an der Kante des Wellenabsatzes befinden, steigt der Druck exponentiell. Dieses Phänomen tritt insbesondere bei hoher Andrückkraft und weicher Andrückrolle auf. Wird die Andrückkraft reduziert und eine härtere Gummimischung verwendet, reduziert sich dieser Effekt, und es ergibt sich eine homogenere Druckspannungsverteilung innerhalb der Kontaktzone.

Ein weiterer entscheidender Aspekt für die Ausprägung der Kantenverrundung ist die Anzahl der axialen Überläufe während des Finishprozesses. Durch die hohen Flächenpressungen an der Kante des Wellenabsatzes ergibt sich bei jedem Überlauf des Finishbandes ein erhöhter Materialabtrag im Vergleich zum mittleren Bereich des Absatzes, in dem geringere Flächenpressungen zwischen Werkzeug und Werkstück vorliegen. Eine erhöhte Anzahl an axialen Überläufen resultiert in einem größe-

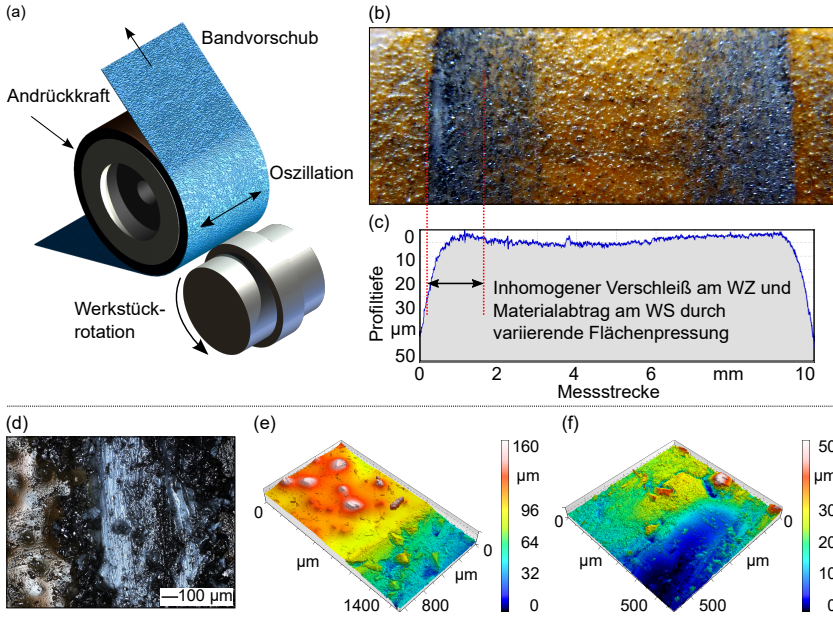


**Abbildung 7.19:** Kantenverrundung in Abhängigkeit von (a) Andrückkraft und Härte der Andrückrolle sowie (b) der Härte der Andrückrolle und der Tangentialgeschwindigkeit

ren Gesamtabtrag. Im Rahmen der Versuchsplanung wurde die Oszillationsfrequenz konstant gehalten, sodass die Anzahl der axialen Überläufe von der Prozesszeit abhängig ist. Da die abgewickelte Bearbeitungslänge bei der Versuchsplanung auf ein Intervall von  $l_B = 20$  bis  $100 \text{ m}$  beschränkt wurde, sind insbesondere geringe Tangentialgeschwindigkeiten durch eine vergleichsweise hohe Prozesszeit und eine dementsprechend große Anzahl an axialen Überläufen gekennzeichnet.

Für eine tribologische Beanspruchung in Form einer Gleit- oder Rollbewegung ist neben der Konturgenauigkeit des gesamten Absatzes, die auch die Kantenverrundung einschließt, insbesondere die tatsächliche Auflagefläche von Interesse. In **Abbildung 7.20** sind für eine ungünstige Belastungssituation die Auswirkungen auf den Verschleiß des Finishbandes sowie die resultierende Form des Wellenabsatzes veranschaulicht. Durch die Verwendung der weichen Andrückrolle bei hoher Andrückkraft ergibt sich neben der Kantenverrundung eine hohle Absatzform im mittleren Bereich des Wellenabsatzes. Im Falle eines Kontaktes mit einer ebenen Auflagefläche wären lediglich die äußeren Kanten des Absatzes im Eingriff und müssten dementsprechend die gesamte Belastung tragen. Dieser Formfehler entsteht durch die inhomogene Belastung des Finishbandes. Aufgrund der hohen Flächenpressungen im Kantenbereich des Wellenabsatzes ergeben sich zwei ausgeprägte Verschleißspuren auf dem Finishband. Diese Bereiche sind, wie in **Abbildung 7.20** (d-f) veranschaulicht, teilweise durch einen vollständigen Abtrag der Schneidkörner und des Bindungsmaterials gekennzeichnet. Die Zerspanleistung

ist in diesen Abschnitten erheblich eingeschränkt. Durch die Axialbewegung wird das partiell verschlissene Finishband in direkt angrenzenden Bereichen auf dem Werkstück in Eingriff gebracht, sodass ständig wechselnde Eingriffsbedingungen vorliegen. Die gleichmäßig verschlissenen Abschnitte des Finishbandes behalten hingegen ihre Zerspanleistung und das vergleichsweise höhere Zeitspanvolumen. Resultierend ergibt sich die hohle Form des Wellenabsatzes.



#### Systemgrößen

Werkzeug: Andrückrolle 50 Shore A  
 Körnung: Diamant  $d_k = 125 \mu\text{m}$   
 Substrat: 42CrMo4  
 Beschichtung: 88WC-12Co

#### Anfasung

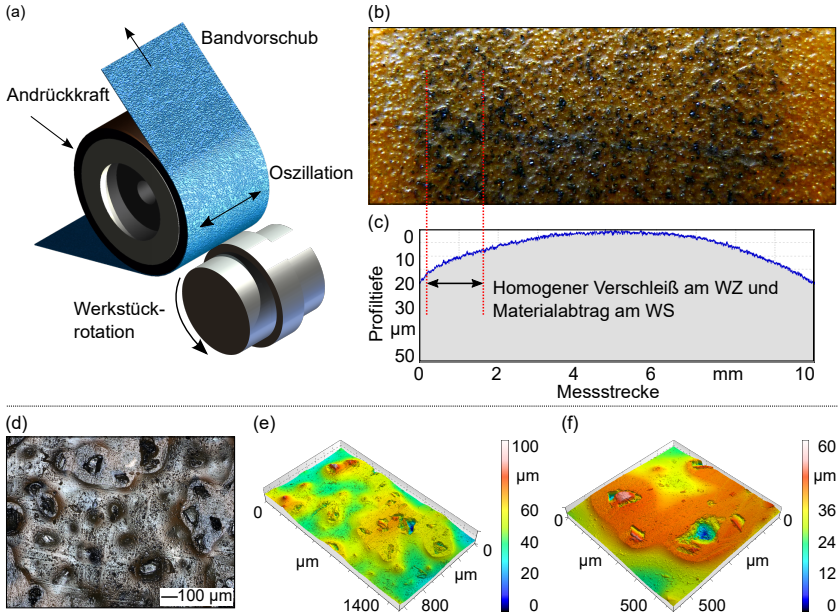
Winkel:  $0^\circ$

#### Prozessstellgrößen

Andrückkraft:  $F = 272 \text{ N}$   
 Tangentialgeschw.:  $v_t = 40 \text{ m min}^{-1}$   
 Bandvorschubgeschw.:  $v_{fb} = 51 \text{ mm min}^{-1}$   
 Oszillationsweite:  $l_{os} = 3 \text{ mm}$   
 Oszillationsfrequenz:  $f_{os} = 21 \text{ Hz}$   
 Prozesszeit:  $t = 30 \text{ s}$   
 Kühlschmierstoffkonzept: MMS; Öl

**Abbildung 7.20:** Verschleiß des Finishbandes und resultierende Form des Wellenabsatzes bei weicher Andrückrolle und hoher Andrückkraft, (a) Kontaktsituation zwischen WZ und WS, (b) Verschleiß auf dem Finishband, (c) Profil des Wellenabsatzes nach der Finishbearbeitung, (d) REM-Aufnahme des verschlissenen Bereichs, (e) Weißlichtaufnahme des Übergangs zwischen benutzten und unbenutzten Abschnitten des Finishbandes, (f) Weißlichtaufnahme eines Bereichs mit vollständigen Abtrag der Schneidkörner sowie der Bindungsschicht

Durch die Verwendung einer härteren Andrückrolle bei reduzierter Andrückkraft lässt sich, wie in **Abbildung 7.21** dargestellt, ein gleichmäßiger Verschleiß des Finishbandes erzielen. Das Finishband zeichnet sich, wie in **Abbildung 7.21** (b) veranschaulicht, auf der gesamten genutzten Breite durch eine gleichmäßige Zusetzung mit Werkstoffpartikeln, einer ebenfalls gleichmäßigen Rücksetzung der obersten Bindungsschicht sowie einen gleichmäßigen Kornverschleiß aus.



#### Systemgrößen

Werkzeug:	Andrückrolle 90 Shore A
Körnung:	Diamant $d_k = 125 \mu\text{m}$
Substrat:	42CrMo4
Beschichtung:	88WC-12Co
<b>Anfasung</b>	
Winkel:	$0^\circ$

#### Prozessstellgrößen

Andrückkraft:	$F = 113 \text{ N}$
Tangentialgeschw.:	$v_t = 76 \text{ m min}^{-1}$
Bandvorschubgeschw.:	$v_{fb} = 51 \text{ mm min}^{-1}$
Oszillationsweite:	$l_{os} = 3 \text{ mm}$
Oszillationsfrequenz:	$f_{os} = 21 \text{ Hz}$
Prozesszeit:	$t = 38 \text{ s}$
Kühlschmierstoffkonzept:	MMS; Öl

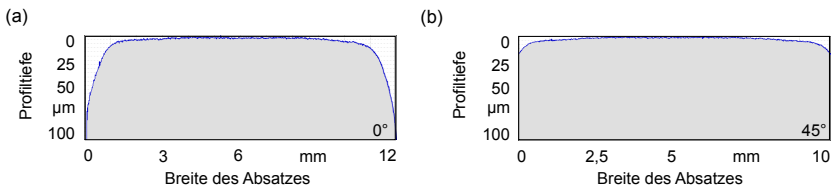
**Abbildung 7.21:** Verschleiß des Finishbandes und resultierende Form des Wellenabsatzes bei harter Andrückrolle und geringer Andrückkraft, (a) Kontaktsituation zwischen WZ und WS, (b) Verschleiß auf dem Finishband, (c) Profil des Wellenabsatzes nach der Finishbearbeitung, (d) REM-Aufnahme des verschlissenen Bereichs, (e) Weißlichtaufnahme des Übergangs zwischen benutztem und unbenutztem Abschnitt des Finishbandes, (f) Weißlichtaufnahme des Finishbandes mit gleichmäßigem Kornverschleiß und gleichmäßiger Rücksetzung der Bindung

Die resultierende ballige Form, dargestellt in **Abbildung 7.21** (c), ist für einen Einsatz in einem tribologischen System günstiger, da die wirkenden Flächenpressungen auf den

Wellenabsatz zu einer elastischen Verformung führen, die wiederum die Kontaktfläche vergrößert. Diese durch die Endbearbeitung erzielte Formänderung wird beispielsweise in der Wälzlagerindustrie angestrebt, um die ursprünglich gerade Mantellinie der Zylinderrollen mit balligen Enden zu versehen, damit die Kontaktsituation im Lager verbessert wird [Haa87].

Beim Vergleich des Einflusses der Prozessparameterwerte auf die Oberflächenqualität (Kapitel 7.1) und auf die Formgenauigkeit ergibt sich für diesen Anwendungsfall ein Zielkonflikt. Insbesondere die Steigerung der Andrückkraft führte für die Zielgröße Oberflächenqualität zu einer erheblichen Verbesserung. In Bezug auf die Formgenauigkeit resultiert die Steigerung der Andrückkraft allerdings teilweise in einer inhomogenen Belastungssituation, sodass die Formgenauigkeit des Absatzes beeinträchtigt wird.

Hinsichtlich der Reproduzierbarkeit des Bearbeitungsergebnisses sollte die Kontaktsituation zwischen Werkzeug und Werkstück daher möglichst homogen gestaltet werden. Der in **Abbildung 7.22** dargestellte Vergleich zwischen einem scharfkantigen und einem angefasten Wellenabsatz belegt, dass sich durch eine vorherige Anpassung der geometrischen Gestalt des Bauteils einerseits erhebliche Unterschiede hinsichtlich der resultierenden Formabweichungen ergeben. Andererseits ermöglicht die Vorkonditionierung eine größere Flexibilität des Finishprozesses hinsichtlich des nutzbaren Parameterwertefensters. Wie in **Abbildung 7.22** (b) dargestellt, ergeben sich trotz einer hohen Andrückkraft von  $F = 290\text{ N}$  durch die vorherige Anfasung nur geringfügige Formabweichungen beim gefinishten Absatz. Der größte Bereich ist durch eine Geradheitsabweichung von weniger als  $5\text{ }\mu\text{m}$  gekennzeichnet, während die erhöhte Balligkeit an den Kanten des Absatzes hinsichtlich der in einem tribologischen System auftretenden Flächenpressungsverteilung ebenfalls als zielführend beurteilt werden kann [Haa87].



#### Systemgrößen

Werkzeug:	Andrückrolle 90 Shore A
Körnung:	Diamant $d_k = 125\text{ }\mu\text{m}$
Substrat:	42CrMo4
Beschichtung:	88WC-12Co
<b>Anfasung</b>	
Winkel	$0^\circ$ bzw. $45^\circ$

#### Prozessstellgrößen

Andrückkraft:	$F = 290\text{ N}$
Tangentialgeschw.:	$v_t = 61\text{ m min}^{-1}$
Bandvorschubgeschw.:	$v_{tb} = 51\text{ mm min}^{-1}$
Oszillationsweite:	$l_{os} = 3\text{ mm}$
Oszillationsfrequenz:	$f_{os} = 21\text{ Hz}$
Prozesszeit:	$t = 29\text{ s}$
Kühlschmierstoffkonzept:	MMS; Öl

**Abbildung 7.22:** Profil des Wellenabsatzes nach der Finishbearbeitung unter Berücksichtigung unterschiedlicher Anfasungen, (a)  $0^\circ$ , (b)  $45^\circ$

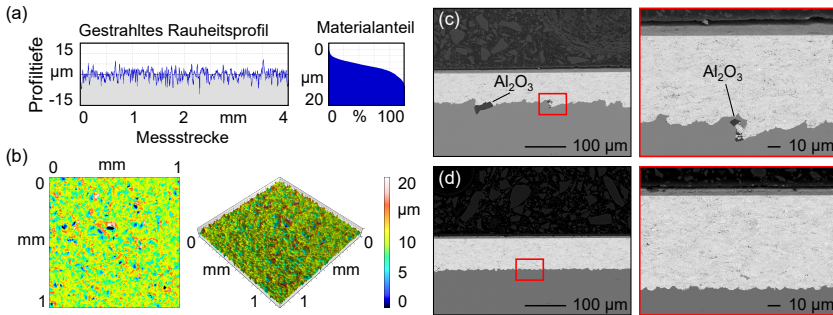
## 7.3 Steigerung der dynamischen Festigkeit durch das Finishen

Thermisch gespritzte Verschleißschutzschichten auf Basis von Wolframkarbid zeichnen sich gegenüber vielen Werkstoffen durch ihre erhöhte Verschleißbeständigkeit gegen abrasiven, korrosiven und kavitativen Verschleiß aus [BBBL10]. Eine gezielte Oberflächenstrukturierung ermöglicht darüber hinaus ein verbessertes Verhalten im tribologischen Kontakt. Oft ist die spezifische Kontaktsituation allerdings durch eine Vielzahl weiterer Beanspruchungen gekennzeichnet. Insbesondere bei dynamisch beanspruchten Bauteilen bildet die Ermüdungsfestigkeit des Werkstoffverbundes eine ebenso wichtige Kenngröße wie die Verschleißbeständigkeit. Diese wird nicht allein durch die Schichtmorphologie sowie die spanende Bearbeitung der Beschichtung bestimmt, sondern ist wesentlich von der Grenzflächenanbindung zwischen Substrat und Beschichtung abhängig. Um den Einfluss der Präparation des Substratwerkstoffs auf die Schichthaftung zu analysieren, wurden durch den Lehrstuhl für Werkstofftechnologie (LWT) der TU Dortmund Gefügeschliffe der beschichteten Proben erstellt, um die Anbindung der Beschichtung zu charakterisieren.

Zur Aktivierung der Substratoberfläche vor der Beschichtung wird konventionell ein Strahlprozess genutzt. Dieser induziert Druckeigenspannungen in der Randzone und erzeugt, wie in **Abbildung 7.23** (a) und (b) dargestellt, eine Mikrorauheit, die eine mechanische Verklammerung der Beschichtungspartikel mit dem Substrat ermöglicht. Da sich der HVOF-Beschichtungsprozess allerdings durch eine hohe kinetische Energie der Pulverpartikel auszeichnet, ist eine vorherige Mikrostrukturierung der Substratoberfläche nicht unbedingt erforderlich [TNS<sup>+</sup>10]. Daher erfolgte die Präparation der Versuchswerkstücke aus weichgeglühtem 100Cr6 alternativ zum Strahlen durch einen Finishprozess. Dabei wurde eine Oberflächentopographie generiert, die sich durch eine gemittelte Rautiefe von  $R_z < 1 \mu\text{m}$  und eine geringe Profilspitzenhöhe von  $R_{pk} < 0,1 \mu\text{m}$  auszeichnete. Die Rauheit der Oberflächen war damit wesentlich geringer als die einer gestrahlten Oberfläche mit einer gemittelten Rautiefe von  $R_z = 7$  bis  $10 \mu\text{m}$ .

Durch die Analyse der Grenzflächenanbindung zeigte sich, dass die gestrahlte Substratoberfläche neben der höheren Oberflächenrauheit durch Strahlgutrückstände in der Grenzfläche zwischen Substrat und Beschichtung gekennzeichnet ist (Abbildung 7.23 (c)). Im Vergleich dazu ist die Grenzflächenanbindung bei gefinishtem Substrat durch eine wesentlich homogenere Struktur gekennzeichnet (Abbildung 7.23 (d)).

Zusätzlich wurden Umlaufbiegeversuche durch den Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der TU Dortmund mit den verschiedenen präparierten Proben durchgeführt, um die Ermüdungsfestigkeit der beschichteten Proben zu analysieren und eine Qualitätsaussage zur Grenzflächenanbindung zwischen Substrat und Beschichtung zu generieren. In einem Umlaufbiegeversuch werden die zylindrischen Werkstücke dynamisch wechselnden Belastungen ausgesetzt. Durch die Rotation der Proben bei konstanter Andrückkraft auf ein Probenende wechselt der Belastungszustand stetig zwischen Druck- und Zugbeanspruchungen. Da die maximalen Spannungen am äußersten Durchmesser der Werkstückgeometrie zu finden sind, ermöglicht der Test eine Analyse



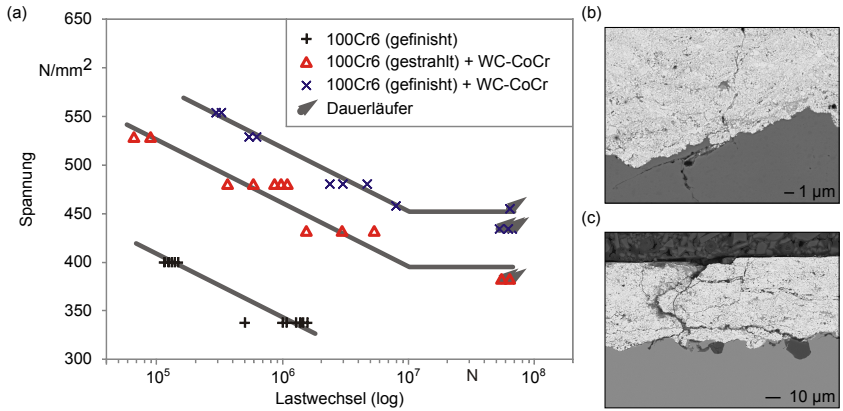
**Abbildung 7.23:** Oberflächentopographie eines gestrahlten Werkstücks (a) Rauheitsprofil und Materialanteil, (b) Weißlichtaufnahme; Grenzflächenanbindung zwischen Substrat und Beschichtung bei (c) gestrahltem Substrat, (d) gefinishtem Substrat nach [BGTN13]

der Schichtadhäsion auf dem Substrat sowie der Kohäsion innerhalb der Beschichtung [WSA98].

Um den Einfluss einer Kerbwirkung von Profiliriefen auf der beschichteten Oberfläche zu reduzieren, wurden die Proben vor den Versuchen durch einen dreistufigen Finishprozess bearbeitet. Die Prozessstrategie war äquivalent zu der in Kapitel 7.1.2 ausgelegt, sodass in einer Profiltiefe von  $Pt < 0,5 \mu\text{m}$  der vollständige Materialanteil vorlag.

Die in **Abbildung 7.24** dargestellten Versuchsergebnisse, die ebenfalls in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Werkstofftechnologie der TU Dortmund erzielt wurden, belegen das Potenzial einer alternativen Substratvorbereitung durch das Finishen zur Erhöhung der dynamischen Festigkeit des Werkstoffverbundes. Die gefinishten Substrate ermöglichen bei einer Spannung von  $\sigma_N = 350 \text{ N mm}^{-2}$  ca.  $10^6$  Lastwechsel bis zum Werkstückbruch. Im Vergleich dazu zeichnen sich die beschichteten Proben unabhängig von der Präparation der Substratoberfläche durch eine signifikant erhöhte Ermüdungsfestigkeit aus. Bis zu einer maximalen Spannung von  $\sigma_N = 400 \text{ N mm}^{-2}$  erzielen die beschichteten Proben mehr als  $10^7$  Lastwechsel. Ein für die Ermüdungsfestigkeit negativer Einfluss resultierend aus Profiliriefen in der Beschichtungsoberfläche ist nicht festzustellen. Bei höheren Spannungen ergeben sich allerdings Unterschiede durch die Präparation der Substratoberfläche. Bei den gestrahlten und anschließend beschichteten Substraten liegt die maximale Spannung für eine Lastwechselanzahl von  $10^6$  Zyklen bei  $\sigma_N = 480 \text{ N mm}^{-2}$ . Mithilfe der alternativen Bearbeitung durch das Finishen wird bei gleicher Lastwechselanzahl eine maximale Biegezugfestigkeit von  $\sigma_N = 550 \text{ N mm}^{-2}$  ermöglicht.

Wie in **Abbildung 7.24** (b) und (c) dargestellt, fördern die Riefen und Strahlgutrückstände in der Grenzfläche zwischen Substrat und Beschichtung bei dynamischer Beanspruchung die Rissbildung sowohl in vertikaler Richtung zur Probenoberfläche als



**Abbildung 7.24:** Vergleich der Biegewechselfestigkeit in Abhängigkeit der Substratpräparation nach [BGTN13] (a) Wöhler-Diagramm, (b) vertikaler Riss durch Beschichtung und Substrat, (c) Rissnetzwerk in der Beschichtung

auch in horizontaler Richtung parallel zur Substratoberfläche. Aufgrund der geringen Härte des Substrates und der hohen kinetischen Energie der Beschichtungspartikel beim HVOF-Prozess ist eine Aufräuhung der Substratoberfläche nicht zielführend. Durch die Kerbwirkung der vergleichsweise tiefen Riefen und der eingeschlossenen Korundpartikel des Strahlguts sinkt die Ermüdungsfestigkeit im Vergleich zu alternativen Präparationsmöglichkeiten.



## 8 Zusammenfassung und Ausblick

Die gezielte Auslegung der Oberflächentopographie tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch das Honen ist für zahlreiche Anwendungen, insbesondere aus der Automobilindustrie, Stand der Technik. Überwiegend werden diese Prozesse mit Honsteinen ausgeführt, die sich durch einen von den Prozessstellgrößen und der Werkzeugspezifikation spezifischen Verschleiß auszeichnen. Als alternativer Ansatz zu der Verwendung von Honsteinen etabliert sich zunehmend, insbesondere in der Außenrundbearbeitung, die Verwendung von Finishbändern. Diese bieten den Vorteil, dass hinsichtlich des Verschleißzustandes am Werkzeug ein äußerst reproduzierbarer Zustand eingestellt werden kann, da das Band durch einen kontinuierlichen, einstellbaren Bandvorschub dem Prozess zugeführt wird. Die für das Honen mit Steinen bekannten Prozesszusammenhänge lassen sich daher nur bedingt auf die Endbearbeitung mit Finishbändern übertragen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde in Grundlagenuntersuchungen gezeigt, dass die Endbearbeitung durch das Kurzhubhonen mit Finishbändern sowohl bei in der Randzone gehärteten Stahl- und Gusswerkstoffen als auch bei der Bearbeitung hochharter Verschleißschutzschichten auf Wolframkarbidbasis eine gute Möglichkeit zur gezielten Oberflächenstrukturierung bietet. Durch die Verwendung von Finishbändern anstatt von Honsteinen ist im Gegensatz zur üblicherweise genutzten Überflutungsschmierung eine Bearbeitung mit erheblich reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz als auch eine Trockenbearbeitung möglich.

Unabhängig von den genutzten Bindungsstrukturen und der Korngröße des Finishbandes, die in einem Bereich zwischen  $d_K = 2$  bis  $125 \mu\text{m}$  variiert wurde, ist das erzielbare bezogene Zeitspanvolumen sowohl für den Schneidstoff Aluminiumoxid bei der Bearbeitung von Stahl- und Gusswerkstoffen als auch für Diamant bei der Bearbeitung der hartmetallähnlichen Verschleißschutzschichten mit  $Q'_w < 0,03 \text{ mm}^3 \text{ mm}^{-1} \text{ s}^{-1}$  wesentlich kleiner als bei Schleifprozessen. Der Spanbildungsmechanismus basiert größtenteils auf dem Abtrag durch das wechselweise Furchen der Oberfläche und dem anschließenden Abscheren des aufgeworfenen Werkstoffes. Lediglich zu Prozessbeginn ergeben sich bei der Bearbeitung des gehärteten Wälzlagerstahls beim Abtrag der hervorstehenden Profilsitzen vereinzelt Mikrospäne. Allerdings werden mit zunehmender Prozesszeit hauptsächlich Werkstoffpartikel mit undefinierter geometrischer Gestalt abgetragen, die um ein vielfaches kleiner sind als die verwendete Korngröße. Die Spanbildung bei der Bearbeitung der Verschleißschutzschichten zeichnete sich durch den Abtrag in Form von Werkstoffplättchen aus, wobei die Größe dieser Plättchen in Abhängigkeit der genutzten Korngröße beim Finishband variierte, allerdings in jedem Fall wesentlich kleiner als die verwendete Korngröße war.

Maßgeblichen Einfluss auf das Zeitspanvolumen beim Finishen hat insbesondere die Bindungsstruktur des Finishbandes. Finishbänder mit elektrostatisch gerich-

teter Bindung ermöglichen ein höheres Zeitspanvolumen als Finishbänder mit einer schwerkraftgestreuten und dementsprechend randomisiert verteilten Kornstruktur. Vorgegebene Rauheitskennwerte beim Werkstück lassen sich daher, ausgehend von einer ursprünglich größeren Rauheit, durch das aggressivere Finish mit elektrostatisch gerichteter Bindung in kürzerer Prozesszeit erzielen. Aufgrund der Furchung der Werkstückoberfläche durch die hervorstehenden Kornspitzen und dem vergleichsweise tieferen Korneingriff ist die erzielbare finale Oberflächenqualität allerdings schlechter als bei nicht ausgerichteten Finishbändern.

Der Einfluss einzelner Prozessstellgrößen und insbesondere die Wechselwirkungen zwischen diesen auf die Oberflächenqualität und das Zeitspanvolumen sind bei gerichteten und ungerichteten Finishbändern verschieden und mitunter sogar gegensätzlich. Insbesondere die wirkende Andrückkraft sowie die Schnittgeschwindigkeit sind bei der Verwendung von ausgerichteten Finishbändern hauptsächlich für die resultierende Oberflächenqualität verantwortlich. Eine erhöhte Andrückkraft mit in der Kontaktzone resultierenden Flächenpressungen bis zu  $p_N = 6 \text{ N mm}^{-2}$  ermöglichen eine erhebliche Verbesserung der Oberflächenqualität und führten zu keiner Überschreitung der Leistungsfähigkeit des Finishbandes. Die infolge der höheren Flächenpressung stärker verschlissenen Körner bedingen geringere Oberflächenrauheiten, da ursprünglich hervorstehende Kornspitzen aufgrund der höheren Einzelkornkräfte abgestumpft sind und dementsprechend zu einer geringeren Furchung der Oberfläche führen. Durch eine erhöhte Schnittgeschwindigkeit in Form einer gesteigerten Werkstückdrehzahl bzw. einer erhöhten Oszillationsgeschwindigkeit des Werkzeugs lässt sich die Oberflächenqualität ebenfalls steigern. Bei gleichbleibendem Bandvorschub ergibt sich durch eine erhöhte Schnittgeschwindigkeit eine größere Werkstückfläche, die durch das Finishband während der vorgesehenen Prozesszeit überlaufen wird. Dies wiederum resultiert in einem erhöhten Kornverschleiß und einem schnelleren Zusetzen der Bindung mit abgetragenem Werkstückmaterial. Resultierend reduziert sich die Eindringtiefe der einzelnen Körner, und der Materialabtrag sinkt, während die Oberflächenqualität steigt, da lediglich verbliebene Profilspitzen abgetragen werden. Zusätzlich wird durch die Erhöhung der Tangentialgeschwindigkeit eine größere Fläche während eines Zeitinkrements überlaufen. Eine ursprünglich höhere Ausgangsrauheit lässt sich daher schneller abtragen. Dieser Zusammenhang ist insbesondere bei geringen Werkstückdurchmessern zu berücksichtigen.

Bei Finishbändern mit regellos verteilter Körnung, die durch Schwerkraftstreuung auf den Polyester-Träger aufgebracht sind, ergibt sich durch hohe Flächenpressungen in Kombination mit einer erhöhten Schnittgeschwindigkeit allerdings eine Zusetzung des Finishbandes mit zerspantem Material. Dies reduziert die Abtragsleistung und resultiert tendenziell in höheren Rautiefen, insofern die ursprüngliche Oberflächenstruktur nicht vollständig abgetragen wird. Durch die Anpassung des Bandvorschubs lässt sich dieser Effekt allerdings begrenzen, da der Verschleiß des Werkzeugs gezielt beeinflusst werden kann. Im Gegensatz zu Honverfahren, die mit Honsteinen durchgeführt werden, bildet die direkte Beeinflussbarkeit des Werkzeugverschleißes einen enormen Vorteil.

Spezifische Oberflächenstrukturen mit individuellen Vorgaben für einzelne Materialteilkenngrößen lassen sich in einer gestuften Prozesskette mit sukzessive kleiner werdender Korngröße erzielen. Grundvoraussetzung für die Erzielung hoher Oberflächenqualitäten mit Rautiefen von  $Rz < 0,2\ \mu\text{m}$  ist die Berücksichtigung der initialen Oberflächentopographie unter präziser Abstimmung der folgenden Prozessstufen auf die Anforderungen, die sich aus dieser Topographie an den Prozess ergeben. Dabei ist die Auslegung der Werkzeuge hinsichtlich Bindungsstruktur und Korngröße abhängig von der Zielsetzung. Die ausschließliche Verwendung ungerichteter Finishbänder eignet sich primär, um die Oberflächenqualität zu verbessern, während eine Kombination aus beiden Bindungsstrukturen die Erzeugung einer plateauartigen Struktur mit einer variabel einstellbaren Riefentiefe bei geringer Profilspitzenhöhe von  $Rpk < 0,05\ \mu\text{m}$  ermöglicht.

Die Nutzung der ursprünglichen Oberflächenstruktur vor der Bearbeitung beschränkt sich allerdings nicht nur auf einzelne Prozessstufen beim Finishen. Im Rahmen der Arbeit wurden die Weiteren Prozessstrategien entwickelt, die die generierten Oberflächentopographien aus spanenden Vorbearbeitungsprozessen, wie dem Fräsen oder Schleifen, gezielt nutzen. Durch die Nutzung unterschiedlicher Prozessketten wurden Strukturen generiert, die sich durch eine Überlagerung der prozessspezifischen Strukturen auszeichneten. Die Bearbeitung mit einem feinkörnigen Aluminiumoxid-Band mit einer Korngröße von  $d_K = 2\ \mu\text{m}$  ermöglichte dabei einen gezielten Abtrag der Rauheitsspitzen, die aus der Vorbearbeitung resultierten. Die auf diese Weise entstehende Struktur ist durch Artefakte der zuvor generierten Profiliriefen sowie einer äußerst feinen Honstruktur auf dem sich ergebenden Plateau gekennzeichnet. Durch Untersuchungen mithilfe eines Gleitverschleißtests in Kooperation mit der Universität Duisburg-Essen konnte gezeigt werden, dass sich diese Strukturen vorteilhaft auf die Verschleißbeständigkeit der Oberfläche sowie den resultierenden Reibungskoeffizienten zwischen den Tribopartnern auswirken.

Durch die Verwendung von hochharten Schneidstoffen wie Diamant ist ebenfalls die Finishbearbeitung von Verschleißschuttschichten möglich. Im Rahmen der Arbeit wurde eine Prozessstrategie entwickelt, die durch eine gestufte Prozessführung eine effiziente Direktbearbeitung der thermisch gespritzten Verschleißschuttschicht ermöglicht, sodass die hohe Ausgangsrauheit von  $Rz = 10\ \mu\text{m}$  auf eine Qualität von  $Rz = 0,3\ \mu\text{m}$  verbessert werden konnte. Die Berücksichtigung unterschiedlicher Kontaktsituationen zwischen Werkzeug und Werkstück ermöglichte zudem eine Prozessbeurteilung hinsichtlich der Qualität der zu erzielenden Kontur. Insbesondere bei erhöhten Zerspanvolumina durch ein vergleichsweise aggressives Finish mit ausgerichteten Bindungsstrukturen und großer Korngröße ergaben sich zum Teil hohe Formabweichungen. Aufgrund des elastischen Materialverhaltens der Werkzeuge können sich bei dem in der Arbeit genutzten Einstechverfahren, abhängig von der geometrischen Gestalt des Werkstücks, ungünstige Kontaktsituationen zwischen Werkzeug und Werkstück ergeben, die in einem unregelmäßigen Abtrag resultieren. Da bei dieser Verfahrensvariante eine gezielte Konturerzeugung nicht möglich ist, muss die

ursprüngliche Oberflächenqualität gewissen Mindestanforderungen genügen, um bei der Endbearbeitung einen möglichst geringen Mindestabtrag zu benötigen.

Durch die kombinierte Anwendung des Finishens zur Präparation des Substrates vor der Beschichtung sowie zur Endbearbeitung der Verschleißschutzschicht lässt sich neben der gezielten Strukturierung der Oberflächentopographie eine Erhöhung der dynamischen Festigkeit erzielen. Da der Beschichtungsprozess durch eine hohe kinetische Energie der Pulverpartikel charakterisiert ist, wird die Substratoberfläche während des Beschichtungsprozesses verformt, sodass sich die einzelnen Beschichtungspartikel auch ohne vorherige Oberflächenstrukturierung und -aktivierung durch einen Strahlprozess in der Werkstückrandzone verankern. Die resultierende Grenzflächenanbindung ist im Gegensatz zur Vorbereitung durch einen Strahlprozess durch eine homogenere Anbindung gekennzeichnet. Tiefe Riefen in der Substratoberfläche sowie Rückstände von Strahlgut in der Grenzflächenanbindung zwischen Substrat und Beschichtung lassen sich durch diese alternative Strategie vermeiden.

Aufbauend auf den Ergebnissen zur Endbearbeitung durch das Finishen unter Berücksichtigung der gesamten spanenden Prozesskette ergeben sich weitere Forschungsaspekte. Da sich eingelaufene tribologische Systeme oft durch eine mikrostrukturell veränderte Gefügestruktur in der Randzone auszeichnen, könnte durch eine Abstimmung der einzelnen Prozesse ein analoger Aufbau der Werkstückrandzone bereits in der Fertigung erzielt werden. Aufgrund des geringen Abtrages beim Finishen ließen sich beispielsweise mikrostrukturelle Gefügeveränderungen aus vorgelagerten Prozessschritten gezielt nutzen. Dies betrifft auch zielführende Druckeigenspannungszustände, die in Kombination mit einer homogenen Oberflächenstruktur zu einer Steigerung der dynamischen Festigkeit führen können. Ebenso ist durch die Verwendung speziell angepasster Schmierstoffe eine chemische Konditionierung der Werkstückrandzone denkbar. Abgestimmt auf die im späteren Betrieb zur Anwendung kommenden Schmiermedien ließe sich der für ein tribologisches System typische Einlaufvorgang bereits bei der spanenden Endbearbeitung abbilden.

# Literaturverzeichnis

- [Abe06] T. Abeln. Reibungsminderung durch Laseroberflächenstrukturierung im Motorenbau. *Technik - Tools - Trends, Präzisions- und Tiefbohren aktuell*, Seiten 217–224, 2006.
- [ADN<sup>+</sup>10] S. Antusch, M. Dienwiebel, E. Nold, P. Albers, U. Spicher und M. Scherge. On the tribochemical action of engine soot. *Wear*, 269(1-2):1–12, 2010.
- [Bau68] D. Baumgarten. *Reibung und Verschleiß von Kolbenringen und Zylinderbuchsen*. Dissertation, Technische Universität Berlin, 1968.
- [BBBL10] M. Barletta, G. Bolelli, B. Bonferroni und L. Lusvardi. Wear and Corrosion Behavior of HVOF-Sprayed WC-CoCr Coatings on Al Alloys. *Journal of Thermal Spray Technology*, 19(1-2):358–367, 2010.
- [BBD<sup>+</sup>09] K. Bewilogua, G. Brüner, A. Dietz, J. Gäbler, G. Goch, B. Karpuschewski und B. Szyszka. Surface technology for automotive engineering. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 58(2):608–627, 2009.
- [BBMF01] J. Brand, C. Beckmann, T. Münnich und T. Filfil. Tribologische Optimierung von Ventiltrieben durch Beschichtungstechnik. *Tribologie und Schmierungstechnik*, 48(1):22–26, 2001.
- [BCK<sup>+</sup>82] E. Brinksmeier, J. T. Cammett, W. König, P. Leskovic, J. Peters und H. K. Tönshoff. Residual Stresses - Measurement and Causes in Machining Processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 31(2):491–510, 1982.
- [BCLL08] A. A. G. Bruzzone, H. L. Costa, P. M. Lonardo und D. A. Lucca. Advances in engineered surfaces for functional performance. *Manufacturing Technology - Annals of the International Institute for Production Engineering Research*, 57(2):750–769, 2008.
- [BdBQ<sup>+</sup>10] K. Bonny, P. de Baets, J. Quintelier, J. Vleugels, D. Jiang, O. Van der Biest, B. Lauwers und W. Liu. Surface finishing: Impact on tribological characteristics of WC-Co hardmetals. *Tribology International*, 43(1-2):40–54, 2010.
- [BFH<sup>+</sup>15] D. Biermann, D. Freiburg, R. Hense, W. Tillmann und D. Stangier. Influence of Surface Modifications on Friction, Using High-Feed Milling and Wear Resistant PVD-Coating for Sheet-Metal Forming Tools. *Key Engineering Materials*, 639:275–282, 2015.

- [BG05] E. Brinksmeier und A. Giwerzew. Hard gear finishing viewed as a process of abrasive wear. *Wear*, 258(1-4):62–69, 2005.
- [BGS14] D. Braun, C. Greiner, J. Schneider und P. Gumbsch. Efficiency of laser surface texturing in the reduction of friction under mixed lubrication. *Tribology International*, 77:142–147, 2014.
- [BGT13] D. Biermann, S. Goeke, W. Tillmann und J. Nebel. Improvement of wear resistant thermally sprayed coatings by microfinishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1):559–562, 2013.
- [BHT11] C. Brecher, S. Hannig und T. Tawakoli. Schwingung erleichtert Abtrag. Superfinishen: Ultraschall verbessert Produktivität beim Bearbeiten zylindrischer Präzisionsteile. *Industrieanzeiger*, 133(11):50–51, 2011.
- [BLM<sup>+</sup>08] G. Bolelli, L. Lusvarghi, F. P. Mantini, F. Pitacco und H. Volz. Enhanced tribological properties of PECVD DLC coated thermally sprayed coatings. *Surface and Coatings Technology*, 202(18):4382–4386, 2008.
- [BMDE05] F.-W. Bach, K. Möhwald, B. Drößler und L. Engl. Technik und Potenziale des Verschleißschutzes mittels thermisch gespritzter Beschichtungen. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 36(8):353–359, 2005.
- [BMLW05] F.-W. Bach, K. Möhwald, A. Laarmann und T. Wenz. *Moderne Beschichtungsverfahren*. Wiley-VCH, Weinheim, 2005.
- [Bob13] K. Bobzin. *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*. Wiley-VCH, Weinheim, 1. Auflage, 2013.
- [Bol95] D. C. Bolles. HVOF Thermal Spraying: An Alternative to Hard Chrome Plating. *Welding Journal (Miami, Fla)*, 74(10):31–34, 1995.
- [Bow59] F. P. Bowden. *Reibung und Schmierung fester Körper*. Springer-Verlag, Berlin/Göttingen/Heidelberg, 1959.
- [Bra80] H. Brandin. Einflussgrößen beim Außenrund-Kurzhubhonen. *Technische Mitteilungen. Haus der Technik e.V.*, 73(8):695–698, 1980.
- [Bre96] P. von Brevern. *Untersuchung zum Tiefenschleifen von Hartmetallen unter besonderer Berücksichtigung von Schleiföl als Kühlschmierstoff*. Dissertation, Technische Universität Hamburg-Harburg, 1996.
- [Bri02] S. Brinkmann. *Funktionsorientierte Beurteilung von Zylinderlaufflächen durch 3-dimensionale Oberflächenmesstechnik*. Dissertation, Universität Hannover, 2002.

- [BRT10] E. Brinksmeier, O. Riemer und S. Twardy. Tribological behavior of micro structured surfaces for micro forming tools. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(4):425–430, 2010.
- [BS12] H.-J. Bargel und G. Schulze. *Werkstoffkunde*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012.
- [BT06] H. Berns und W. Theisen. *Eisenwerkstoffe: Stahl und Gusseisen*. Springer-Verlag, Berlin, 3. Auflage, 2006.
- [BT12] N. Brunetière und B. Tournerie. Numerical analysis of a surface-textured mechanical seal operating in mixed lubrication regime. *Tribology International*, 49(0):80–89, 2012.
- [Büs05] R. Büscher. *Gefügeumwandlungen und Partikelbildung in künstlichen Metall/Metall-Hüftgelenken*. Dissertation, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [BWD05] S. Binkowski, M. Woydt und E. Dietrich. Ungewöhnliche Aufhängung des 100Cr6 in einem ausgefallenen Keramik-Hybrid-Wälzlager. In M. Göken, Hrsg., *Fortschritte in der Metallographie*, Jgg. 37, Seiten 247–252. MAT-INFO, Werkstoff-Informationsges, Frankfurt [Main], 2005.
- [BZGW08] D. Biermann, A. Zabel, S. Grünert und T. Wagner. Effiziente Modellbildung in der Zerspanung. Einsatz neuer Methoden der statistischen Modellierung in der Zerspanung gradierter Werkstoffe. *wt Werkstattstechnik online*, 98(1/2):39–43, 2008.
- [CBC<sup>+</sup>97] S. H. Chang, S. Balasubramhanya, S. Chandrasekar, T. N. Farris und F. Hashimoto. Forces and specific energy in superfinishing of hardened steel. *Annals of the CIRP*, 46(1):257–X55, 1997.
- [CFC00] S. H. Chang, T. N. Farris und S. Chandrasekar. Contact mechanics of superfinishing: Kontaktmechanik bei der Feinstbearbeitung. *Transactions of the ASME, Journal of Tribology*, 122(2):388–393, 2000.
- [CFC03] S. H. Chang, T. N. Farris und S. Chandrasekar. Experimental characterization of superfinishing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, 217(7):941–951, 2003.
- [CFC08] S. H. Chang, T. N. Farris und S. Chandrasekar. Experimental Analysis on evolution of superfinished surface texture. *Journal of Material Processing Technology*, 203:365–371, 2008.

- [CH07] H. L. Costa und I. M. Hutchings. Hydrodynamic lubrication of textured steel surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*, 40(8):1227–1238, 2007.
- [CH10] H. Czichos und K.-H. Habig. *Tribologie-Handbuch: Tribometrie, Tribomaterialien, Tribotechnik*. Vieweg + Teubner, Wiesbaden, 3. Auflage, 2010.
- [CL13] J. V. Carstensen und M. Lindegren. Quality control of thermal spray coatings in diesel engines. *Practical Metallography*, 50(6):369–390, 2013.
- [CWKS07] P. Chivavibul, M. Watanabe, S. Kuroda und K. Shinoda. Effects of carbide size and Co content on the microstructure and mechanical properties of HVOF-sprayed WC-Co coatings. *Surface & Coatings Technology*, (202):509–521, 2007.
- [DBH<sup>+</sup>14] W.-G. Drossel, A. Bucht, C. Hochmuth, A. Schubert, A. Stoll, J. Schneider und R. Schneider. High Performance of Machining Processes by Applying Adaptronic Systems. *Procedia CIRP*, 14:500–505, 2014.
- [DBK08] B. Denkena, D. Boehnke und J. Kästner. Microstructuring of functional surfaces by means of cutting processes. *Production Engineering*, 2(1):21–25, 2008.
- [dCKPL03] L. de Chiffre, H. Kunzmann, G. N. Peggs und D. A. Lucca. Surfaces in Precision Engineering, Microengineering and Nanotechnology. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2):561–577, 2003.
- [DDK<sup>+</sup>96] J. DeBarro, M. Dorfman, K. Kempton, J. Exline und D. Aldag. HVOF internal diameter spraying: An update on power cylinders for natural gas engines. In *DVS-Berichte*, Jgg. 175, Seiten 126–130. DVS-Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [DdLW09] B. Denkena, L. de Leon und B. Wang. Grinding of microstructured functional surfaces: a novel strategy for dressing of microprofiles. *Production Engineering*, 3(1):41–48, 2009.
- [DFK76] M. F. DeVries, M. Field und J. F. Kahles. Relationship of Surface Roughness and Surface Integrity to Functional Properties. *Annals of the CIRP*, 25(2):569–573, 1976.
- [DHJG08] Z. Deng, Zhong Wei Hu, Qi Jing und Ya Dong Gong. Experimental Investigations on Surface Residual Stresses in the As-Sprayed and

- Ground Nanostructured WC/12Co Coatings. *Key Engineering Materials*, 359-360:229–233, 2008.
- [DHS13] W.-G. Drossel, C. Hochmuth und R. Schneider. An adaptronic system to control shape and surface of liner bores during the honing process. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1):331–334, 2013.
- [DIN03] DIN 8589-14. Fertigungsverfahren Spanen - Teil 14: Honen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe, September 2003.
- [DIN05] DIN EN 657. Thermisches Spritzen - Begriffe, Einteilung; Deutsche Fassung EN 657, Juni 2005.
- [DKK<sup>+</sup>08] B. Denkena, J. Kästner, G. Knoll, S. Brandt, F.-W. Bach, B. Dröbber, E. Reithmeier und M. Bretschneider. Mikrostrukturierung funktionaler Oberflächen. Auslegung, Fertigung und Charakterisierung von Mikrostrukturen zur tribologischen Funktionalisierung von Oberflächen. *wt Werkstattstechnik online*, 98(6):486–494, 2008.
- [DKW10] B. Denkena, Jan Kästner und B. Wang. Advanced microstructures and its production through cutting and grinding. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1):67–72, 2010.
- [EB99] C. J. Evans und J. B. Bryan. ‘Structured’, ‘textured’ or ‘engineered’ surfaces. *Annals of the CIRP*, 48(2):541–556, 1999.
- [Edi97] M. Edinger. *Untersuchung zur spanenden Endbearbeitung und zum Funktionsverhalten von thermisch gespritzten Verschleißschutzschichten*. Dissertation, Universität Kaiserslautern, 1997.
- [EO11] J. Eriksson und M. Olsson. Tribological testing of commercial CrN, (Ti,Al)N and CrC/C PVD coatings — Evaluation of galling and wear characteristics against different high strength steels. *Surface and Coatings Technology*, 205(16):4045–4051, 2011.
- [Ets04] I. Etsion. Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing. *Tribology Letters*, 17(4):733–737, 2004.
- [FB07] G. Flores und T. Birkner. Positionshonen statt Feinbohren. Neues Verfahren zur Herstellung von Zylinderbohrungen. *VDI-Z Integrierte Produktion*, 149(4):83–85, 2007.
- [Flo92] G. Flores. *Grundlagen und Anwendung des Honens*. Vulkan-Verlag, Essen, 1992.

- [Fol14] R. U. Folle. *Experimentelle Untersuchungen zum Bandfinishen von thermisch gespritzten Verschleißschutzschichten unter Berücksichtigung unterschiedlicher Belastungsfälle und Werkstückkonturen*. Diplomarbeit, Technische Universität Dortmund, 2014.
- [Frö11] H. Frömming. *Zerspanung von WC-Co-Hartmetall im unterbrochenen Schnitt*. Dissertation, TU Hamburg-Harburg, 2011.
- [FRT<sup>+</sup>04] M. Froning, P. Ruggiero, J. Tsiao, J. Marnix, C. Alford und G. Shubert. Transition of a world class HVOF thermal spray capability into a US engine overhaul facility. In *Thermal Spray 2004: Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, Seiten 11–14. Osaka, 2004.
- [Fuh80] W. Fuhrmann. Die Einlauf-Oberfläche - Untersuchungen an Nocken und Stoesseln. *Motortechnische Zeitschrift*, 41(6):271–276, 1980.
- [Fuh85] W. Fuhrmann. Beitrag zur Kenntnis des Einlaufs von Nocken und Stoesseln. *Motortechnische Zeitschrift*, 46(4):147–148, 1985.
- [FWS13] G. Flores, A. Wiens und O. Stammen. Honen von Zahnradbohrungen. *Diamond Business*, 1(44):6–15, 2013.
- [GBS<sup>+</sup>14] S. Goeke, D. Biermann, D. Stickel, P. Stemmer, A. Fischer, K. Geenen, S. Huth und W. Theisen. Enhancing the Surface Integrity of Tribologically Stressed Contacting Surfaces by an Adjusted Surface Topography. *Procedia CIRP*, 13:214–218, 2014.
- [GHCL<sup>+</sup>10] W. A. González-Hermosilla, D. Chicot, J. Lesage, J. G. La Barbera-Sosa, I.C. Gruescu, M. H. Staia und E. S. Puchi-Cabrera. Effect of substrate roughness on the fatigue behavior of a SAE 1045 steel coated with a WC–10Co–4Cr cermet, deposited by HVOF thermal spray. *Materials Science and Engineering: A*, 527(24-25):6551–6561, 2010.
- [Giw03] A. Giwierzew. *Spanbildungsmechanismen und tribologisches Prozessverhalten beim Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten*. Dissertation, Universität Bremen, 2003.
- [GKPO13] W. Grabon, W. Koszela, P. Pawlus und S. Ochwat. Improving tribological behaviour of piston ring–cylinder liner frictional pair by liner surface texturing. *Tribology International*, 61:102–108, 2013.
- [GL07] R. Gadow und D. López. Keramische Struktur- und Funktionsschichten auf Leichtmetall für motorische Anwendungen. In *Internationales Stuttgarter Symposium Automobil- und Motorentechnik*, 7, Seiten 641–657. Vieweg, Wiesbaden, 2007.

- [Gle09] M. Gleß. *Wälzkontaktermüdung bei Mischreibung*. Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, 2009.
- [GPS10] W. Grabon, P. Pawlus und J. Sep. Tribological characteristics of one-process and two-process cylinder liner honed surfaces under reciprocating sliding conditions. *Tribology International*, 43(10):1882–1892, 2010.
- [GVD<sup>+</sup>13] B. Goedel, J. Voisin, D. Dumur, M. El Mansori und M. Frabolot. Flexible right sized honing technology for fast engine finishing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1):327–330, 2013.
- [Haa87] G. Haasis. Möglichkeiten der Prozessbeherrschung beim Langhub- und Kurzhubhonen. *TZ fuer Metallbearbeitung*, 81(3):9–15, 1987.
- [HAE12] K. Holmberg, P. Andersson und A. Erdemir. Global energy consumption due to friction in passenger cars. *Tribology International*, 47:221–234, 2012.
- [Hah13] W.-C. Hahmann. *Innovative Ansätze zur Finishbearbeitung von Funktionsoberflächen*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2013.
- [HAN<sup>+</sup>14] K. Holmberg, P. Andersson, N.-O. Nylund, K. Mäkelä und A. Erdemir. Global energy consumption due to friction in trucks and buses. *Tribology International*, 78:94–114, 2014.
- [Hel13] J. Helbig. *Kombinierte Bearbeitung von Wälzlagerstahl 100Cr6 durch Hochpräzisionshartdrehen und Außenrundhonen*. Dissertation, RWTH Aachen, 2013.
- [Hem47] E. L. Hemingway. *Wear and surface finish*. Gisholt Machine Company, Madison, Wis, 1947.
- [Hey15] T. Heymann. *Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen*. Dissertation, TU Dortmund, 2015.
- [HG97] H.-W. Hoffmeister und J. Gäbler. Feinschleifen von Keramik mit Folienwerkzeugen. *Industrie Diamanten Rundschau*, 31(3):228–233, 1997.
- [HW06] F. Hashimoto, Y. B. Guo und A. W. Warren. Surface Integrity Difference between Hard Turned and Ground Surfaces and Its Impact on Fatigue Life. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 55(1):81–84, 2006.

- [HH05] H.-W. Hoffmeister und H. Hermann. Bandfinishing technischer Keramiken. In H.-W. Hoffmeister und B. Denkena, Hrsg., *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren*, Seiten 420–432. Vulkan-Verlag, Essen, 2005.
- [Hil14] O. Hildebrandt. Superfinishen mit Piezounterstützung - Strukturfinishen. In *Innovation of Sustainable Production for Green Mobility. Energy-Efficient Technologies in Production*, ICMC – International Chemnitz Manufacturing Colloquium, Seiten 377–391. Auerbach, 2014.
- [Höh98] L. Höhne. *Honen technischer Keramiken*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, 1998.
- [Hop06] A. Hoppermann. *Einfluss von Oberflächengestaltung und Werkstoffwahl auf das tribologische Verhalten von Gleit- und Dichtungskontakten hydraulischer Komponenten*. Dissertation, RWTH Aachen, 2006.
- [How94] C. P. Howes. Thermal spraying: Processes, Preparation, Coatings and Applications. *Welding Journal, New York*, 73(4):47–51, 1994.
- [HS09] E. Hornbogen und B. Skrotzki. *Mikro- und Nanoskopie der Werkstoffe*. Springer, Berlin and Heidelberg, 3. Auflage, 2009.
- [HSL<sup>+</sup>13] K. Holmberg, R. Siilasto, T. Laitinen, P. Andersson und A. Jäsberg. Global energy consumption due to friction in paper machines. *Tribology International*, 62:58–77, 2013.
- [HW99] G. Haasis und U.-P. Weigmann. Neues Honverfahren für umweltfreundliche Verbrennungsmotoren. *WB Werkstatt und Betrieb*, 132(3):29–35, 1999.
- [IB07] A. Ibrahim und C. C. Berndt. Fatigue and deformation of HVOF sprayed WC–Co coatings and hard chrome plating. *Materials Science and Engineering: A*, 456(1-2):114–119, 2007.
- [JBM<sup>+</sup>11] I. S. Jawahir, E. Brinksmeier, R. M’Saoubi, D. K. Aspinwall, J. C. Outeiro, D. Meyer, D. Umbrello und A. D. Jayal. Surface integrity in material removal processes: Recent advances. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2):603–626, 2011.
- [JHB<sup>+</sup>13] A. Jourani, B. Hagège, S. Bouvier, M. Bigerelle und H. Zahouani. Influence of abrasive grain geometry on friction coefficient and wear rate in belt finishing. *Tribology International*, 59:30–37, 2013.

- [Joh95] K. L. Johnson. Contact mechanics and the wear of metals. *Wear*, 190(2):162–170, 1995.
- [Jos06] H. P. Jost. Tribology: How a word was coined 40 years ago. *Tribology and Lubrication Technology*, 62(3):24–28, 2006.
- [JRE08] A. Javidi, U. Rieger und W. Eichlseder. The effect of machining on the surface integrity and fatigue life. *International Journal of Fatigue*, (30):2050–2055, 2008.
- [Juc84] H. O. Juchem. Entwicklungsstand beim Honen von Bohrungen in metallischen Werkstuecken mit Diamant und CBN. *Industrie Diamanten Rundschau*, 18(3):173–185, 1984.
- [Kap99] G. Kappmeyer. *Hochfrequenzhonen - Beitrag zum ultraschallunterstützen Dornhonen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1999.
- [Kat02] D. Katrakova. *Anwendungen der Orientierungsabbildenden Mikroskopie zur Gefügecharakterisierung kristalliner Werkstoffe*. Dissertation, Universität des Saarlandes, 2002.
- [KCS<sup>+</sup>90] W. König, L. Cronjäger, G. Spur, H. K. Tönshoff, M. Vigneau und W. J. Zdeblick. Machining of New Materials. *Annals of the CIRP*, 39(2):673–681, 1990.
- [Keh98] B. Kehrwald. *Untersuchung der Vorgänge in Tribologischen Systemen während des Einlaufs*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1998.
- [Key73] W. Keyser. Kühlschmierstoffe beim Finishen und Honen. *Schmiertechnik und Tribologie*, 20(1):9–15, 1973.
- [KFKH09] J. Keller, V. Fridrici, Ph. Kapsa und J. F. Huard. Surface topography and tribology of cast iron in boundary lubrication. *Tribology International*, 42(6):1011–1018, 2009.
- [KGM<sup>+</sup>16] P. Kersting, D. Gröbel, M. Merklein, P. Sieczkarek, S. Wernicke, A. E. Tekkaya, E. Krebs, D. Freiburg, D. Biermann, T. Weikert, S. Tremmel, D. Stangier, W. Tillmann, S. Matthias, E. Reithmeier, M. Löffler, F. Beyer und K. Willner. Experimental and numerical analysis of tribological effective surfaces for forming tools in Sheet-Bulk Metal Forming. *Production Engineering*, 2016.
- [Khe07] A. Khellouki. *Caractérisation des mécanismes de coupe en superfinition par toilage et de l'intégrité de surface induite dans le cas des aciers traités*. Dissertation, Ecole Nationale Supérieure des Mines, Saint-Étienne, 2007.

- [Kir79] K. Kirner. Die Bearbeitung von harten Plasmaspritzschichten mit Diamant. *Industrie Diamanten Rundschau*, 13(4):328–331, 1979.
- [KK05] F. Klocke und W. König. *Fertigungsverfahren 2: Schleifen, Honen, Läppen*. Springer, Berlin, 4. Auflage, 2005.
- [KK08] F. Klocke und W. König. *Fertigungsverfahren 1: Drehen, Fräsen, Bohren*. Springer, 8. Auflage, 2008.
- [KK14] E. Krebs und P. Kersting. Improving the Cutting Conditions in the Five-axis Micromilling of Hardened High-speed Steel by Applying a Suitable Tool Inclination. *Procedia CIRP*, 14:366–370, 2014.
- [KKTA84] W. König, R. Komanduri, H. K. Tönshoff und G. Ackershott. Machining of Hard Materials. *Annals of the CIRP*, 33(2), 1984.
- [Kle06] W. Kleppmann. *Taschenbuch Versuchsplanung: Produkte und Prozesse optimieren*. Hanser, München [u.a.], 4. Auflage, 2006.
- [KOM06] A. Kirsten, M. Oechsle und R. Moll. HVOF-gespritzte Werkstoffe ersetzen Hartverchromung. *STR Sulzer Technical Review*, 88(1):7–9, 2006.
- [KPWR12] B. Karpuschewski, H.-J. Pieper, F. Welzel und K. Risse. Alternative strategies in finishing cylinder running surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 61(1):559–562, 2012.
- [Kre09] O. Kreil. *Einfluss der Oberflächenstruktur auf Druckverteilung und Schmierfilmdicke im EHD-Kontakt*. Dissertation, Technische Universität München, 2009.
- [KRZ07a] A. Khellouki, J. Rech und H. Zahouani. The effect of abrasive grain's wear and contact conditions on surface texture in belt finishing. *Wear*, 263(1-6):81–87, 2007.
- [KRZ07b] A. Khellouki, J. Rech und H. Zahouani. Influence of the belt-finishing process on the surface texture obtained by hard turning. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture)*, 221(7):1129–1137, 2007.
- [KRZ10] A. Khellouki, J. Rech und H. Zahouani. The effect of lubrication conditions on belt finishing. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 50(10):917–921, 2010.
- [KRZ13] A. Khellouki, J. Rech und H. Zahouani. Micro-scale investigation on belt finishing cutting mechanisms by scratch tests. *Wear*, 308(1-2):17–28, 2013.

- [KSG07] T. I. Khan, G. Saha und L. B. Glenesk. Development of nanostructured HVOF coatings for wear resistant applications. In *10. International Symposium on Advanced Materials*, Seiten 381–389. 2007.
- [KTBS14] B. Karpuschewski, M. Toefke, M. Beutner und W. Spintig. Surface Integrity Aspects of Milled Large Hardened Gears. *Procedia CIRP*, 13:37–42, 2014.
- [KVB93] A. Karimi, C. Verdon und G. Barbezat. Microstructure and hydroabrasive wear behaviour of high velocity oxy-fuel thermally sprayed WC-CO(Cr) coatings. *Surface and Coatings Technology*, 57(1):81–89, 1993.
- [KWR14] B. Karpuschewski, F. Welzel und K. Risse. Analogy Studies of the Effect of Finishing on the Tribological Running-In Behaviour of Engine Components Using the Example of the Cylinder Running Surface. *Advanced Materials Research*, 1018:75–81, 2014.
- [Lan05] P. Langenstein. *Verbesserung der Bearbeitungsqualität beim Zahnradhonen durch Optimierung der Hauptspindeltriebndynamik*. Dissertation, Technische Hochschule Zürich, 2005.
- [LB02] E. Lugscheider und F.-W. Bach. *Handbuch zur thermischen Spritztechnik: Technologien - Werkstoffe - Fertigung*. DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [LBG98] D. A. Lucca, E. Brinksmeier und G. Goch. Progress in Assessing Surface and Subsurface Integrity. *Annals of the CIRP*, 47(2):669–693, 1998.
- [LCG06] D. López, A. Candel und R. Gadow. Herstellung von tribologischen Schutzschichten auf Zylinderlaufflächen durch das HVOF-Verfahren. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 37(4):312–317, 2006.
- [Lim92] R. Limbach. *Entwicklung thermisch gespritzter Verschleißschutzschichten mit günstigem Reibverhalten*. Dissertation, RWTH Aachen, 1992.
- [LTWJ15] C. Lenauer, C. Tomastik, T. Wopelka und M. Jech. Piston ring wear and cylinder liner tribofilm in tribotests with lubricants artificially altered with ethanol combustion products. *Tribology International*, 82:415–422, 2015.
- [LTZ<sup>+</sup>14] M. Lebsanft, M. Tiffe, A. Zabel, W. Zinn, D. Biermann und B. Scholtes. Residual Stresses in Different Heat Treated Workpieces after Turning. *Advanced Materials Research*, 996:652–657, 2014.

- [LZ02] X. Liu und B. Zhang. Effects of grinding process on residual stresses in nanostructured ceramic coatings. *Journal of Materials Science*, 37(15):3229–3239, 2002.
- [LZ03] X. Liu und B. Zhang. Grinding of nanostructural ceramic coatings: damage evaluation. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 43(2):161–167, 2003.
- [LZD02] X. Liu, B. Zhang und Z. Deng. Grinding of nanostructured ceramic coatings: surface observations and material removal mechanisms. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 42(15):1665–1676, 2002.
- [MBC79] M. D. McKay, R. J. Beckman und W. J. Conover. A Comparison of Three Methods for Selecting Values of Input Variables in the Analysis of Output from a Computer Code. *Technometrics*, 21(2):239–245, 1979.
- [MBS<sup>+</sup>08] G. Matthäus, W. Brandl, I.-F. Secosan, G. Marginean, V. Chirila und D. Ackermann. Standard HVOF Process Compared to the HVOF Process for Internal Coating with Fine Powders. *Thermal Spray 2011: Proceedings of the International Thermal Spray Conference*, Seiten 473–476, 2008.
- [MES09] S. Mezghani, M. El Mansori und E. Sura. Wear mechanism maps for the belt finishing of steel and cast iron. *Wear*, 267(1-4):86–91, 2009.
- [MG13] Andrei Manzat und R. Gadow. Untersuchungen zum tribologischen Verhalten von thermischen Spritzschichten: Studies on tribological behaviour of thermal spray coatings. In *Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen, Tribologie-Fachtagung*, 54, Seiten 68/1–68/11. GfT, Aachen, 2013.
- [Mic95] S. Michel. Bandfinishen von Großkurbelwellen. *Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Qualität in der Fertigung*, 3. Fachtagung, Seiten 15–1–15–14, 1995.
- [Mic99] S. Michel. *Entwicklung einer kraftgeregelten Bandfinishtechnologie für die Präzisionsbearbeitung von Schwermaschinenbauteilen*. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1999.
- [MMAC09] R. H. Myers, D. C. Montgomery und C. M. Anderson-Cook. *Response surface methodology: Process and product optimization using designed experiments*. Wiley series in probability and statistics. Wiley, Hoboken, New York, 3. Auflage, 2009.

- [MMR09] A. K. Maiti, N. Mukhopadhyay und R. Raman. Improving the Wear Behavior of WC-CoCr-based HVOF Coating by Surface Grinding. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 18(8):1060–1066, 2009.
- [Moh10] T. Mohn. *Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschutzschichten auf Bearbeitungszentren: Prozessgestaltung und Simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2010.
- [Mon97] D. C. Montgomery. *Design and analysis of experiments*. Wiley, New York, 4. Auflage, 1997.
- [MRS<sup>+</sup>13] A. Malshe, K. Rajurkar, A. Samant, H. N. Hansen, S. Bapat und W. Jiang. Bio-inspired functional surfaces for advanced applications. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(2):607–628, 2013.
- [MRV01] Murthy, J. K. N., D. S. Rao und B. Venkataraman. Effect of grinding on the erosion behaviour of a WC–Co–Cr coating deposited by HVOF and detonation gun spray processes. *Wear*, 249(7):592–600, 2001.
- [MSG<sup>+</sup>07] M. El Mansori, E. Sura, P. Ghidossi, S. Deblaise, T. D. Negro und H. Khanfir. Toward physical description of form and finish-performance in dry belt finishing process by a tribo-energetic approach. *Journal of Materials Processing Technology*, 182(1-3):498–511, 2007.
- [Mus86] H. Mushardt. *Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen*. Dissertation, TU Braunschweig, 1986.
- [MV00] S. Malkin und B. Varghese. Selection of Optimal Superfinishing Parameters. *Journal of Manufacturing Processes*, 2(2):124–130, 2000.
- [MY92] K. Martin und K. Yegenoglu. *HSG-Technologie: Handbuch zur praktischen Anwendung*. Guehring-Automation, 1992.
- [MZS80] Mokhtar, M. O. A., M. Zaki und Shawki, G. S. A. Correlation between the frictional behavior and the physical properties of metals. *Wear*, 65(1):29–34, 1980.
- [Nag82] B. Nagler. Superfinishing and honing. *Tooling and Production*, 48(2):97–104, 1982.
- [NHG08] R. Neugebauer, C. Hochmuth und R. Georgi. Fräsen thermisch gespritzter Hartmetalle. *wt Werkstattstechnik online*, 98(11/12):899–902, 2008.

- [NÖC08] M. Nursoy, C. Öner und İ. Can. Wear behavior of a crankshaft journal bearing manufactured by powder spraying. *Materials & Design*, 29(10):2047–2051, 2008.
- [NPS98] M. C. Nestler, G. Prenzel und T. Seitz. HVOF-spraying vs. hard chrome plating-coating characteristics and aircraft applications. *Proceedings of the 15th Thermal Spray Conference*, 2:1073–1078, 1998.
- [OBF10] J. F. G. Oliveira, A. C. Bottene und T. V. França. A novel dressing technique for texturing of ground surfaces. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 59(1):361–364, 2010.
- [OMIS95] Y. Onchi, N. Matsumori, N. Ikawa und S. Shimada. Porous fine CBN stones for high removal rate superfinishing. *Annals of the CIRP*, 44(1):291–294, 1995.
- [Paf11] K. U. Paffrath. *Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren*. Dissertation, TU Dortmund, 2011.
- [PAM06] J. A. Picas, A. Forn und G. Matthäus. HVOF coatings as an alternative to hard chrome for pistons and valves. *Wear*, 261(5–6):477–484, 2006.
- [Pau08] E. Paucksch. *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden, 12. Auflage, 2008.
- [Paw94] P. Pawlus. A study on the functional properties of honed cylinders surface during running-in. *Wear*, 176(2):247–254, 1994.
- [Paw96] P. Pawlus. A study of the dependence of the functional properties of the cylinder liner surface layer on the operating conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 210(1):17–27, 1996.
- [PHB10] K. U. Paffrath, T. Heymann und D. Biermann. Umweltfreundlicher Glanz. Super-/Micro-Bandfinishen ohne Kühlschmierstoff. *WB Werkstatt und Betrieb*, 143(3):62–64, 2010.
- [PK94] D. W. Parker und G. L. Kutner. HVOF moves into the industrial mainstream. *AMP - Advanced Materials & Processes*, 146(1):31–35, 1994.
- [PM95] T. K. Puthanangady und S. Malkin. Experimental investigation of the superfinishing process. *Wear*, 185(1-2):173–182, 1995.
- [Rab65] E. Rabinowicz. *Friction and wear of materials*. Wiley series on the science and technology of materials. Wiley, 1965.

- [Ran02] J. Randolph. HVOF facility qualification at an airline - importance and benefits for landing gear applications. In *International Thermal Spray Conference*, Seiten 17–22. DVS-Verlag, Düsseldorf, 2002.
- [RBK14] S. Rausch, D. Biermann und P. Kersting. Five-axis grinding of wear-resistant, thermally sprayed coatings on free-formed surfaces. *Production Engineering*, 8(4):423–429, 2014.
- [RK10] D. A. Rigney und S. Karthikeyan. The Evolution of Tribomaterial During Sliding: A Brief Introduction. *Tribology Letters*, 39(1):3–7, 2010.
- [RKC<sup>+</sup>08] J. Rech, G. Kermouche, C. Claudin, A. Khellouki und W. Grzesik. Modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel. *International Journal of Material Forming*, 1(S1):567–570, 2008.
- [RKG<sup>+</sup>08] J. Rech, G. Kermouche, W. Grzesik, C. García-Rosales, A. Khellouki und V. García-Navas. Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 208(1-3):187–195, 2008.
- [RKS13] A. Rehl, C. Klimesch und M. Scherge. Reibungsarme und verschleissfeste Aluminium-Silizium-Zylinderlaufflächen. *Motortechnische Zeitschrift*, 74(12):972–977, 2013.
- [RR97] F. Rastegar und D. E. Richardson. Alternative to chrome: HVOF cermet coatings for high horse power diesel engines. *Surface and Coatings Technology*, 90(1-2):156–163, 1997.
- [Rud08] G. Rudloff. Superfinish von Automobil-Komponenten mit Band. *Spannende Fertigung – Prozesse, Innovationen, Werkstoffe*, 5. Ausgabe:40–53, 2008.
- [SC40] A. M. Swigert und Chrysler Corporation. *The story of Superfinish*. Henry Ford Estate collection. Lynn Publishing Company, 1940.
- [Sch90] M. Scherge. Third-bodies in tribology. *Wear*, 136(1):29–45, 1990.
- [Sch99a] D. M. Schibisch. Kühles Band für beste Güte. Metallbearbeitung. *Automobil Industrie*, 44(10):84–88, 1999.
- [Sch99b] C. Schneider. *Schleifen mit niedriger Schnittgeschwindigkeit und veränderlicher Wirkrichtung*. Dissertation, Universität Bremen, 1999.
- [Sch14] R. Schwarzer. Orientation Microscopy Using the Analytical Scanning Electron Microscope. *Praktische Metallographie*, 51(3):160–179, 2014.

- [SE09] L. Sabri und M. El Mansori. Process variability in honing of cylinder liner with vitrified bonded diamond tools. *Surface and Coatings Technology*, 204(6-7):1046–1050, 2009.
- [SF11] D. M. Schibisch und U. Friedrich. *Superfinish-Technologie: Feinste Oberflächen für höchste Präzision*. Verlag Moderne Industrie, Landsberg, 3. Auflage, 2011.
- [SF15] D. Stickel und A. Fischer. The alteration of micro-contact parameters during run-in and their effect on the specific dissipated friction power. *Tribology International*, 82:287–296, 2015.
- [SFB15] D. Stickel, A. Fischer und R. Bosman. Specific dissipated friction power distributions of machined carburized martensitic steel surfaces during running-in. *Wear*, 330-331:32–41, 2015.
- [SGB<sup>+</sup>07] D. Shakhvorostov, B. Gleising, R. Büscher, W. Dudzinski, A. Fischer und M. Scherge. Microstructure of tribologically induced nanolayers produced at ultra-low wear rates. *Wear*, 263(7-12):1259–1265, 2007.
- [SM94] N. P. Suh und M. Mosleh. The Minimum Coefficient of Friction: What Is It? *Annals of the CIRP*, 43(1):491–495, 1994.
- [SME10] L. Sabri, S. Mezghani und M. El Mansori. A study on the influence of bond material on honing engine cylinder bores with coated diamond stones. *Surface and Coatings Technology*, 205(5):1515–1519, 2010.
- [SMH05] R. Singh, S. N. Melkote und F. Hashimoto. Frictional response of precision finished surfaces in pure sliding. *Wear*, 258(10):1500–1509, 2005.
- [SMT<sup>+</sup>00] A. C. Savarimuthu, I. Megat, H. F. Taber, J. R. Shadley, E. F. Rybicki, W. A. Emery, J. D. Nuse und D. A. Somerville. Sliding Wear Behavior as a Criterion for Replacement of Chromium Electroplate by Tungsten Carbide (WC) Thermal Spray Coatings in Aircraft Applications. In C. C. Berndt, Hrsg., *Thermal Spray 2000: Proceedings of the 1st International Thermal Spray Conference*, Seiten 1095–1104. Montreal, QUE, 2000.
- [SOS<sup>+</sup>13] Silva, E. J. da, Oliveira, J. F. G. de, B. B. Salles, R. S. Cardoso und Reis, V. R. A. Strategies for production of parts textured by grinding using patterned wheels. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62(1):355–358, 2013.
- [SS87] N. P. Suh und N. Saka. Surface Engineering. *Annals of the CIRP*, 36(1):403–408, 1987.

- [SSHB13] J. Schommers, H. Scheib, M. Hartweg und A. Bosler. Reibungsminimierung bei Verbrennungsmotoren. *Motortechnische Zeitschrift*, 74(7/8):566–573, 2013.
- [SSP03] M. Scherge, D. Shakhvorostov und K. Pöhlmann. Fundamental wear mechanism of metals. *Wear*, 255(1-6):395–400, 2003.
- [SUCC11] L. H. Shu, K. Ueda, I. Chiu und H. Cheong. Biologically inspired design. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 60(2):673–693, 2011.
- [SvBH10] K. Siebertz, D. T. van Bebbber und T. Hochkirchen. *Statistische Versuchsplanung: Design of Experiments (DoE)*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2010.
- [SVG82] M. Santochi, M. Vignale und F. Giusti. A study on the functional properties of a honed surface. *Annals of the CIRP*, 31(1):431–434, 1982.
- [SWK07] W. Schatt, K.-P. Wieters und B. Kieback. *Pulvermetallurgie: Technologien und Werkstoffe*. VDI-Buch. Springer-Verlag, Berlin, 2. Auflage, 2007.
- [SWMW89] J. Sacks, W. J. Welch, T. J. Mitchell und H. P. Wynn. Design and Analysis of Computer Experiments. *Statistical Science*, 4(4):409–423, 1989.
- [TBH11] W. Tillmann, I. Baumann und P. Hollingsworth. Einfluss des Spritzwinkels auf die Prozess- und Schichteigenschaften beim Thermischen Spritzen feiner WC-12Co (2-10  $\mu\text{m}$ ) Pulver mittels des HVOF-Verfahrens. In W. Tillmann, Hrsg., *SFB 708 - 4. öffentliches Kolloquium*, Seiten 21–34. Dortmund, 2011.
- [THB11] W. Tillmann, P. Hollingsworth und I. Baumann. Entwicklung HVOF gespritzter feinstrukturierter WC-12Co Schichtsysteme. In B. Wielage, Hrsg., *Tagungsband zum 14. Werkstofftechnischen Kolloquium*, Seiten 63–71. Chemnitz, 2011.
- [Til14] M. Tilger. *Prozessübergreifende Analyse der Fertigungsverfahren Fräsen, Schleifen, Honen hinsichtlich einer gezielten Topographieerzeugung zur Verbesserung des Einlaufverhaltens unter tribologischer Beanspruchung*. Diplomarbeit, Technische Universität Dortmund, 2014.
- [TM00] H. K. Tönshoff und C. Marzenell. Effects of gear honing on flank characteristics and pitting life. *Production Engineering, Research and Development*, 7(1):5–8, 2000.

- [TNH11] W. Tillmann, Jan Nebel und F. Hoffmann. Endkonturnahe Abscheidung von WC-CoCr als funktional gradierte Zwischenschicht für ein reibungsoptimiertes DLC-System. In *14. Werkstofftechnisches Kolloquium*, Seiten 52–60. Chemnitz, 2011.
- [TNP13] W. Tillmann, J. Nebel und W. Piotrowski. Influence of Fine Powder Feedstock ( $-10 + 2 \mu\text{m}$ ) on the HVOF Spraying Characteristics, Coating Morphology, and Properties of WC-CoCr 86-10-4. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(2-3):242–249, 2013.
- [TNS<sup>+</sup>10] W. Tillmann, J. Nebel, C. Schaak, D. Biermann, A. Peuker und T. Brüggemann. Haftung HVOF gespritzter WC-CoCr Schichten auf gefrästen, gestrahlten und geschliffenen Oberflächen. In *13. Werkstofftechnisches Kolloquium*, Seiten 25–36. Chemnitz, 2010.
- [Tön70] T. Tönshoff. *Formgenauigkeit, Oberflächenrauheit und Werkstoffabtrag beim Langhubhonen*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1970.
- [TSL13] W. Tillmann, U. Selvadurai und W. Luo. Measurement of the Young's Modulus of Thermal Spray Coatings by Means of Several Methods. *Journal of Thermal Spray Technology*, 22(2-3):290–298, 2013.
- [TTH<sup>+</sup>11] W. Tillmann, M. Tolan, P. Hollingsworth, I. Baumann und M. Paulus. Nanostructured WC-Co coatings manufactured by fine powders ( $-10 + 2 \mu\text{m}$ ) with ultra-fine carbides (400 nm) by means of HVOF. In *Proceedings of International Thermal Spray Conference & Exposition*. Hamburg, 2011.
- [TW78] H. K. Tönshoff und G. Warnecke. Über die Zerspanbarkeit von Stahl und Gusseisen. *VDI-Zeitschrift*, 120(7):311–318, 1978.
- [vB03] D. T. van Bebber. *PVD-Schichten in Verdrängereinheiten zur Verschleiß- und Reibungsminimierung bei Betrieb mit synthetischen Estern*. Dissertation, RWTH Aachen, 2003.
- [VGGCL<sup>+</sup>08] C. J. Villalobos-Gutiérrez, G. E. Gedler-Chacón, J. G. La Barbera-Sosa, A. Piñeiro, M. H. Staia, J. Lesage, D. Chicot, G. Mesmacque und E. S. Puchi-Cabrera. Fatigue and corrosion fatigue behaviour of an AA6063-T6 aluminum alloy coated with a WC-10Co-4Cr alloy deposited by HVOF thermal spraying. *Surface & Coatings Technology*, 202(18):4572–4577, 2008.
- [VM98] B. Varghese und S. Malkin. Experimental Investigation of Methods to Enhance Stock Removal for Superfinishing. *Annals of the CIRP*, 47(1):232–234, 1998.

- [Wei00] U.-P. Weigmann. Die Endbearbeitung von Zylinderlaufflächen - Der Werkstoff bestimmt die Honttechnologie. *Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren*, (59):440–457, 2000.
- [Wei05a] U.-P. Weigmann. Ausschussquote nach unten gedrückt. Modifiziertes Honverfahren ersetzt Feinbohren beim Bearbeiten von Pleuelstangen. *MM - Maschinenmarkt. Das IndustrieMagazin*, (11):38–40, 2005.
- [Wei05b] U.-P. Weigmann. Warum Pleuelstangen wieder gehont werden. *wt Werkstattstechnik online*, 95(6):469–473, 2005.
- [Wei12] W. Weißbach. *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*. Vieweg + Teubner Verlag, Wiesbaden, 18. Auflage, 2012.
- [WFB<sup>+</sup>10] M. A. Wimmer, A. Fischer, R. Büscher, R. Pourzal, C. Sprecher, R. Hauert und J. J. Jacobs. Wear mechanisms in metal-on-metal bearings: The importance of tribochemical reaction layers. *Journal of Orthopaedic Research*, 28(4):436–443, 2010.
- [WH92] E. Westkämper und L. Höhne. Honing of advanced ceramics. In *Paper-Nr. 92-136*, Technical Paper. Society of Manufacturing Engineers, Seiten 1–16. 1992.
- [Wie11] A. Wiens. *Formhonen von Zylinderlaufbahnen*. Dissertation, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, 2011.
- [WLO05] Y.-Y. Wang, C.-J. Li und A. Ohmori. Influence of substrate roughness on the bonding mechanisms of high velocity oxy-fuel sprayed coatings. *Thin Solid Films*, 485(1-2):141–147, 2005.
- [WSA98] S. Watanabe, N. Sakoda und J. Amano. Fatigue Cracks in HVOF Thermally Sprayed WC-Co Coatings. *Journal of Thermal Spray Technology*, 7(1):93–96, 1998.
- [WWP<sup>+</sup>06] B. Wielage, A. Wank, H. Pokhmurska, T. Grund, C. Rupprecht, G. Reisel und E. Friesen. Development and trends in HVOF spraying technology. *Surface and Coatings Technology*, 201(5):2032–2037, 2006.
- [XRAN03] L. Xiao, B.-G. Rosen, N. Amini und P. H. Nilsson. A study on the effect of surface topography on rough friction in roller contact. *Wear*, 254(11):1162–1169, 2003.
- [Zho01] Z. Zhong. Machining of thermally sprayed WC-Co coatings. *Materials and Manufacturing Processes*, 16(1):103–112, 2001.

- [ZM83] K.-H. Zum Gahr und D. Mewes. Werkstoffabtrag beim Furchungverschleiss. *METALL – Wirtschaft, Wissenschaft, Technik*, 37(12):1212–1217, 1983.
- [Zum81] K.-H. Zum Gahr. Abrasiver Verschleiss metallischer Werkstoffe. In *Fortschritt-Berichte der VDI-Zeitschriften. Reihe 5, Grund- und Werkstoffe*, Jgg. 57. Verein Deutscher Ingenieure, Düsseldorf, 1981.
- [Zum87] K.-H. Zum Gahr. *Microstructure and wear of materials*. Elsevier, Amsterdam and New York, 1987.
- [Zum92] K.-H. Zum Gahr. Reibung und Verschleiß: Ursachen - Arten - Mechanismen. In *Symposium der Deutschen Gesellschaft für Materialkunde*, Seiten 3–14. DGM Informationsgesellschaft Verlag, Oberursel, 1992.
- [Zur90] R. Zurrin. *Variables Formhonen durch rechnergestützte Honprozeßsteuerung*. Dissertation, Universität Karlsruhe, 1990.

# Lebenslauf

## Persönliche Daten

Name: Sebastian Goeke  
Geburtsdatum: 9. November 1983  
Geburtsort: Münster

## Schulbildung

08/1990 – 06/1994 Gemeinschaftsgrundschule Villigst, Schwerte  
08/1994 – 06/2003 Ruhrtal-Gymnasium, Schwerte  
Abschluss: Allgemeine Hochschulreife

## Grundwehrdienst

07/2003 – 03/2004 Wehrpflichtiger, Sanitäter in Stuttgart/Büdel (Niederlande)

## Studium

10/2004 – 09/2010 Studium des Wirtschaftsingenieurwesen an der TU Dortmund  
Vertiefungsrichtung: Produktionsmanagement  
Abschluss: Diplom

## Beruf

06/2004 – 07/2004 Fertigungstechnisches Grundpraktikum bei der Otto Fuchs KG, Meinerzhagen  
08/2005 – 09/2005 Elektrotechnisches Grundpraktikum bei der Otto Fuchs KG, Meinerzhagen  
09/2008 – 05/2009 Studentische Hilfskraft am Institut für Spanende Fertigung (Abteilung: Schleiftechnologie) an der TU Dortmund  
06/2009 – 11/2009 Fachpraktikum Serienbetreuung A4/A5/A6/A7 bei der AUDI AG, Neckarsulm  
12/2009 – 06/2010 Studentische Hilfskraft am Institut für Spanende Fertigung (Abteilung: Schleiftechnologie) an der TU Dortmund  
seit 10/2010 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Spanende Fertigung (Abteilung: Schleiftechnologie) an der TU Dortmund



# Bisher erschienene Bände in der Schriftenreihe des ISF

- Band H1 Mehnen, J.: *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse*. Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 3-8027-8760-9
- Band H2 Zabel, A.: *Prozesssimulation in der Zerspanung – Modellierung von Dreh- und Fräsprozessen*. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8752-2
- Band 1 Adams, F.-J.: *Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996, ISBN 3-8027-8700-5
- Band 2 Friedhoff, J.: *Aufbereitung von 3D-Digitalisierdaten für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1997, ISBN 3-8027-8701-3
- Band 3 Willsch, C.: *Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-8702-1
- Band 4 Enselmann, A.: *HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X
- Band 5 Thamke, D.: *Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrens*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN: 3-8027-8707-2
- Band 6 Gillmeister, F.: *Passive und aktive sekundäre Maßnahmen zur Reduzierung der Hand-Arm-Schwingungsbelastung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8706-4
- Band 7 Mumm, A.: *Analyse und Gestaltung von Werkzeugversorgungssystemen in der spanenden Fertigung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8705-6
- Band 8 Albersmann, F.: *Simulationsgestützte Prozessoptimierungen für die HSC-Fräsbearbeitung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8709-9
- Band 9 Schneider, M.: *Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8708-0
- Band 10 Schroer, M.: *Reiben von Vergütungsstahl mit Einschneiden-Reibahlen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8711-0

- Band 11 Schulte, K.: *Stahlbearbeitung mit Wendeschneidplatten-Bohrern bei reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8710-2
- Band 12 Mehnen, J.: *Evolutionäre Flächenrekonstruktion*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8712-9
- Band 13 Bruchhaus, T.: *Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8713-7
- Band 14 Meng, J.: *Freiformflächenmanipulation für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8714-5
- Band 15 Buschka, M.: *Formgedächtnistechnik - Prozessgestaltung beim Drehen und Bohren von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2002, ISBN 3-8027-8715-3
- Band 16 Liedschulte, M.: *Untersuchungen zum Bohren von Magnesiummatrix-Verbundwerkstoffen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8719-6
- Band 17 Finke, M.: *Untersuchungen zur Auslegung und Optimierung des Innenrund-Längsschleifens von Futterteilen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8717-X
- Band 18 Löbbe, H.: *Tiefbohren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8718-8
- Band 19 Opalla, D.: *Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1
- Band 20 Zabel, A.: *Simulationsgestützte Vorhersage des Verschleißverhaltens von Fräswerkzeugen beim Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8720-x
- Band 21 Schwietering, C.: *Technologische Aspekte der mikromechanischen Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8721-8
- Band 22 Johlen, G.: *Prozessoptimierung für die Hartfeinbearbeitung durch die Kombination von Hartdrehen und Schleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8722-6
- Band 23 Guntermann, G.: *Aspekte des Hochgeschwindigkeits-Hartfräsens im Werkzeug- und Formenbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8723-4
- Band 24 Lange, M.: *Prozessgestaltung bei der spanenden Bearbeitung von kurzfaserverstärkten Magnesiumlegierungen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8724-2

- Band 25 Schulte, M.: *Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8725-0
- Band 26 Du, S.: *Simulation and Tool Path Optimization for the Hexapod Milling Machine*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- Band 27 Loichinger, A.: *Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung rotierender Werkzeuge*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- Band 28 Koehler, W.: *Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8728-5
- Band 29 Kalveram, M.: *Analyse und Vorhersage der Prozessdynamik und Prozessstabilität beim Hochgeschwindigkeitsfräsen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 3-8027-8729-3, 978-3-8027-8729-4
- Band 30 Hagedorn, M.: *Herstellung von Verbundbauteilen durch Einwalzen - Verfahrensentwicklung und experimentelle Grundlagen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8730-7, ISBN 978-3-8027-8730-0
- Band 31 Peters, C.: *Herstellung und Einsatzverhalten von Keramik-Hartmetall-Verbundbohrwerkzeugen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8731-5, ISBN 978-3-8027-8731-7
- Band 32 Stautner, M.: *Simulation und Optimierung der mehrachsigen Fräsbearbeitung*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8732-3, 978-3-8027-8732-4
- Band 33 Surmann, T.: *Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsiges Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8733-1, 978-3-8027-8733-1
- Band 34 Damm, P.: *Rechnergestützte Optimierung des 5-Achsen-Simultanfräsens von Freiformflächen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8734-X, 978-3-8027-8734-8
- Band 35 Hesterberg, S.: *Trockenbearbeitung nichtrostender Stähle - Prozessgestaltung für das Drehen und Bohren mit Wendeschneidplatten*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8735-8, 978-3-8027-8735-5
- Band 36 Kötter, D.: *Herstellung von Schneidkantenverrundungen und deren Einfluss auf das Einsatzverhalten von Zerspanwerkzeugen*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8736-6, 978-3-8027-8736-2
- Band 37 Petzoldt, V.: *Formgedächtnistechnik – Tiefbohren und Mikrofräsen von NiTi*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8737-4, 978-3-8027-8737-9

- Band 38 Zhang, L.: *Accuracy Enhancement of a Hexapod Machine Tool*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8738-6
- Band 39 Webber, O.: *Untersuchungen zur bohrtiefenabhängigen Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8739-3
- Band 40 Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8740-9
- Band 41 Kress, J.: *Auswahl und Einsatz von polykristallinem kubischem Bornitrid beim Drehen, Fräsen und Reiben*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8741-6
- Band 42 Hammer, N.: *Spanende Bearbeitung endlos stahlverstärkter Aluminiummatrixstrangpressprofile*. Dissertation Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8742-3
- Band 43 Jansen, T.: *Entwicklung einer Simulation für den NC-Formschleifprozess mit Torusschleifscheiben*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8743-0
- Band 44 Noyen, M.: *Analyse der mechanischen Belastungsverteilung in der Kontaktzone beim Längs-Umfangs-Planschleifen*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8744-7
- Band 45 Kahnis, P.: *Analyse von Größeneinflüssen bei einer Herabskalierung des Fräsprozesses in den Mikrobereich*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2008, ISBN 978-3-8027-8745-4
- Band 46 Bergmann, S.: *Beitrag zur Zerspanung intermetallischer  $\gamma$ -Titanaluminide durch Bohren, Gewindebohren und Fräsen*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8746-1
- Band 47 Kersting, M.: *Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2
- Band 48 Enk, D.: *Untersuchungen zum dynamischen Stabilitätsverhalten von Fräswerkzeugen zur HSC-Bearbeitung*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8748-5
- Band 49 Rautenberg, J.: *Simultane fünffachsige Fräsbearbeitung von Aluminiumstrukturbau-teilen*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8754-6
- Band 51 Mohn, T.: *Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschutzschichten auf Bearbeitungszentren – Prozessgestaltung und Simulation*. Dissertation Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8751-5

- Band 52 Kahleyß, F.: *Grundlagenuntersuchungen und simulationsbasierte Optimierung zur fünfachsigen Mikrofräsbearbeitung von NiTi-Formgedächtnislegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8753-9
- Band 53 Weckerle, T.: *Konzeption und Entwicklung einer standardisierten Datenübertragung von Schleifoperationen für Werkzeugschleifmaschinen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8756-0
- Band 54 Marschalkowski, K.: *Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungsimmenrund-Schälschleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8758-4
- Band 55 Kersting, P.: *Simulation und Analyse regenerativer Werkstückschwingungen bei der NC-Fräsbearbeitung von Freiformflächen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8757-7
- Band 56 Hossam, M.: *Chatter Occurrence at Different Natural Frequencies of Milling Machine Axes*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8759-1
- Band 57 Faraz, A.: *Experimental Study On Delamination, Mechanical Loads and Tool Wear in Drilling of Woven Composite Laminates*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8761-4
- Band 58 Paffrath, K.-U.: *Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8762-1
- Band 59 Kessler, N.: *Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8763-8
- Band 60 Felderhoff, J. F.: *Prozessgestaltung für das Drehen und Tiefbohren schwefelarmer Edelbaustähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8765-2
- Band 61 Engbert, T.: *Fließbohrbearbeitung und Innengewinfertigung an Leichtbaustrukturen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8764-5
- Band 62 Würz, E.: *Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8767-6
- Band 63 Terwey, I.: *Steigerung der Leistungsfähigkeit von Vollhartmetallwendelbohrern durch Strahlspanen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8766-9
- Band 64 Pantke, K.: *Entwicklung und Einsatz eines temperatursensorischen Beschichtungssystems für Zerspanwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8769-0

- Band 65 Scheidler, A. V.: *Simulation des NC-Formschleifprozesses mit unterschiedlichen CBN-Schleifscheibenformen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8768-3
- Band 66 Heilmann, M.: *Tiefbohren mit kleinen Durchmessern durch mechanische und thermische Verfahren – Prozessgestaltung und Verfahrenskombination*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8770-6
- Band 67 Machai, C.: *Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von  $\beta$ -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8772-0
- Band 68 Feldhoff, M.: *Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duomere*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3
- Band 69 Baschin, A.: *Analyse und Simulation der Prozessdynamik und -stabilität beim NC-Mikrofräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8773-7
- Band 70 Sacharow, A.: *Kompensation von Formabweichungen durch adaptive Freiformdeformation der CAD/CAM-Daten*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8774-4
- Band 71 Wagner, T.: *Planning and Multi-Objective Optimization of Manufacturing Processes by Means of Empirical Surrogate Models*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2013, ISBN 978-3-8027-8775-1
- Band 72 Zhang, L. J.: *Untersuchungen zum Drehen und Bohren der Nickelbasislegierung Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2014, ISBN 978-3-8027-8776-8
- Band 73 Schlenker, J.: *Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8777-5
- Band 74 Peuker, A.: *Werkzeugentwicklung für die Transplantation thermisch gespritzter mikrostrukturierter Funktionsschichten auf Druckgusswerkstücke*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8779-9
- Band 75 Upmeier, T.: *Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9
- Band 76 Ungemach, E.: *Simulationsbasierte Adaption von NC-Fräsprogrammen zur Vermeidung von Ratterschwingungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8780-5
- Band 77 Heymann, T.: *Schleifen und Polierschleifen von wendelförmigen Spannuten an Vollhartmetallbohrwerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8778-2

- Band 78 Bleckmann, T.: *Simulationsbasierte Auslegung von Fräsprozessen für die Großserienfertigung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8781-2
- Band 79 Steiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zur Mikrofräsbearbeitung des austenitischen Edelstahls X5CrNi18-10*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8783-6
- Band 80 Odendahl, S.: *Entwicklung eines multiskaligen Simulationssystems zur Analyse und Optimierung von Zerspanprozessen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8786-7
- Band 81 Beer, N.: *Systematische Untersuchung von Vollhartmetall-Wendelbohrern zum Bearbeiten von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8784-3
- Band 82 Rausch, S.: *Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8785-0
- Band 83 Hartmann, H.: *Analyse der Außenlängsdreh- und Einlippentiefbohrbearbeitung hochfester bainitischer und vergüteter Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8788-1
- Band 84 Rautert, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8789-8
- Band 85 Iovkov, I.: *Technologische Analyse des Tiefbohrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4