

Meik Tilger

**Prozesswechselwirkungen beim
Microfinishen von Funktionsflächen
rotationssymmetrischer Bauteile**



Schriftenreihe des ISF
Hrsg.: Dirk Biermann

Prozesswechselwirkungen beim Microfinishen von Funktionsflächen
rotationssymmetrischer Bauteile

Zur Erlangung des akademischen Grades eines

Dr.-Ing.

von der Fakultät Maschinenbau
der Technischen Universität Dortmund

Dissertation

vorgelegt von

Meik Tilger

aus

Königstein im Taunus

Tag der mündlichen Prüfung: 28. Oktober 2025

1. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann

2. Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Heinzl

Dortmund, 2026

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 abrufbar.

ISBN 978-3-8027-8936-6

Danksagung

Die vorliegende Dissertation habe ich im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Spanende Fertigung (ISF) verfasst. Für das entgegengebrachte Vertrauen möchte ich mich besonders bei meinem Doktorvater Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann bedanken. Für die Übernahme des Koreferats danke ich Prof. Dr.-Ing. habil. Carsten Heinzel. Mein Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Frank Walther für seine Mitwirkung in der Prüfungskommission sowie apl. Prof. PD Dr.-Ing. Dipl.-Inform. Andreas Zabel für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Bei den aktuellen und ehemaligen Kolleginnen und Kollegen des ISF und insbesondere der Abteilung Schleiftechnologie möchte ich mich für die gute Zusammenarbeit und den freundschaftlichen Umgang miteinander bedanken. Besonders hervorheben möchte ich Lukas Vogel, Tountzer Tsagkir Dereli und Genevieve Günther für viele konstruktive Hinweise sowie Juan Sebastian Palomeque Vargas für die Unterstützung bei Matlab. Ein großer Dank gilt auch unseren Technikern Jörg Eichmann, Michael Kater und Tobias Hoffmann für viel praktische Unterstützung sowie Nicole Knepe für die Durchsicht meiner Arbeit und viele gute Ratschläge. Bedanken möchte ich mich insbesondere auch bei Marcel Bosch für viele spannende Gespräche zum Microfinishen und die, über das Fachliche hinaus gewonnene Freundschaft.

Ein ganz besonderer Dank gilt meinem in dieser Zeit neu gewonnenen Freund Ulf Hensler, der mich in einer neben der Dissertation besonders herausfordernden Lebensphase unterstützt hat. Allen meinen weiteren Freunden möchte ich ebenso Danken und insbesondere gilt dies für: Daniel Klein, Konstantinos Papadopolous und Simone Bachmann, Timo Grünhage, Linda Gawol und Gad Phan Pheng sowie Simon Schuster. Meiner Mutter und meinem Stiefvater gilt ebenso ein besonderer Dank für all die Unterstützung, die es mir erst ermöglicht hat, diesen Weg zu gehen.

Bei meiner Lebensgefährtin Janina möchte ich mich von ganzem Herzen bedanken, für viel Verständnis, den unermüdlichen Rückhalt sowie die Aufmerksamkeit, die du mir und auch meinen Söhnen schenkst!

Tom und Theo – vielen Dank für jeden gemeinsamen Moment!

Kurzfassung

Prozesswechselwirkungen bei der Herstellung von Funktionsflächen rotationssymmetrischer Bauteile mittels Microfinishen

In allen technischen Anwendungen mit mechanischer Kraftübertragung sind Bauteilkomponenten und insbesondere deren Oberflächen hohen Belastungen ausgesetzt. Die Wechselwirkung der Oberflächen im tribologischen Kontakt beeinflusst sowohl die Bauteillebensdauer als auch das Funktionsverhalten des gesamten Systems. An den Komponenten in Antriebssystemen unterliegen viele funktionsrelevante Oberflächen der Gleit-Reibbeanspruchung. Die Reibung beeinflusst hierbei die Effizienz und das Verschleißverhalten in den mechanischen Systemen, weshalb die Reibungsreduktion sowohl ökologisch als auch ökonomisch wichtig ist.

Die resultierende Reibung gleit-reibbeanspruchter Oberflächen und damit auch das Funktionsverhalten, werden durch viele unterschiedliche Eigenschaften und Parameter beeinflusst. Hierzu zählen zum Beispiel die Kontaktverhältnisse und Reibungsart, aber auch die Oberflächentopographie und -integrität der Kontaktpartner, die meist durch eine mechanische Bearbeitung konditioniert werden. Aus der Vielzahl an Einflussfaktoren ergeben sich viele Stellschrauben zur Reibungsminimierung für gleit-reibbeanspruchte Oberflächen, die unterschiedliche Disziplinen, wie die Tribologie, die Maschinenelemente, die Oberflächentechnik und die spanende Fertigung umfassen. Zu Letzterer zählen auch Honverfahren, wie das Microfinishen, auch Kurzhubhonen oder Superfinishen genannt, das ein relevantes Bearbeitungsverfahren zur Herstellung gleit-reibbeanspruchter Oberflächen ist.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird das Microfinishen mit Band unter Berücksichtigung des elastischen Werkzeugverhaltens betrachtet. Hierbei wird für unterschiedliche Andrückelemente die Kontaktzone und die daraus resultierende Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück sowie deren Einfluss auf die Prozesswechselwirkungen untersucht. Auf Basis gezielt angepasster flexibler Federstahl-Andrückelemente wird analysiert, ob sich die unterschiedlichen Anforderungen hinsichtlich radialer Welligkeit, axialer Kontur und Bauteiltopographie mittels Microfinishen mit Band erreichen lassen. Ziel der Betrachtungen ist es, die Herstellung von technischen Funktionsflächen mittels Microfinishen genauer zu verstehen und auf Basis der Erkenntnisse Handlungsempfehlungen zu geben, um die Prozessauslegung zur Herstellung technischer Funktionsflächen zu optimieren.

Abstract

Process Interactions in Manufacturing of Functional Surfaces of Rotationally Symmetrical Components Using Microfinishing

In all technical applications involving mechanical power transmission, component parts and, particularly, their surfaces are exposed to high loads. The interaction of surfaces in tribological contact influences both the service life of the components and the functional behaviour of the entire system. Many functionally relevant surfaces of components in drive systems are exposed to sliding friction loads. Friction affects the efficiency and wear behaviour in mechanical systems, making friction reduction important for both ecological and economic reasons.

The resulting friction of surfaces under sliding friction load, and thus also their functional behaviour, are influenced by many different properties and parameters. These include, for example, the contact conditions and type of friction, but also the surface topography and integrity of the contact partners, which are usually conditioned by mechanical processing. The multitude of influencing factors results in numerous parameters for minimising friction on surfaces exposed to sliding friction loads, encompassing various disciplines such as tribology, machine elements, surface technology and machining. The latter includes honing processes such as microfinishing, also known as short-stroke honing or superfinishing, which is a relevant machining process for producing surfaces exposed to sliding friction loads.

This thesis considers microfinishing with belt in the context of elastic tool behaviour. In this context, the contact zone and the resulting surface pressure between tool and workpiece, as well as the process interactions are analysed for different contact elements. Based on specifically adapted flexible spring steel contact elements, it is analysed whether the different requirements in terms of radial waviness, axial contour and component topography can be achieved through microfinishing with belt. The aim of the investigations is to gain a more precise understanding of the production of technical functional surfaces by means of microfinishing. Based on the findings, recommendations will be provided for optimising the process design for the production of technical functional surfaces.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Funktionsflächen rotationssymmetrischer Bauteile.....	3
2.1.1	Einordnung und Definition von Funktionsflächen.....	3
2.1.2	Tribologie und Kontaktmechanik.....	4
2.1.3	Merkmale und Anforderungen an rotationssymmetrische Funktionsflächen...	7
2.2	Microfinishen/Kurzhubhonen.....	10
2.2.1	Kinematik, Prozessparameter und Einflussgrößen	11
2.2.2	Finishwerkzeuge.....	13
2.2.3	Andrückelemente.....	15
2.2.4	Materialabtragsmechanismen	16
2.2.5	Prozesswechselwirkungen beim Microfinishen.....	18
3	Motivation und Zielsetzung.....	23
4	Experimentelle Bedingungen	27
4.1	Werkstücke und Werkstoffeigenschaften	27
4.2	Werkzeugmaschinen.....	28
4.3	Werkzeugsysteme.....	29
4.3.1	Andrückrollen.....	29
4.3.2	Flexibles Federstahl-Andrückelement	30
4.4	Mess- und Analysetechnik.....	32
4.4.1	Ermittlung der Kontaktfläche und der resultierenden Flächenpressung	32
4.4.2	Werkstückanalyse.....	33
4.4.3	Prozess- und Einsatzverhalten	35
4.4.4	Statistische Versuchspläne und Auswertemethoden	35
5	Analyse der Kontaktsituation und ihres Einflusses auf den Microfinishprozess	37
5.1	Experimentelle Analyse der Kontaktsituation für Andrückrollen.....	37
5.2	Gegenüberstellung der Kontaktsituation für Andrückrollen und flexible Federstahl-Andrückelemente.....	41
5.3	Einfluss der Flächenpressung auf den Microfinishprozess	44

6	Prozesswechselwirkungen für das flexible Federstahl-Andrückelement.....	53
6.1	Einsatzverhalten beim Microfinishen mit flexiblem Federstahl-Andrückelement.....	53
6.1.1	Einfluss des Bandvorschubs.....	53
6.1.2	Einfluss unterschiedlicher Kühlschmierstoff-Strategien.....	56
6.2	Einfluss der Werkstückumschlingung auf das Prozessergebnis.....	68
6.2.1	Gegenüberstellung der Bearbeitung mit FFA und mit Andrückrolle.....	68
6.3	Einfluss der Prozesswechselwirkungen auf relevante Eigenschaften technischer Funktionsflächen.....	73
6.3.1	Beeinflussung der Oberflächentopographie.....	73
6.3.2	Beeinflussung der axialen Kontur.....	78
6.3.3	Beeinflussung der radialen Welligkeit.....	79
6.4	Mehrstufige Prozessbetrachtung.....	82
6.5	Microfinishbearbeitung zur Reduktion von Schallemissionen.....	88
7	Herstellung technischer Funktionsflächen durch angepasste flexible Federstahl-Andrückelemente	91
7.1	Beeinflussung der axialen Kontur durch angepasste FFA.....	93
7.1.1	Einfluss der Aussparung.....	95
7.1.2	Einfluss der Korngröße.....	98
7.2	Beeinflussung der Oberflächengüte durch angepasste FFA.....	100
7.3	Radiale Welligkeit der Oberfläche durch angepasste FFA.....	102
8	Handlungsempfehlung zur Prozessauslegung beim Microfinishen mit Band.....	105
8.1	Empirische Ersatzmodelle zur Approximation der Flächenpressung.....	108
9	Zusammenfassung und Ausblick.....	111
	Literaturverzeichnis.....	117
	Anhang.....	130
	Regressionsmodelle und Regressionsformeln für die Flächenpressung.....	130
	Regressionsformeln der dargestellten 3D-Regressionsmodelle.....	138
	Bisher erschienene Bände der Schriftenreihe des ISF	141

Abkürzungen

Abkürzung	Bezeichnung
BTA	Boring and Trepanning Association
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
EN	Europäische Norm
Fa.	Firma
FFA	Flexibles Federstahl-Andrückelement
FFT	Fast Fourier Transformation
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
HRC	Härte nach Rockwell
HV	Härte nach Vickers
ISO	International Organization for Standardization
KSS	Kühlschmierstoff
MMS	Minimalmengenschmierung
NVH	Noise, Vibration, Harshness
PVD	Physikalische Gasphasenabscheidung (Physical Vapour Deposition)
QT	Quenched and Tempered
REM	Rasterelektronenmikroskop
VDI	Verein Deutscher Ingenieure
Wz	Werkzeug
W/U	Wellen/Umfang
3D	Dreidimensional

Formelzeichen

Chemische Formelzeichen und Werkstoffbezeichnungen

Chemische Bezeichnung	Name; Werkstoff-Nr.
Al	Aluminium
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid (weitere Namen: Korund)
C	Kohlenstoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
C100S	Federbandstahl; 1.1274
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Ni	Nickel
O	Sauerstoff
P	Phosphor
S	Schwefel
Si	Silizium
SiC	Siliziumcarbid
16MnCr5	Einsatzstahl; 1.7131
42CrMo4	Vergütungsstahl; 1.7225
100Cr6	Wälzlagerstahl; 1.3505

Griechische Buchstaben

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
α_H	Honwinkel	°
ΔF_t	Differenz der Tangentialkraft F_t zu zwei	-
ΔR_z	Differenz der Rz-Werte (initial-final)	-
ΔR_{zrel}	Relative Veränderung der Rz-Werte	-
λ_c	Cut-off-Filter	mm

Lateinische Kleinbuchstaben

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
a_e	Arbeitseingriff/Zustellbetrag	μm
b_A	Breite der Elastomer-Andrückrolle	mm
b_K	Breite des konstanten Werkzeugkontaktes	mm
b_F	Breite des Federstahlbandes	mm
b_R	Breite der rautenförmigen Aussparung im Federstahl-	mm
b_W	Breite des Werkstücks / Wellenabsatzes	mm
b_{Wz}	Breite des Werkzeugs / Finishbandes	mm
d	Werkstückdurchmesser	mm
d_A	Durchmesser des Andrückelements	mm
d_K	Mittlerer Korndurchmesser/Korngröße	μm
f	Frequenz	Hz
f_{Os}	Oszillationsfrequenz	Hz
f_{ab}	Verhältnis der Flächen von aufgeworfenem zu	-
$h_{cu,eff}$	Effektive Spannungsdicke	
h_R	Höhe der rautenförmigen Aussparung im	mm
l_a	Länge der Kante a	mm
l_b	Länge der Kante b	mm
l_K	Kontaktlänge	mm
l_m	Messstrecke	mm
$l_{m,G}$	Gesamtmessstrecke	mm
l_{Os}	Oszillationsweite	
m	Steigungskoeffizient	-
n	Drehzahl	min^{-1}
n_K	Anzahl der Mikrokontakte einer Kontaktfläche	-
p_A	Flächenpressung	N/mm^2
p_{In}	Einstelldruck	bar
t	Prozesszeit/Bearbeitungsdauer	s
t_m	Messzeit	s
v_{ca}	Axiale Komponente der Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_c	Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{ct}	Tangentiale Komponente der Schnittgeschwindigkeit	m/min
v_{fb}	Bandvorschubgeschwindigkeit	mm/min
w_E	Elastomerdicke	mm

Lateinische Großbuchstaben

Formelzeichen	Bezeichnung	Einheit
A_0	Nominelle Kontaktfläche	mm^2
$A_1; A_2$	Fläche des zur Seite verdrängten Materials im	μm^2
A_{Kon}	Kontaktfläche des Werkzeug-Werkstück-Kontaktes	mm^2
A_R	Fläche des abgetragenen Materials im Furchungsprofil	μm^2
A_r	Reale Kontaktfläche	mm^2
A_r^i	Mikrokontaktfläche i	μm^2
F_{An}	Andrückkraft	N
F_a	Axialkraft	N
F_n	Normalkraft	N
F_t	Tangentialkraft	N
H_R	Härte der Elastomer-Andrückrolle	Shore A
H_{Rc}	Werkstückhärte nach Rockwell	HRC
R_a	Arithmetischer Mittenrauwert	μm
R_k	Kernrautiefe	μm
R_{max}	Maximale Höhe des Rauheitsprofils	μm
R_{pk}	Reduzierte Spitzenhöhe	μm
R_{vk}	Reduzierte Muldentiefe	μm
R_z	Gemittelte Rautiefe	μm
R^2	Bestimmtheitsmaß	-
R_{adj}^2	Adjustiertes Bestimmtheitsmaß	-

1 Einleitung

Funktionsflächen in mechanischen Systemen sind meist hohen Belastungen ausgesetzt und müssen unterschiedliche Anforderungen erfüllen. Insbesondere Lagerflächen, wie sie im Bereich der Antriebs- und Lagertechnik eingesetzt werden, zählen zu solchen hochbelasteten Funktionsflächen. Aufgrund ihrer Funktion als Gleit-Reibpartner im tribologischen Kontakt unterliegen diese der Reibbeanspruchung. Diese Reibung beeinflusst die CO₂-Emissionen und auch die Lebensdauer von Lagerflächen, weshalb es diese aus ökologischen und ökonomischen Aspekten zu reduzieren gilt [HAE12; CH15]. Darüber hinaus tragen Lager oder Lagerstellen von Antriebskomponenten häufig hohe Lasten und müssen für die zu realisierenden Funktionen konditioniert werden. Es gilt hierbei, sowohl die Anforderungen an die Form- und Maßhaltigkeit, als auch die tribologischen Eigenschaften zu vereinen, um die bestmögliche Funktionalität gewährleisten zu können. Die Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle, Funktionen und damit einhergehenden Anforderungen an solche Komponenten erfordern ein zunehmendes Verständnis der Wechselwirkung erzeugter Bauteilspezifikationen und deren Funktionalität [HAE12; Ros15].

Aus diesem Bedarf an optimal ausgelegten Funktionsflächen resultieren besondere Herausforderungen für die Fertigungstechnik, Bauteile mit hohen Qualitätsanforderungen, wie bspw. besonders niedrigen Formtoleranzen oder sehr hohen Oberflächengüten, prozesssicher und wirtschaftlich herzustellen. Zur Fertigung von gleit-reibbeanspruchten Funktionsflächen, wie bspw. Lagerstellen, eignen sich hierzu Honverfahren. Diese der spanenden Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide zugeordneten mechanische Bearbeitungsverfahren eignen sich aufgrund der Kinematik und Prozesswechselwirkungen zur Herstellung reibungsoptimierter Oberflächen mit hoher Form- und Maßhaltigkeit [Goe16]. Das Microfinishen mit Bandwerkzeug, auch Kurzhubhonen genannt, ist hierbei eine Verfahrensvariante, die für die Bearbeitung außenliegender rotationssymmetrischer Funktionsflächen eingesetzt wird. Das Bandwerkzeug wird hierbei über ein Andrückelement geführt und durch Kraftinduktion mit dem Werkstück in Kontakt gebracht. Neben der kraftinduzierten Prozessführung, die einen flächenhaften Werkzeug-Werkstück-Kontakt erzeugt, ist die Überlagerung der tangentialen Schnittgeschwindigkeit mit einer orthogonal dazu oszillierenden Schnittkomponente eine besondere Verfahrenscharakteristik. Diese Kinematik des Verfahrens bietet, insbesondere durch die kraftinduzierte Prozessführung, viele Vorteile im Bereich der Oberflächenfeinbearbeitung. Gleichzeitig sind damit die Möglichkeiten der gezielten Formerzeugung begrenzt, woraus sich Einschränkungen in der Anwendung ergeben [SF01]. Darüber hinaus bestehen Wechselwirkungen zwischen der Wahl des

Andrückelements sowie der kraftinduzierten Prozessführung, die das Prozessverhalten und Prozessergebnis maßgeblich beeinflussen.

Ausgehend von der Analyse der Kontaktbedingungen zwischen Werkzeug und Werkstück werden unterschiedliche Andrückelemente und ihr Prozessverhalten untersucht. Hierbei liegt der Fokus auf der Erzeugung rotationssymmetrischer Funktionsflächen mit hohen Anforderungen an Topographie, radiale Welligkeit und axiale Kontur. Die Prozesswechselwirkungen werden unter Berücksichtigung unterschiedlicher Kühlschmierstoffstrategien betrachtet. Darüber hinaus erfolgen experimentelle Einsatzversuche mit speziell ausgelegten Andrückelementen zur Optimierung des Microfinishprozesses und zur gezielten Herstellung hochbelastbarer technischer Funktionsflächen.

2 Stand der Technik

In jedem mechanischen System existieren vielzählige Oberflächen, die für die Funktion einzelner Komponenten und letztlich die Funktion des gesamten Systems unerlässlich sind. Solche Oberflächen, die das Einsatzverhalten einzelner Komponenten beeinflussen, lassen sich allgemein als Funktionsfläche bezeichnen. Meist sind es diese Oberflächen, die neben der Funktionsrelevanz auch den höchsten Belastungen des Bauteils ausgesetzt sind. Neue Entwicklungen, insbesondere im Bereich von Antriebssystemen, sowie die allgemein steigenden Anforderungen an die Lebensdauer von Bauteilkomponenten erfordern ein zunehmendes Verständnis der Wechselwirkung erzeugter Spezifikationen, wie der Oberflächentopographie, der radialen Welligkeit und der axialen Kontur hinsichtlich der Bauteilfunktionalität [HAE12; Ros15].

Im Folgenden findet eine detaillierte Betrachtung der Anforderungen und Beurteilung von rotationssymmetrischen Funktionsflächen statt. Aufbauend darauf wird mit dem Microfinishen ein Bearbeitungsverfahren vorgestellt, das insbesondere zur gezielten Herstellung von Funktionsflächen Anwendung findet.

2.1 Funktionsflächen rotationssymmetrischer Bauteile

2.1.1 Einordnung und Definition von Funktionsflächen

Evans und Bryan definieren Funktionsflächen als sogenannte technische Oberflächen, für die die Bearbeitungsprozesse hinsichtlich der zu erzielenden Oberflächen- und Randzoneneigenschaften optimiert sind, um der Oberfläche so spezifische Funktionen zu ermöglichen [EB99; GC14]. Im Umkehrschluss ist nach *Santo und Davim* eine technische Oberfläche ebenso eine Funktionsfläche und die Begriffe verstehen sich synonym. Je nach Gewichtung auf die Funktion oder den Herstellungsprozess der Oberfläche kann der jeweilige Begriff verwendet werden [SD14; GC14]. Abgegrenzt werden kann jedoch die strukturierte Oberfläche als Funktionsfläche. Diese ist über das Vorhandensein eines deterministischen Musters an geometrischen Merkmalen definiert, die in der Regel ein hohes Seitenverhältnis aufweisen, um eine Funktion zu erfüllen [EB99; SD14]. *Stout und Blunt* haben darüber hinaus Unterklassifizierungen für technische Oberflächen formuliert, die strukturierte Oberflächen hinsichtlich der Struktur-Orientierung in direktional und nicht direktional unterscheiden. Somit können auch mittels elektrochemischer Verfahren erzeugte Oberflächen mit Nanostruktur den strukturierten Oberflächen zugeordnet werden [SB01]. Grundlegend festzuhalten ist jedoch, dass nicht jede Funktionsfläche eine strukturierte Oberfläche ist, allerdings gelten strukturierte Oberflächen grundsätzlich als Funktionsflächen: Beispielsweise können durch Mikrofräsen Strukturen an

Umformwerkzeugen hergestellt werden, die das Fließverhalten bei der Blechmassivumformung dahingehend beeinflussen, dass Riss- oder Faltenbildungen verhindert werden [MB21; BMS+20; LAE+16].

Allgemein werden unter Funktionsflächen solche Oberflächen verstanden, deren Form und Topographie für einen expliziten Anwendungsfall ausgelegt sind, um innerhalb eines technischen Systems eine oder mehrere genau definierte Funktionen zu erfüllen [GC14]. Unter Berücksichtigung dieser Beschreibung finden sich Funktionsflächen in allen technischen Bereichen von Antriebstechnik, Fluid-Energiemaschinen, Anlagenbau etc. bis in die Mikrosystemtechnik. Aufgaben bzw. Funktionen der Funktionsflächen dienen i. d. R. der Veränderung oder Übertragung von Ist-Zuständen in mechanischen, hydraulischen, pneumatischen und elektrischen, aber auch chemischen Systemen. Das wohl bekannteste und eines der ältesten Beispiele sind Plateau-gehobte Oberflächen von Zylinderlaufbahnen, die durch ihre gezielt erzeugte Topographie das tribologische Verhalten verbessern [SD14; GC14]. Weitere Beispiele für Funktionen, die an Oberflächen gezielt beeinflusst werden können, sind unter anderem Strömungsverhalten von Fluiden und Gasen, die Aufnahmefähigkeit von Kräften in mechanischen Systemen, die Gleit-Reibeigenschaften oder das Fließverhalten von Werkstoffen auf dieser Fläche [MB21; GBS+14; Goe16; Kra12].

Aus der Vielzahl an unterschiedlichen Einsatzgebieten und Funktionen ergeben sich unterschiedliche Anforderungen an die Funktionsflächen aufgrund der jeweils auftretenden Belastungen und der zu realisierenden Aufgaben. Daher ist es nicht möglich, allgemeine Leitlinien zur Erstellung von Funktionsflächen zu formulieren. Sowohl die Erstellung der Funktionsfläche als auch deren Bewertung muss im direkten Zusammenhang mit dem spezifischen Anwendungsfall betrachtet werden [SGG19].

Da der Fokus dieser Arbeit auf einem Herstellungsverfahren funktionaler bzw. technologischer Oberflächen liegt, erfolgt die Eingrenzung auf die hierfür gängigen Anwendungsbeispiele. Somit werden ausschließlich Funktionsflächen in Form von Mantelflächen rotationssymmetrischer Bauteile betrachtet, welche spezifisch für den tribologischen Belastungsfall im Gleit-Reibkontakt ausgelegt sind. Typische Anwendungsbeispiele hierfür sind Lagerflächen von bspw. Antriebswellen im Getriebebau oder die Laufflächen von Gleit- und Wälzlagern [G7].

2.1.2 Tribologie und Kontaktmechanik

Die aus dem Griechischen sinngemäße Ableitung des Begriffs Tribologie entspricht dem synonym Reibungslehre („tribein“ = reiben; „logia“ = Lehre). Die erste Definition der Tribologie als „Wissenschaft und Technik von Wirkflächen in Relativbewegung und zugehöriger Gegenstände und Teilchen“ erfolgte 1966 [Jos06]. Heute wird die Definition weiter gefasst, sodass die Tribologie das Gesamtgebiet von Reibung und

Verschleiß sowie Schmierung umfasst und entsprechende Grenzflächenwechselwirkungen sowohl zwischen Festkörpern als auch zwischen Festkörpern und Flüssigkeiten oder Gasen einschließt [Bob13; G7].

Da zwischen zwei in Kontakt stehenden Körpern grundsätzlich Reibung vorliegt [Pop16; QCL+17], ergibt sich für den Fall der gleitenden Relativbewegung der Gleit-Reibkontakt. Mit Bezug auf eine Rotationssymmetrie sind Lagerflächen das bekannteste Beispiel für gleit-reibbeanspruchte Oberflächen. Aber auch andere Oberflächen, wie bspw. Zylinderbohrungen oder Kolben, unterliegen in ihrer Funktion Gleit-Reibbeanspruchungen [MBB11].

Aus dem tribologischen Lastfall ergeben sich besondere Anforderungen hinsichtlich der Gestaltung einer gleit-reibbeanspruchten Fläche, die explizit auf den Anwendungsfall abgestimmt sein sollten [Sch09; MBB11]. Der Lastfall ergibt sich anwendungsbedingt unter anderem aus den Reibungsarten in Abhängigkeit von der Kinematik, der Hertz'schen Pressung sowie dem Reibungszustand, der durch den Kontaktzustand zwischen den Reibpartnern definiert wird. Für das Beispiel eines Radialgleitlagers bedeutet dies, dass der Reibungszustand der Gleitreibung nach Trocken-, ungeschmierter, Grenz-, Misch- und hydrodynamischer Reibung unterschieden werden kann [SHS10; Sch09]. Die Hertz'sche Pressung beschreibt den Zusammenhang, dass der Kontakt von zwei Körpern mit gekrümmter Geometrie linien- oder flächenhaft ausgeprägt ist. Die resultierende Spannungsverteilung über diese Kontaktzone variiert lokal und lässt sich in Abhängigkeit von Kraft, Krümmungsradien und den Werkstoffeigenschaften Elastizitätsmodul und Querkontraktionszahl berechnen. Hieraus ergibt sich der Zusammenhang, dass die Lastverteilung zwischen zwei gekrümmten Flächen nicht linear ist, sondern lokal variiert [Her82; PHW19].

Darüber hinaus kann die Beanspruchung der Funktionsfläche für den Lastfall durch fertigungsbedingte sowie materialspezifische Eigenschaften beeinflusst werden. Materialspezifisch ist hier insbesondere die Härte relevant. Fertigungstechnisch werden Eigenschaften, wie die Form, Rauheit, Topographie, und Eigenspannungen der Randzone beeinflusst, die direkten Einfluss auf das Einsatzverhalten der Funktionsfläche und somit auf deren Lebensdauer haben [BCL+08].

Die Überlagerungen der material- und fertigungsspezifischen Eigenschaften beschreiben die Ausbildung der Oberflächenrandzone und -topographie, die für das Einsatzverhalten unter tribologischer Belastung entscheidende Faktoren sind. Diese inhärenten und erweiterten Zustände einer Oberfläche können unter dem Begriff der Oberflächenintegrität oder des häufig genutzten englischen Synonyms *surface integrity* zusammengefasst werden [Bre13].

Funktionsflächen, wie alle technischen Oberflächen, weisen ausgehend vom innenliegenden Grundwerkstoff zur Oberfläche hin einen schichtweisen Aufbau der Werkstückrandzone auf. Diese Werkstoffgrenzschichten sind in Abbildung 2-1 a) schematisch dargestellt, wobei die Schichtdicken Orientierungswerte sind. Die Grenzschicht und somit das tribologische Verhalten werden durch jeden Bearbeitungsprozess sowie tribologischen Vorgang beeinflusst. Allerdings lassen sich die Oberflächeneigenschaften von Grenzschichten im Gegensatz zum Grundwerkstoff oft schwierig oder zum Teil gar nicht charakterisieren [SHS10].

Die in Abbildung 2-1 a) dargestellte Polierschicht, von *Qui et al.* als Bayes-Schicht (Bayesian layer) benannt, ist eine Ablagerungsschicht, die aufgrund der Kaltverfestigung nach der Auflösung von Oberflächenmolekülen und Oberflächenströmungen während der Bearbeitung entsteht. Diese Schicht, die einer amorphen und mikrokristallinen Struktur zugeordnet wird, liegt üblicherweise auf microgefinishten Wälzlageroberflächen vor. Durch die Feinstbearbeitung kann die Dicke dieser Schicht reduziert werden [QCL+17].

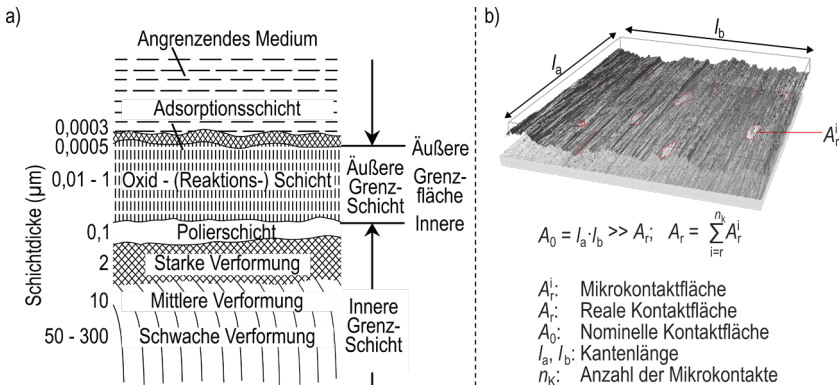


Abbildung 2-1: a) Schichtweiser Aufbau der Werkstückrandzone nach [SHS10]; b) schematische Darstellung der Mikrokontaktfläche zweier Tribopartner nach [CH15; Zum87].

Neben den stofflichen Besonderheiten ist die fertigungsspezifische Oberflächentopographie als Eigenschaft der Oberflächenintegrität ebenso relevant, da ihre Ausprägung die reale Kontaktfläche der Funktionsfläche mit dem Tribopartner bestimmt. Der resultierende tribologische Kontakt zweier Festkörper besteht, wie in Abbildung 2-1 b) schematisch dargestellt, aus der Summe an Mikrokontakten. Diese Mikrokontakte ergeben sich wiederum sowohl aus der Topographie der Funktionsfläche sowie des Gegenkörpers [CH15].

Die Ausprägung der Topographie beeinflusst somit die Kontaktmechanik und Reibungseigenschaften von Funktionsflächen. Durch ihre Wechselwirkungen bestimmen Mikrokontakte den Verschleiß von Kontaktflächen, weshalb sie einen erheblichen Beitrag zum sicheren und energiesparenden Einsatz technischer Anlagen leisten können [Pop16]. Je nach Funktion eines Tribosystems können unterschiedliche Kontakt- und Reibungszustände vorliegen, für die wiederum andere Bedingungen gelten [HAE12; Ros15].

2.1.3 Merkmale und Anforderungen an rotationssymmetrische Funktionsflächen

Für die vorliegende Arbeit bezieht sich die Betrachtung der Funktionsfläche vorrangig auf Lagerflächen von Antriebskomponenten, welche i. d. R. Gleit-Reibbeanspruchungen unterliegen. Typische Beispiele hierfür sind die Lagerflächen von Antriebs-, Nocken- oder Kurbelwellen sowie die Nocken und Hublager der Nocken- oder Kurbelwelle. Diese Flächen haben analoge Anforderungen hinsichtlich ihrer Beschaffenheit, damit ihre Funktion als Lagerfläche gewährleistet ist. Hierzu zählen vor allem die Formgenauigkeit, die Oberflächengüte und Topographie sowie die Randzoneneigenschaften der Funktionsfläche.

Profil rotationssymmetrischer Funktionsflächen

Aus der Hertz'schen Kontakttheorie und den daraus folgenden Berechnungen ist für zylindrische Laufflächen von bspw. Rollenlagern bekannt, dass ein ideal zylindrisches Profil zu Spannungsspitzen an den Laufbahnenden führt, die die Lebensdauer maßgeblich beeinflussen [Sch09]. Um diesem Effekt entgegenzuwirken, sollten an die tatsächliche Lastverteilung angepasste Profile erzeugt werden. Für die Gestaltung von Lagerringen oder Zylinderrollen werden hierzu logarithmische Profile empfohlen. Diese weisen neben einer Verrundung der Kante im Randbereich eine logarithmische Verjüngung in Form eines Profilabfalls hin zum zylindrischen Mittenbereich auf. Die Veränderung des Profils bewirkt eine Verringerung der Last im Randbereich bei gleichzeitiger Steigerung der Last im zylindrischen Mittenbereich. Dies führt zu einer insgesamt gleichmäßigeren Lastverteilung in axialer Richtung über die Lauffläche [Sch09]. Diese Erkenntnisse basieren auf der Entwicklung und Optimierung der Laufflächen von Gleit- und Wälzlagern. Daraus lässt sich aber auch für die Lagerstellen an rotierenden Wellen ableiten, dass Anpassungen der ideal geraden Profilform von Vorteil sind. Das Zusammenwirken der Lagerfläche mit dem aufgesprenten Lager führt zwangsweise zu einer Wechselwirkung zwischen Lagerstelle und Lagerring. Hierbei beeinflusst die spanende Fertigung die geometrische Gestalt der Lagerstelle und somit die Lebensdauer der Lager [MBP18]. Aus der Kontaktmechanik lässt sich vereinfacht ableiten, dass für den Kontakt mit einem konkaven Lagerring eine konvexe Ausprägung der Lagerstelle auf der Welle zielführend ist. Auch *Krajnik et al.*

weisen darauf hin, dass die Gestaltung der Lagerflächen von Wellen zunehmend konvex ausgeführt wird [KHK+21; Sch19].

Zur Beschreibung bzw. messtechnischen Quantifizierung des Profils eines Lagerabsatzes wird i. d. R. die geometrische Eigenschaft der Geradheit herangezogen. Hierbei werden in technischen Zeichnungen enge Toleranzen angegeben, die häufig nur die Abweichung in eine Richtung zulassen, wodurch eine konkave oder konvexe Mantellinie des Bauteils beschrieben wird. Allerdings wird innerhalb der Norm die Abweichung nur als Betrag berechnet, sodass die Werte in jeder Ausprägung positiv sind [D12780-1]. Häufig wird in Zeichnungen daher der Zusatz „konvex“ oder „konkav“ angefügt. Konvex beschreibt hierbei die meist gewünschte konvexe Ausführung für rotationssymmetrische Kontaktflächen mit einer nach oben gekrümmten Profillinie; die niedrigsten Profilpunkte liegen am Rand der Messung. Neben der schematischen Darstellung eines logarithmischen Profils für eine Zylinderrolle sind schematisch die konkave und konvexe Ausprägung von Konturen in Abbildung 2-2 dargestellt.

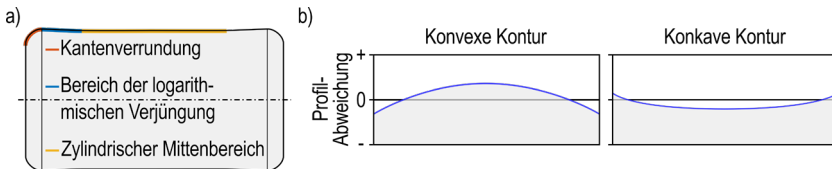


Abbildung 2-2: Schematische Darstellung a) eines logarithmischen Zylinderrollenprofils und b) konvex und konkav ausgeprägter Bauteilkonturen

Umfangswelligkeit rotationssymmetrischer Funktionsflächen

Neben der geometrischen Form wird die technische Funktionsfläche auch durch Oberflächenmerkmale wie die Welligkeit beeinflusst. Für rotationssymmetrische Bauteile umfasst dies vor allem die Umfangswelligkeit, die sich bei Bearbeitungsverfahren wie dem Drehen oder Schleifen einstellt [BTB21]. Es ist bekannt, dass diese im Bereich von Lagerstellen zu Schwingungen führen können, die sich wiederum über akustische Signale in Form von Schallemissionen äußern. Diese Schallemissionen beschreiben letztlich Störgeräusche, sofern die Frequenzen innerhalb des für Menschen hörbaren Spektrums auftreten. Im Bereich der Automobilindustrie ist dies eine Komponente der Eigenschaften „Noise, Vibration, Harshness“, kurz NVH-Eigenschaften, die zunehmend in den Fokus der Optimierung rücken [BBM+12]. Die NVH-Eigenschaften beschreiben hierbei die Geräuschemissionen (Noise), Vibrationen (Vibration) und Stoßbelastungen (Harshness), die den Fahrkomfort beeinflussen und die es somit weitestgehend zu reduzieren gilt [Tho08]. Durch die Elektrifizierung der

Antriebsstränge in Fahrzeugen kommen insbesondere Geräuschemissionen zunehmend zum Tragen bzw. finden eine zunehmend stärkere Betrachtung. Während das Motorgeräusch eines Verbrennungsmotors die Laufgeräusche eines vibrierenden Lagers übertönt, ist dies im elektrisch angetriebenen Fahrzeug nicht mehr der Fall [Gri23]. Darüber hinaus resultieren aus den Schwingungen nicht bloß störende Geräuschemissionen, sondern sie sind gleichbedeutend mit inkohärenten Kontaktbedingungen und lokal erhöhten Lasten und bewirken eine Verringerung der Laufruhe und Lebensdauer des Bauteils.

Oberflächentopographie rotationssymmetrischer Funktionsflächen

Abhängig vom jeweiligen Anwendungsfall ergeben sich differente Anforderungen an die Beschaffenheit der Oberflächentopographie für Funktionsflächen. Somit gibt es sowohl Einsatzfelder für Mikrostrukturen als auch für sehr glatte Oberflächen ohne Strukturmerkmale. Für Lagerflächen an Wellen ergeben sich aufgrund der Relativbewegung mit dem Gleitlager Gleit-Reibbeanspruchungen, die eine gezielte Oberflächenkonditionierung erfordern. Neben der Reibungsreduzierung und dem Einstellen einer hohen Tragfähigkeit der Oberfläche ist, insbesondere für die hydrodynamische Reibung, das Einbringen von Ölrückhaltevolumen relevant [Ros15]. Typischerweise werden diese Oberflächen durch die spanende Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide erzeugt. Analog zur Bearbeitung von Zylinderlaufbahnen, die prinzipiell ähnliche Anforderungen aufweisen, sind auch für außenliegende rotationssymmetrische Funktionsflächen Honverfahren zur Oberflächenkonditionierung geeignet [Goe16; HYK+16]. *Tamatam* stellt in seinen Untersuchungen dabei die Vorteile einer Plateau-gefinishten Oberfläche gegenüber einer strukturlosen glatten Oberfläche vor. Die in der Plateau-Struktur vorliegenden Riefen bieten neben der höheren Kapazität als Ölrückhaltevolumen den Vorteil, dass Verschleißpartikel des Initialverschleißes in diesen Riefen aufgenommen werden können. Somit kann die Abrasivwirkung dieser reduziert werden [Tam17]. Ähnliche Ergebnisse stellen auch *Goeke et al.* dar. Für plane Oberflächen mit einer Kreuzschliffstruktur ergeben sich geringere Reibungskoeffizienten, und es liegt kein Initialverschleiß der Oberfläche im oszillierenden Gleit-Reibversuchsstand vor [GBS+14].

Aufgrund der spezifischen Anforderungen von Funktionsflächen müssen auch die Bewertungskriterien spezifiziert werden, um geeignete Kenngrößen zur Quantifizierung zu verwenden. Dies betrifft neben der Form- und Maßgenauigkeit insbesondere die Bewertung der Oberflächentopographie und -rauheit. Hierzu lässt sich aus der Kontaktmechanik ableiten, weshalb über viele Jahre in der Industrie angewandte Kenngrößen, wie die gemittelte Rautiefe R_z oder der arithmetische Mittenrauwert R_a , eingeschränkt geeignet sind, um eine Funktionsfläche zu bewerten:

Bereits 1986 beschrieben *Whitney und Schwab*, dass die Auswertung des arithmetischen Mittenrauwerths R_a für Kurbelwellen aus Sphäroguss nicht geeignet ist [WS86]. Unabhängig vom Werkstoff können der arithmetische Mittenrauwert R_a und die gemittelte Rautiefe R_z unterschiedlich ausgeprägte Oberflächen nur begrenzt differenzieren. So ergeben sich für inverse Profile, aufgrund der starken Mittelung bzw. Reduzierung der Werte auf eine geringe Anzahl an Messpunkten, identische Kennwerte für R_z und R_a [SD14]. Da jedoch der Anteil an Spitzen und Riefen deutlich voneinander abweicht und dies die Mikrokontaktfläche maßgeblich beeinflusst, lässt sich ableiten, dass die Topographien der zugehörigen Oberflächen sehr unterschiedlich ausgeprägt sind. Es lässt sich daher festhalten, dass R_a sowie R_z nicht ausreichend geeignet sind, um diese Unterschiede zu quantifizieren und Funktionsflächen hinsichtlich ihrer Topographie zu bewerten. Hierzu fehlt eine Beschreibung der in der Oberfläche vorliegenden Anteile an Riefen und Spitzen. Über die in ISO 13565-2 beschriebenen Materialtraganteilskenngößen, die anhand der Abbott-Kurve gebildet werden, lässt sich die Topographie einer Funktionsfläche genauer beschreiben [SD14; D13565-2]. Hierbei sind insbesondere die Materialtraganteilskenngößen Kernrautiefe R_k , reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und reduzierte Riefentiefe R_{vk} zu nennen. Diese Kenngrößen beschreiben das Auftreten von Spitzen und Riefen im Profil sowie die Höhe des zwischenliegenden Profilateils. Die bereits beschriebenen Plateau-Oberflächen, die für Gleit-Reibkontakte häufig gefordert werden, weisen hierbei vor allem niedrige R_{pk} -Werte und vergleichsweise hohe reduzierte Riefentiefen R_{vk} auf. Oft werden die beiden Kenngrößen auch in Relation zueinander betrachtet und das Verhältnis R_{vk}/R_{pk} oder umgekehrt bewertet, um eine plateauartige Oberfläche zu beschreiben.

2.2 Microfinishen/Kurzhubhonen

Microfinishen ist genau genommen eine spezifische Bezeichnung für das nach DIN EN ISO 8589-14 genormte spanende Bearbeitungsverfahren Kurzhubhonen [D8589-14]. Andere gebräuchliche Bezeichnungen sind Superfinishen sowie einfach Finishen. *Barton* unterscheidet hierbei anhand des eingesetzten Werkzeugs, Finishstein oder Finishband zwischen Superfinishen und Microfinishen [Bar18]. Des Weiteren werden beide Begriffe jedoch sowohl in der Literatur als auch im täglichen Gebrauch synonym verwendet, weshalb im Folgenden keine Unterscheidung vorgenommen wird. Vielmehr wird hier die Begrifflichkeit Microfinishen verwendet, da der Begriff zwei elementare Charakteristika des Verfahrens beschreibt. Einerseits dient das Verfahren zur Oberflächenfein- und Feinstbearbeitung am Ende der Prozesskette und somit zur finalen Bearbeitung (finishen). Andererseits eignet es sich zur Mikrostrukturierung und Beeinflussung der Oberfläche auf der Mikro-Ebene, weshalb der Begriff „Micro“ hier ebenso passend ist.

Entsprechend der Bezeichnung nach DIN gehört das Microfinishen zum Fertigungsverfahren Honen und somit zur spanenden Bearbeitung mit geometrisch unbestimmter Schneide [D8589-14]. In Abhängigkeit von der zu bearbeitenden Fläche wird zwischen Plan-, Außen- und Innenrund-Kurzhubhonen bzw. Microfinishen unterschieden [D8589-14]. Darüber hinaus werden auch sphärische Bauteilgeometrien mittels Microfinishen bearbeitet [Sto17]. Als Fein- und Feinstbearbeitungsverfahren dient das Microfinishen meist der finalen Bearbeitung von Funktionsflächen und hierbei insbesondere solchen, die im späteren Einsatz tribologischen Beanspruchungen ausgesetzt sind. Das Microfinishen eignet sich daher zur Herstellung von hochbelasteten Wellenabsätzen, wie Lagerstellen oder Nocken, aber auch für die Bearbeitung von beispielsweise Dichtflächen. Entsprechend werden unter anderem die Nockenwellen, Kurbelwellen und Lagersitze von Getriebewellen, aber auch Lagerringe sowie die Rollen und Tonnen von Rollen- und Tonnenlagern mittels Microfinishen bearbeitet [SF01; HYK+16; Bar18].

2.2.1 Kinematik, Prozessparameter und Einflussgrößen

Beim Microfinishen wird in der Regel von einem kraftgesteuerten Prozess gesprochen, bei dem durch einen pneumatisch oder hydraulisch betätigten Kolben eine konstante Andrückkraft auf das Werkzeug und weiterhin auf das Werkstück wirkt [Paf11; Hil10]. Die Orientierung der Andrückkraft F_{An} entspricht hierbei der Normalenrichtung, womit die Andrückkraft mit der Normalkraft F_n korreliert. Eine Regelung im Sinne einer systematischen Anpassung der Normalkraft findet hierbei nicht statt. Aufgrund des konstanten Krafteintrags auf die Wirkstelle zwischen Werkzeug und Werkstück wird der Begriff der kraftinduzierten Prozessführung als treffender angesehen und im Folgenden verwendet. Aus der Kraftinduktion ergibt sich der für den Materialabtrag notwendige Korneingriff. Dieser ist beim Microfinishen aufgrund des flächenhaften Kontaktes durch die resultierende Flächenpressung geprägt. Hieraus lässt sich ableiten, dass für den Materialabtrag das kraftgebundene Wirkprinzip vorliegt [HYK+16; KK05].

Die Verfahrenskinematik zeichnet sich darüber hinaus durch die Überlagerung zweier zueinander orthogonaler Schnittbewegungen aus, die sich in eine tangentiale und eine axiale Schnittbewegung bzw. -geschwindigkeit aufteilen lassen. Hierbei wird die tangentiale Komponente der Schnittgeschwindigkeit v_{ct} durch die Rotation des Werkstücks erzeugt, während die axiale Komponente v_{ca} aus einer kurzhubigen Oszillation des Werkzeugs parallel zur Werkstückachse folgt [Bra80].

Die zusätzlich für das Microfinishen mit Band regelbare Bandvorschubgeschwindigkeit v_B wirkt entgegen der tangentialen Schnittgeschwindigkeit, sodass sich eine größere Relativgeschwindigkeit zwischen Werkzeug und Werkstück ergibt.

Die resultierende Schnittgeschwindigkeit v_c lässt sich mathematisch wie in Formel (2.1) über die Richtungsvektoren v_{ca} , v_{ct} und v_{fb} ermitteln. Hierbei wird für die oszillierende Komponente v_{ca} stets der maximale Betrag der Geschwindigkeit verwendet und v_c errechnet sich zu:

$$v_c = \sqrt{v_{ca}^2 + (v_{ct} + v_{fb})^2}. \quad (2.1)$$

Aufgrund der verhältnismäßig geringen Beträge der Bandvorschubgeschwindigkeit von maximal $v_{fb} = 120 \text{ mm/min}$ wird diese Komponente in der Rechnung jedoch meist vernachlässigt. Somit ergibt sich für die resultierende Schnittgeschwindigkeit v_c :

$$v_c = \sqrt{v_{ca}^2 + v_{ct}^2}. \quad (2.2)$$

Die Bewegung von Werkstück und Werkzeug sowie die sich ergebende relative Eingriffsbahn einzelner Körner werden in Abbildung 2-3 verdeutlicht. Hierbei stellt Teil a) die Prozesskinematik und Teil b) die sich ergebende Relativbewegung eines Korns auf der Materialoberfläche dar.

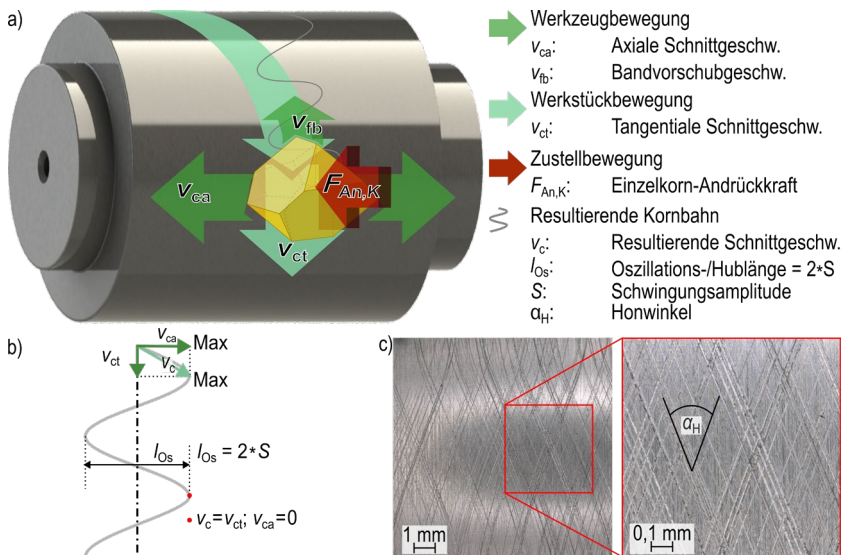


Abbildung 2-3: Schematische Darstellung der Bewegungen von Korn und Werkstück beim Microfinishen nach [Bra80; Goe16]

Die aus den Komponenten v_{ct} , v_{ca} und v_{fb} entstehende Relativbewegung zwischen Abrasivkorn und Oberfläche entspricht hierbei einer sinusförmigen Bahn, vgl.

Abbildung 2-3 b). Diese Bewegung definiert die resultierende Schnittbewegung. Aus dem mehrfachen Überlauf eines Korns über die Oberfläche und der Überlagerung einer Vielzahl von eingreifenden Körnern entsteht die für das Honen charakteristische Kreuzriefenstruktur [HYK+16; Bra80], wie sie in Teil c) der Abbildung 2-3 dargestellt ist. Durch eine Veränderung des Verhältnisses von v_{ca} zu v_{ct} lässt sich der Honwinkel α_H verändern. Dieser steht im geometrischen Bezug und lässt sich entsprechend Formel (2.3) berechnen zu:

$$\alpha_H = 2 * \tan^{-1} \left(\frac{v_{ca}}{v_{ct}} \right). \quad (2.3)$$

Aus der kraftinduzierten Prozessführung und dem Einsatz elastischer Werkzeuge ergibt sich ein flächenhafter Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück [Bra80]. Beeinflusst wird die resultierende Kontaktfläche bspw. durch die Härte des Andruckelements [KRZ07; BWK+17], aber auch durch die Korngröße des gewählten Werkzeugs [BWK+17].

Eine weitere Besonderheit des Microfinishens ist die geringe Wärmeentwicklung während des Bearbeitungsprozesses. Aufgrund der geringen Korneingriffstiefe, verhältnismäßig niedrigen Schnittgeschwindigkeiten und der Verteilung der Prozesskräfte auf eine größere Fläche ergibt sich ein, verglichen mit anderen spanenden Verfahren, niedriger Energieeintrag auf die Werkstückoberfläche. Aufgrund dieser Zusammenhänge erreichen die Prozesstemperaturen in der Wirkzone Werte von maximal etwa $T = 100 \text{ °C}$ [KRZ13b; BKH+14]. Hieraus ergeben sich Einsatzbereiche zur Nachbearbeitung bzw. Vorteile beim Einsatz des Verfahrens als finaler Bearbeitungsschritt. Die geringe thermische und mechanische Belastung in Kombination mit dem niedrigen Materialabtrag bewirken, dass weder eine thermisch induzierte noch mechanisch bedingte Randzonenschädigung induziert wird [SVT+21]. Im Gegenteil: Durch die Bearbeitung mittels Microfinishen ist es möglich, solche Randzonenschädigungen, die durch die vorgelagerte mechanische Bearbeitung mittels Schleifen oder Drehen entstehen können, abzutragen, ohne eine erneute Schädigung der Oberfläche zu erzeugen. Dies beinhaltet auch den Abtrag möglicher Zugeigenspannungen in der Bauteiloberfläche und die Einbringung von Druckeigenspannungen [RKG+08; CVC+16; HYK+16; TBA+19].

2.2.2 Finishwerkzeuge

Beim Microfinishen wird grundsätzlich zwischen den Werkzeugtypen starr gebundener Werkzeuge, sogenannten Hon- oder Finishsteinen, und Finishwerkzeugen auf Basis flexibler Träger, sogenannte Finishbänder, unterschieden. Finishsteine bestehen analog zu Schleifkörpern aus einer Bindung, Poren und den Schneidkörnern. Die gängigen Kornarten sind Korund (Al_2O_3), Siliziumkarbid (SiC), Diamant (D) und

kubisches Bornitrid (cBN). Während für SiC und Al_2O_3 typischerweise keramische und Kunstharzbindungen verwendet werden, werden für Diamant und cBN zusätzlich auch Bindungen auf metallischer Basis eingesetzt [AYO+01; HBT+24; TB23]. Durch die Variation von Kornqualität und spezifischen Bindungszusammensetzungen kann das Einsatzverhalten des Werkzeugs stark variieren. Dies bewirkt Veränderungen im Werkzeugverschleiß auf Korn- und Bindungsebene und damit einhergehend Wechselwirkungen mit den Materialabtragsmechanismen. Körner, die eher runde Kanten aufweisen oder durch Verschleiß verrunden, führen zu vermehrtem Mikrofurchen und –pflügen. Im Gegensatz dazu können scharfe Kanten, wie sie vermehrt bei spröden Schneidkörnern auftreten, die Mikrospanbildung begünstigen [KRZ13a]. Die Bindungszusammensetzung beeinflusst darüber hinaus das elastisch-plastische Verhalten des Werkzeugs und, wie stark das Korn gehalten und wann es gegebenenfalls aus der Bindung gelöst wird. Eine elastische Bindung hat in der Regel eine höhere Kornhaltekraft, resultiert aber gleichzeitig durch seine Elastizität in geringeren Korneindringtiefen. So ist es möglich, dass das Korn bei ausreichend Elastizität und einem hohen Anteil an Poren in die Bindung ausweicht und nicht entsprechend dem vorhandenen Kornüberstand in das zu bearbeitende Material eindringt.

Finishbänder bzw. Bandwerkzeuge basieren auf einer Polyesterfolie, auf die Schneidkörner aufgebracht und mittels einer Bindungsschicht basierend auf Kunstharz fixiert werden. Die Kornlagen sind üblicherweise einschichtig, da bei der Verwendung von Finishbändern nur ein einmaliger Eingriff der Körner in das Material vorgesehen ist [Sch99]. Einen erheblichen Einfluss auf die Materialabtragsrate und auf die resultierende Oberflächengüte hat die Art der Kornaufbringung. Hierbei wird zwischen elektrostatisch gerichtet und schwerkraftgestreut unterschieden. Durch die Möglichkeit des elektrostatischen Ausrichtens lassen sich die Schneidenspitzen der Schneidkörner nach oben ausrichten, sodass eine vergleichsweise raue Wirktopographie entsteht. Darüber hinaus werden homogene Kornverteilungen erzielt, sodass gleichmäßige Spanräume entstehen. Demgegenüber liegen die mittels Dispersionsverfahren, auch Schwerkraftstreuung genannt, aufgetragenen Schneidkörner randomisiert in der Bindungsschicht vor und bilden häufig auch Kornagglomerationen. Abbildung 2-4 zeigt schematisch den Aufbau für a) elektrostatisch gerichtete und b) schwerkraftgestreute Kornaufbringung sowie Aufnahmen c, d) aus dem Rasterelektronenmikroskop (REM) von Al_2O_3 -Finishbändern mit den unterschiedlichen Kornaufbringungen bei gleicher Korngröße $d_K = 30 \mu\text{m}$.

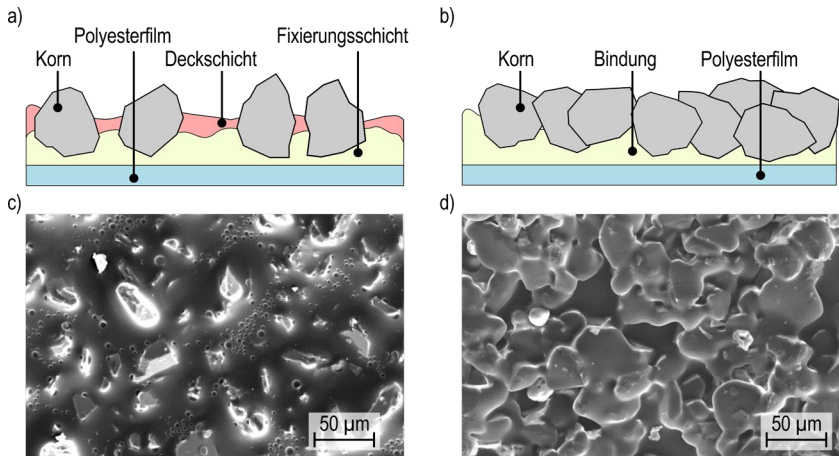


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung und REM-Aufnahmen des Werkzeugaufbaus für a, c) elektrostatistisch gerichtete und b, d) schwerkraftgestreute Finishbänder ($d_K = 30 \mu\text{m}$; Al_2O_3)

Entsprechend der Wirktopographie unterscheidet sich der Einsatzzweck des jeweiligen Finishbandes. Elektrostatistisch gerichtete Finishbänder dienen insbesondere zur ersten Finishstufe, dem sogenannten Vorfinishen, mit dem Ziel, bei verhältnismäßig hohen Materialabtragsraten die initiale Topographie vollständig oder weitestgehend abzutragen und ggf. eine gleichmäßige Riefenstruktur zu erzeugen. Schwerkraftgestreute Bänder werden in der Regel in anschließenden Finishstufen verwendet, um sukzessive die resultierenden Rauheitsspitzen abzutragen und so den Materialtraganteil zu erhöhen, ohne dabei neue Riefen einzubringen [PHB10; BGT+13]. Entsprechend der Einsatzgebiete unterscheiden sich auch die gängigen Korngrößen für die jeweilige Kornaufbringung. Elektrostatistisch gerichtete Bänder existieren im Bereich $d_K = 126 - 9 \mu\text{m}$, wohingegen schwerkraftgestreute Bänder in der Regel Korngrößen von $d_K = 40 - 0,5 \mu\text{m}$ aufweisen [AMR+22].

2.2.3 Andrückelemente

Während Finishsteine als starrer Körper direkt in Werkstückkontakt gebracht werden können, benötigen Finishbänder eine Führung sowie geeignete Andrückelemente. Je nach zu bearbeitender Fläche können diese Andrückelemente unterschiedlich ausgeführt sein. Für die Außenrund-Bearbeitung bieten sich hierbei Andrückrollen oder Schalen an, die das Band führen und den Kontaktdruck zwischen Band und Werkzeug ermöglichen. Andrückschalen sind in der Regel mit Andrückelementen aus Stahl oder Kunststoff ausgestattet und für einen geeigneten Werkstückdurchmesser konzipiert. Dies bedeutet einen erhöhten Fertigungsaufwand

und reduziert die Flexibilität im Einsatz [Sch19]. Darüber hinaus existiert eine weitere Variante, die auf ein Patent der Firma NAGEL Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH & Co. KG zurückgeht. Dieses Andrückelement entspricht im Aufbau einer Andrückschale, wobei das Band anstelle einer freien Führung zusätzlich über ein Federstahlband gestützt wird. Das als „D-Flex“ benannte Andrückelement ermöglicht einen stabilen Werkzeug-Werkstück-Kontakt bei gleichzeitiger Flexibilität hinsichtlich des Werkstückdurchmessers aufgrund des elastischen Verformungsverhaltens des Federstahls [Uts12; Nag13]. Zusätzlich ergibt sich im Vergleich mit einer Andrückrolle eine größere Werkstückumschlingung [Uts12; WB07]. Im Rahmen dieser Arbeit wird das am „D-Flex“ angelehnte Andrückelement als flexibles Federstahl-Andrückelement (kurz: FFA) benannt. Neben der Form des Andrückelements können die Maße sowie die jeweilige Elastizität den Prozess direkt beeinflussen. Andrückrollen sind üblicherweise aus Vulkollan, einem Polyurethan-Elastomer, hergestellt und werden in verschiedenen Härtegraden eingesetzt [KRZ07; Goe16; BWK+17]. Hierüber lässt sich eine direkte Beeinflussung der Werkzeug-Werkstückumschlingung erzielen. Diese beeinflusst ebenso wie Breite und Durchmesser des Andrückelements die resultierende Flächenpressung im Finishprozess und somit die Intensität des Werkstück-Werkzeug-Kontaktes [BWK+17].

2.2.4 Materialabtragsmechanismen

Da das Microfinishen den spanenden Verfahren mit geometrisch unbestimmter Schneide zugeordnet ist, wird häufig angenommen, dass die Materialabtragsmechanismen und die Spanbildung analog zum Schleifen sind. Allerdings ist dies aufgrund des flächenhaften Werkzeug-Werkstück-Kontaktes, der Wirkprinzipien des Prozesses sowie den vergleichsweise geringen Schnittgeschwindigkeiten, die geringe spezifische Energie und niedrige Prozesstemperaturen erzeugen, nicht der Fall [Tön70; Mar76]. Dies deckt sich mit den Abweichungen, die *Tönshoff* im Rahmen seiner Dissertation beschreibt: das theoretische Materialabtragsvolumen unter der Annahme der klassischen Spanabnahme ist um das 200-Fache größer als der tatsächliche Materialabtrag [Tön70]. Auch *Martin* setzte sich mit der noch 1976 weit verbreiteten Annahme kritisch auseinander, dass die Materialabtragsmechanismen beim Kurzhubhonen äquivalent zum Schleifen sind. Er erläuterte, dass auf Basis der entstehenden Späne eine Spanabnahme in der ursprünglichen Form nicht vorliegt [Mar76]. Die Materialabtragsmechanismen, die nach heutigem Stand der Technik für die spanende Feinbearbeitung und damit auch für das Microfinishen gelten, sind von *Zum Gahr* schematisch beschrieben worden. Hiernach ergeben sich vier prinzipielle Abtragsvorgänge, die sich in Mikrospanen, Mikropflügen, Mikroermüden und Mikrobrechen unterscheiden lassen [ZM83]. Diese Materialabtragsmechanismen sind in Abbildung 2-5 schematisch dargestellt.

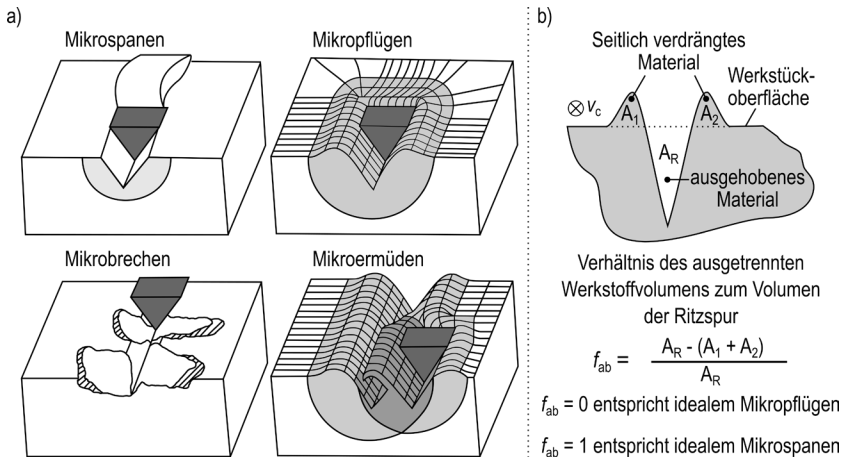


Abbildung 2-5: Schematische Darstellung des Materialabtrags beim abrasiven Verschleiß a) sowie Betrachtung des Furchungsprofils b) nach [Zum87; Zum98; Goe16]

Unter der Annahme, dass ein Abrasivkörper, wie bspw. das Schneidkorn, eine Furche in das Material einbringt, können Mikrospanen und Mikropflügen in Abhängigkeit von der Volumendifferenz unterschieden werden. Während beim idealen Mikrospanen der Abtrag des gesamten Furchungsvolumens stattfindet, wird beim Mikropflügen das Werkstoffvolumen plastisch verformt und zu den Furchungsrändern verdrängt, ohne dass ein Abtrag erfolgt [ZM83].

Die Mikroermüdung beschreibt darüber hinaus die wiederkehrende plastische Verformung, die zu Werkstoffermüdung führt, in deren Folge Materialabtrag durch Mikropflügen auftreten kann. Das Mikrobrechen wird vor allem bei spröden Werkstoffen beobachtet [ZM83]. Eine genaue Grenze, insbesondere zwischen den abrasiven Mechanismen Mikrospanen und Mikropflügen, lässt sich nicht ziehen, da die Übergänge hierzu fließend sind, auch wenn der kritische Angriffswinkel jedes Schneidkorns einen Einfluss auf den Materialabtrag hat [ZM83; MS62; Zum87]. Ebenso beeinflusst die Kornform die Spanbildungsmechanismen. Während rundere Kornformen eher zu Mikrofurchen und Mikropflügen führen, begünstigen scharfe Kanten am Schneidkorn das Mikrospanen [MY92]. Neben werkzeugspezifischen Einflüssen, wie bspw. Korngröße d_k , Korntyp und Kornkonzentration, kommen prozessseitige Einflussfaktoren, wie bspw. Schnittgeschwindigkeit, spezifischer Anpressdruck und Kühlschmierstoffstrategie, zum Tragen [ESG+07]. Darüber hinaus haben die Materialeigenschaften des zu bearbeitenden Werkstoffs einen erheblichen Einfluss auf die Materialabtragsmechanismen [Zum81; Goe16]. *El Mansori et al.* und

Goeke beschreiben darüber hinaus die Wechselwirkung zwischen Werkzeugverschleiß und Materialabtragsmechanismen beim Microfinishen mit Band. Durch die Reduzierung des Schneidkornüberstandes, aufgrund resultierender Materialadhäsion am Werkzeug, nimmt der Anteil an Mikrospanen mit zunehmender Prozesszeit ab, während das Mikropflügen verstärkt auftritt [ESG+07; Goe16].

Zur besseren Bewertung der wirkenden Materialabtragsmechanismen bezogen auf Mikrospanen und Mikropflügen lässt sich das Furchungsprofil betrachten. Dieses ist schematisch in Abbildung 2-5 dargestellt. Anhand der flächenhaften Betrachtung des zur Seite verdrängten (A_1 und A_2) sowie des abgetragenen Materials (A_R) lässt sich der Kennwert f_{ab} ermitteln, anhand dessen sich der wirkende Materialabtragsmechanismus zuordnen lässt:

$$f_{ab} = \frac{A_R - (A_1 + A_2)}{A_R}. \quad (2.4)$$

Entsprechend des Verhältnisses ist ein f_{ab} -Wert von $f_{ab} = 1$ gleichbedeutend mit einem idealen Mikrospanen, bei dem der gesamte Furchungsquerschnitt abgetragen wird. Dahingegen bedeutet ein f_{ab} -Wert von $f_{ab} = 0$, dass kein Materialabtrag erfolgte und ideales Mikropflügen vorliegt [ZM83]. Synonym zum Begriff des verdrängten Materials wird bei der Bewertung der Oberflächen auch von lateralen Aufwürfen bzw. aufgeworfenem Material gesprochen [TSB17].

2.2.5 Prozesswechselwirkungen beim Microfinishen

Der Microfinishprozess und das Prozessergebnis werden durch eine Vielzahl an Faktoren beeinflusst, die häufig gegenseitig wechselwirken. Neben dem zu zerspanenden Werkstoff, der im Speziellen durch seine Materialeigenschaften einen direkten Einfluss auf Prozessverhalten und -ergebnis hat, betrifft dies auch die Prozesseinstellgrößen. Die Schnittgeschwindigkeit v_c , die sich aus Tangentialgeschwindigkeit v_{ct} , Oszillationsfrequenz f_{Os} und Amplitude S ergibt, beeinflusst ebenso die Mikrospanbildung im Prozess wie die resultierende Flächenpressung p_A [VM98; Sch02]. So beschreiben *El Mansori et al.*, dass ein härterer Andruckschuh zu einer höheren Spannungsdicke führt. Damit geht insbesondere zu Beginn der Bearbeitung auch eine höhere Materialabtragsrate einher. Unabhängig vom Andrückelement zeigt sich eine Unterscheidung des Microfinishprozesses in drei Phasen: zu Beginn des Prozesses erfolgt ein hoher Materialabtrag, ehe dieser im weiteren Prozessverlauf abnimmt. In der dritten und letzten Phase bleibt das Materialabtragsvolumen nahezu konstant, und es dominiert ein Reiben zwischen Bandwerkzeug und Werkstück, wodurch eine Polierwirkung erzielt wird [ESG+07]. Dieser Sachverhalt wurde ebenso von *Goeke* dokumentiert, der dies in Relation zu dem adhäsiven Verschleiß auf dem Finishband gesetzt hat [Goe16]. Aus dem beschriebenen

Effekt lässt sich ableiten, dass die erzielbare Oberflächengüte auch abhängig von der gewählten Korngröße und Kornaufbringung ist. Grundsätzlich ist daher die Wahl des Werkzeugs in Form von Korngröße, Kornaufbringung oder für starre Werkzeuge Bindungstyp und Kornkonzentration ausschlaggebend für das Prozessverhalten und das erzielbare Bearbeitungsergebnis. Größere Korngrößen ermöglichen hierbei höhere Materialabtragsraten, führen gleichzeitig aber zu einer höheren Rauheit der Oberfläche [VM00; USK15]. Dies gilt ebenso für Finishbänder mit elektrostatisch gerichtet aufgetragenen Schneidkörnern im Vergleich zu Finishbändern mit schwerkraftgestreuter Kornaufbringung. Zweitere werden in der Regel für nachfolgende Finishstufen eingesetzt und dienen der finalen Oberflächenfeinstbearbeitung [Goe16; MDM+20; FYH+16; Abr16].

Neben der Auswahl des Werkzeugs und Andrückelements hat der Einsatz von Kühlschmierstoff Einfluss auf die Microfinishbearbeitung und deren Ergebnis. Der Kühlschmierstoff reduziert durch seine Schmierwirkung die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück, woraus geringere Materialabtragsraten folgen. Da die Reibung maßgeblich Einfluss auf die Materialabtragsmechanismen hat, werden diese weiterhin durch den Einsatz von Kühlschmierstoff beeinflusst, sodass die reibungsbehafteten Mechanismen Mikrofurchen und Mikropflügen seltener auftreten. Zusätzlich nimmt die Anhaftung von abgetragenem Material am Finishband ab, sodass der Werkzeugverschleiß in Form von Zusetzungen reduziert werden kann [USK15]. Für das Finishen mit Band wird häufig Öl als Kühlschmiermedium eingesetzt, aber auch Emulsion ist anwendbar [Rud04]. Da die Prozesstemperaturen beim Microfinishen vergleichsweise niedrig sind, ist die Kühlwirkung eines Schmierstoffes vernachlässigbar, und die Schmierwirkung steht im Vordergrund [BKH+14].

Die vorhandene Oszillationsfrequenz begünstigt den Materialabtrag und die Spanbildung. Durch das Abscheren der Mikrospäne entstehen kürzere Späne, womit der adhäsive Verschleiß, das sogenannte Zusetzen, des Finishbandes reduziert wird [ESG+07]. *Goeke* beschreibt außerdem, dass eine Steigerung der Oszillationsgeschwindigkeit zu höheren Oberflächengüten beiträgt. Darüber hinaus ist die Oszillationsfrequenz essenziell für die Herstellung der gewünschten Kreuzriefenstruktur, die charakteristisch für Honverfahren ist, und beeinflusst in Relation zur Tangentialgeschwindigkeit den resultierenden Honwinkel [Goe16].

Aufgrund der verhältnismäßig geringen Korngrößen und der kraftinduzierten Prozessführung findet der Werkstoffabtrag primär im Bereich der Oberflächenrandzone statt, sodass insbesondere bei kleineren Korngrößen die Umschreibung des sukzessiven Abtrags der vorhandenen Oberflächentopographie treffend ist. Dies bedeutet, dass sich initiale topographische Eigenschaften, wie beispielsweise die Spitzen eines Dreh- oder

Fräsprozesses, sukzessive abtragen lassen. Die Microfinishbearbeitung ermöglicht damit den vollständigen Abtrag der initialen Topographie und die Erzeugung einer isotropen Oberfläche oder die Modifikation der vorherigen periodischen Struktur [KRZ07; Goe16; TBA+19]. Gleichzeitig bedeutet dieser sukzessive Abtrag aufgrund der kraftinduzierten Prozessführung auch, dass die Formgebung mittels Microfinishen limitiert ist, weshalb der Prozess häufig nur als formverbessernd bezeichnet wird [SF01; Wei95; Mic99; Rud08]. Für Rundheiten lässt sich vorrangig eine Verbesserung der Unrundheiten höherer Ordnung erzielen, während ovale Formen (2. Ordnung) nicht korrigiert werden können [Pau08]. Die Umschlingung des Werkzeugs ermöglicht jedoch den Abtrag von Welligkeiten höherer Ordnung, die als Störeinflüsse der Funktionsfläche gelten und bspw. die NVH-Eigenschaften negativ beeinflussen können [Bar18; BTB21; WW93].

Allerdings kann eine Formbeeinflussung durch das Microfinishen auch unerwünscht sein: Im Fall einer konvexen Ausgangsgestalt werden typischerweise die höheren Bereiche zuerst abgetragen, sodass möglicherweise ungewünschte Formänderungen stattfinden und eine konkave Kontur resultiert [Sch19]. Für typische Anwendungsfelder des Microfinishens, wie bspw. die Herstellung von Wälzkörpern, die eine konvexe oder logarithmische Profilierung aufweisen sollen, ist dieser Effekt daher ungünstig [SGG19; Sch19; Sch09]. Andere Formbeeinflussungen können sich aufgrund der Elastizität des Werkzeugsystems ergeben. *Abrahams* zeigte in seinen Untersuchungen, dass die axiale Umschlingung zu einer Verrundung der Werkstückkanten führt. In seinem Anwendungsfall resultierte für die Führungsleisten zum BTA-Tiefbohren (BTA: Boring and Trepanning Association) eine optimierte Geometrie, die wiederum zu geringerem Verschleißverhalten führt [Abr16; BAG14].

Aufgrund des sukzessiven Abtrags der initialen Oberflächentopographie kann ein Werkzeug in Abhängigkeit von der Prozesszeit und dem Einsatz von Kühlschmierstoff für unterschiedliche Prozessparameter gleiche Oberflächengüten erreichen [ESG+07; BTT19]. Die Abstimmung der Einstellgrößen ist hierbei jedoch ausschlaggebend für die benötigte Prozesszeit respektive der Wirtschaftlichkeit des Prozesses. Für die Herstellung einer Plateau-Struktur sind jedoch mindestens zwei aufeinander abgestimmte Prozessstufen innerhalb der Finishbearbeitung erforderlich. Hierbei wird die Korngröße sukzessive verringert. Im ersten Prozess wird die initiale Oberflächentopographie abgetragen oder zumindest angepasst und eine Oberfläche mit typischerweise homogener Riefenstruktur erzeugt. Durch die nachfolgenden Bearbeitungsstufen werden die entlang der Riefen typischerweise auftretenden Materialaufwürfe, die insbesondere durch die Materialabtragsmechanismen Mikrofurchen und Mikropflügen entstehen, abgetragen und der Anteil an Spitzen in der Oberfläche reduziert [Goe16; TKS+17].

Die Microfinishbearbeitung lässt sich prinzipiell für alle technisch genutzten Materialien einsetzen. Hierzu zählen neben Metallen in den unterschiedlichen Legierungen und Vergütungsstufen Keramiken, Kunststoffe, monokristallines Silizium und Nicht-Eisen-Metalle sowie beschichtete Oberflächen [KDK22; Hil10]. Hierbei können sowohl verhältnismäßig dicke, hochfeste Verschleißschutzschichten als auch dünne mittels physikalischer Gasphasenabscheidung erzeugte PVD-Beschichtungen (Physical Vapour Deposition) bearbeitet werden [Goe16; Abr16]. Für Beschichtungen mit einem porösen Schichtaufbau und Hartstoffpartikeln ergeben sich hierbei Topographien mit verhältnismäßig großem Ölrückhaltevolumen. Durch das Abtragen von Material oberhalb innenliegender Poren können diese freigelegt werden oder Hartstoffpartikel werden aus der Beschichtung gelöst, sodass entsprechende Hohlräume in der Topographie entstehen [Goe16]. Ähnlich wie beim Herauslösen von Hartstoffpartikeln ist der Effekt beim Microfinishen von Gusswerkstoffen. Hier können Graphitpartikel freigelegt werden und sich ggf. aus dem Werkstoff lösen, sodass ein offener Hohlraum entsteht. Dieser Effekt tritt zwar grundlegend auch beim Schleifen auf, jedoch resultieren hier meistens scharfe Grate, sogenannte Blechdeckel, an den Rändern der freigelegten Graphitpartikel. Diese scharfkantigen Grate können im tribologischen Kontakt einer gleit-reibbeanspruchten Kontaktfläche ausbrechen und als Abrasivpartikel die Funktion einschränken. Für die Microfinishbearbeitung lässt sich keine Entstehung von Blechdeckeln beobachten. Vielmehr kommt es durch das Microfinishen zum Abscheren der Grate und Verrunden der vorhandenen scharfen Kanten [SGG+15; WS86].

Abgeleitet aus den Anforderungen an rotationssymmetrische Funktionsflächen ergibt sich die Notwendigkeit, die Konditionierung dieser gezielt auszuliegen, um die Form- und Lagetoleranzen sowie Oberflächentopographien prozesssicher herstellen zu können. Für das Microfinishen mit Band ergeben sich hierbei unterschiedliche Fragestellungen hinsichtlich der Prozessauslegung. Hierzu zählen unter anderem die Auswahl der Bandwerkzeuge und insbesondere der Andrückelemente, aber auch die Wahl geeigneter Kühlschmierstoffstrategien und Prozessparameter. Durch diese Einflüsse ist die Vergleichbarkeit der Prozesse erschwert und ein Transfer von bestehenden auf neue Prozesse nur eingeschränkt möglich. Darüber hinaus ist die gezielte Beeinflussung der axialen Kontur beim Microfinishen mit Band aufgrund des elastischen Werkzeugverhaltens und der geringen Materialabträge besonders herausfordernd. Bisherige Lösungsansätze, wie sequentiell belegte Finishbänder sind hinsichtlich ihrer Flexibilität sowie Verfügbarkeit limitiert. Dies motiviert die Entwicklung und Erprobung neuer Lösungsansätze zur Beeinflussung der axialen Kontur, die sich gezielt an unterschiedliche Vorgaben und Prozessrandbedingungen bei der Herstellung von rotationssymmetrischen Funktionsflächen anpassen lassen.

3 Motivation und Zielsetzung

Aufgrund der kraftinduzierten Prozessführung, der damit verbundenen Einstellgrößen, Einstelldruck oder Andrückkraft, und der Vielzahl an unterschiedlichen Andrückelementen und Bandwerkzeugen beim Microfinishen mit Band ist die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Prozesse gering [BWK+17]. Dies erschwert die Adaption vorhandener Prozesse bei veränderten Randbedingungen, sodass bei der Prozessauslegung häufig auf zusätzliche Versuche oder auch empirisches Prozesswissen erfahrener Fachkräfte zurückgegriffen werden muss. Diese werden jedoch aufgrund des demografischen Wandels und der Abnahme des allgemeinen Bildungsniveaus in Deutschland zunehmend weniger, wodurch der Erhalt als auch die Weitergabe von spezifischem Fachwissen zunehmend erschwert werden [Bos24].

Gleichzeitig steigen die Anforderungen an mechanische Komponenten in tribologischen Systemen und erfordern eine genaue Kenntnis geeigneter Herstellungsverfahren und ihrer Prozesswechselwirkungen zur zielgerichteten und effizienten Fertigung von technischen Funktionsflächen [Ros15; VDI23]. Bezogen auf gleit-reibbeanspruchte Lagerflächen bedeutet dies die Herstellung einer geeigneten Oberflächentopographie sowie die Reduktion von Formfehlern [HAE12]. Im Kontext des Microfinishens ist hier zum einen die Reduzierung von radialen Welligkeiten relevant, die zu einer Steigerung der Lebensdauer und Verbesserung der NVH-Eigenschaften beitragen kann [BTB21; Bar18]. Zum anderen ist auch die axiale Kontur bzw. Geradheit von Lagerstellen eine wichtige Funktionseigenschaft, die durch die finale Bearbeitung mittels Microfinishen beeinflusst wird [Sch19; Ita18; KHK+21]. Insbesondere für die Bearbeitung mit Finishband ergeben sich hier, aufgrund der elastischen Werkzeuge und der damit lokal variierenden Materialabträge, besondere Herausforderungen.

Ziel dieser Arbeit ist es, einerseits einen Beitrag zur Weitergabe empirischen Fachwissens sowie zur Optimierung der Prozessauslegung zu leisten. Andererseits soll aus den Erkenntnissen ein spezifischer Lösungsansatz zur Herstellung technischer Funktionsflächen mittels Microfinishen mit Band abgeleitet werden, der die Zielgrößen Topographie, radiale Welligkeit und Geradheit berücksichtigt. Zusammenfassend ergibt sich das übergeordnete Ziel, Handlungsempfehlungen für die Prozessauslegung beim Microfinishen mit Band zu formulieren.

Hierzu wird mithilfe aufgestellter Regressionsmodelle die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Microfinishprozesse erhöht und die Prozesswechselwirkungen beim Microfinishen mit Band unter Berücksichtigung der Flächenpressung für den Einsatz von Andrückrollen und flexiblen Federstahl-Andrückelementen (FFA)

gegenübergestellt, um den Einfluss der Kontaktbedingungen auf das Prozessergebnis zu analysieren. Abbildung 3-1 zeigt schematisch den Aufbau der wissenschaftlichen Arbeit und die Gliederung der drei analytischen Kapitel, die sich aus der Motivation und Zielsetzung ergeben.

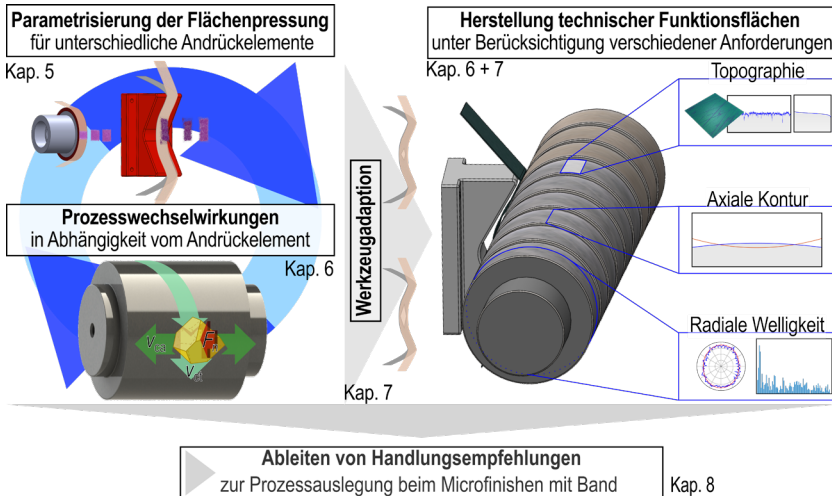


Abbildung 3-1: Schematische Darstellung der Arbeitsinhalte

Im Rahmen dieser Arbeit werden für die verwendeten Andrückelemente Ersatzmodelle aufgestellt, die es ermöglichen, die Flächenpressung als Einstellparameter vorzugeben. Somit kann der Einfluss der Flächenpressung sowie der Einfluss unterschiedlicher Andrückelemente direkt betrachtet und gegenübergestellt werden (Kapitel 5). Grundsätzlich kann bei ähnlichen Werkstückdurchmessern, Werkzeugbreiten und Andrückelementen auf die Regressionsformeln zurückgegriffen werden. Hieraus kann für industrielle Anwendungen die benötigte Einstellgröße (Andrückkraft oder Einstelldruck) für eine gewünschte Flächenpressung bestimmt werden, sodass sich der nötige Aufwand an empirischer Prozessauslegung reduzieren lässt.

Anschließend werden Andrückelemente mit großer Werkzeug-Werkstück-Umschlingung hinsichtlich ihres Prozessverhaltens analysiert (Kapitel 6). Aufgrund der Besonderheiten beim Einsatz des FFA wird hierbei zusätzlich analysiert, wie sich der Einsatz unterschiedlicher Kühlschmierstoffstrategien auf das Prozessergebnis auswirkt. Ergänzend wird der Einfluss der Werkzeug-Werkstück-Umschlingung auf die

mehrstufige Microfinishbearbeitung betrachtet, bei der in aufeinander abgestimmten Prozessfolgen die Korngröße der eingesetzten Werkzeuge sukzessive reduziert wird.

Abgeleitet aus den Anforderungen, die bei der Herstellung technischer Funktionsflächen gestellt werden, soll ein Optimierungsansatz für die Microfinishbearbeitung mit Band entwickelt werden. Ziel ist es, den Einfluss gezielt angepasster FFA auf den Microfinishprozess und das Bearbeitungsergebnis hinsichtlich axialer Kontur, Topographie sowie radialer Welligkeit zu analysieren (Kapitel 7).

Die gesammelten Erkenntnisse sollen abschließend in Bezug zur Prozessauslegung betrachtet werden, wobei die Zielgrößen sowie die Auswahl des Andrückelements im Fokus stehen. Hieraus werden Handlungsempfehlungen zum Microfinishen mit Finishband formuliert, die in Abhängigkeit von unterschiedlichen Eingangs- und Zielgrößen Lösungsansätze zur zielgerichteten Bearbeitung aufzeigen und zur Prozessauslegung herangezogen werden können (Kapitel 8).

4 Experimentelle Bedingungen

4.1 Werkstücke und Werkstoffeigenschaften

Im Bereich der Antriebs- und Lagertechnik, in dem viele Bauteilkomponenten Gleit-Reibbeanspruchungen unterliegen, kommen häufig wärmebehandelte Stahlwerkstoffe zum Einsatz. Hierzu zählen insbesondere Wälzlager-, Einsatz- und Vergütungsstähle, die in Abhängigkeit vom jeweiligen Anwendungsfall und den daraus resultierenden spezifischen Anforderungen über die Legierungsbestandteile und Wärmebehandlungen hinsichtlich ihrer Werkstoffeigenschaften, wie Härte, Zähigkeit und Festigkeit, gezielt beeinflusst werden können [BT06; Wei12]. Der niedrig legierte Wälzlagerstahl 100Cr6 wird vor allem im Bereich der Lagertechnik eingesetzt, da er insbesondere eine hohe Dauerfestigkeit besitzt. Durch seinen hohen Kohlenstoffgehalt ist ein Durchhärten des Werkstoffs möglich. Gleichzeitig ist es für 100Cr6 mittels Induktivhärten möglich, ein Randschichthärten für lokale Bauteilbereiche, wie bspw. Lagersitze, durchzuführen [BT06; Wei12]. Für große Bauteile im Bereich der Antriebs- und Lagertechnik wird alternativ Einsatzstahl verwendet, der aufgrund des geringeren Kohlenstoffanteils nur in der Randzone gehärtet werden kann. Hierzu wird das sogenannte Aufkohlen eingesetzt. Bei diesem Vorgang des Einsatzhärtens wird während der Warmbehandlung das gesamte Bauteilvolumen erwärmt und der Kohlenstoffanteil durch Kohlenstoff-Diffusion in die Randzone erhöht [BS12]. Auch der Vergütungsstahl 42CrMo4+QT wird häufig für Großwälzlager eingesetzt. Durch seine hohe Festigkeit bei gleichzeitig hoher Zähigkeit eignet er sich aber auch für Bauteile wie Getriebewellen und Zahnräder. Im vergüteten und randschichtgehärteten Zustand (+QT: Quenched and Tempered) ist er universell einsetzbar [BS12]. Da die Betrachtungen zum Microfinishen sowohl an Wälzlagerstahl 100Cr6 (1.3505), an Einsatzstahl 16MnCr5 (1.7131) als auch an Vergütungsstahl 42CrMo4 (1.7225) erfolgen, sind die Werkstoffzusammensetzungen der drei Werkstoffe in Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Stähle 100Cr6, 16MnCr5 und 42CrMo4 nach [D683-3; D683-17; D683-2]

Werkstoff	Element							
	Enthaltener Massenanteil (Höchstwert oder Bereich)							
	C	Si	Mn	Cr	P	Mo	S	Cu
100Cr6	0,93-	0,15-	0,25-	1,35-	0,025	0,10	0,015	0,30
16MnCr5	0,14-	0,40	1,0-	0,8-	0,025	-	0,035	0,40
42CrMo4	0,38-	0,10-	0,60-	0,90-	0,025	0,15-	0,035	0,40

Die Proben werden in Form rotationssymmetrischer Voll- und Absatzwellen eingesetzt. Für die Untersuchungen relevant sind hierbei die Durchmesser der zu bearbeitenden Oberflächen sowie die Breite der Absätze der Absatzwellen. Diese relevanten Maße sowie die schematische Darstellung der Bauteilgeometrien, die innerhalb der Versuchsreihen genutzt wurden, sind in Abbildung 4-1 dargestellt. Alle Werkstücke sind hierbei zur Bearbeitung zwischen Spitzen mit Zentrierbohrungen versehen.

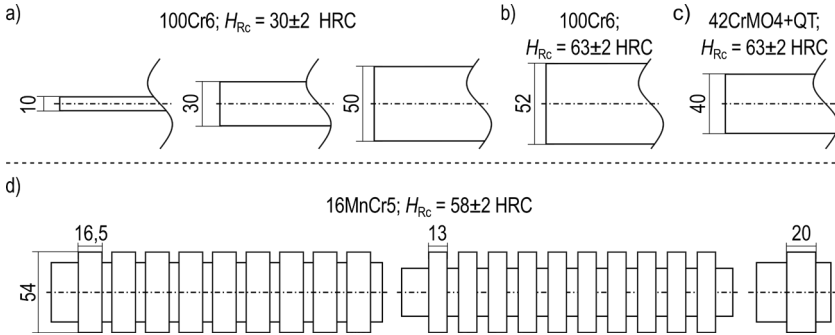


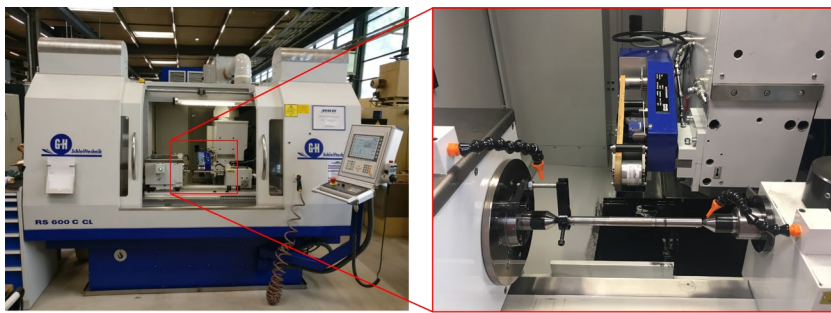
Abbildung 4-1: Vereinfachte Darstellung der Werkstückgeometrien inklusive der relevanten Maß- und Härteangaben für die Vollwellen aus a), b) 100Cr6 sowie c) 42CrMo4+QT und d) die Absatzwellen aus 16MnCr5

Für die umfangreiche Analyse der Flächenpressung in Kapitel 5 kommen hierbei alle dargestellten Geometrien zum Einsatz. Die Werkstückgeometrien a) mit einer Härte von 30 ± 2 HRC werden hierbei ausschließlich zur Ermittlung der Kontaktfläche verwendet (*Kapitel 5.1*). Die Untersuchung zum Einfluss der Flächenpressung auf die Bearbeitung (*Kapitel 5.3*) erfolgt an wärmebehandelten Wellen der Geometrie b) mit einer Randzonenhärte von 63 ± 2 HRC. Die Wärmebehandlung des Wälzlagerstahls erfolgte in Form eines Randzonenhärtens mittels Induktionshärten und Entspannen auf die Zielhärte bei einer Einhärtetiefe von 2,5 bis 4,5 mm. Die Werkstücke aus dem Einsatzstahl 16MnCr5 (1.7131) sind mittels Einsatzhärten wärmebehandelt. Die Einhärtetiefe beträgt $1,2 \pm 0,2$ mm bei einer Härte von 58 ± 2 HRC.

4.2 Werkzeugmaschinen

Die Microfinishbearbeitung erfolgte durch den Einsatz eines Finish-Anbaugerätes NBFG 5 der Firma Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH. Das flexibel einsetzbare Finish-Anbaugerät ist in die Außenrundscheifmaschine RS 600 C CL der Firma Geibel & Hotz GmbH implementiert und wird über die Maschinensteuerung

bedient. Die sich für die Kombination ergebenden Kenndaten der Prozesseinstellgrößen zum Microfinishen sind in Abbildung 4-2 zusammengefasst.



Induzierter Druck p_{in} : 1...6 bar Wkst.-drehzahl n : 0...1000 1/min Oszillationsfrequenz f_{os} : 0...20 Hz
 Res. Andrückkraft F_{An} : 40...240 N Amplitude S : +/- 2 mm Bandvorschubgeschw. v_B : 0...100 mm/min

Abbildung 4-2: Rundschleifmaschine RS 600 C CL der Geibel & Hotz GmbH mit integriertem Bandfinishgerät NBFG 5 der Firma Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH

Die Oszillationsschwingung des Finish-Anbaugerätes wird hierbei elektro-mechanisch erzeugt, während die Andrückkraft pneumatisch realisiert wird. Die Bandvorschubgeschwindigkeit kann konstant laufen oder vollständig ausgesetzt werden, ebenso wie die Oszillationsfrequenz. Zur Sicherstellung, dass das Microfinishband im Prozess durch die Rotation der Welle nicht abgewickelt wird, erfolgt die Bearbeitung ausschließlich im Gegenlauf. Dies bedeutet, dass die Richtungsvektoren der Bandvorschubgeschwindigkeit sowie der tangentialen Schnittgeschwindigkeitskomponente entgegengesetzt gerichtet sind.

4.3 Werkzeugsysteme

Die Microfinishbearbeitung mit Band lässt sich werkzeugseitig nicht auf die Betrachtung des Finishbandes beschränken, da auch das Andrückelement in seiner Ausprägung hinsichtlich Art, Geometrie und Härte einen direkten Einfluss auf die Bearbeitung hat. Unter dem Begriff des Werkzeugsystems lässt sich somit das Zusammenwirken von Andrückelement und Finishband verstehen. Im Folgenden werden die eingesetzten Andrückelemente und Finishbänder hinsichtlich ihrer Eigenschaften beschrieben.

4.3.1 Andrückrollen

Das klassische Andrückelement bei der Finishbearbeitung mit Band entspricht einer Rolle, bestehend aus einer Elastomer-Ummantelung auf einem Stahl- oder Aluminiumkern, wie es bereits im Stand der Technik vorgestellt wurde. Als

Andrückrollen werden Elastomer-Rollen unterschiedlicher Härte eingesetzt, die in Tabelle 4-2 aufgelistet sind.

Tabelle 4-2: Übersicht der verwendeten Andrückrollen bezüglich Rollenhärte und relevanten Abmessungen

Härte H_R (Shore A)	60	80	90	80
Breite b_A (mm)	12			50
Elastomer-Dicke w_E (mm)	9			9
Andrückrollen-Durchmesser d_{Wz} (mm)	70			70

Die Breite der eingesetzten Finishbänder entspricht jeweils der Breite der genutzten Andrückrolle. Somit wird die Bezeichnung Werkzeugbreite b_{Wz} synonym zu Rollenbreite oder Finishbandbreite für das gesamte jeweilige Werkzeugsystem verwendet. Ebenso gilt dies für die Breite anderer eingesetzter Andrückelemente, wie dem im Folgenden beschriebenen flexiblen Federstahl-Andrückelement (FFA).

4.3.2 Flexibles Federstahl-Andrückelement

Als weiteres Andrückelement wird das sogenannte flexible Federstahl-Andrückelement (FFA) verwendet. Es basiert grundlegend auf dem bereits vorgestellten Andrückelement „D-Flex“ der Firma Nagel und wurde so konzipiert, dass es sich in das Finish-Anbaugerät, anstelle einer Andrückrolle, integrieren lässt.

Das Andrückelement besteht aus einem schalen- oder V-förmig ausgesparten Grundkörper, über dessen Aussparung ein an zwei Punkten fixiertes Federstahlband liegt. Das Federstahlband dient als Führungs- und Andrückelement des Finishbandes. Aufgrund seiner Elastizität kann es sich im Prozess verformen und so eine verhältnismäßig große Werkzeug-Werkstück-Umschlingung realisieren. Abbildung 4-3 zeigt den Aufbau sowie den Einsatz des FFA. In die Haltevorrichtung für das FFA wurde zu Untersuchungszwecken zusätzlich ein piezoelektrischer Kraftmessring integriert. Dies ermöglicht die In-Prozess-Messung der Prozesskräfte Andrück- bzw. Normal- (F_n), Tangential- (F_t) und Axialkraft (F_a).

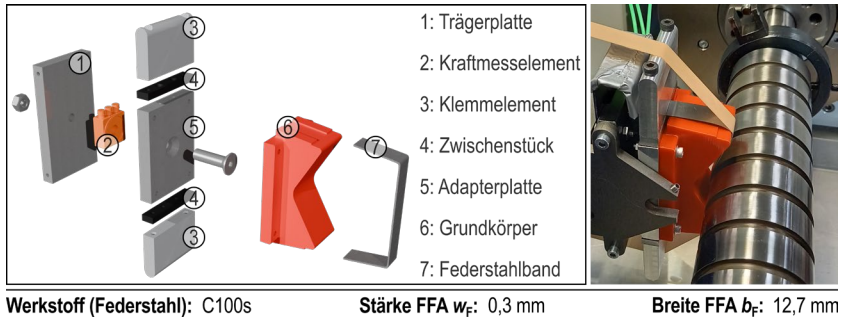
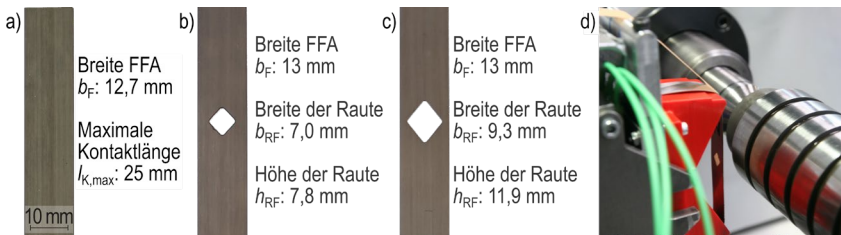


Abbildung 4-3: Schematischer Aufbau a) des flexiblen Federstahl-Andrückelements inkl. Adaptierung eines piezosensorischen Kraftmessrings und b) Einsatz des FFA zum Microfinishen

Die eingesetzten Federstahlbänder aus C100s (1.1274) weisen eine Stärke von $w_F = 0,3$ mm auf und haben je nach Ausführung eine Breite von $b_F = 12,7$ mm bzw. 13 mm. Neben dem Einsatz eines vollständigen Federstahlbandes ($b_F = 12,7$ mm) wurden im Rahmen dieser Arbeit Federstahlbänder mit einer Aussparung ($b_F = 13$ mm) eingesetzt. Es liegen somit drei unterschiedliche Geometrien vor, die in Abbildung 4-4 dargestellt sind. Neben dem vollständigen Federstahlband wurden zwei rautenförmige Aussparungen ausgelegt und in die Federstahlbänder eingebracht. Die rautenförmigen Aussparungen wurden hierbei mittels Laserstrahlschneiden in die Federstahl-Andrückelemente eingebracht.



Werkstoff: C100s **Stärke FFA w_F :** 0,3 mm **Herstellung d. Aussparung:** Laserstrahlschneiden

Abbildung 4-4: Darstellung der Federstahl-Andrückelemente a) ohne sowie b, c) mit rautenförmiger Aussparung und d) im eingebauten Zustand

Die unterschiedlichen rautenförmigen Aussparungen wurden auf Basis der sich ergebenden maximalen Kontaktfläche (für $F_{An} = 240$ N) so ausgelegt, dass sie, bezogen auf die Kontaktfläche des FFA ohne Aussparung, eine um etwa 10 bzw. 20 % geringere Kontaktfläche aufweisen. Die finalen Maße der beiden rautenförmigen Aussparungen

betragen $b_{RF} \cdot h_{RF} = 7 \cdot 7,8 \text{ mm}$ und $9,3 \cdot 11,9 \text{ mm}$. Ziel der angepassten FFA ist es, zu überprüfen, ob sich der Materialabtrag in axialer Richtung gradieren lässt, um die entstehende Kontur bei der Bearbeitung zu beeinflussen und so gezielt konvexe Konturen herzustellen.

Die im Rahmen dieser Arbeit in den Versuchen eingesetzten Werkzeuge sind allesamt Finishbänder und gehören somit zur Gruppe der geometrisch unbestimmten Werkzeuge auf flexibler Unterlage. Im Rahmen der Untersuchungen wurden die Kornmaterialien Aluminiumoxid, Siliziumkarbid und Diamant eingesetzt. Neben der Kornart wurden auch Werkzeuge unterschiedlicher Korngröße und verschiedener Arten des Kornauftrags eingesetzt. Alle Schneidkörner der Korngröße $d_K < 30 \mu\text{m}$ sind schwerkraftgestreut aufgebracht, wohingegen die übrigen ($d_K \geq 30 \mu\text{m}$) elektrostatisch gerichtet aufgetragen sind. Alle Werkzeuge wurden mit einer Breite $b_{Wz} = 12 \text{ mm}$ eingesetzt und hierbei über die unterschiedlichen Andrückelemente geführt. Abbildung 4-5 fasst die in den experimentellen Untersuchungen eingesetzten Werkzeuge zusammen und zeigt eine mikroskopische Aufnahme der Werkzeuge.

Kornart: Korngröße d_K : Kornauftrag:	SiC 30 μm gerichtet	Al ₂ O ₃ 30 μm gerichtet	Al ₂ O ₃ 9 μm gestreut	D 74 μm gerichtet	D 30 μm gerichtet	D 9 μm gestreut	D 3 μm gestreut
							

Abbildung 4-5: Übersicht der in den experimentellen Versuchen verwendeten Microfinish-Werkzeuge

4.4 Mess- und Analysetechnik

4.4.1 Ermittlung der Kontaktfläche und der resultierenden Flächenpressung

Zur Ermittlung der Flächenpressung zwischen Werkzeug und Werkstück werden die Druckmessfolien *Prescale* Ultra Super Low Pressure (LLLW) und Extreme Low Pressure (4LW) der Firma *FujiFilm Europe GmbH* eingesetzt. Mithilfe dieser Druckmessfolien lässt sich im statischen Kontakt die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück abbilden. Ein auf der Druckmessfolie entstehender Farbadruck wird anschließend mittels Digitalmikroskop vermessen. Mithilfe der Software *VHX 5000* der Firma *Keyence Deutschland GmbH* können die einzelnen Farbpixel in der mikroskopischen Aufnahme ermittelt und die Kontaktflächen detailliert bestimmt werden. In Kombination mit der bekannten Andrückkraft lässt sich auf diesem Weg die Flächenpressung p_A genau ermitteln. Aus dem Quotienten der

Kontaktfläche A_{Kon} zur Andrückkraft F_{An} ergibt sich die resultierende Flächenpressung p_A zu:

$$p_A = \frac{A_{Kon}}{F_{An}}. \quad (4.1)$$

4.4.2 Werkstückanalyse

Die im Rahmen der Arbeit verwendete Messtechnik bezieht sich neben der Prozessanalyse sowohl auf die Analyse des Prozessergebnisses werkstückseitig als auch auf werkzeugseitige Veränderungen durch die Prozessführung. Daher werden die angewendeten Mess- und Analysetechniken entsprechend getrennt vorgestellt.

Zur quantitativen und qualitativen Bewertung der Prozessergebnisse werden unterschiedliche Messwerte aufgenommen, ausgewertet und analysiert. Die im Rahmen dieser Arbeit relevanten Messwerte umfassen Rauheits- und Materialtraganteilskenngößen sowie Rundheitsmessungen zur Analyse der radialen Welligkeit mittels Fast-Fourier-Transformation (FFT) und die Betrachtung der axialen Bauteilkontur.

Die Rauheits- und Materialtraganteilskenngößen dienen hierbei der Charakterisierung der erzeugten Oberflächentopographie. Die gemittelte Rautiefe R_z wurde bereits in *DIN 4768:1990* definiert und beschreibt den Mittelwert der Höhe-Tal-Differenz aus fünf Segmenten des Rauheitsprofils [D4768]. In *DIN EN ISO 4287:2010* wird das Kurzzeichen R_z zur Beschreibung der größten Höhe-Tal-Differenz des gesamten Messschriebs genutzt und „maximale Höhe des Profils“ genannt [D4287]. Nach der aktuellsten Normung *DIN EN ISO 21920-2:2022* beschreibt R_z die maximale Höhe, die den Mittelwert der R_z -Werte mehrerer Einzelabschnitte wiedergibt [D21920-2]. Unter Berücksichtigung von fünf Einzelmessstrecken ist die Definition der maximalen Höhe R_z nach *DIN EN ISO 21920-2* somit deckungsgleich mit der früheren Definition der gemittelten Rautiefe R_z nach *DIN 4768* von 1990. Da die Bezeichnung „maximale Höhe“ unter Berücksichtigung der mathematischen Herleitung samt Mittelwertbildung nicht passend erscheint, und die alte Bezeichnung „gemittelte Rautiefe“ immer noch weit verbreitet ist, wird im Rahmen dieser Arbeit die Bezeichnung der gemittelten Rautiefe R_z genutzt. Sofern nicht anders beschrieben, bezieht sich die Berechnung der angegebenen Werte immer auf fünf Einzelmessstrecken. Der Kennwert eignet sich zur Bewertung der Rauheit des Profils, ohne jedoch eine Aussage über die Ausprägung von Riefen- und Spitzenverhältnis zu treffen. Das Inverse eines Rauheitsprofils weist den gleichen R_z -Wert auf wie das Original, obwohl durch die Umkehrung von Riefen und Spitzen eine Veränderung der Funktionseigenschaften vorliegt. Daher ist die Bewertung einer Funktionsfläche ausschließlich anhand der gemittelten Rautiefe R_z oder dem Mittenrauwert R_a nicht zielführend [BT19; SD14; WS86]. Um Funktionsflächen, wie bspw. gehonte Plateau-

Oberflächen, zu charakterisieren, empfiehlt sich die Betrachtung zusätzlicher Kennwerte wie Materialtraganteilskenngößen nach *DIN EN ISO 13565-2*. Im Rahmen dieser Arbeit betrifft dies die reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} , die reduzierte Riefentiefe R_{vk} sowie die Kernrautiefe R_k . Die Kennwerte werden ebenso aus dem gemessenen Rauheitsprofil ermittelt und geben Aufschluss über die Riefen- und Spitzenausprägung der Oberfläche. Die Kennwerte werden mittels eines stationären taktilen Rauheitsmessgerätes vom Typ *MarSurf XR 20* der Firma *Mahr GmbH* ermittelt. Alle Darstellungen von Rauheits- und Materialtraganteilskenngößen beziehen sich hierbei mindestens zwölf Einzelmessungen auf der betrachteten Oberfläche. Für die Erstellung von Regressionsmodellen wurde hierzu der Mittelwert der Messungen betrachtet. Darstellungen im Boxplot-Format umfassen alle einzelnen Messwerte einer Oberfläche.

In Ergänzung hierzu wurden mittels Konfokalmikroskopie (Konfokalmikroskop *Nanofocus µSurf C*) und Structured-Illumination-View (3D-Oberflächenmessgerät *Confovis Duo Vario*) Aufnahmen der Oberflächentopographie erstellt. Die Aufnahmen dienen zur qualitativen Betrachtung der Oberflächentopographie. Die Auswertung der Messdaten erfolgte mithilfe der Analysesoftware *MountainsMap* der Firma *Digital Surf*.

Weiterhin erfolgt die Betrachtung der Werkstückkontur anhand von taktilen Messungen. Hierbei wird die Kontur in axialer Bauteilrichtung erfasst und analysiert. Die taktilen Messungen erfolgten am stationären Konturmessgerät *MarSurf XC 20* der Firma *Mahr GmbH*. Die Auswertung der Konturmessung erfolgte mithilfe der Software *MountainsMap* der Firma *Digital Surf*. Für die Bewertung der Kontur wurde hierbei die Profiltiefe P_t betrachtet. Diese gibt die maximale Differenz des tiefsten zum höchsten Profilpunkt an. Je nach Ausprägung der Kontur wird der P_t -Wert positiv oder negativ angegeben. Liegt der höchste Punkt des Profils im mittleren Bereich der Messstrecke, so liegt eine ballige Kontur (konvex) vor und der P_t -Wert wird positiv angegeben. Negative P_t -Werte beschreiben im Gegensatz dazu eine nach oben geöffnete Kontur mit konkaver Ausprägung.

Zur Bewertung der radialen Welligkeit an den bearbeiteten Oberflächen wird das Formmessgerät *TurboForm F360* der Firma *Jenoptik AG* eingesetzt. Basierend auf Rundheitsmessungen der betrachteten Bauteilflächen erfolgt eine Fast-Fourier-Transformation (FFT) zur Analyse der signifikanten Welligkeit auf der Oberfläche. Die FFT-Analyse ist eine nach *VDI 2631 Blatt11* empfohlene Analyse für die radiale Welligkeit an rotationssymmetrischen Bauteilflächen mit Funktionseigenschaften und stellt die Amplitudengröße der auf dem Umfang auftretenden Wellen in Form eines Balkendiagramms übersichtlich dar [V2631-11].

4.4.3 Prozess- und Einsatzverhalten

Neben der Post-Prozess-Messtechnik erfolgte prozessbegleitend der Einsatz von In-Prozess-Messtechnik. Diese umfasst den Einsatz von piezoelektrischer Kraftmesstechnik, die an das FFA implementiert wurde, sowie im Rahmen eines Analogieversuchs zur Ermittlung von Schallemissionen ein Freifeldmikrofon.

Ein Kraftmessring des Typs „9251A“ der Firma *Kistler Instrumente AG* wurde eingesetzt, um die auftretenden Prozesskräfte in alle drei Raumrichtungen aufzunehmen. Der Kraftmessring mit piezoelektrischer Sensorik wurde hierbei so verbaut, dass sein Zentrum auf Höhe der Rotationsachse des Werkstücks liegt, sodass der Kraftfluss mittig durch den Sensor erfolgt. Die gemessenen und analysierten Prozesskräfte Normalkraft F_n , Tangentialkraft F_t und Axialkraft F_a korrelieren mit den kinematischen Größen Andrückkraft F_{An} , tangentiale Schnittgeschwindigkeit v_{et} und axiale Schnittgeschwindigkeit v_{ea} in ihren Wirkrichtungen und werden durch diese hervorgerufen.

Zur Analyse der Schallemissionen geschliffener und gefinishter Oberflächen im Analogieversuchsstand wurde ein Freifeldmikrofon vom Typ „4189“ der Firma *Hottinger Brüel & Kjaer GmbH* eingesetzt. Die Sensorik erfasst Schalldruckwellen in einem Frequenzspektrum von $f = 6,3$ Hz bis $f = 20$ kHz. Zur Analyse der Schallemissionen wurde die Open-Source-Software *Sonic Visualiser*, die an der Queen Mary University of London vom Fachbereich Physik entwickelt wurde, eingesetzt [CLS10]. Mithilfe der Software wurde eine Frequenzbandanalyse durchgeführt, um die signifikanten Bereiche der Schallemissionen zu detektieren.

4.4.4 Statistische Versuchspläne und Auswertemethoden

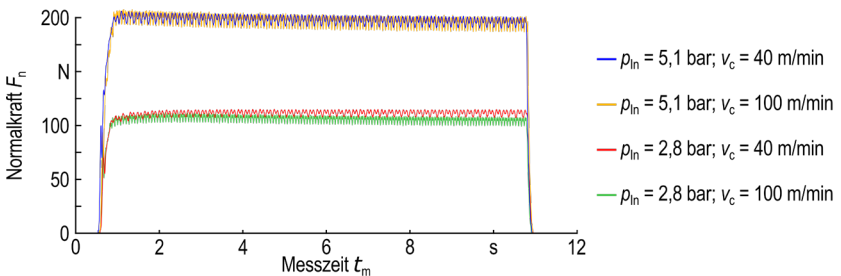
Im Zuge der Untersuchungen wurden unterschiedliche Versuchsreihen durchgeführt, die auf statistischer Versuchsplanung basieren. Es wurden sowohl Ein-Faktor-Versuchspläne als auch zentral zusammengesetzte Versuchspläne genutzt. Die Ein-Faktor-Versuchsplanung entspricht der Variation eines einzigen Parameters über mehrere Faktorstufen und wurde unter anderem für die Analyse der Kontaktfläche durchgeführt. Hierbei wurden bspw. die unterschiedlichen Eingangsparameter, wie Andrückrollenhärte, Korngröße und Kornaufbringung sowie Werkstückdurchmesser, für eine Versuchsreihe konstant gehalten und ausschließlich die Andrückkraft variiert. Die zentral zusammengesetzten Versuchspläne sind nach dem Prinzip des Central-Composite-Design (CCD) erstellt, wobei die Anzahl der Faktoren auf zwei reduziert ist und sich anstelle eines Würfels ein Quadrat mit einem Stern an Versuchspunkten bildet. Aus der Kombination ergeben sich fünf Faktorstufen für die variierten Parameter, wobei der Zentrums punkt dreifach durchgeführt wurde. Des Weiteren wurden Versuchspläne im Ein-Faktor-Design unter Berücksichtigung verschiedener

Einflussfaktoren für FFA mit Aussparung durchgeführt. Hierbei wurden je drei Faktorstufen für die Eingangsgrößen Andrückkraft F_{An} , Oszillationsfrequenz f_{Os} und Prozesszeit t betrachtet.

5 Analyse der Kontaktsituation und ihres Einflusses auf den Microfinishprozess

5.1 Experimentelle Analyse der Kontaktsituation für Andrückrollen

Wie bereits in *Kapitel 4* erläutert, kann die Flächenpressung im Microfinishprozess mittels Druckmessfolien für den statischen Lastfall ermittelt werden. In-Prozess-Messungen der Prozesskräfte lassen darauf schließen, dass abgesehen von der An- und Abfahrbewegungen des Werkzeugs im Mittel konstante Normalkräfte im Prozess vorliegen. Die Schwankungen der Prozessnormalkraft F_n , in Abhängigkeit von der Werkzeugoszillation und möglicher Rundlauffehler sind periodisch der pneumatisch erzeugten Andrückkraft F_{An} , die dem Mittelwert entspricht, überlagert. Im Prozess auftretende Normalkräfte F_n sind exemplarisch in Abbildung 5-1 für unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten und Einstelldrücke p_{in} dargestellt. Bei gleichbleibender Kontaktfläche kann damit die Flächenpressung über die Prozesszeit als konstant angenommen werden.



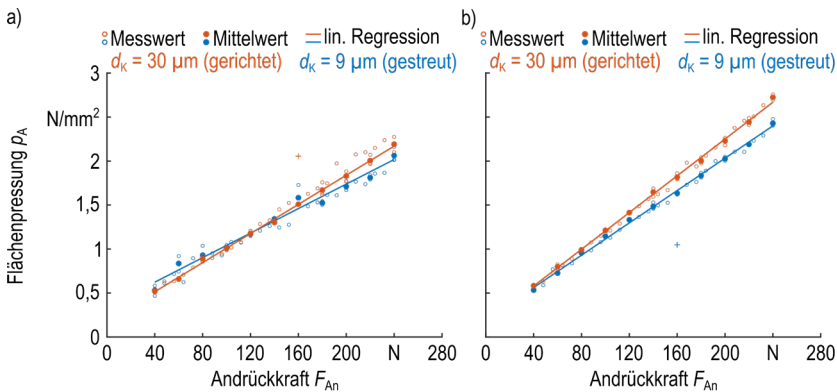
Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μ m
Härte:	58 $\pm$ 2 HRC			Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min	Einstelldruck p_{in}:	Var.
Osz.-amplitude S:	$\pm$ 2 mm	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.
Drehzahl n:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 5-1: Darstellung der Normalkraft F_n bei Variation der Andrückkraft F_{An} und Schnittgeschwindigkeit v_c .

In der Abbildung wird deutlich, dass die Frequenz der Schwingung in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit variiert. Für die Variation der Schnittgeschwindigkeit wurde bei den dargestellten Versuchen als Einstellgrößen sowohl die Drehzahl n (234 und 586 1/min) als auch die Oszillationsfrequenz f_{Os} (6 und 15 Hz) variiert. Die Zunahme der Oszillationsfrequenz zeigt sich hierbei in der Erhöhung der Schwingungsfrequenz in der Kraftmessung für höhere Schnittgeschwindigkeiten.

Aufgrund der Prozessführung durch Kraftinduktion bleibt die Normalkraft F_n im Mittel konstant. Unter der Annahme, dass sich die Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück nur geringfügig verändert, lässt sich die vereinfachte Betrachtung der Flächenpressung für den statischen Fall begründen. Für die Ermittlung der Flächenpressung werden die Kontaktflächen im statischen Versuch ermittelt und als konstant über die Prozesszeit angenommen.

Da die Flächenpressung von unterschiedlichen Einflussfaktoren, wie Gestalt des Andrückelements, Andrückrollenhärte H_R , Werkzeugbreite b_{Wz} , Finishband (Korngröße und Kornauftrag), Werkstückdurchmesser und eingestellter Andrückkraft, abhängt, gilt es, deren Einfluss zu berücksichtigen. Im Folgenden werden die resultierenden Flächenpressungen bei Variation dieser Einflussgrößen ermittelt. Abbildung 5-2 zeigt hierbei die Gegenüberstellung für zwei unterschiedliche Finishbänder bei Verwendung von Andrückrollen aus Elastomer mit einer Härte von 60 Shore A in Teil a) und 80 Shore A in Teil b). Die gegenübergestellten Finishbänder unterscheiden sich sowohl hinsichtlich der Korngröße als auch hinsichtlich des Kornauftrags. Für das Finishband der Korngröße $d_K = 30 \mu\text{m}$ liegt ein elektrostatisch gerichteter Kornauftrag vor, wohingegen die Schneidkörner des Finishbandes mit kleinerer Korngröße ($d_K = 9 \mu\text{m}$) schwerkraftgestreut aufgetragen sind.



Werkstoff:	100Cr6	Andrückelement:	Rolle	Abrasivkorn:	Al_2O_3
Durchmesser d:	50 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	Var.
Härte:	30 HRC	Rollenhärte H_R:	a) 60; b) 80 Shore A	Kornauftrag:	Var.

Abbildung 5-2: Ermittelte Flächenpressung für unterschiedliche Finishbänder unter Verwendung von Andrückrollen mit einer Härte H_R von a) 60 Shore A und b) 80 Shore A

Aus den ermittelten Flächenpressungen wird deutlich, dass der Einfluss des Finishbandes für die betrachteten Werkzeuge als gering eingestuft werden kann.

Lediglich bei Einsatz der Andrückrolle mit einer Härte von $H_R = 80$ Shore A lässt sich ab Andrückkräften von $F_{An} > 160$ N ein Einfluss der Korngröße erkennen. Hier ergeben sich höhere Flächenpressungen bei gleicher Andrückkraft für größere Korngrößen. Dies kann auf den Einfluss der Korngröße sowie des Kornauftrags zurückgeführt werden. Elektrostatisch gerichtete Bänder weisen in der Regel eine geringere Kornkonzentration auf. Da die Kontaktfläche insbesondere durch die Summe der Mikrokontaktflächen zwischen Schneidkörnern und Werkstückoberfläche beeinflusst wird, lässt sich auf einen entsprechenden Einfluss der Kornaufbringung und respektive der Kornkonzentration schließen. Gleichzeitig zur geringeren Kornkonzentration erzeugt die elektrostatische Ausrichtung eine Topographie des Finishbandes, die durch die nach oben ausgerichteten Kornspitzen geprägt ist. Die geringere Anzahl an Schneidkörnern sowie die Ausrichtung der Kornspitzen erzeugen theoretisch kleinere Mikrokontaktflächen als dies bei schwerkraftgesteuerten Finishbändern der Fall ist. In Summe ergibt sich also eine kleinere Kontaktfläche und damit, bei gleicher Andrückkraft, eine höhere Flächenpressung für größere Korngrößen. Beim Vergleich der Andrückrollen zeigen sich höhere Flächenpressungen für eine härtere Andrückrolle. Dies lässt sich mit der geringeren Elastizität erklären, aus der eine geringere Verformung hervorgeht. Hierdurch ergibt sich eine niedrigere Werkstückumschlingung respektive Kontaktlänge l_k zwischen Werkzeug und Werkstück. Die resultierende Kontaktfläche ist somit für eine härtere Andrückrolle geringer, woraus bei gleicher Andrückkraft eine höhere Flächenpressung p_A entsteht. Dieser Effekt tritt erst bei höheren Andrückkräften auf, da für Andrückkräfte $F_{An} < 100$ N das Verformungsverhalten der betrachteten Andrückrollen noch sehr ähnlich ist.

Abbildung 5-3 zeigt den Einfluss des Werkstückdurchmessers für unterschiedlich harte Andrückrollen in Form von Regressionsmodellen. Die betrachteten Werkstücke weisen Durchmesser von $d = 10, 30$ und 50 mm auf. Die Andrückrollen variieren in ihrer Härte von a) 60 zu b) 80 und c) 90 Shore A bei gleicher Breite $b_{Wz} = 12$ mm.

Für kleinere Werkstückdurchmesser lässt sich hierbei grundsätzlich ein Anstieg der Flächenpressung bei gleicher Andrückkraft erkennen. Mit zunehmender Andrückkraft nimmt dieser Einfluss weiter zu. Darüber hinaus steht dieser Sachverhalt in Wechselwirkung mit der Andrückrollenhärte. Für härtere Andrückrollen wird der Einfluss des Werkstückdurchmessers noch deutlicher, und es resultieren, verglichen mit weicheren Andrückrollen oder größeren Werkstückdurchmessern, größere Flächenpressungen.

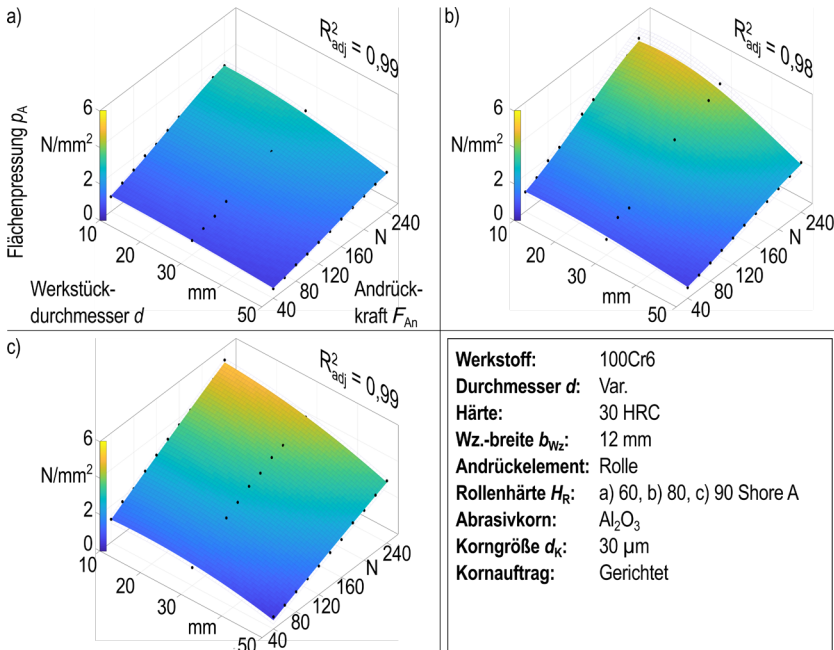


Abbildung 5-3: Einfluss des Werkstückdurchmessers auf die Flächenpressung für Andrückrollen der Härte a) 60, b) 80 und c) 90 Shore A

Als ursächlich hierfür wird das limitierte Verformungsverhalten der Andrückrolle gesehen, das für härtere Andrückrollen zu kleineren Kontaktlängen bzw. Umschlingungen des Werkstücks führt. Die Limitierung der Elastizität harter Andrückrollen kommt insbesondere bei kleinen Werkstückdurchmessern zum Tragen, weshalb insbesondere für kleinere Werkstückdurchmesser geringere Kontaktflächen entstehen, die zu einer höheren Flächenpressung für harte Andrückrollen führen. Weichere Andrückrollen erzeugen aufgrund ihrer höheren elastischen Verformbarkeit auch bei kleinen Werkstückdurchmessern eine vergleichsweise große Umschlingung, sodass die Kontaktfläche groß und die resultierende Flächenpressung vergleichsweise gering ist. Im Gegensatz zur Andrückrolle ermöglichen Andrückschalen oder das vorgestellte FFA aufgrund ihres Aufbaus tendenziell eine Steigerung der Kontaktlänge bzw. Werkstückumschlingung.

5.2 Gegenüberstellung der Kontaktsituation für Andrückrollen und flexible Federstahl-Andrückelemente

Alternativ zu Andrückrollen wird der Einsatz des FFA untersucht. Abbildung 5-4 stellt hierzu die resultierende Flächenpressung einer Andrückrolle mit 60 Shore A und dem FFA gegenüber. Das verwendete Finishband und das Werkstück sind für beide Andrückelemente identisch. In Teil a) sind exemplarisch mithilfe von Druckmessfolie ermittelte Kontaktflächen dargestellt. Die Teile b) und c) zeigen jeweils die gemessene Kontaktlänge l_k sowie die Flächenpressung in Abhängigkeit von der eingestellten Andrückkraft F_{An} . Auf Basis der ermittelten Flächenpressung ergeben sich lineare Regressionsmodelle mit einem Bestimmtheitsmaß von $R^2 > 0,94$.

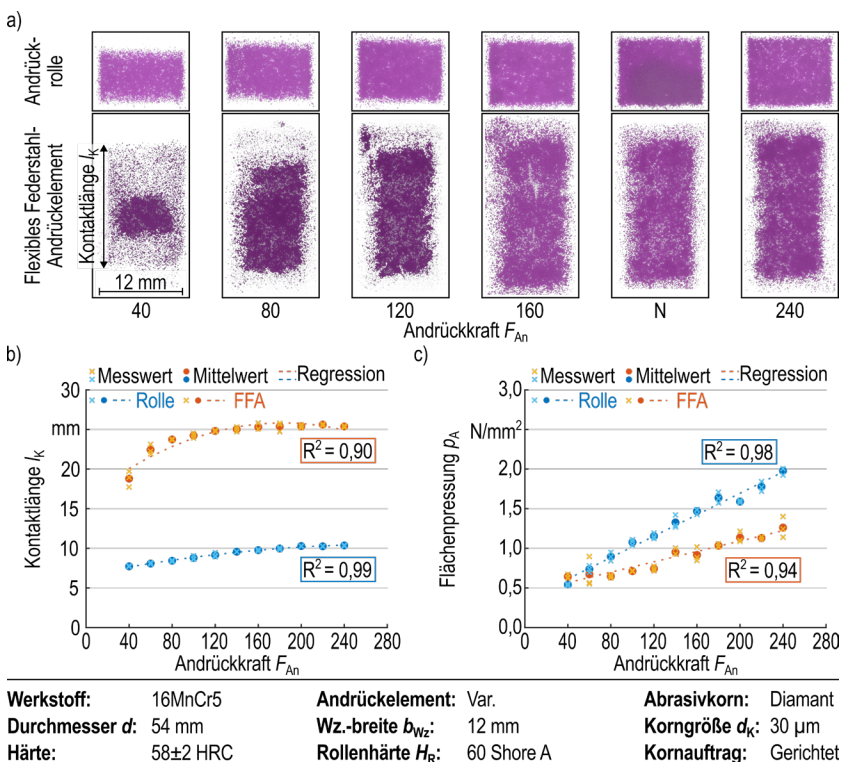


Abbildung 5-4: Gegenüberstellung der resultierenden a) Kontaktfläche, b) Kontaktlänge l_k und c) Flächenpressung p_A für eine Andrückrolle ($H_R = 60$ Shore A) sowie das FFA bei Variation der Andrückkraft

Deutlich zu erkennen ist, dass sich bei Verwendung der Andrückrolle für alle Andrückkräfte eine homogenere Kontaktzone einstellt als dies beim flexiblen Federstahl-Andrückelement der Fall ist. Dies bedeutet, dass in den Randbereichen des FFA nur vereinzelt Kontakt vorherrscht. Diese inhomogene Ausprägung der Kontaktfläche betrifft für das FFA sowohl die Kontaktlänge als auch -breite. Hierbei spielt eine Rolle, dass das FFA sich nur in radialer Richtung verformen und somit eine Umschlingung erzeugen kann, jedoch keine Aufweitung durch die auftretende Andrückkraft entsteht. Die elastische Andrückrolle verformt sich aufgrund ihrer Beschaffenheit sowohl radial als auch axial. Während radial ein Eindringen stattfindet, kann die axiale Verformung eine Aufweitung der Rollenbreite bedeuten. Da das Finishband jedoch in der Breite limitiert ist und diese Aufweitung nicht erfährt, resultiert hier ein homogener Abdruck der Kontaktfläche. Um eine vergleichsweise homogene Kontaktfläche mit FFA-Werkzeug zu erzeugen, müsste die radiale Verformung begrenzt werden, sodass sich die wirkende Andrückkraft gleichmäßiger in radialer und axialer Richtung verteilen kann. Die unterschiedliche Verformung der Andrückelemente zeigt sich auch für die detaillierte Betrachtung der Kontaktlänge l_K . Bereits bei einer Andrückkraft von $F_{An} = 80 \text{ N}$ stellt sich eine größere Kontaktlänge l_K für das FFA-Werkzeug ein. Dies ist gleichbedeutend mit einer größeren Umschlingung des Werkzeugs um das Werkstück und, aufgrund der festen Werkzeugbreite, mit einer insgesamt größeren Kontaktfläche. Hierbei ist die Kontaktlänge für das FFA mit $l_K = 20 - 24 \text{ mm}$ mehr als doppelt so groß wie bei Nutzung der elastischen Andrückrolle ($l_K = 7 - 10 \text{ mm}$). Hieraus ergibt sich die geringere Flächenpressung bei Einsatz des FFA bei gleicher Andrückkraft, wie in Teil c) dargestellt.

Aus dem Einsatz des FFA-Werkzeugs ergibt sich, aufgrund der größeren Kontaktfläche, eine Vergrößerung des Schneidenraums, der mit dem Werkstück in Kontakt kommt, bzw. in das Werkstück schneidet, sodass eine größere Anzahl an Schneidkörnern an der Bearbeitung beteiligt ist. Bei der Schleifbearbeitung führt eine Steigerung der Schneidenraum-Eingriffe, durch beispielsweise die Erhöhung der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit, zu einer Reduzierung der Oberflächenrauheit [Kip23; SUJ+]. Auch für das Microfinishen ist zu erwarten, dass die Streuung der Oberflächenkennwerte durch eine Erhöhung der Werkstückumschlingung abnimmt, da die Schneidenraum-Eingriffe damit erhöht werden.

Für das FFA gibt es darüber hinaus weitere Gestaltungsmöglichkeiten, wie bspw. das Einbringen einer Aussparung zur Veränderung der Kontaktbedingungen. Eine solche Veränderung der Gestalt des Andrückelements führt theoretisch zur Reduzierung der vielen Mikrokontakte im Bereich der Aussparung. Dies bedeutet, dass dort weniger Schneidkörner mit dem Werkstück in Eingriff kommen und eine lokale Verringerung des Materialabtrags zu erwarten ist. Theoretisch lässt sich auf diese Weise

das Verhältnis des Materialabtrags bezogen auf verschiedene Bereiche des Werkzeugeingriffs gezielt variieren. Im Rahmen dieser Arbeit wurden hierzu zwei angepasste FFA (vgl. Abbildung 4-4) eingesetzt, deren Gestalt rautenförmige Aussparungen aufweisen, um den Materialabtrag am Rand bezogen auf den Mittenbereich zu erhöhen und so konvexe, axiale Konturen zu erzeugen.

Die entstehende Kontaktfläche für die angepassten FFA mit rautenförmiger Aussparung sowie die resultierende Flächenpressung sind in Abbildung 5-5 gegenübergestellt. Teil a) zeigt hierbei einige exemplarische Aufnahmen der Druckmessfolien, während Teil b) die ermittelten Flächenpressungen sowie die Regressionsgeraden zusammenfasst. Die mittels Laserstrahlschneiden in die Federstahl-Andrückelemente eingebrachten rautenförmigen Aussparungen werden durch die Maße Breite b_{RF} und Höhe h_{RF} beschrieben.

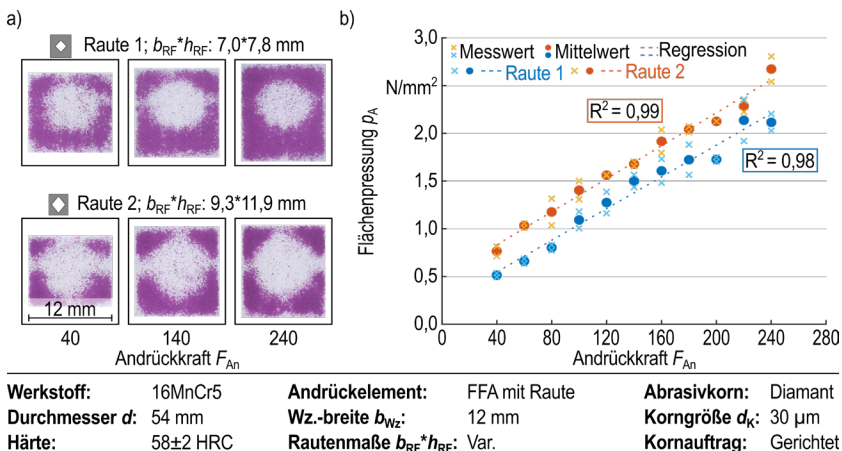


Abbildung 5-5: Ermittlung der Flächenpressung für FFA-Werkzeuge mit unterschiedlich großer rautenförmiger Aussparung – a) Darstellung der Kontaktfläche mittels Druckmessfolie; b) lineare Regressionsmodelle der Flächenpressung in Abhängigkeit von der Andrückkraft

Teil a) der Abbildung verdeutlicht, dass im Bereich der Aussparung nur vereinzelt Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück besteht bzw. der vorhandene Druck nicht ausreicht, um mittels Druckmessfolie einen Kontakt zu detektieren. Für die minimale Andrückkraft von 40 N stellt sich ein inhomogener Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück her, sodass insbesondere für Raute 2 im seitlichen Bereich und oberhalb der Raute kein Werkzeugkontakt vorliegt. Mit Steigerung der Andrückkraft werden die Kontakte homogener, wobei die Randbereiche der Aussparung insbesondere für Raute 1 ungleichmäßig bleiben. Verglichen mit dem flexiblen Federstahl-

Andrückelement ohne Aussparung lässt sich jedoch an den Außenseiten des Werkzeugs eine homogenere Kontaktfläche erkennen. Im Vergleich mit dem FFA ohne Aussparung ergibt sich eine deutlich kleinere Kontaktlänge für die angepassten FFA mit Aussparung. Möglicherweise ist dieser Sachverhalt auf die Herstellung der Aussparung mittels Laserstrahlschneiden zurückzuführen. Aufgrund der Wärmebringung in den Federstahl kann der Eigenspannungszustand verändert werden, was zu einer Beeinflussung des elastischen Verformungsverhaltens führen kann, sodass die Elastizität des Federstahls abnimmt.

Basierend auf der kleineren Kontaktfläche, die sich durch die Aussparung ergibt, sind die ermittelten Flächenpressungen höher als dies beim FFA ohne Aussparung der Fall ist. Im direkten Vergleich bewirkt die größere Aussparung auch eine größere Flächenpressung bei gleicher Andrückkraft.

Aus den Regressionsgeraden in Abbildung 5-4 und Abbildung 5-5 können Regressionsgleichungen aufgestellt werden, anhand derer die Flächenpressung bestimmt oder im Umkehrschluss die, für eine gewählte Flächenpressung benötigte Andrückkraft errechnet werden kann. Diese Regressionsgleichungen sind im Folgenden tabellarisch aufgeführt.

Tabelle 5-1: Regressionsgleichungen zur Berechnung der Flächenpressung p_A bzw. Andrückkraft F_{An} für den Werkstückdurchmesser $d = 54$ mm

Andrückelement	Funktionsgleichung	
	$p_A (F_{An}) =$	$F_{An} (p_A) =$
Rolle (60 Shore A)	$0,0068 * F_{An} + 0,3429$	$(p_A - 0,3429) / 0,0068$
FFA ohne Aussparung	$0,0033 * F_{An} + 0,4363$	$(p_A - 0,4363) / 0,0033$
FFA (Raute 1)	$0,0083 * F_{An} + 0,2142$	$(p_A - 0,2142) / 0,0083$
FFA (Raute 2)	$0,0086 * F_{An} + 0,4859$	$(p_A - 0,4859) / 0,0086$

5.3 Einfluss der Flächenpressung auf den Microfinishprozess

Wie bereits dargestellt, ist die Flächenpressung eine indirekte Einstellgröße für den Microfinishprozess, da sie von verschiedenen Faktoren, wie Andrückkraft, Typ und Gestaltung des Andrückelements, verwendetes Bandwerkzeug und Werkstückdurchmesser, abhängig ist. Für die Einstellgröße ergibt sich eine Einflussnahme auf den Microfinishprozess, die im Weiteren betrachtet wird. Um diesen Einfluss der Flächenpressung auf den Microfinishprozess zu analysieren, wurden Werkstücke

mittels Microfinishen vorbereitet, sodass die Kenngrößen reduzierte Riefentiefe und reduzierte Spitzenhöhe sowie Kernrautiefe möglichst niedrig sind. Die resultierende Oberflächentopographie beschreibt eine Oberfläche, die im Allgemeinen als glatt bzw. Spiegelglanz-Oberfläche ohne signifikante Plateaus, Spitzen oder Riefen beschrieben wird. Auf Basis von Microfinishversuchen mit einer kurzen Prozesszeit von $t = 3$ s wird der Einfluss der Flächenpressung auf das Bearbeitungsergebnis hinsichtlich der gemittelten Rautiefe und Materialtraganteilskenngößen beschrieben und die Prozesswechselwirkungen analysiert.

Abbildung 5-6 zeigt die entstandene gemittelte Rautiefe R_z in Abhängigkeit von der Flächenpressung beim Einsatz unterschiedlicher Finishbänder. Hierbei wurde für elektrostatisch aufgetragene Schneidkörner der Korngröße $d_K = 30 \mu\text{m}$ die Kornart variiert. Die betrachteten Kornarten sind Aluminiumoxid (Al_2O_3), Siliziumkarbid (SiC) und Diamant (D). Für jede Kornart wurden Versuche mit Variation der Flächenpressung durchgeführt.

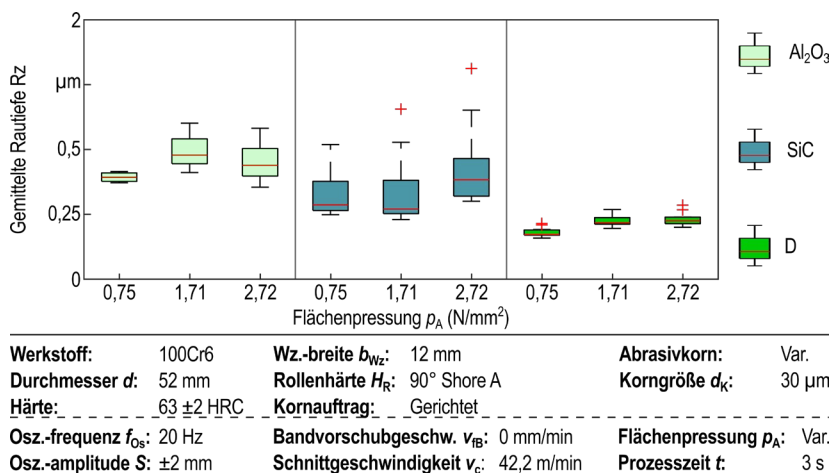


Abbildung 5-6: Einfluss der Flächenpressung auf die gemittelte Rautiefe R_z beim Einsatz unterschiedlicher Finishbänder

Bei Betrachtung der gemittelten Rautiefe ergeben sich für die Schneidkörner unterschiedliche Ergebnisse, die zum Teil auf die Eigenschaften der Kornwerkstoffe zurückgeführt werden können. Auffällig ist bei Diamant- und Al_2O_3 -Werkzeugen der geringere R_z -Wert bei der niedrigsten Flächenpressung im Vergleich zu den höheren Flächenpressungen. Für SiC lässt sich dies nur eingeschränkt anhand der Streuung sagen, die hier etwas geringer ist. Die Zunahme der Flächenpressung bewirkt, dass

mehr Schneiden des Finishbandes in Eingriff kommen und gleichzeitig, dass einzelne Schneiden tiefer in den Werkstoff dringen. Hieraus ergibt sich für die Oberfläche eine Zunahme an eingebrachten Riefen und somit eine Erhöhung der Rauheit. Bei Gegenüberstellung der Kornwerkstoffe zeigt sich insbesondere für Diamant ein differentes Ergebnis. Die erzielten Rz-Werte sind niedriger als die der Kornwerkstoffe Aluminiumoxid und Siliziumkarbid. Gleichzeitig sind die Streuungen für Diamant geringer. Aluminiumoxid hat verglichen mit SiC und Diamant eine geringere Härte und eignet sich nur eingeschränkt für die Microfinishbearbeitung gehärteter Stahlwerkstoffe mit Härten über 60 HRC. Siliziumkarbid zeichnet sich durch eine höhere Härte verglichen mit Aluminiumoxid aus, hat aber darüber hinaus die Eigenschaft, eine spitze Form zu haben, und verhält sich meist spröde. Hierdurch kommt es schneller zum Brechen der Kornschneiden, und es entstehen neue Schneiden. Wenn diese Kornsplitter nicht aus der Wirkzone entweichen können, können diese die Oberfläche furchen. Dies erklärt insbesondere die höhere Streuung und die Messausreißer bei der Bearbeitung mit SiC. Diamant als härteste Schneidkornart führt hingegen zu geringeren gemittelten Rautiefen, was im Zusammenhang mit der höheren Härte und Zähigkeit im Vergleich zu Al_2O_3 und SiC stehen kann. Allerdings wäre es auch möglich, dass die expliziten Kornformen sowie zwischen den Werkzeugen variierende Kornkonzentrationen den Einfluss des jeweiligen Korntyps überlagern. Allen drei Kornwerkstoffen gemein ist ein verhältnismäßig geringer Einfluss der Flächenpressung auf die gemittelte Rautiefe. Die geringste Flächenpressung erzeugt geringere gemittelte Rautiefen oder, bei SiC, zumindest eine geringere Streuung der Messwerte. Aufgrund der geringen Flächenpressung kommen tieferliegende Schneidkörner nicht in Eingriff, sodass weniger aktive Schneiden am Zerspanungsprozess beteiligt sind und weniger Riefen erzeugt werden. Gleichzeitig ist davon auszugehen, dass die Schneidkörner durch die geringere Flächenpressung weniger tief in das Werkstück eindringen, sodass die Tiefe der Riefen geringer ist, als dies für höhere Flächenpressungen der Fall ist. Die vergleichbaren Werte für die gemittelte Rautiefe Rz bei den beiden höheren Flächenpressungen lassen vermuten, dass bereits alle im Kontaktbereich befindlichen Schneidkörner in Eingriff kommen und entsprechend vergleichbar viele Riefen in der Oberfläche resultieren, die ähnliche Tiefen aufweisen. Der geringe Anstieg der Rz-Werte für die höchste Flächenpressung bei SiC und Diamant lässt sich durch eine Beeinflussung der Spanbildungsmechanismen begründen. Durch eine Zunahme der Flächenpressung, bei vergleichsweise ähnlicher Anzahl an aktiven Schneiden, steigt die Korneindringtiefe, wodurch größere Riefentiefen entstehen. Bezogen auf die Analyse der Oberfläche lässt sich dies anhand der Auswertung der Materialtraganteilskenngroße reduzierte Riefentiefe R_{vk} nachweisen. Hierzu sind in Abbildung 5-7 die Kenngrößen Kernrautiefe R_k , reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und reduzierte Riefentiefe R_{vk} für die Bearbeitung mit Diamant-Finishband dargestellt. Hierbei zeigt sich der Einfluss der

Flächenpressung insbesondere für die Kenngrößen der Kernrautiefe sowie der reduzierten Riefentiefe. Beide Kenngrößen nehmen mit steigender Flächenpressung zu. Für die reduzierte Riefentiefe ist dies durch die größere Eindringtiefe der Schneidkörner und die resultierenden tieferen Riefen zu erklären. Diese tieferen Riefen erzeugen auch einen Anstieg der Kernrautiefe in Relation zur niedrigsten Flächenpressung. Zusätzlich zur Riefentiefe ist aber auch die Anzahl der Riefen ausschlaggebend. Mit einer höheren Anzahl an Riefen in der Oberfläche nimmt die Steigung der Materialanteilskurve im mittleren Bereich zu, weshalb auch die Kernrautiefe R_k höhere Werte aufweist.

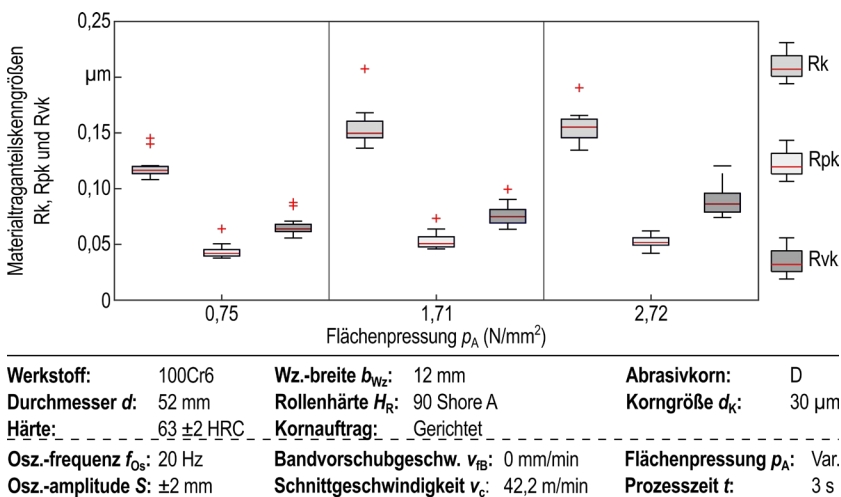


Abbildung 5-7: Einfluss der Flächenpressung auf die Materialtraganteilskenngößen Kernrautiefe R_k , reduzierte Spitzenhöhe R_{pk} und reduzierte Riefentiefe R_{vk} für die Korngröße $d_K = 30 \mu m$

Weiterführend wird für Diamant-Finishbänder der Einfluss der Flächenpressung auf den R_z -Wert bei Einsatz unterschiedlicher Korngrößen betrachtet. Hierbei sind die Körner mit einer Korngröße von $d_K = 9 \mu m$ schwerkraftgestreut aufgetragen, während die Körner mit 30 und 74 µm Korngröße elektrostatisch gerichtet aufgetragen sind. Die gemittelte Rautiefe bei Variation der Flächenpressung und Korngröße ist in Abbildung 5-8 dargestellt.

Aufgrund der vergleichsweise großen Korngröße erzeugt das Finishband mit $d_K = 74 \mu m$ deutlich höhere gemittelte Rautiefen, weshalb eine zweite Skala für die Ergebnisdarstellung im Diagramm genutzt wird. Hieraus lässt sich ableiten, dass die gemittelte Rautiefe R_z bis zu sechsfach höhere R_z -Werte annimmt als die der Bearbeitung mit einer Korngröße von $d_K = 30 \mu m$. Aufgrund der deutlich größeren

Schneidkörner entstehen deutlich tiefere Riefen, die sich in den Rz-Werten widerspiegeln. Für diese Korngröße lässt sich zudem auch bei der Steigerung von $p_A = 1,71$ auf $2,72$ N/mm² eine deutliche Zunahme der Rz-Werte erkennen. Hierbei wirkt sich die Steigerung der Einzelkornbelastung stärker auf die Eindringtiefe der Schneidkörner aus, als dies bei $d_K = 30$ µm der Fall ist. Aufgrund der deutlich größeren Korngröße ergibt sich ein größeres Potenzial zur Korneindringung, welches bei der mittleren Flächenpressung nur zu einem geringen Teil erreicht wird. Diese These ist gleichbedeutend mit einer entsprechenden Zunahme der reduzierten Riefentiefe R_{vk} , welche nachfolgend in Abbildung 5-9 betrachtet wird.

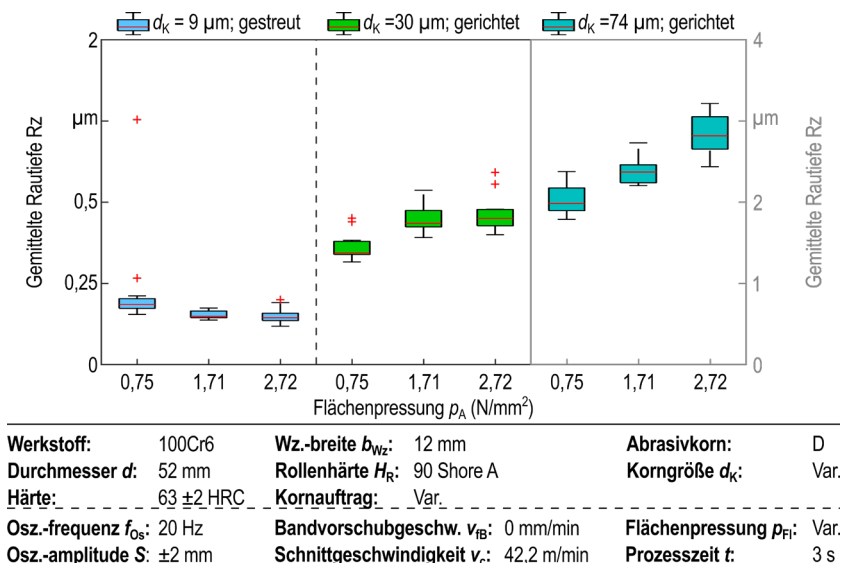
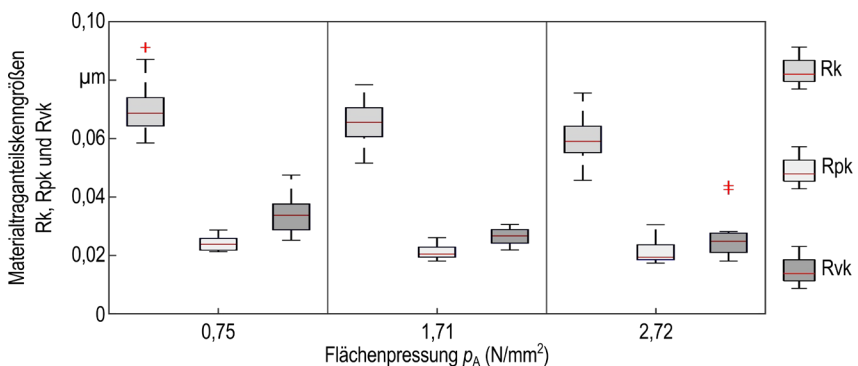


Abbildung 5-8: Einfluss der Flächenpressung auf die gemittelte Rautiefe Rz beim Einsatz unterschiedlicher Korngrößen

Während die Finishbänder mit elektrostatisch ausgerichtet aufgetragenen Diamantkörnern ($d_K = 30$ bzw. 74 µm) tendenziell höhere Rz-Werte aufgrund der Zunahme der Riefentiefe bei Steigerung der Flächenpressung erzeugen, zeigt sich für das schwerkraftgestreute Finishband eine gegenläufige Entwicklung. Aufgrund der kleinen Korngröße und des schwerkraftgestreuten Kornauftrags, besitzt das Finishband einen deutlich geringeren Kornüberstand. Damit verbunden dringen die Schneiden weniger tief in das Werkstück ein, und die resultierenden Riefen sind kleiner. Die maximale Eindringtiefe der Schneidkörner kann hier schon mit geringer Flächenpressung erreicht werden, sodass eine Erhöhung der Flächenpressung keine signifikante Steigerung der

Korneindringtiefe erzeugt. Die Zunahme der Flächenpressung bedeutet allerdings eine Erhöhung der Einzelkornbelastung. Infolge dessen kann die Schnitteinsatztiefe steigen, und es können zusätzlich tieferliegende Schneiden in Eingriff kommen. Mit höherer Schnitteinsatztiefe und der Zunahme an aktiven Schneiden geht tendenziell auch ein höherer Materialabtrag einher, sodass die vorherige Kern-Topographie abgetragen wird. Geschieht dies gleichzeitig durch den Eingriff vieler Schneiden und ohne die Entstehung von Materialaufwürfen, wird die Tiefe initial erzeugter oder zuvor vorhandener Riefen gleichzeitig gesenkt. Für die Erklärung dieser Effekte können erneut die Materialtraganteilskenngößen herangezogen werden. Diese sind für das Finishband der Korngröße $d_K = 9 \mu\text{m}$ in Abbildung 5-9 dargestellt.



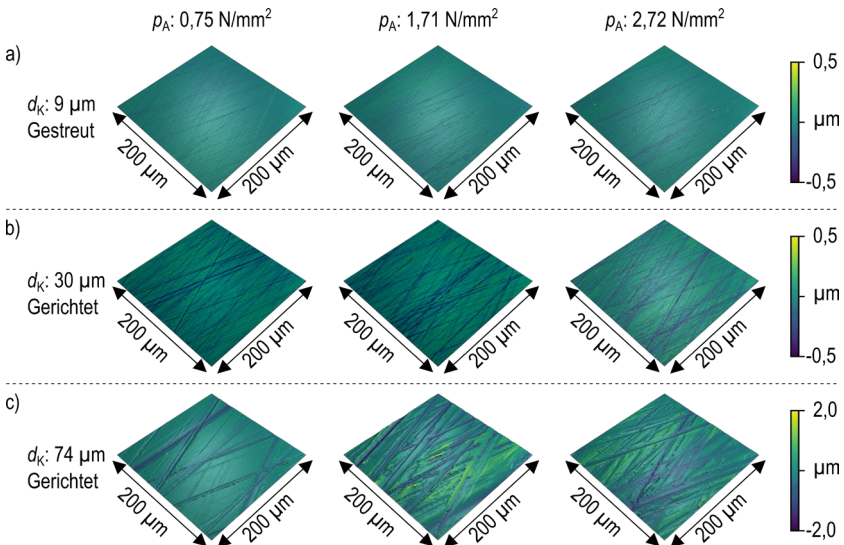
Werkstoff:	100Cr6	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	52 mm	Rollenhärte H_R:	90 Shore A	Korngröße d_K:	9 μm
Härte:	63 ± 2 HRC	Kornauftrag:	Gestreut		
Os.-frequenz f_{Os}:	20 Hz	Bandvorschubgeschw. v_{fB}:	0 mm/min	Flächenpressung p_A:	Var.
Os.-amplitude S:	± 2 mm	Schnittgeschwindigkeit v_c:	42,2 m/min	Prozesszeit t:	3 s

Abbildung 5-9: Einfluss der Flächenpressung auf die Materialtraganteilskenngößen Kernrautiefe Rk, reduzierte Spitzenhöhe Rpk und reduzierte Riefentiefe Rvk für die Korngröße $d_K = 9 \mu\text{m}$

Wie in der Erläuterung zur Abnahme des Rz-Wertes bei Zunahme der Flächenpressung beschrieben, zeigen auch die Materialtraganteilskenngößen eine Abhängigkeit von der Flächenpressung. Neben den Riefentiefen (gemessen am Rvk-Wert) nimmt auch die Kernrautiefe Rk mit steigender Flächenpressung ab. Beides führt in Kombination zur Abnahme der Rz-Werte. Die reduzierte Riefentiefe bleibt vergleichsweise konstant und somit unbeeinflusst von der Flächenpressung.

Neben der quantitativen Beschreibung der Oberflächentopographie anhand der gemittelten Rautiefe Rz und den Materialtraganteilskenngößen lassen auch qualitative

Betrachtungen der Topographien Rückschlüsse auf den Einfluss von Flächenpressung und Korngröße zu. Hierzu sind in Abbildung 5-10 Ausschnitte der erzeugten Oberflächentopographien für die Bearbeitung mit den unterschiedlichen Korngrößen und Flächenpressungen dargestellt. Während die Bearbeitung mit einer Korngröße von $d_K = 9\ \mu\text{m}$ nur wenig Veränderung aufweist, lässt sich für die größeren Korngrößen mit elektrostatisch ausgerichtetem Kornauftrag der beschriebene Einfluss der Flächenpressung erkennen. Mit Zunahme der Flächenpressung nehmen sowohl die Anzahl der Riefen als auch deren Tiefe zu. Mit größerer Korngröße wird dieser Effekt zusätzlich verstärkt.



Werkstoff:	100Cr6	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	52 mm	Rollenhärte H_R:	90 Shore A	Korngröße d_K:	Var.
Härte:	63 ± 2 HRC	Kornauftrag:	Var.		
Osz.-frequenz f_{os}:	20 Hz	Bandvorschubgeschw. v_{fb}:	0 mm/min	Flächenpressung p_A:	Var.
Osz.-amplitude S:	± 2 mm	Schnittgeschwindigkeit v_c:	42,2 m/min	Prozesszeit t:	3 s

Abbildung 5-10: Darstellung der erzeugten Oberflächentopographien in Abhängigkeit von der Flächenpressung bei Verwendung der Korngröße a) $9\ \mu\text{m}$, b) $30\ \mu\text{m}$ und c) $74\ \mu\text{m}$

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der Flächenpressung für den Microfinishprozess einen direkten Einfluss auf den Materialabtrag und das Bearbeitungsergebnis hat. Mit Zunahme der Flächenpressung wird zuerst die Größe des Schneidenraums erhöht, ehe durch die Aktivierung tiefer liegender Schneidkörner die

Anzahl aktiver Schneiden zusätzlich steigt. Ebenso steigt die Korneindringtiefe, woraus tiefere Riefen entstehen.

Durch die geringen Korneindringtiefen und niedrigen Materialabtragsraten wird die Oberflächentopographie beim Microfinishen stark von der initialen Bauteiltopographie und der gewählten Prozesszeit beeinflusst [Goe16; TBA+19]. Hieraus lässt sich ableiten, dass der Einfluss der Flächenpressung mit zunehmender Prozesszeit tendenziell abnimmt, da die erzeugte Oberflächengüte letztlich durch die Wirktopographie des Finishbandes bestimmt wird. Diese wird durch Korngröße und Kornauftrag definiert. Für eine zielgerichtete und effiziente Bearbeitung ist der Einfluss der Flächenpressung auf die Wechselwirkung nicht zu vernachlässigen. Eine Steigerung der Flächenpressung kann hierbei das Werkzeugeinsatzverhalten durch Steigerung der Korneindringtiefe und Erhöhung der Anzahl an aktiven Schneiden verbessern, womit wiederum eine effizientere Zerspanung einhergeht.

6 Prozesswechselwirkungen für das flexible Federstahl-Andrückelement

Neben der Reduzierung der Flächenpressung bei gleicher Andrückkraft bedeutet der Einsatz des flexiblen Federstahl-Andrückelements, wie in Abbildung 5-4 dargestellt, eine Vergrößerung der Werkzeug-Werkstück-Umschlingung bzw. der Kontaktlänge. Dies bedeutet, dass eine größere Anzahl an Schneiden in Eingriff kommt und eine größere Kontaktfläche während der Bearbeitung vorliegt. Der Einfluss dieser Effekte auf den Microfinishprozess sowie auf das Bearbeitungsergebnis wird im folgenden Kapitel genauer betrachtet.

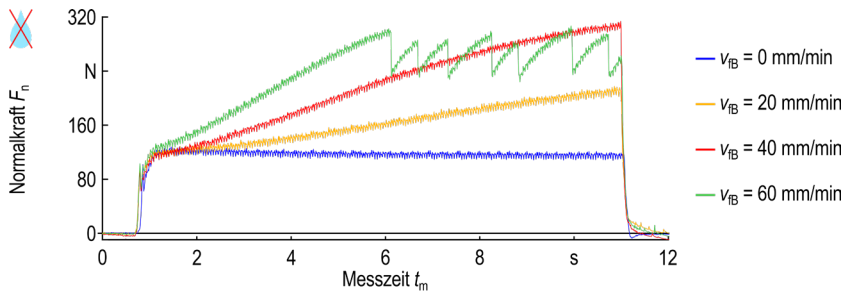
6.1 Einsatzverhalten beim Microfinischen mit flexiblem Federstahl-Andrückelement

Im folgenden Kapitel wird das Einsatzverhalten des flexiblen Federstahl-Andrückelements beim Microfinischen mit Band analysiert. Hierbei werden die Wechselwirkungen der großen Werkzeug-Werkstück-Umschlingung mit den Prozessparametern und die daraus resultierende Beeinflussung des Bearbeitungsergebnisses betrachtet.

6.1.1 Einfluss des Bandvorschubs

Ein Vorteil der Microfinishbearbeitung mit Band im Vergleich zum Einsatz von Finishsteinen ist die Möglichkeit, mittels konstantem Bandvorschub stetig neues Band in die Wirkzone zu führen und auf diese Weise möglichen Werkzeugverschleiß zu kompensieren. Dies führt zu reproduzierbaren Prozessergebnissen, da Schwankungen durch Werkzeugverschleiß in der Regel ausgeschlossen werden können. In industriellen Anwendungen gibt es auch Prozesse, bei denen das Band zwischen der Bearbeitung zweier Bauteile weiter getaktet und damit ein neuer Bandabschnitt bereitgestellt wird. Hierbei liegt während des Prozesses kein Bandvorschub vor.

Der Einfluss der Bandvorschubgeschwindigkeit v_{FB} bei Nutzung des flexiblen Federstahl-Andrückelements auf das Prozessverhalten ist in Abbildung 6-1 anhand der Kraftverläufe für die Normalkraft F_n dargestellt. Üblicherweise entspricht die Prozessnormalkraft der pneumatisch induzierten Andrückkraft F_{An} und wird durch Prozessbedingungen, wie der Werkzeugoszillation oder dem Rundlauffehler des Werkstücks, nur vernachlässigbar beeinflusst, wie bereits anhand von Abbildung 5-1 beschrieben. Im Gegensatz hierzu zeigt die Anwendung eines konstanten Bandvorschubs bei Einsatz des FFA einen signifikanten Einfluss auf die Normalkraft. Für die Bearbeitung ohne Bandvorschubgeschwindigkeit $v_{\text{FB}} = 0 \text{ mm/min}$ stellt sich ein nahezu konstanter Kraftverlauf für den Prozess ein, bei dem die mittlere Normalkraft von 120 N der induzierten Andrückkraft entspricht.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μ m
Härte:	58 $\pm$ 2 HRC	KSS-Strategie:	Trocken	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	$\pm$ 2 mm	Drehzahl n:	200 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	Var.
Osz.-frequenz f_{Os}:	20 Hz	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	37 m/min
Einstelldruck p_{in}:	3 bar	Res. Andrückkraft F_{An}:	120 N	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

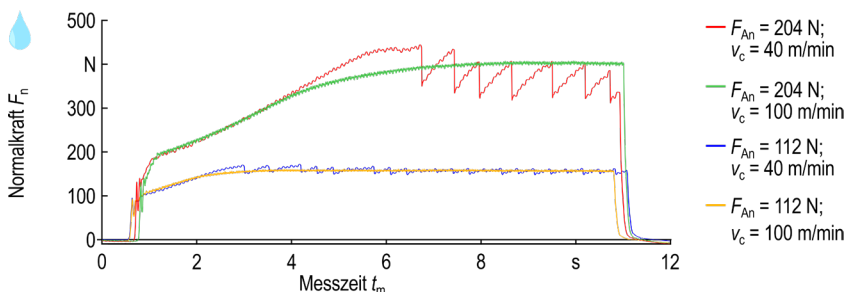
Abbildung 6-1: Verlauf der Normalkraft in Abhängigkeit von dem Bandvorschub v_{FB} beim Microfinishen mit FFA

Die Verwendung einer konstanten Bandvorschubgeschwindigkeit führt im Gegensatz dazu zu einem stetigen Anstieg der Prozessnormalkraft über die Prozessdauer. Mit zunehmender Geschwindigkeit ist auch dieser Anstieg stärker. Ab einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_{FB} = 60$ mm/min verändert sich der Einfluss, und ein Kraftanstieg ist nur bis zur Hälfte der Prozessdauer ersichtlich, anschließend verzeichnet die Kraftmessung wiederkehrend einen abrupten Abfall der Normalkraft um ca. 80 N und einen erneuten Anstieg.

Aus den Messungen wird ersichtlich, dass ein konstanter Bandvorschub aufgrund der großen Umschlingung und der entstehenden Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück nicht gewährleistet werden kann. Insbesondere ab einer Vorschubgeschwindigkeit von $v_{FB} = 60$ mm/min kommt es zu einem sequentiellen Durchrutschen des Bandes, das sich als Stick-Slip-Effekt bezeichnen lässt. Aufgrund des Einflusses auf die Normalkraft im Prozess ist auch die Flächenpressung nicht konstant, wodurch die Prozessstabilität eingeschränkt wird. Neben ungleichmäßiger Bearbeitung birgt der auftretende Effekt vor allem das Risiko, das Federstahlband zu ermüden, sodass Risse initiiert werden und es zu einem frühzeitigen Versagen kommt. Für die Anwendung des FFA eignet sich daher ein Weitertakten des Bandes zwischen zwei Prozessen.

Da ein stetiger Bandvorschub während des Prozesses aufgrund des beschriebenen Stick-Slip-Effektes bei der Trockenbearbeitung nicht realisierbar war, wurden zusätzlich Versuche unter Einsatz von Kühlschmierstoff durchgeführt. Hierbei sollte

geprüft werden, ob eine Reduzierung der Reibung durch ein geeignetes Kühlschmiermittel einen besseren Transport des Bandes durch die Kontaktzone ermöglicht. Das Kühlschmiermittel wurde hierzu initial auf das Finishband aufgetragen. Aufgrund des über die Prozesszeit geringeren Einsatzes an Kühlschmiermittel im Vergleich zur Überflutungsschmierung wird diese Variante mit einer Minimalmengenschmierung verglichen und im Folgenden als MMS bezeichnet. Wie Abbildung 6-2 verdeutlicht, können auch unter Verwendung eines Kühlschmierstoffs, in Form eines Honöls, die entsprechenden Effekte beobachtet werden. Hierbei ist der auftretende Stick-Slip-Effekt geringer, bzw. tritt erst bei vergleichsweise höher eingestellten Andrückkräften auf. Es lässt sich jedoch auch hier ein grundsätzlicher Anstieg der Prozessnormalkraft verzeichnen. Abbildung 6-2 stellt den Zusammenhang bei einer Bandvorschubgeschwindigkeit von $v_{FB} = 50 \text{ mm/min}$ für unterschiedlich eingestellte Andrückkräfte F_{An} und variierende Schnittgeschwindigkeiten v_c dar. Das eingesetzte Honöl wurde hierbei vor dem Prozess auf das Finishband aufgetragen, und es erfolgte keine weitere Zuführung.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μm
Härte:	58 ± 2 HRC	KSS-Strategie:	MMS	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	$\pm 2 \text{ mm}$	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	50 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{In}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 6-2: Verlauf der Normalkraft bei stetigem Bandvorschub und initialer Honölvorsorgung in Abhängigkeit von der eingestellten Andrückkraft F_{An} und der Schnittgeschwindigkeit v_c

Für die dargestellten Prozesskraftverläufe liegen in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit unterschiedliche Oszillationsfrequenzen vor, sodass das Verhältnis aus tangentialer und axialer Schnittgeschwindigkeit konstant ist und äquivalente Honwinkel bei der Bearbeitung entstehen. Zusätzlich wurde die eingestellte

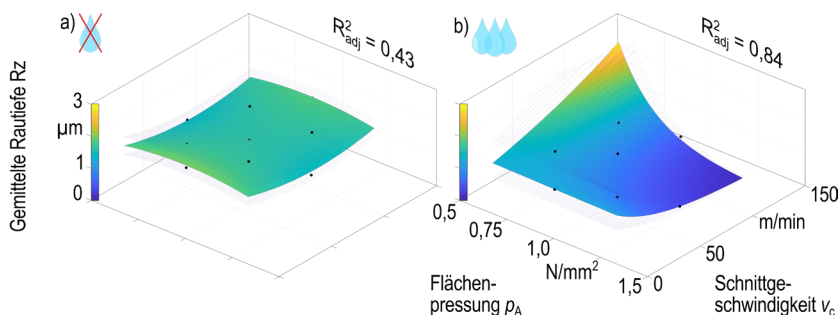
Andrückkraft F_{An} variiert, womit auch die resultierende Flächenpressung prinzipiell variiert.

Der Einsatz von Honöl führt zu einer deutlichen Reduktion des Stick-Slip-Effektes, allerdings beeinflusst der Bandvorschub weiterhin die Prozessnormalkraft F_n . Im Vergleich zur Trockenbearbeitung ist der Effekt bei der äquivalenten Parameterkombination aus Andrückkraft $F_{An} = 112 \text{ N}$ und Schnittgeschwindigkeit $v_c = 40 \text{ m/min}$ weniger stark ausgeprägt, und auch die Differenz von gemessener Prozessnormalkraft zu eingestellter Andrückkraft fällt deutlich geringer aus. Die Schmierwirkung des Honöls führt hier zu geringerer Reibung und so zu einem besseren Bandtransport durch die Wirkstelle. Mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit nimmt der Stick-Slip-Effekt weiter ab. Noch deutlicher wird dies bei Betrachtung der höheren Andrückkraft von $F_{An} = 204 \text{ N}$, bei welcher der Stick-Slip-Effekt für eine Schnittgeschwindigkeit von $v_c = 40 \text{ m/min}$ sehr deutlich zu erkennen ist. Für die höhere Schnittgeschwindigkeit ist dieser nicht mehr nachzuweisen, sodass eine Verbesserung des Banddurchlaufs vorliegt. Dennoch führt die Bandvorschubgeschwindigkeit auch bei Einsatz von Honöl und hohen Schnittgeschwindigkeiten zu einer Steigerung der Prozessnormalkraft und damit einer Veränderung der für den Prozess relevanten Flächenpressung. Um konstante Bedingungen im Prozess zu gewährleisten, sollte daher kein Bandvorschub während des Prozesses stattfinden.

6.1.2 Einfluss unterschiedlicher Kühlschmierstoff-Strategien

Der Einsatz von Kühlschmierstoff führt, wie bereits dargestellt, zu Veränderungen der Prozesswechselwirkungen. Dies lässt die Vermutung zu, dass auch das Prozessergebnis maßgeblich vom Einsatz eines Kühlschmierstoffs beeinflusst wird. Abbildung 6-3 zeigt hierzu Regressionsmodelle der erzeugten gemittelten Rautiefe R_z für die Bearbeitung ohne Kühlschmierstoff a) sowie mit Überflutungsschmierung b).

Für die Trockenbearbeitung zeigt sich ein geringer Einfluss der Prozessparameter, und es ergeben sich vergleichbare R_z -Werte für alle Versuche. Tendenziell lässt sich festhalten, dass im Bereich der niedrigen und hohen Schnittgeschwindigkeiten höhere Rauheiten resultieren und die Flächenpressung keinen signifikanten Einfluss aufweist. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei Einsatz von Kühlschmierstoff die Einflüsse der Flächenpressung und Schnittgeschwindigkeit. Eine Erhöhung der Flächenpressung führt hierbei zu niedrigeren R_z -Werten, die sich bei höheren Schnittgeschwindigkeiten tendenziell weiter reduzieren lassen, sofern die Flächenpressung nicht zu gering ist.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 µm
Härte:	58 ±2 HRC	KSS-Strategie:	Var.	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_B:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

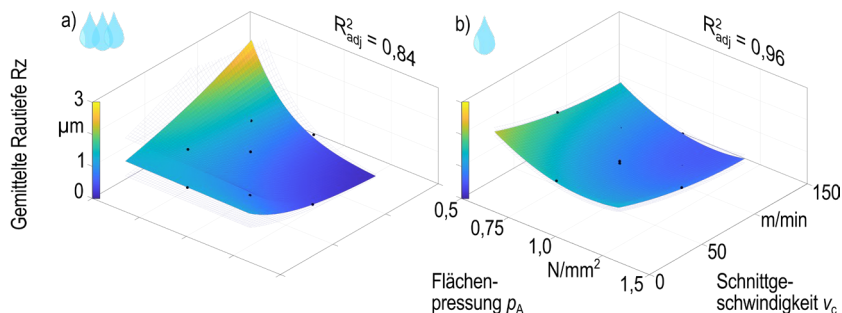
Abbildung 6-3: Prozesswechselwirkungen bei Variation der Flächenpressung und Schnittgeschwindigkeit für a) Trockenbearbeitung und b) Überflutungsschmierung

In Bezug auf die Kühlschmierstoffstrategie lässt sich vermuten, dass sich das Finishband bei der Trockenbearbeitung bereits früh im Prozess zusetzt. Aufgrund der verhältnismäßig kleinen Korngröße von $d_K = 30 \mu\text{m}$ ergeben sich geringe Kornüberstände und somit wenig Spanraum. In Kombination mit den typischerweise zu Prozessbeginn höheren Materialabtragsraten, durch den Abtrag der Rauheitsspitzen des Werkstücks, ist ein Zusetzen des Bandes begünstigt [Goe16]. Dieses Zusetzen des Bandes beschreibt die Adhäsion von Werkstück-Werkstoff mit dem Finishband und resultiert in der Reduktion der Kornüberstände bis hin zum Übertreten der Schneidkörner. Hieraus folgt, dass kein weiterer Materialabtrag durch das Finishband stattfindet und die Rauheit nicht weiter reduziert wird.

Im Gegensatz zur Trockenbearbeitung ermöglicht die Überflutungsschmierung den Abtransport des zerspanen und abgetragenen Materials. Somit ist davon auszugehen, dass es nicht zum Zusetzen kommt und das Finishband über die gesamte Prozesszeit über ausreichende Kornüberstände verfügt. Gleichzeitig ergibt sich für sehr niedrige Flächenpressungen und hohe Schnittgeschwindigkeiten, dass keine ausreichende Korneindringtiefe gewährleistet wird und der Materialabtrag vergleichsweise gering ausfällt, sodass verhältnismäßig hohe Rz-Werte erzeugt werden. Für die Überflutungsschmierung ist somit eine höhere Flächenpressung sinnvoll, um trotz des Zwischenmediums die für die Mikrozerspanung benötigte Reibung zwischen Korn und Werkstück-Werkstoff durch höhere Korneindringtiefen zu gewährleisten.

In Gegenüberstellung zur Überflutungsschmierung ist in Abbildung 6-4 das Regressionsmodell für die gemittelte Rautiefe R_z bei Einsatz von Minimalmengenschmierung b) dargestellt. Vergleichbar zur Überflutungsschmierung zeigt sich die Relevanz von Flächenpressung und Schnittgeschwindigkeit hinsichtlich der resultierenden Rauheit.

Die Flächenpressung beeinflusst durch das elastische Werkzeugverhalten hierbei sowohl die Korneindringung als auch die Anzahl der aktiven Schneiden. Für Letztere lässt sich bei Erhöhung auf eine Zunahme der Oberflächengüte schließen, sofern ausreichend Spanraum vorhanden ist. Bei einer höheren Anzahl an aktiven Schneidkörnern, die hinsichtlich der Form und Orientierung ihrer Schneiden variieren, nimmt die Homogenität der Oberfläche grundsätzlich zu. Gleichzeitig ermöglicht die höhere Flächenpressung eine Steigerung der Korneindringtiefe, wodurch das Mikrospanen als Materialabtragsmechanismus begünstigt wird. Die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit erhöht die kinetische Energie, die für den Zerspanprozess an der Schneide genutzt werden kann, sodass wiederum das Mikrospanen begünstigt wird. Gleichzeitig ergibt sich für eine identische Prozesszeit eine höhere Varianz der lokalen Überdeckung des Schneidenraums mit dem Werkstück. Auch dies bewirkt eine Reduktion der Rauheit.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivekorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 µm
Härte:	58 ±2 HRC	KSS-Strategie:	Var.	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

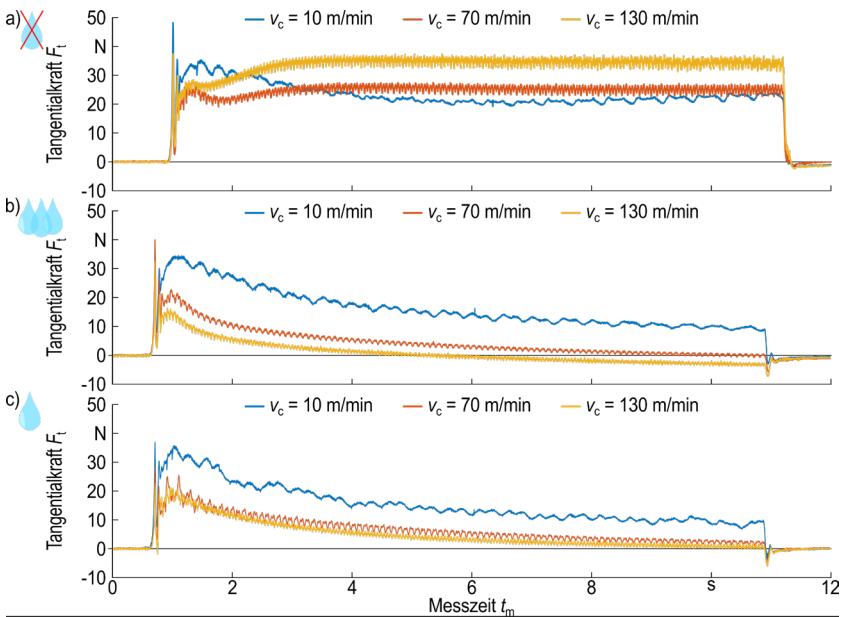
Abbildung 6-4: Prozesswechselwirkungen bei Variation der Flächenpressung und Schnittgeschwindigkeit für a) Überflutungsschmierung und b) Minimalmengenschmierung

In der direkten Gegenüberstellung zeigt sich, dass die Tendenzen für den Einsatz von Überflutungsschmierung und Minimalmengenschmierung ähnlich sind. Im Gegensatz dazu steht die Trockenbearbeitung, die grundsätzlich höhere Rz-Werte erzeugt und nur wenig von den Prozessparametern beeinflusst wird.

Während die Normalkräfte beim Microfinishen mit Band, unter Ausnahme des Bandvorschubs, aufgrund der kraftinduzierten Prozessführung unabhängig von der Kühlschmierstoffstrategie sind, ergeben sich für die Tangentialkräfte Unterschiede. In Abbildung 6-5 sind die resultierenden Tangentialkräfte für die Bearbeitung ohne KSS a), mit Überflutung b) und mit MMS c) für jeweils drei unterschiedliche Schnittgeschwindigkeiten dargestellt. Für alle Kraftverläufe lässt sich der Microfinishprozess innerhalb der Messzeit eingrenzen auf den Bereich zwischen dem impulsiven Anstieg der Kraft vom Ausgangsniveau auf Werte von $F_t > 10 \text{ N}$ bis hin zum Abschalten der Kraftinduktion, die ebenso durch spontane Änderung des Kraftverlaufs in Form eines senkrechten Verlaufs gekennzeichnet ist. Zu Beginn des Prozesses zeigen alle Messungen nach dem impulsiven Anstieg der Kraft durch die Anfahrbewegung ein Einschwingen und eine kurze Phase der stetigen Kraftzunahme von ca. 0,5 s Dauer. Hiernach unterscheidet sich insbesondere die Trockenbearbeitung vom Einsatz mit Kühlschmierstoff. Bei geringer Schnittgeschwindigkeit verhält sich die Tangentialkraft F_t im folgenden Prozessverlauf regressiv und sinkt ausgehend von ca. $F_t = 35 \text{ N}$ auf ca. 20 N. Bei Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit zeigt sich eine kurze regressive Phase gefolgt von einem degressiven Anstieg und einer konstanten Tangentialkraft über die restliche Prozessdauer von ca. 8 s. Im Vergleich zur Schnittgeschwindigkeit $v_c = 10 \text{ m/min}$ ist die Tangentialkraft im Mittel um ca. 5 N erhöht. Die größere Oszillation der Kraft um den Mittelwert ergibt sich aus der höheren Oszillationsfrequenz des Werkzeugs, die sich auch in der Tangentialkraft abbildet, sowie der höheren Drehzahl des Werkstücks. Bei weiterer Steigerung der Schnittgeschwindigkeit wird die regressive Phase weiter verkürzt, und die degressive Steigung hat einen stärkeren Anstieg. Wie bei $v_c = 100 \text{ m/min}$ beginnt auch 130 m/min nach ca. 2 Sekunden eine stationäre Phase, in der die Tangentialkraft bis zum Prozessende um einen konstanten Kraftwert von $F_t = 35 \text{ N}$ oszilliert. Für die Trockenbearbeitung ist keine eindeutige Tendenz für die Veränderung der Tangentialkraft in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit zu erkennen.

Im Gegensatz zur Trockenbearbeitung zeigt der Einsatz von Kühlschmierstoff unabhängig von der Strategie einen anderen Verlauf und eine Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit, wobei die Unterschiede bei den höheren Geschwindigkeiten gering ausfallen. Allen Messschrieben ist gleich, dass mit der initialen Kontaktaufnahme zwischen Werkzeug und Werkstück eine Wechselbeanspruchung in Form von kurz aufeinanderfolgenden Kraftpeaks und -tälern einhergeht, in deren

Anschluss, ebenso wie bei der Trockenbearbeitung, eine Phase des degressiven Kraftanstiegs folgt. Anschließend an diese Phase beginnt nach ca. 0,5 s Prozessdauer ein regressiver Verlauf, der bis zum Prozessende anhält. Sowohl die initiale Kraft, das höchste Kraftniveau nach dem degressiven Anstieg als auch die Ausprägung der Regression unterscheiden sich hierbei in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit. Die niedrigste Schnittgeschwindigkeit erzeugt hierbei die höchste Tangentialkraft, was bereits im initialen Kontakt als auch nach der degressiven Phase deutlich wird. Die resultierende Tangentialkraft nach dem initialen Anstieg bis ca. 0,5 s Prozessdauer beträgt ca. $F_t = 35$ N. Im Gegensatz dazu liegen die Werte für $v_c \geq 100$ m/min bei $F_t \leq 20$ N. In der Folge des Kraftanstiegs folgt im weiteren Verlauf des Prozesses die regressive Phase, in der die Tangentialkraft regressiv abnimmt.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μ m
Härte:	58 $\pm$ 2 HRC	KSS-Strategie:	Var.	Kornauftrag:	Gerichtet
Os.-Amplitude S:	$\pm$ 2 mm	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{fB}:	0 mm/min
Os.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{in}:	4,1 bar	Res. Andrückkraft F_{An}:	164 N	Res. Flächenpressung p_A:	0,95 N/mm ²

Abbildung 6-5: Darstellung der Tangentialkraft F_t bei variierenden Schnittgeschwindigkeiten für a) Trockenbearbeitung, b) Überflutungsschmierung und c) Minimalmengenschmierung

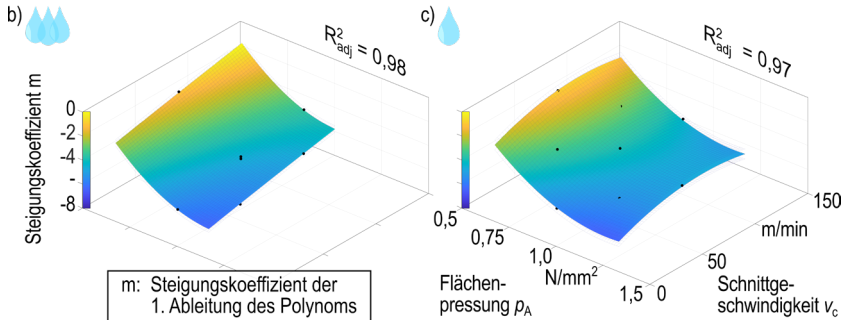
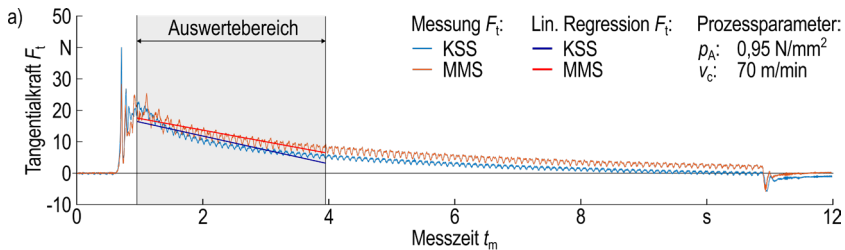
Die Tangentialkraft erfasst die tangential zur Werkstückrotation wirkende Kraft im Kontaktbereich zwischen Werkzeug und Werkstück. Zur Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit v_c wird neben der Oszillationsfrequenz vor allem die Werkstückumfangsgeschwindigkeit durch Steigerung der Drehzahl erhöht. Da der Anteil der tangentialen Geschwindigkeitskomponente v_{ct} hierbei deutlich größer ist als die axiale Komponente v_{ca} , die durch die Oszillation erzeugt wird, lässt sich anhand der Tangentialkraft auf eine Beeinflussung des Materialabtragsverhaltens schließen. Eine Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit begünstigt das Mikrospanen im Gegenzug zum Mikropflügen oder -furchen. Die kraftinduzierte Prozessführung bewirkt darüber hinaus konstante Normalkräfte, sodass unter Berücksichtigung der verhältnismäßig großen Werkzeug-Werkstück-Umschlingung davon ausgegangen wird, dass auch die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück die Tangentialkraft beeinflusst. Auch Mikrofurchen und Mikropflügen gehen mit höherer Reibung einher, sodass dies die höheren Tangentialkräfte begründet. Die deutlich verringerte Schnittgeschwindigkeit $v_c = 10$ m/min erzeugt somit geringere Materialabtragsraten aufgrund der höheren Anteile an Mikrofurchen und Mikropflügen im Vergleich zu den Schnittgeschwindigkeiten $v_c = 70$ und 130 m/min.

Der im Prozess zu betrachtende Abfall der Tangentialkraft trotz konstanter Schnittgeschwindigkeit bei Verwendung von Öl wird auf die Veränderung der Oberflächentopographie während des Prozesses zurückgeführt. Die Oberflächenrauheit wird bei der dargestellten Bearbeitung bezogen auf den Ausgangszustand verringert, womit sich die Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück verändert, was wiederum die Tangentialkraft beeinflusst. Hieraus lässt sich schließen, dass der Abfall der Tangentialkraft in der regressiven Phase mit der Abnahme der Reibung und damit einer Reduktion der Oberflächenrauheit korreliert.

Für den Einsatz von Überflutungsschmierung und MMS wird im Folgenden die initiale Sequenz der regressiven Prozessphase detailliert betrachtet. Hierbei soll ermittelt werden, ob die Abnahme der Tangentialkraft, genauer die Geschwindigkeit, mit der die Tangentialkraft abnimmt, in direktem Zusammenhang zu den Prozessparametern Schnittgeschwindigkeit und Flächenpressung steht. Hierzu wurde für alle Tangentialkräfte der regressive Bereich nach dem vorherigen Anstieg betrachtet. Abbildung 6-6 stellt den Auswertebereich a) inklusive der linearen Regression für den Einsatz von Überflutungsschmierung (KSS) und MMS für einen ausgewählten Versuch dar. Der Auswertebereich umfasst hierbei 3 Sekunden des Prozesses und startet etwa 0,15 Sekunden nach dem ersten Peak des Ausfahrhubs. Die lineare Regression des Bereichs beschreibt näherungsweise die Abnahme der Tangentialkraft. Ausgehend von dem Zusammenhang, dass die Tangentialkraft mit Abnahme der Rauheit sinkt, wurden die Steigungskoeffizienten m aller

Regressionsgeraden herangezogen und Regressionsmodelle zum CCD-Versuchsplan erstellt. Diese sind in der Abbildung 6-6 für KSS b) und MMS c) dargestellt.

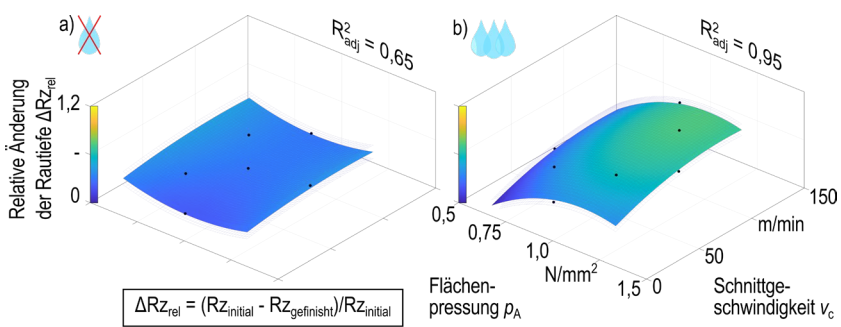
Die negativen Werte der Steigungen in den Regressionsmodellen sind gleichbedeutend mit der Abnahme der Tangentialkraft. Für niedrigere Werte lässt sich somit eine stärkere Abnahme der Tangentialkraft innerhalb der betrachteten Prozesssequenz (3 s) ableiten. Bei Betrachtung der Modelle wird deutlich, dass die Prozessparameter einen Einfluss auf die Abnahme der Tangentialkraft haben. Insbesondere die Flächenpressung führt zu einer stärkeren Veränderung der Tangentialkraft, wohingegen höhere Schnittgeschwindigkeiten tendenziell eine geringe Zunahme der Steigungskoeffizienten bewirken.



Werkstoff:	16MnCr5	Andruckelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μ m
Härte:	58 $\pm$ 2 HRC	KSS-Strategie:	Var.	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	$\pm$ 2 mm	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andruckkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 6-6: a) Darstellung des Auswertebereichs und der Regressionskurve (Polynom 2. Ordnung) sowie Regressionsmodelle für die Steigungskoeffizienten linearer Regression der Kraftverläufe für b) Überflutungsschmierung (KSS) und c) Minimalmengenschmierung (MMS)

Höhere Schnittgeschwindigkeiten beim Microfinishen mit FFA weisen tendenziell eine niedrigere Ausgangstangentiale Kraft auf, sodass die betragsmäßige Abnahme dieser grundsätzlich kleiner ausfällt. Grundsätzlich lässt sich die Abnahme der Tangentiale Kraft durch die Reduktion der Rauheit und die daraus resultierende Abnahme der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück erklären. Die Microfinishbearbeitung reduziert die Rauheit der Ausgangsoberfläche und erzeugt reibungsoptimierte Oberflächen. Ersterer Zusammenhang ist in Abbildung 6-7 anhand der relativen Veränderung der gemittelten Rautiefe $\Delta R_{z,rel}$ aufgeführt. Die hier für a) Trockenbearbeitung und b) KSS-Überflutung dargestellten Regressionsmodelle zeigen die relative Veränderung der gemittelten Rautiefe R_z zwischen Ausgangszustand und Prozessergebnis. Für die Berechnung von $\Delta R_{z,rel}$ wird der Mittelwert der gemessenen R_z -Werte eines Versuchspunktes genutzt. Der Quotient aus ΔR_z und dem initialen R_z -Wert gibt somit Aufschluss über die relative Veränderung der R_z -Werte in Abhängigkeit von den Prozessparametern.



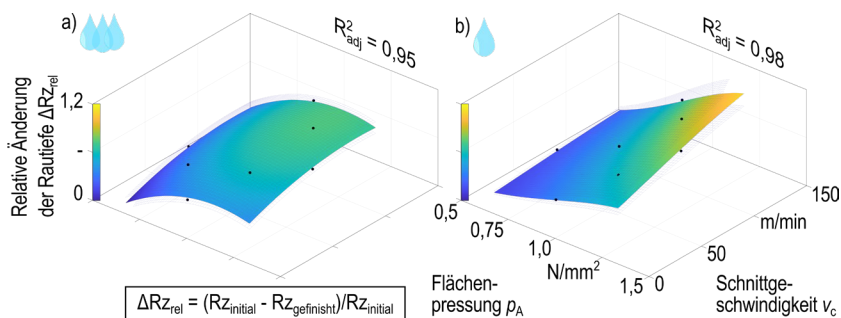
Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μ m
Härte:	58 $\pm$ 2 HRC	KSS-Strategie:	Var.	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	$\pm$ 2 mm	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{An}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpression p_A:	Var.

Abbildung 6-7: Regressionsmodell der relativen Veränderung der R_z -Werte in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit und Flächenpression bei a) Trockenbearbeitung und b) Überflutungs-schmierung

Wie bereits aus den Messwerten der Trockenbearbeitung hervorgeht, lässt sich kein signifikanter Einfluss der Prozessparameter erkennen. Tendenziell ergibt sich bei höheren Flächenpressungen und Schnittgeschwindigkeiten eine leichte Zunahme der relativen Veränderung der R_z -Werte. Dieser Zusammenhang lässt sich bei höheren Schnittgeschwindigkeiten auf eine Steigerung des Materialabtrags aufgrund der höheren Anteile an Mikrospanvorgängen zurückführen. Die höhere Flächenpression

kann einerseits zu erhöhten Korneindringtiefen führen, was wiederum die Mikrozerspanung fördert. Andererseits kann eine höhere Flächenpressung das Brechen von initialen Rauheitsspitzen fördern, was ebenso zu einer höheren relativen Veränderung des Rz-Wertes führen kann. Die geringe Auswirkung dieser Effekte bei der Trockenbearbeitung lassen sich jedoch auf den Werkzeugverschleiß zurückführen. Durch die Zusetzung des Finishbandes mit abgetragenen Werkstoff wird der Kornüberstand reduziert, sodass die Korneindringtiefe abnimmt und anstelle von Mikrospanen zunehmend Mikropflügen und -furchen auftreten. Im Gegensatz dazu lassen sich die Effekte hinsichtlich einer Steigerung des Materialabtrags mit zunehmender Schnittgeschwindigkeit und Flächenpressung bei Einsatz von Überflutungsschmierung anhand der relativen Veränderung des Rz-Wertes nachvollziehen. Insbesondere die Erhöhung der Flächenpressung wirkt sich hierbei positiv auf die Veränderung der Rz-Werte aus. Mit Blick auf das Regressionsmodell lässt sich jedoch festhalten, dass die Veränderung der Rauheit begrenzt ist. Abgeleitet aus der relativen Veränderung des Rz-Wertes ist die Steigerung des Materialabtrags vor allem zwischen den niedrigen und mittleren Flächenpressungen deutlich. Eine weitere Erhöhung der Flächenpressung zeigt nur einen kleinen Effekt. Dafür nimmt im Bereich der höheren Flächenpressungen der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit auf die relative Veränderung der Rz-Werte zu.

In Gegenüberstellung zur Überflutungsschmierung ist in Abbildung 6-8 das Regressionsmodell für die relative Veränderung der Rautiefe $\Delta R_{z,rel}$ für den Einsatz von MMS dargestellt. Auch hier lässt sich eine Zunahme der relativen Veränderung mit Erhöhung der Werte der betrachteten Prozessparameter erkennen. Die Flächenpressung hat ebenso wie bei Anwendung der Überflutungsschmierung einen dominanten Einfluss. Im Vergleich zur Überflutungsschmierung ist jedoch auch im Bereich zwischen der mittleren ($p_A = 0,95 \text{ N/mm}^2$) und höchsten Flächenpressung ($p_A = 1,28 \text{ N/mm}^2$) ein deutlicher Anstieg zu erkennen. Darüber hinaus lässt sich bei gleichzeitiger Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit eine zusätzliche Erhöhung der relativen Veränderung des Rz-Wertes beobachten. Als ursächlich hierfür wird die Zunahme an Reibungsvorgängen in der Kontaktzone angesehen. Die theoretischen Modelle des Materialabtrags bei der Oberflächenfeinbearbeitung beschreiben, dass für die Vorgänge der Mikrospanbildung geringere Reibung vorliegt, wohingegen bei Mikrofurchen und Mikropflügen sowie der Oberflächenzerrüttung der Anteil an Reibung höher ist [ESG+07; ZM83; Goe16].



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μm
Härte:	58 ± 2 HRC	KSS-Strategie:	Var.	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	± 2 mm	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_B:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächen- pression p_A:	Var.

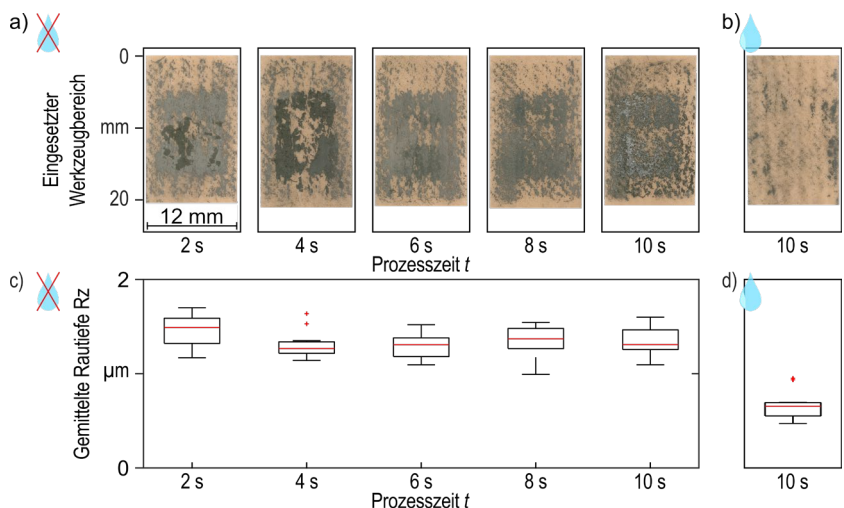
Abbildung 6-8: Regressionsmodell der relativen Veränderung der Rz-Werte in Abhängigkeit von der Schnittgeschwindigkeit und Flächen-
pression bei a) Überflutungsschmierung und b) Minimalmengenschmierung

Grundsätzlich überlagern sich beim Microfinishen die unterschiedlichen Materialabtragsmechanismen. Die Erhöhung der Flächen-
pression bewirkt höhere Korneindringtiefen und damit eine Zunahme der effektiven Spannungs-
dicke $h_{cu,eff}$. Gleichzeitig führen höhere Schnittgeschwindigkeiten durch eine Steigerung der
wirkenden kinetischen Energie der Schneidkörner zu einer früher einsetzenden
plastischen Verformung des zu trennenden Werkstoffs. Beide Effekte fördern die
Mikrozerspanung. Allerdings sind Korngeometrie, Kornüberstand aus der Bindung und
Wirkrichtung der Kornschneiden ebenso Einflussfaktoren für die jeweiligen
Materialabtragsmechanismen. Bezogen auf die Vielzahl an Schneidkörnern,
vorhandene Kornagglomerationen und die aufgrund der Oszillation hin und her
wechselnde Schnitt-
richtung des Werkzeugs lässt sich festhalten, dass beim
Microfinishen eine Überlagerung der unterschiedlichen Materialabtragsmechanismen
vorliegt. Aus dieser Überlagerung der unterschiedlichen Vorgänge lässt sich der
Unterschied zwischen Minimalmengenschmierung und Überflutungsschmierung
hinsichtlich der Beeinflussung der relativen Veränderung der gemittelten Rautiefe
erklären. Da die Reibung in Wechselwirkung mit den Mechanismen Mikrofurchen und
Mikro-
pflügen sowie der Oberflächenzerrüttung steht, kann die Erhöhung der Reibung
auch zu einer Zunahme dieser Mechanismen führen. Während größere Schneidkörner
oder Kornspitzen mit weniger negativ ausgeprägtem Spanwinkel zur Mikrozerspanung

beitragen, sind Schneidkörner mit geringerem Kornüberstand, negativem Spanwinkel oder möglicherweise runderer Schneidenform am Mikrofurchen und Mikropflügen beteiligt. Ebenso gilt dies für Bereiche des Finishbandes, die durch die zentrale Kraftinduktion und die große Umschlingung vermutlich geringere lokale Flächenpressungen erfahren. Unter Berücksichtigung der Kontaktmessungen mittels Druckmessfolie sind dies beim flexiblen Federstahl-Andrückelement, insbesondere bei geringen Andrückkräften, sowohl die axialen als auch radialen Randbereiche. Hier nimmt die Einzelkornbelastung und damit die Korneindringtiefe ab. Die Reduktion der Kühlschmierstoffzufuhr durch den Einsatz von MMS bewirkt für diese Schneidkörner eine Zunahme der Reibung, sodass diese Schneidkörner stärker Mikropflügen und -furchen. Für den Einsatz von Überflutungsschmierung hingegen ist davon auszugehen, dass dieser Anteil am gesamten Materialabtrag geringer ist und somit weniger Material abgetragen werden kann. Microfinishwerkzeuge weisen bekanntlich nur geringe Bindungsniveaus auf, sodass Kornausbrüche zu erwarten sind. Für den Einsatz von MMS lässt sich davon ausgehen, dass lose Schneidkörner länger in der Kontaktzone bleiben und weiter am Materialabtrag mitwirken, als dies unter Überflutungsschmierung der Fall ist.

Es lässt sich festhalten, dass bei Einsatz des FFA eine Trockenbearbeitung nicht zielführend ist. Ohne die Möglichkeit des konstanten Bandvorschubs ist der Werkzeugverschleiß durch Zusetzen der Spanräume so groß, dass kein ausreichender Materialabtrag gewährleistet werden kann. Eine alternative Strategie wäre hierbei das Weitertakten der verschlissenen Bandbereiche durch bspw. ein Unterbrechen des Prozesses. Die Betrachtung des Werkzeugverschleißes für unterschiedlich lange Prozesszeiten in Abbildung 6-9 Teil a) bei der Trockenbearbeitung zeigt jedoch, dass bereits nach einer kurzen Prozesszeit von 2 Sekunden ein Großteil des Finishbandes mit abgetragenen Material zugesetzt ist. Längere Prozesszeiten weisen keine deutliche Zunahme der Zusetzungen mehr auf. Hieraus lässt sich schließen, dass direkt mit dem zu Prozessbeginn abgetragenen Material die Zusetzung des Werkzeugs erfolgt, sodass kein relevanter Materialabtrag im weiteren Prozessverlauf mehr stattfindet.

Dies deckt sich mit den gemessenen Rz-Werten der gefinishten Oberflächen, die in Teil c) der Abbildung dargestellt sind. Die geringfügige Abnahme der Rz-Werte mit den Prozesszeiten $t > 2 \text{ s}$ lässt sich mit einem Brechen der Rauheitsspitzen der Werkstückoberfläche durch die weiterhin vorliegende Reibung zwischen Werkstück und Werkzeug zurückführen. In Korrelation zu den gemessenen Tangentialkräften (vgl. Abbildung 6-5) lässt sich schließen, dass der Materialabtrag bei der Trockenbearbeitung ausschließlich innerhalb der ersten 3 Sekunden des Prozesses stattfindet, da im weiteren Verlauf die Tangentialkraft konstant bleibt.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_k:	30 µm
Härte:	58 ±2 HRC	KSS-Strategie:	Var.	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	410 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	10,5 Hz	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	70 m/min
Einstelldruck p_{in}:	4,1 bar	Res. Andrückkraft F_{An}:	164 N	Res. Flächenpressung p_A:	0,95 N/mm ²

Abbildung 6-9: Eingesetzte Finishbänder a), b), Rz-Werte der Werkstückoberfläche c), d) bei Trockenbearbeitung a), c) sowie Einsatz von MMS b), d)

Im Gegensatz hierzu zeigt sich für die Bearbeitung mit MMS in Teil b) ein anderes Verschleißbild für das Finishband. Hierbei lassen sich nur lokal Bereiche erkennen, in denen abgetragenes Material vorliegt. Im rechten Randbereich liegt entsprechend eine lokale Zusetzung vor. Diese ist vermutlich auf eine stärkere Belastung im Bereich der Kante zurückzuführen, die aus einer nicht ganz parallelen Ausrichtung zwischen Werkzeug und Werkstück hervorgerufen werden kann.

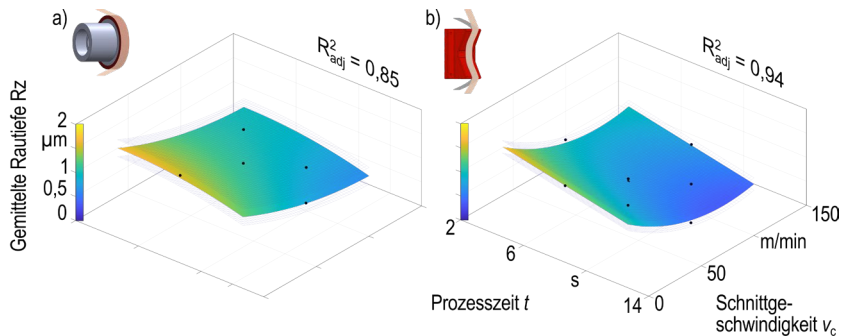
Wie bereits anhand der gemittelten Rautiefen und den relativen Veränderungen der Rz-Werte dargelegt wurde, lässt sich durch den Einsatz von MMS ein höherer Materialabtrag erzielen, woraus bessere Oberflächengüten resultieren, wie bspw. in Teil d) der Abbildung dargestellt. Das abgetragene Material wird aufgrund der Schmierwirkung besser entlang des Finishbandes verteilt oder entsprechend der Rotationsrichtung der Welle mitgeführt und haftet anschließend als Material-Öl-Gemisch an der Werkstückoberfläche.

6.2 Einfluss der Werkstückumschlingung auf das Prozessergebnis

Die Bearbeitung mit FFA erzeugt durch seinen Aufbau und die resultierende Kontaktfläche, verglichen mit der herkömmlichen Andrückrolle, bei gleicher induzierter Normalkraft geringere Flächenpressungen. Gleichzeitig führt die größere Werkzeug-Werkstück-Umschlingung zur Erhöhung der Anzahl an aktiven Schneiden im Bearbeitungsprozess. Die Analyse der hieraus folgenden Prozesswechselwirkungen und Bearbeitungsergebnisse wird im Folgenden in Relation zur Bearbeitung mit Andrückrolle näher betrachtet.

6.2.1 Gegenüberstellung der Bearbeitung mit FFA und mit Andrückrolle

Für den Einsatz von KSS im Prozess erfolgt in Abbildung 6-10 die Gegenüberstellung für den Einsatz eines FFA und einer Andrückrolle. Für beide Werkzeuge basiert das Regressionsmodell auf einem zentral zusammengesetzten Versuchsplan mit Variation der Parameter Prozesszeit t und Schnittgeschwindigkeit v_c .



Werkstoff: 16MnCr5	Andrückelement: Var.	Abrasivkorn: D
Durchmesser d: 54 mm	Wz.-breite b_{Wz}: 12 mm	Korngröße d_K: 30 µm
Härte: 58 ±2 HRC	KSS-Strategie: KSS ($V=3,3$ l/min)	Kornauftrag: Gerichtet
Osz.-Amplitude S: ±2 mm	Drehzahl n: Var.	Bandvorschubgeschw. v_{fb}: 0 mm/min
Osz.-frequenz f_{os}: Var.	Prozesszeit t: Var.	Res. Schnittgeschw. v_c: Var.
Einstelldruck p_{in}: Var.	Res. Andrückkraft F_{An}: Var.	Res. Flächenpressung p_a: 0,95 N/mm ²

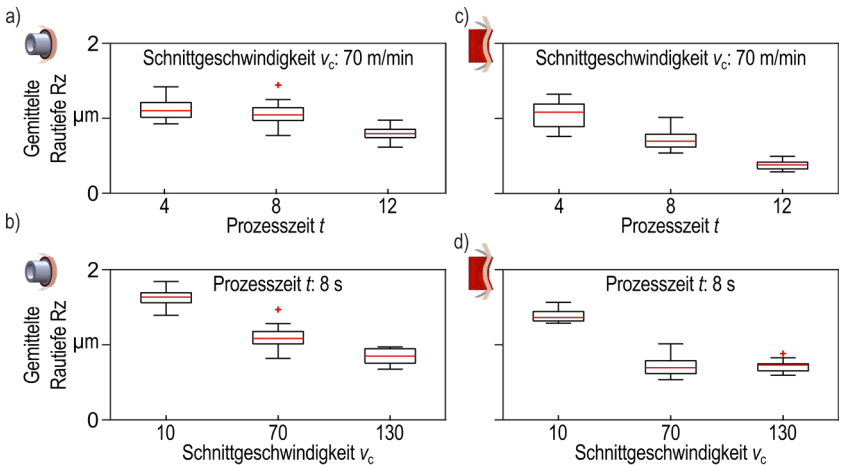
Abbildung 6-10: Regressionsmodelle der Rz-Werte bei Variation der Prozesszeit und Schnittgeschwindigkeit bei Nutzung einer a) Andrückrolle ($H_R = 60$ Shore A) und des b) FFA

Zur Vergleichbarkeit der Versuchsreihen ist die Flächenpressung für beide Versuchsreihen identisch, was mit variierendem Einstelldruck p_{in} und damit unterschiedlichen Normalkräften einhergeht. Hierbei ergeben sich Normalkräfte von $F_n = 84$ N für die Andrückrolle sowie $F_n = 164$ N für das FFA zur Realisierung der identischen Flächenpressung von $p_a = 0,95$ N/mm². Unabhängig vom Andrückelement

entstehen bei kürzeren Prozesszeiten höhere Rz-Werte. Die gleiche Entwicklung ergibt sich für die Bearbeitung mit geringen Schnittgeschwindigkeiten. Der sukzessive Materialabtrag über die Prozessdauer führt dazu, dass kurze Prozesszeiten nicht ausreichend sind, um die initiale Topographie abzutragen und damit die Ausgangsrauheit signifikant zu verändern. Niedrigere Schnittgeschwindigkeiten bewirken durch die Reduktion der Werkstückdrehzahl sowie Oszillationsfrequenz eine Verringerung der Schneidenraumüberdeckung innerhalb der Prozesszeit. Dies führt ebenso zu grundsätzlich geringerem Materialabtrag wie die verringerte Schnittgeschwindigkeit an sich. Die geringere kinetische Energie im Prozess reduziert die Zerspanleistung. Materialabtragsmechanismen, wie Mikrofurchen und Mikro-pflügen, werden hierdurch begünstigt, wohingegen die Mikrospanbildung erschwert wird. Mit Zunahme beider variierten Parameter lässt sich eine deutliche Verringerung der Rz-Werte erreichen. Durch den sukzessiven, quasi schichtweisen Abtrag der initialen Oberfläche mit fortlaufender Prozesszeit wird diese zunehmend verändert und die höheren Rauheitsspitzen abgetragen. Für ausreichend lange Bearbeitungen lässt sich beim Microfinishen ein degressives Verhalten hinsichtlich der Beeinflussung der Rauheit festhalten [BTT19; TBA+19]. Unabhängig von anderen Prozessparametern und bei Verwendung eines konstanten Bandvorschubs wird, in Abhängigkeit des Finishbandes und bei ausreichend langer Bearbeitung, immer eine vergleichbare Rauheit erzielt. Um im Sinne der Produktivität möglichst kurze Prozesszeiten zu realisieren, ist bspw. die Erhöhung der Schnittgeschwindigkeit ein geeigneter Ansatz. Dies zeigt sich ebenso in den dargestellten Regressionsmodellen. Für beide Andrückelemente nimmt die gemittelte Rautiefe Rz mit Steigerung der Schnittgeschwindigkeit ab. Letztlich ergeben sich aus der Kombination der längsten Prozesszeit ($t = 12$ s) mit der höchsten Schnittgeschwindigkeit ($v_c = 130$ m/min) die geringsten Rz-Werte. In der Gegenüberstellung wird jedoch deutlich, dass die Bearbeitung mit FFA im Bereich der geeigneten Prozessführung $t > 6$ s und $v_c > 50$ m/s grundsätzlich zu niedrigeren Rz-Werten führt. Aufgrund der größeren Kontaktlänge des Werkzeugs, die bei gleicher Flächenpressung für das FFA vorliegt, ergibt sich eine höhere Anzahl aktiver Schneiden und somit eine größere Schneidenraumüberdeckung innerhalb der Prozesszeit. Hieraus ergibt sich ein höherer Materialabtrag und gleichzeitig eine geringere Rauheit der Oberfläche.

Verdeutlicht wird der Einfluss des Andrückelements auf die gemittelte Rautiefe Rz bei genauer Betrachtung der Messwerte für ausgewählte Versuchspunkte. Abbildung 6-11 stellt diese in Boxplots für die Variation der Parameter Prozesszeit a) und c) sowie Schnittgeschwindigkeit b) und d) für je drei Versuche dar. Die Darstellung verdeutlicht den Einfluss jeden Parameters und die Abnahme der Rz-Werte mit steigender Prozessdauer sowie mit Zunahme der Schnittgeschwindigkeit. Gleichzeitig

zeigen die Messwerte, dass der Einfluss der Parameter für die Bearbeitung mit FFA größer ist. Insbesondere bei Steigerung der Prozesszeit lassen sich hier größere Unterschiede erkennen als dies bei der Andrückrolle der Fall ist. Für die Variation der Schnittgeschwindigkeit zeigt sich im Median keine Veränderung zwischen $v_c = 70$ m/s und $v_c = 130$ m/s, allerdings nimmt die Streuung der Rz-Werte ab. Dies trifft allgemein auch auf die Gegenüberstellung der Versuche mit Andrückrolle und mit FFA zu. Hier zeigt sich für den Einsatz des FFA eine geringere Streuung der Messwerte der gemittelten Rautiefe Rz. Besonders deutlich ist dies aber bei längerer Prozessdauer sowie bei höherer Schnittgeschwindigkeit.

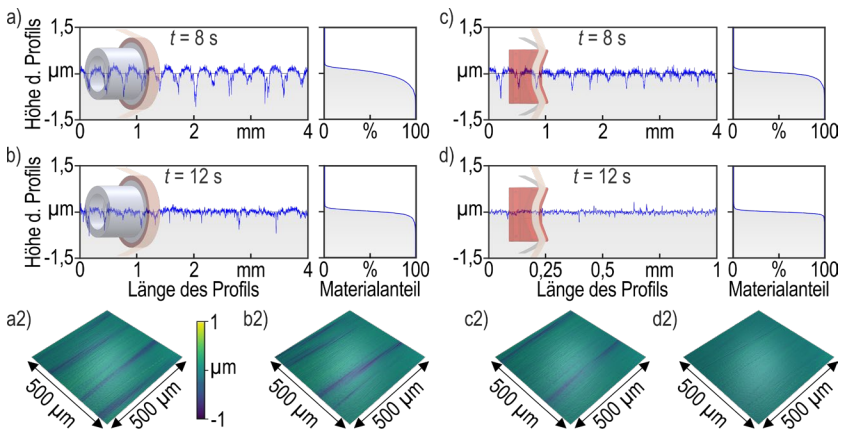


Werkstoff: 16MnCr5	Andrückelement: Var.	Abrasivkorn: D
Durchmesser d: 54 mm	Wz.-breite b_{Wz}: 12 mm	Korngröße d_K: 30 μm
Härte: 58 ± 2 HRC	KSS-Strategie: KSS ($V = 3,3$ l/min)	Kornauftrag: Gerichtet
Osz.-Amplitude S: ± 2 mm	Drehzahl n: Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}: 0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}: Var.	Prozesszeit t: Var.	Res. Schnittgeschw. v_c: Var.
Einstelldruck p_{in}: Var.	Res. Andrückkraft F_{An}: Var.	Res. Flächenpressung p_A: 0,95 N/mm ²

Abbildung 6-11: Gegenüberstellung der gemittelten Rautiefe für den Einsatz der Andrückrolle a), b) sowie des FFA c), d) bei variierenden Prozesszeiten a), c) und Schnittgeschwindigkeiten b), d)

Die beschriebenen Ergebnisse lassen sich auf den Effekt der größeren Werkzeug-Werkstück-Umschlingung respektive die größere Kontaktfläche zurückführen. Die Zunahme der Kontaktfläche bedeutet eine Vergrößerung des Schneidenraums und damit eine Steigerung der Anzahl aktiver Schneiden. Durch die höhere Anzahl an Schneidkörnern, die am Materialabtrag beteiligt sind, ergibt sich letztlich eine homogenere Oberflächentopographie. Die höhere Anzahl an aktiven Schneiden bewirkt

grundsätzlich auch eine Steigerung der Spanvorgänge und damit eine Erhöhung des Materialabtrags. Dieser Zusammenhang lässt sich anhand der dargestellten Profilschriebe in Abbildung 6-12 erkennen. Insbesondere für die kurze Prozesszeit fällt hierbei auf, dass die initiale Topographie der Schleifbearbeitung nur teilweise abgetragen wurde. Die hierbei noch vorhandenen periodischen Riefen der Vorbearbeitung sind bei Einsatz der Andrückrolle deutlich stärker ausgeprägt. Auch die Materialtraganteilskurve ist noch deutlich steiler im Vergleich zur Bearbeitung mit FFA.

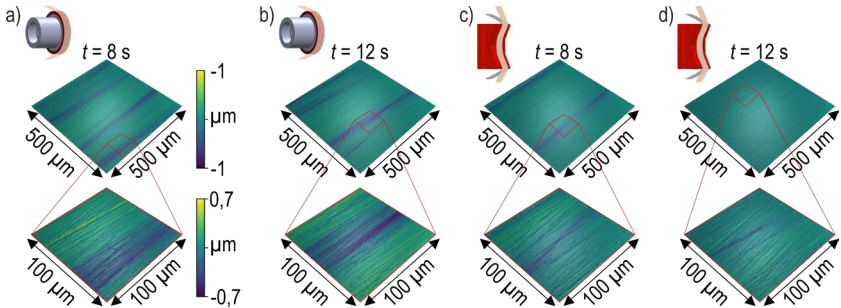


Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	Var.	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_k:	30 µm
Härte:	58 ±2 HRC	KSS-Strategie:	KSS ($V = 3,3$ l/min)	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	410 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{fB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{os}:	10,5 Hz	Prozesszeit t:	Var.	Res. Schnittgeschw. v_c:	70 m/min
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	0,95 N/mm ²

Abbildung 6-12: Profilschriebe, Materialanteilskurven und 3D-Topographie für Oberflächen nach dem Microfinishen unter Verwendung der Andrückrolle a), b) sowie FFA c), d)

Mit zunehmender Bearbeitungsdauer wird die initiale Topographie des Schleifprozesses weiter abgetragen. Allerdings sind auch nach 12 s Prozesszeit nach der Bearbeitung mit Andrückrolle im Vergleich zum FFA weiterhin tiefere Riefen im Profil sichtbar. Die Periodizität dieser ist vergleichbar zu den erhaltenen Riefen des Schleifprofils bei kurzer Bearbeitungsdauer. Hieraus lässt sich schließen, dass auch hier die initiale Topographie noch nicht vollständig abgetragen wurde. Im Gegensatz dazu lassen sich für die Bearbeitung mit FFA bei $t = 12$ s keine Elemente im Profil erkennen, die aus der initialen Topographie des Schleifprozesses resultieren. Die vergrößerte

Darstellung der gefinishten 3D-Topographie in Abbildung 6-13 verdeutlicht ebenso die homogenere Oberfläche für die Bearbeitung mit FFA. Die sich kreuzenden Riefen der Microfinishbearbeitung sind hierbei deutlich zu erkennen. Im Gegensatz dazu lassen sich bei der Bearbeitung mit Andrückrolle einzelne tiefere Riefen erkennen, die noch aus dem Schleifprozess resultieren.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	Var.	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 µm
Härte:	58 ± 2 HRC	KSS-Strategie:	KSS ($\dot{V} = 3,3 \text{ l/min}$)	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	± 2 mm	Drehzahl n:	410 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	10,5 Hz	Prozesszeit t:	Var.	Res. Schnittgeschw. v_c:	70 m/min
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	0,95 N/mm ²

Abbildung 6-13: Detailansicht der Oberflächentopographie nach dem Microfinishen mit Andrückrolle a) und b) sowie FFA c) und d)

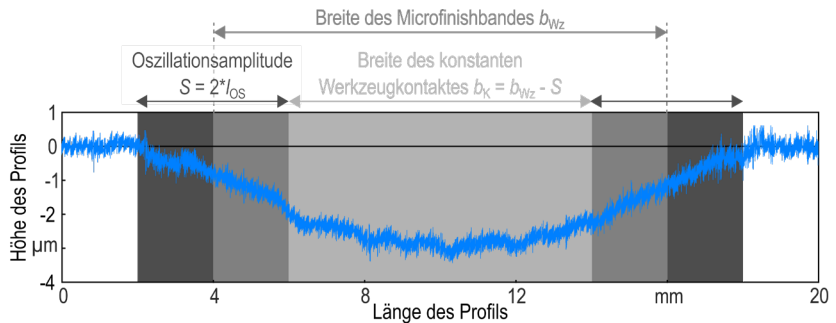
Aus der Betrachtung der Bearbeitungsergebnisse lässt sich ableiten, dass die Vergrößerung der Kontaktfläche bei gleicher Flächenpressung zu einem gleichmäßigeren Bearbeitungsergebnis führt. Die durch die größere Kontaktfläche höhere Anzahl an aktiven Schneiden führt zu einer Zunahme der Zerspanvorgänge und einer größeren Schneidenraumüberdeckung. Hieraus ergeben sich höhere Materialabtragsraten und homogenere Oberflächen im Vergleich zur Bearbeitung mit Andrückrolle. Die Bearbeitung mit FFA bietet für diese Prozessstufe somit Möglichkeiten, bei kürzeren Prozesszeiten gleiche oder gar bessere Oberflächengüten zu erzielen als der Einsatz einer Andrückrolle bei gleicher Flächenpressung.

6.3 Einfluss der Prozesswechselwirkungen auf relevante Eigenschaften technischer Funktionsflächen

Bezugnehmend auf eine typische Anwendung des Microfinishprozesses zur Herstellung technischer Funktionsflächen an rotationssymmetrischen Bauteilen sind für die Bewertung des Prozessergebnisses unterschiedliche Eigenschaften der bearbeiteten Werkstücke von besonderer Relevanz. In Anlehnung an Lagerflächen von bspw. Antriebswellen sind dies unter anderem die Oberflächentopographie, die axiale Kontur (Geradheit) sowie die radiale Welligkeit. Für diese drei funktionsrelevanten Eigenschaften werden im Folgenden exemplarische Bearbeitungsergebnisse betrachtet, um insbesondere den Einfluss der unterschiedlichen Andrückelemente auf diese Bauteilmerkmale zu analysieren.

6.3.1 Beeinflussung der Oberflächentopographie

Typischerweise bezieht sich die Tolerierung von Oberflächeneigenschaften, wie der Rauheit, auf die gesamte Oberfläche. Für Bearbeitungsverfahren, wie bspw. das Außenrundlängsschleifen, können jedoch an den Endpunkten der Längsbewegung abweichende Oberflächen auftreten. Diese Effekte können mittels geeigneter Positionierung der Umkehrpunkte sowie Einstellung der Haltezeit in den Umkehrpunkten kompensiert werden. Aufgrund der vorliegenden Kinematik beim Microfinishen liegen auch hier lokal variierende Korneingriffe durch die Werkzeugoszillation vor, welche zu unterschiedlichen Materialabtragsraten in den unterschiedlichen Bereichen führen. Entsprechend der Oszillationsamplitude ergeben sich außenliegende Bereiche der Bearbeitung, die eine geringere Anzahl an Korneingriffen erfahren. Dies führt in der Regel zu einem geringeren Materialabtrag im Randbereich des Werkzeugeingriffs. Dieser Zusammenhang ist für die Finishbearbeitung einer zuvor gedrehten und festgewalzten Oberfläche in Abbildung 6-14 dargestellt. Die Einstechbearbeitung ermöglicht nach Durchführung der drei aufeinanderfolgenden Prozessstufen die Vermessung der resultierenden Kontur, die im Bearbeitungsbereich entsteht.

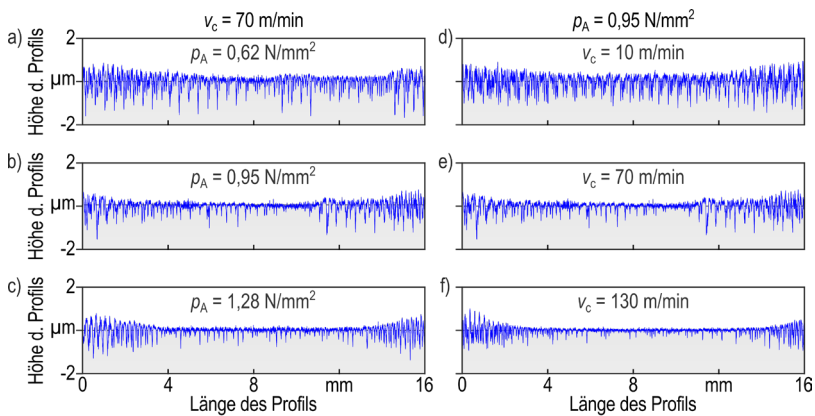


Werkstoff:	42CrMo4+QT	Andrückelement:	Rolle	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	40 mm	Härte d. Andrückrolle:	60° Shore A	Korngröße d_K:	30, 9, 3 µm
Vorbearbeitung:	Drehen und Festwalzen	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Kornauftrag:	gestreut
Osz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	144 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	100 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	11,2 Hz	Prozesszeit t:	20, 10, 10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	20 m/min
Einstelldruck p_{in}:	3,5 bar	Res. Andrückkraft F_{An}:	140 N	Res. Flächenpressung p_A:	1,5 N/mm ²

Abbildung 6-14: Exemplarische Darstellung des gradierten Materialabtrags anhand des Profils nach dreistufiger Microfinishbearbeitung; angelehnt an [SVT+21]

Korrelierend mit dem lokal variierenden Materialabtrag ergeben sich auch unterschiedliche resultierende Rauheiten beim Microfinishen entlang der Oszillations- bzw. Werkstückachse. Abbildung 6-15 zeigt Rauheitsprofile mit einer Länge von 16 mm. Die bearbeiteten Wellenabsätze haben eine Breite von $b_w = 16,5$ mm. Die dargestellten Versuche beschreiben hierbei die Variation der Schnittgeschwindigkeit und Flächenpressung bei Einsatz des FFA.

Unter Berücksichtigung der Werkzeugbreite und Oszillationsamplitude ergibt sich ein Bereich von $b_K = 8$ mm, der während des gesamten Prozesses konstant im Kontakt mit dem Werkzeug ist. Dieser Bereich befindet sich entsprechend in der Mitte des bearbeiteten Absatzes. Die dargestellten Profile für b) und e) sind entsprechend identisch, da sie den gleichen Versuchspunkt betreffen.



Werkstoff (Härte):	16MnCr5 (58 $\pm$ 2 HRC)	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μm
Breite Versuchsabsatz b_W:	16,5 mm	KSS-Strategie:	KSS	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	$\pm 2 \text{ mm}$	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 6-15: Darstellung von Rauheitsprofilen über die gesamte Bearbeitungsbreite für unterschiedliche Flächenpressungen a)-c) sowie bei Variation der Schnittgeschwindigkeit d)-f)

Bei Betrachtung der Rauheitsprofile kann mit Zunahme von Flächenpressung und Schnittgeschwindigkeit eine Veränderung des Profils erkannt werden. Entsprechend der Zunahme des Materialabtrags entstehen bei Steigerung der Flächenpressung oder Schnittgeschwindigkeit glattere Profile, deren Riefen kleiner sind und die geringere Spitzen aufweisen. Gleichzeitig wird der Unterschied zwischen mittlerem Bereich und dem Randbereich deutlicher. Die Oszillation des Werkzeugs und die damit verbundene geringere Kontaktzeit zwischen dem äußeren Werkstückbereich und dem Werkzeug führt für die Randbereiche zu geringerem Materialabtrag. Hieraus folgt, dass die initiale Schleiftopographie noch nicht vollständig abgetragen ist und noch mehr und größere Spitzen sowie tiefere Riefen im Profil dieser Bereiche vorhanden sind. Grundsätzlich kann dieser Effekt auch für schmalere Werkstückabsätze beobachtet werden, sofern diese die Breite des konstant im Eingriff befindlichen Werkzeugbereichs b_K ($b_{Wz} - |S|$) übersteigen. Ein Profil für eine solche Bearbeitung ist in Abbildung 6-16 c) für einen Werkstückabsatz der Breite $b_W = 13 \text{ mm}$ mit einem Absatz der Breite $b_W = 16,5 \text{ mm}$ gegenübergestellt. Die exemplarischen Profilschriebe zeigen die Hälfte des ausgewerteten Profilschriebs, weshalb die Skalierung der axialen Länge variiert.

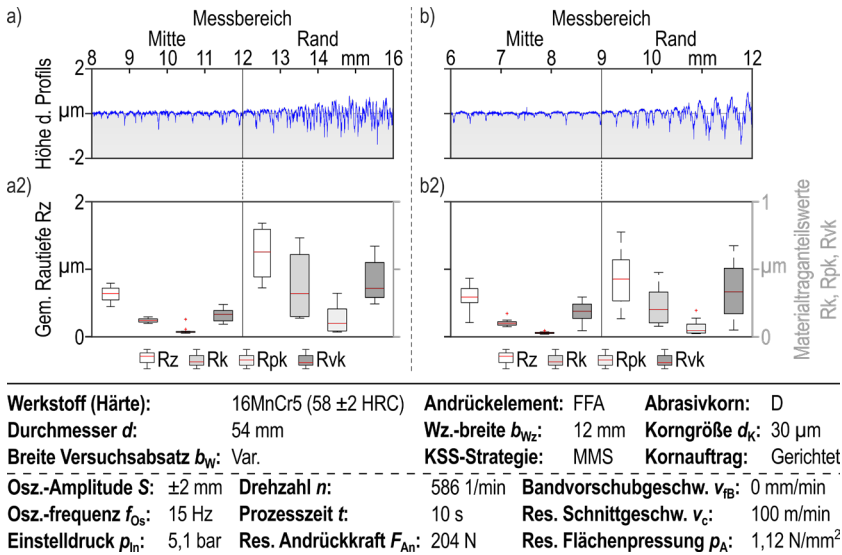


Abbildung 6-16: Darstellung der Rauheit entlang der Werkstückachse für die Bearbeitung von Absätzen mit einer Breite von a) $b_w = 16,5$ mm und b) $b_w = 13$ mm

Da der Bereich des nicht konstanten Werkzeugkontaktes kleiner ist, ergibt sich auch im Profil ein kleinerer Bereich, der eine entsprechend höhere Rauheit besitzt. Ausgehend vom axial konstanten Kontaktbereich von $b_K = 8$ mm ergibt sich, bezogen auf die Breite des Werkstückabsatzes von $b_w = 13$ mm, je Seite ein 2,5 mm breiter Bereich der unstetigen Bearbeitung. Für $b_w = 16,5$ mm ist dieser Bereich jeweils 4,25 mm breit. Basierend auf der Länge der Gesamtmessstrecke von $l_{m,G} = 16$ bzw. 12 mm wurden auf je vier gleich großen Messstrecken zu $l_m = 4$ bzw. 3 mm die Kenngrößen gemittelte Rautiefe R_z sowie die Materialtraganteilsgrößen ermittelt. Unabhängig von der Messstrecke wurde der Cut-off-Filter $\lambda_c = 0,8$ mm verwendet. Die Messungen der mittleren und die der äußeren Bereiche sind zusammengefasst in der Boxplot-Auswertung dargestellt. Entsprechend der Profilschriebe zeigt sich hier auch in den Kennwerten die ungleichmäßige Bearbeitung in axialer Richtung. Neben einer Erhöhung der Kennwerte lässt sich aufgrund der inhomogenen Bearbeitung im Randbereich auch eine deutliche Steigerung der Messwertstreuung erkennen. Grundsätzlich nimmt der Effekt für schmalere Absätze ab und kann durch die Wahl eines entsprechend breiten Werkzeugs kompensiert werden, allerdings ermöglichen die geometrischen Restriktionen in vielen Anwendungsfällen nicht deren Einsatz. Verglichen mit dem Einsatz des FFA ist der Effekt für die Bearbeitung mit

Andrückrolle insgesamt geringer. Dies ist in der Gegenüberstellung in Abbildung 6-17 dargestellt.

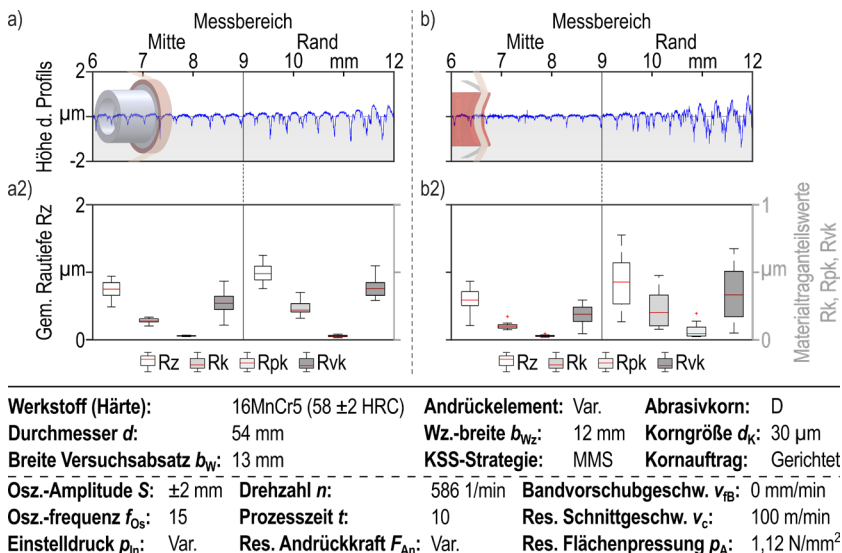


Abbildung 6-17: Darstellung der Rauheit entlang der Werkstückachse beim Microfinishen mit a) Andrückrolle und b) FFA

Wie bereits dargestellt, ergibt sich durch die Bearbeitung mit Andrückrolle grundsätzlich ein etwas geringerer Materialabtrag und weniger homogene Oberflächen, gleichzeitig ist aber der Effekt der axialen inhomogenen Bearbeitung bei höherem Materialabtrag höher (vgl. Abbildung 6-15). Neben diesem Zusammenhang gibt es einen weiteren Aspekt, der zu den geringeren Abweichungen der Rauheiten entlang der Werkstückachse führt. Es ist bekannt, dass sich die Andrückrolle bei Überschreiten der Werkstückkante aufgrund der Oszillation um die Kante drückt bzw. dort Spannungsspitzen auftreten, die einer höheren lokalen Flächenpressung entsprechen. Dies steht im direkten Zusammenhang mit einer Verrundung der Werkstückkante, wie sie sowohl *Goeke* als auch *Abrahams* beschrieben haben [Goe16; Abr16]. Für das FFA ist diese Verformung nicht zu erwarten, da sich die Elastizität eindimensional, in Richtung der Andrückkraft, auswirkt. Dies deckt sich letztlich mit den dargestellten Abdrücken auf der Druckmessfolie, bei denen sich der Druck beim FFA eher in der Werkzeugmitte konzentriert und zur Seite abnimmt, wie bereits in Abbildung 5-4 dargestellt. Die prinzipiell auch in axialer Richtung wirkende Elastizität der

Andrückrolle hingegen ermöglicht einen gleichmäßigeren Kontakt des Werkzeugs über die Breite der resultierenden Kontaktfläche.

6.3.2 Beeinflussung der axialen Kontur

Neben der Oberflächengüte sind auch viele Merkmale der Form für Funktionsflächen von besonderer Relevanz und stehen in Abhängigkeit mit den Bearbeitungsprozessen, die zur Formgebung genutzt werden. In Anlehnung an die Geradheit von Lagerstellen an Antriebswellen wird für die Absatzwellen die axiale Kontur der gefinishten Absätze betrachtet. Durch die Kinematik des Microfinishens und den Gradienten hinsichtlich der Korneingriffe über die Prozesszeit ergeben sich die bereits beschriebenen ungleichmäßigen Materialabträge in axialer Richtung, vgl. Abbildung 6-14. Dies steht auch im Zusammenhang mit den resultierenden axialen Konturen, wie Abbildung 6-18 anhand der axialen Konturen für drei unterschiedlich microgefinishte Absätze darstellt.

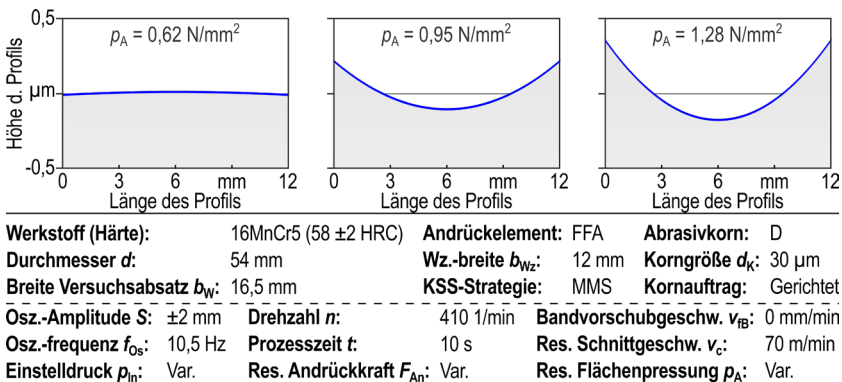


Abbildung 6-18: Einfluss der Microfinishbearbeitung mit FFA auf die resultierende axiale Kontur unter Berücksichtigung variierender Flächenpressungen

In Abhängigkeit von der Flächenpressung variiert auch das Materialabtragsvolumen, wodurch grundsätzlich die Formveränderung durch den Prozess zunimmt. Da durch die geringere Anzahl von Korneingriffen im Randbereich weniger Materialabtrag vorliegt, ergibt sich die Entstehung einer konkaven Werkstückkontur. Die leicht konvexe Kontur für die geringste Flächenpressung lässt auf eine initial konvexe Oberfläche schließen, deren Bearbeitung aufgrund des verhältnismäßig geringen Materialabtrags beim Microfinishen keine konkave Form erreicht. Diese, für viele Funktionsflächen ungeeignete Beeinflussung der Oberfläche tritt für den Einsatz von Andrückrollen weniger stark auf, jedoch können auch hier konkave Konturen nach der Bearbeitung vorliegen, wie in Abbildung 6-19 anhand der Konturschriebe zu sehen ist.

Hierbei basieren die Konturen auf zwei getrennt durchgeführten Versuchen und weisen auf einen Einfluss der initialen Kontur hin. Für eine konvexe Oberfläche ergibt sich erst mit höherem Materialabtrag eine konkave Kontur, da beim sukzessiven Materialabtrag ein höherer Abtrag in der Mitte der Bearbeitung stattfindet.

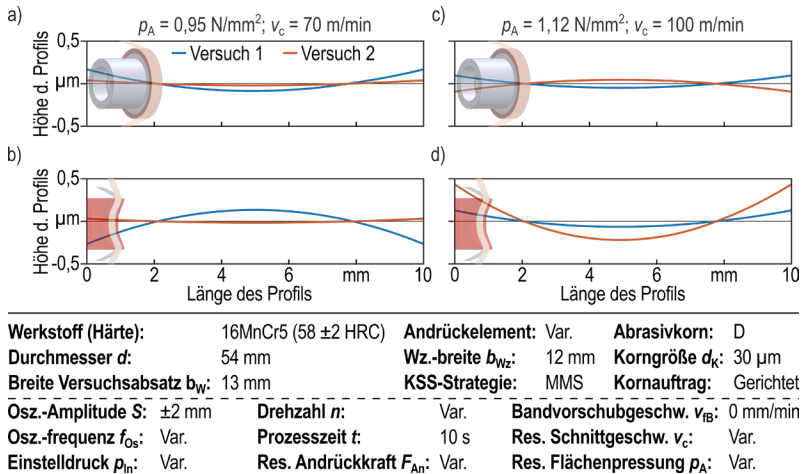


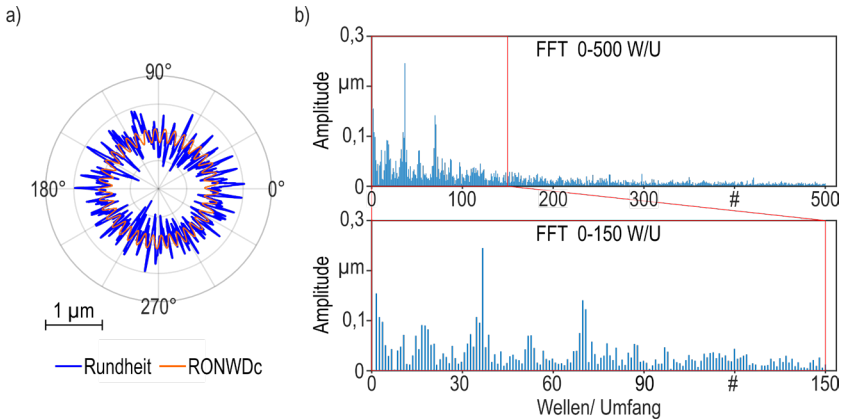
Abbildung 6-19: Darstellung resultierender axialer Konturen für variierende Versuchsabsätze bei Gegenüberstellung des Einflusses von Andrückrolle a, c) und FFA b, d)

Die stärkere Beeinflussung der Kontur durch das FFA ergibt sich hierbei aus dem höheren Materialabtrag sowie der geringeren Elastizität und der ungleichmäßigeren Verteilung der Flächenpressung auf dem Finishband. Für das FFA liegt im Mittenbereich eine homogenere Kontaktfläche vor als im Randbereich, woraus sich eine deutlich höhere Anzahl an aktiven Schneiden ergibt. Gleichzeitig lässt sich vermuten, dass die Steifigkeit des Federstahls bezogen auf die Breite zu lokal höheren Normalkräften im Bereich der Werkzeugmitte führt. Dies bewirkt höhere Korneindringtiefen und damit eine Zunahme der Spanungsdicke, respektive eine Verbesserung der Spanbildung, in diesem Bereich. Hieraus resultiert ein höherer Materialabtrag in der Werkstückmitte gegenüber dem Randbereich, der entsprechend größer ausfällt als dies bei der Andrückrolle der Fall ist.

6.3.3 Beeinflussung der radialen Welligkeit

Neben der Oberflächentopographie und der axialen Kontur ist die radiale Welligkeit eine relevante Eigenschaft rotationssymmetrischer Funktionsflächen. Für die Betrachtung der radialen Welligkeit eignet sich die Fast-Fourier-Transformation, kurz FFT, bei der die über den Umfang vorliegenden Wellen hinsichtlich ihrer

Amplitudengröße und Anzahl analysiert werden. Abbildung 6-20 zeigt ein exemplarisches Rundheitsprofil sowie die Fast-Fourier-Transformation eines Versuchsabsatzes im geschliffenen Ausgangszustand.



Werkstoff: 16MnCr5 **Härte:** 58 ±2 HRC **Durchmesser d:** 54 mm **Bearbeitungszustand:** Geschliffen

Abbildung 6-20: Exemplarisches Rundheitsprofil a) und Fast-Fourier-Transformation b) eines Versuchsabsatzes im geschliffenen Ausgangszustand

Die Amplitudenwerte der FFT beschreiben hierbei die Berg-zu-Tal-Höhe der jeweiligen Welle und sind entsprechend ihrer Wellenanzahl über den Umfang aufgelistet. Hierbei fallen insbesondere die höheren Amplituden im Bereich 30 - 40 Wellen/Umfang (W/U) sowie bei 7 W/U auf. Die Welligkeiten in diesem Spektrum erreichen Amplituden von 0,25 und 0,15 µm. Mittels Microfinishbearbeitung lassen sich diese Welligkeiten reduzieren und Verbesserungen der Rundheit erzielen. Hierbei erfolgt durch die kraftinduzierte Bearbeitung und den flächenhaften Werkstück-Werkzeugkontakt eine Umschlingung der Wellen. Diese Umschlingung führt in Kombination mit dem Materialabtrag zu einer Reduzierung der Wellenamplituden. Dass hierbei die Werkzeug-Werkstück-Umschlingung eine übergeordnete Rolle spielt, lässt sich in Abbildung 6-21 erkennen. Hier sind die FFT für die Verwendung eines FFA mit dem Ergebnis bei Einsatz einer Andrückrolle gegenübergestellt.

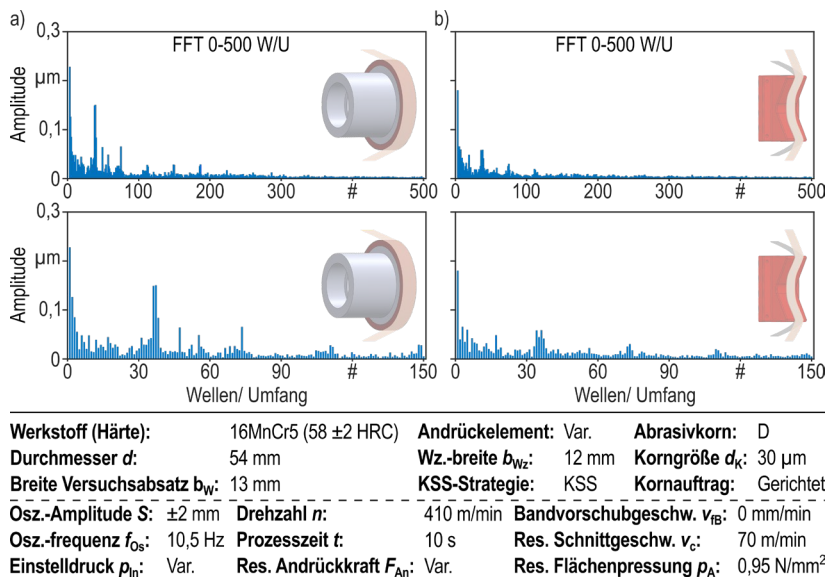


Abbildung 6-21: FFT-Darstellung der radialen Welligkeiten für microgefinishte Bauteile unter Verwendung a) des FFA und b) einer Andrückrolle

Für die größere Kontaktlänge und damit auch größere Umschlingung findet eine stärkere Reduzierung der radialen Welligkeiten statt. Für den bereits im geschliffenen Zustand als signifikant bezeichneten Bereich von 30 – 40 W/U sind die Amplituden für die Bearbeitung mit dem FFA um das Dreifache geringer. Darüber hinaus sind auch die weiteren hochfrequenten Amplituden erkennbar kleiner. Die Kraftinduktion beim Microfinishen bewirkt, dass das Werkzeugsystem auch entgegen der Normalkraft zurückgedrückt werden kann. Dies bedeutet, dass das Werkzeug der Werkstückform folgt, sodass die Formgebung nur eingeschränkt möglich ist. Der Effekt führt zu einer Abdrängung des Werkzeugs und somit zur Abnahme der Korneindringtiefe, sodass der Materialabtrag verringert und letztlich die Verbesserung der Oberfläche und Form limitiert wird. Eine größere Werkzeug-Werkstück-Umschlingung und das weniger elastische Materialverhalten des Federstahls gegenüber dem Elastomer der Andrückrolle sind hiervon weniger beeinflusst. Die flexiblen Federstahl-Andrückelemente ermöglichen daher auch die Bearbeitung von unrunder Bauteilflächen, wie bspw. den Nocken an Nockenwellen [Nag13; Uts12].

6.4 Mehrstufige Prozessbetrachtung

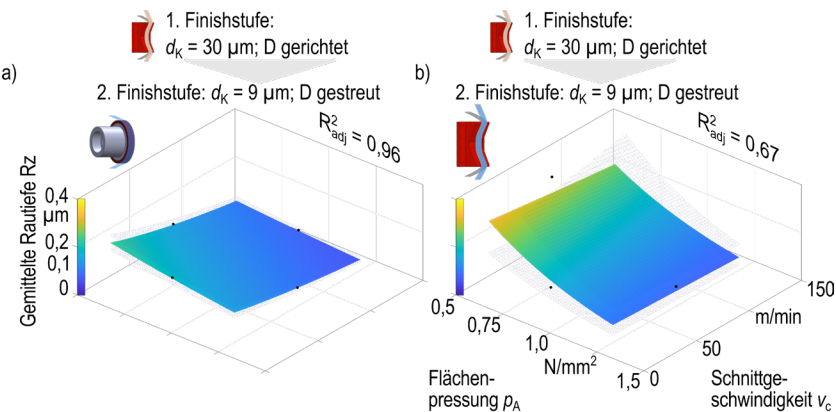
Die für die Herstellung von Funktionsflächen mit Gleit-Reibkontakt angewandte Prozesskette des Microfinishens beinhaltet in der Regel mehrere aufeinanderfolgende Prozessstufen. Hierbei werden die eingesetzten Korngrößen sukzessive kleiner, und es werden auf den nachfolgenden Prozessstufen Finishbänder mit schwerkraftgestreuter Kornaufbringung eingesetzt. Der Einsatz von Finishbändern mit kleineren Korngrößen und schwerkraftgestreuter Kornaufbringung erzeugt einen geringen Materialabtrag. Die nach der ersten Prozessstufe folgenden Bearbeitungen dienen vorrangig dem Abtragen der Rauheitsspitzen der initialen Oberfläche und somit einer Reduzierung der Oberflächenrauheit. Durch den sukzessiven Abtrag können auf diese Weise gezielt unterschiedliche Oberflächentopographien mit beispielsweise Plateau-Struktur mit hohem Materialtraganteil bei gleichzeitig verhältnismäßig tiefen Riefen erzeugt werden. Durch ein vollständiges Abtragen der Riefen aus vorherigen Prozessen können aber auch feinstbearbeitete „spiegelglänzende“ Oberflächen mit niedrigen Riefen- und Spitzenwerten erzeugt werden. Eine gute Abstimmung der Prozessstufen aufeinander ist jedoch notwendig, um die Zieltopographie prozesssicher und wirtschaftlich herstellen zu können.

Hierbei kann das Andrückelement das Prozessverhalten respektive die erreichbare Oberflächengüte beeinflussen. Abbildung 6-22 stellt für zuvor mittels FFA gefinishte Oberflächen Regressionsmodelle für die gemittelte Rautiefe R_z nach einer zweiten Prozessstufe dar. Hierbei wurden sowohl für die Andrückrolle (a) als auch für das FFA (b) die Parameter Schnittgeschwindigkeit und Flächenpressung auf drei Faktorstufen variiert.

Die Andrückrolle weist nur geringe Unterschiede und Einflüsse der Einstellgrößen auf. Hierbei führen eine höhere Flächenpressung sowie höhere Schnittgeschwindigkeiten zu niedrigeren R_z -Werten. Höhere Schnittgeschwindigkeiten erzeugen eine Erhöhung der kinetischen Energie und somit eine Verbesserung der Spanbildung und einen erhöhten Materialabtrag. Durch den geringeren Anteil der Spanbildungsmechanismen Mikrofurchen und Pflügen nimmt die Entstehung von Materialaufwürfen ab, weshalb auch die Rauheit abnimmt.

Für das FFA lässt sich jedoch nur ein sehr geringer Einfluss der Schnittgeschwindigkeit erkennen. Dahingegen ist die gewählte Flächenpressung signifikant für das Bearbeitungsergebnis. Niedrige Flächenpressungen führen hierbei zu höheren Rauheiten, was auf einen geringeren Materialabtrag schließen lässt. Da das FFA bei gleicher Flächenpressung eine größere Kontaktfläche besitzt, ergibt sich in der Regel ein größerer Bereich an aktiven Schneiden. Aus den Messungen der Kontaktfläche mittels Druckmessfolie ist bekannt, dass die Verteilung des Drucks auf die Fläche beim

flexiblen Federstahl-Andrückelement weniger homogen ist. Insbesondere bei niedrigen Flächenpressungen konzentriert sich der homogene Druckbereich auf die Werkzeugmitte. Für die äußeren Bereiche verteilt sich der Werkzeugkontakt auf weniger Schneiden, sodass diese höheren Einzelkorbelastungen ausgesetzt sind. Auch ist die Korneindringtiefe tiefer liegender oder kleinerer Schneidkörner damit reduziert. Hieraus ergibt sich, dass die Spanbildung erschwert ist und die Materialabtragsmechanismen Mikrofurchen und Mikropflügen verstärkt auftreten können, wodurch aufgrund der Entstehung von Aufwürfen größere Rauheiten resultieren. Hieraus ergibt sich bei großen Werkzeug-Werkstück-Umschlingungen die Anforderung, höhere Flächenpressungen einzusetzen, um so geeignete Bearbeitungsergebnisse zu erzielen.

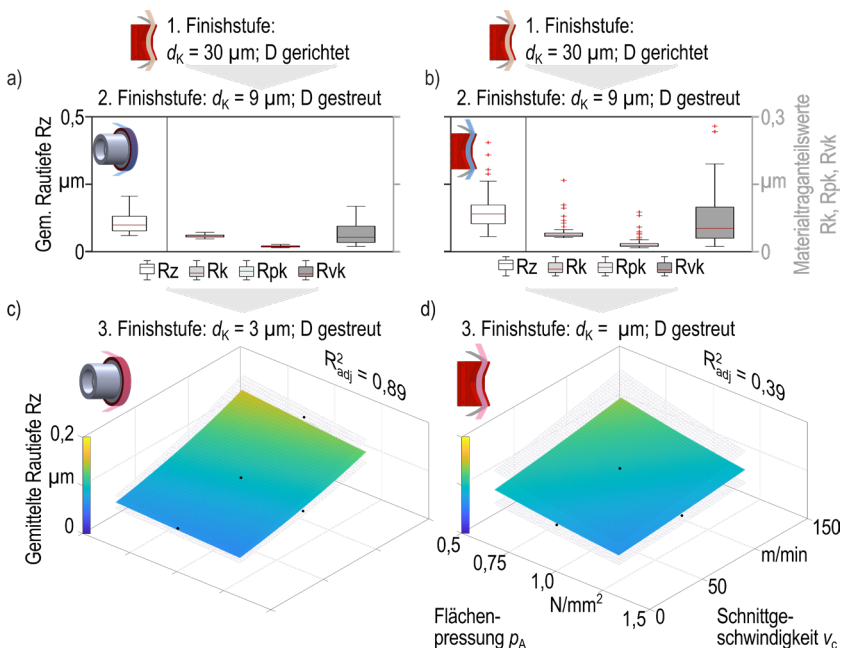


Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	Var.	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	9 μm
Härte:	58 ± 2 HRC	KSS-Strategie:	KSS ($V = 3,3 \text{ l/min}$)	Kornauftrag:	Gestreut
Osz.-Amplitude S:	$\pm 2 \text{ mm}$	Drehzahl n:	Var.	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	Var.	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 6-22: Regressionsmodell für die Versuchsdurchführung auf der zweiten Bearbeitungsstufe mit $d_K = 9 \mu\text{m}$ für den Einsatz a) der Andrückrolle und b) das FFA

Mit einer weiteren Reduzierung der eingesetzten Korngröße auf $d_K = 3 \mu\text{m}$ lässt sich eine dritte Prozessstufe zum Microfinishen anschließen. Abbildung 6-23 zeigt die Einflüsse der Flächenpressung und Schnittgeschwindigkeit auf der dritten Prozessstufe für unterschiedliche Andrückelemente und unter Berücksichtigung der vorherigen Oberflächentopographie. Hierbei wurde bereits auf der zweiten Bearbeitungsstufe das Andrückelement variiert. Nach der zweiten Prozessstufe weisen die mit FFA

bearbeiteten Oberflächen höhere Rauheitswerte mit größerer Streuung der Messwerte auf. Die Messwerte umfassen alle Versuchsabsätze, die in der dritten Prozessstufe gefinisht wurden. Die Bearbeitung mit FFA weist neben der größeren Kontaktfläche auch eine weniger gleichmäßige Druckverteilung auf. Insbesondere in Bereichen mit geringerem Druck können Schneidkörner zum Mikrofurchen und Mikropflügen neigen, sodass die Entstehung von Materialaufwürfen begünstigt wird.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	Var.	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d :	54 mm	Wz.-breite b_{Wz} :	12 mm	Korngröße d_K :	Var.
Härte:	58 $\pm$ 2 HRC	KSS-Strategie:	KSS ($\dot{V} = 3,3 \text{ l/min}$)	Kornauftrag:	Gestreut
Os.-Amplitude S :	$\pm 2 \text{ mm}$	Drehzahl n :	Var.	Bandvorschubgeschw. v_B :	0 mm/min
Os.-frequenz f_{os} :	Var.	Prozesszeit t :	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c :	Var.
Einstelldruck p_n :	Var.	Res. Andrückkraft F_{An} :	Var.	Res. Flächenpressung p_A :	Var.

Abbildung 6-23: Mehrstufige Microfinishbearbeitung bei Variation des Andrückelements – Ausgangszustand der Rauheit nach der zweiten Bearbeitungsstufe $d_K = 9 \mu\text{m}$ a) und b) sowie Regressionsmodelle c) und d) für die dritte Bearbeitungsstufe mit $d_K = 3 \mu\text{m}$ für Andrückrolle und FFA

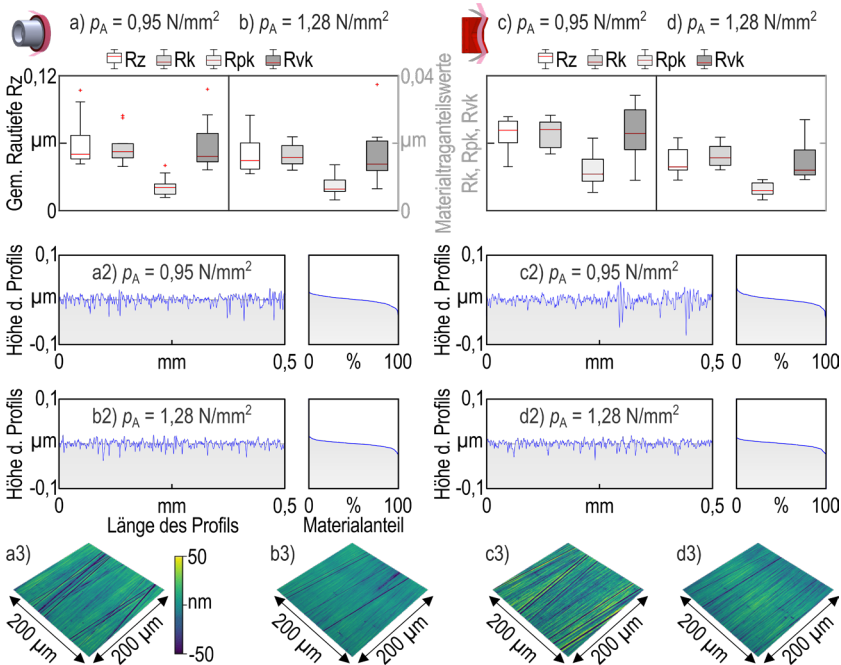
Im Gegensatz dazu weist die Oberfläche, die in der zweiten Bearbeitungsstufe mit Andrückrolle bearbeitet wurde, geringere Rauheitswerte und nur eine geringe Streuung auf. Der homogenere Flächenkontakt bewirkt hierbei somit eine bessere und gleichmäßigere Bearbeitung der Oberfläche. Anhand der Materialtraganteilskenngößen lässt sich hier die Oberflächentopographie genauer beschreiben. Die im Vergleich zur Kernrautiefe R_k und reduzierten Spitzenhöhe R_{pk} hohen Werte für die reduzierte Riefentiefe beschreiben eine Oberfläche mit Plateau-Struktur.

Im Gegensatz zur zweiten Prozessstufe ist der Einfluss der Flächenpressung weniger signifikant, wohingegen der Einfluss der Schnittgeschwindigkeit insbesondere für den Einsatz der Andrückrolle steigt. Entgegen der vorherigen Beobachtung werden auf dieser Prozessstufe mit geringeren Schnittgeschwindigkeiten niedrigere R_z -Werte erzielt. Die Steigerung der Schnittgeschwindigkeit erzeugt grundsätzlich eine höhere Belastung des Finishbandes. In Kombination mit der höheren Oszillationsfrequenz und damit einer Zunahme an Überläufen an der Werkstückkante wird das Finishband höher beansprucht. Ohne Einsatz eines stetigen Bandvorschubs wird eine Überlastung des Finishbandes durch Zusetzungen oder dem abrasiven Verschleiß, in Form von Kornausbrüchen bis hin zum Abtrag der Bindung vom Grundträger, begünstigt. Daher werden hohe Schnittgeschwindigkeiten ohne Einsatz konstanter Bandvorschübe als ungeeignet angesehen. Die Erhöhung der Flächenpressung dagegen erzeugt eine höhere Belastung der Rauheitsspitzen, womit diese leichter abgetragen werden können oder bereits durch den initialen Werkzeug-Werkstück-Kontakt brechen können. Gleichzeitig nimmt mit der Erhöhung der Flächenpressung die Anzahl aktiver Schneiden zu, sodass eine größere Schneidenraumüberdeckung vorliegt.

Grundsätzlich führt die weitere Reduktion der Korngröße für die dritte Prozessstufe auf $d_K = 3 \mu\text{m}$ zu einer zusätzlichen Abnahme der Materialabtragsrate. Bei kleinen Korngrößen liegen entsprechend kleinere Korneindringtiefen und damit geringe Spannungsdicken vor. Der Effekt bei der Bearbeitung mit den Korngrößen $d_K = 9$ bzw. $3 \mu\text{m}$ entspricht daher einem Feinstschleifen oder Läppen. Die Reduzierung der Oberflächenrauheit resultiert dabei weniger aus einem Abtrag der vorherigen Oberfläche, sondern basiert vielmehr auf dem Abtrag vorhandener Rauheitsspitzen. Dies bedeutet auch, dass die Materialabtragsmechanismen Mikrospanen, Mikrospflügen und Mikrofurchen weniger stark auftreten und die Oberflächenzerrüttung tendenziell mehr Anteil am Materialabtrag hat.

Wie bereits an den R_z -Werten dargestellt, entstehen durch die dreistufige Bearbeitung Oberflächen mit geringer Rauheit. Für beide Andrückelemente sind hierzu die finalen Oberflächentopographien zweier Versuchspunkte in Abbildung 6-24 dargestellt. Die Betrachtung der Materialtraganteilskenngößen verdeutlicht, dass mit

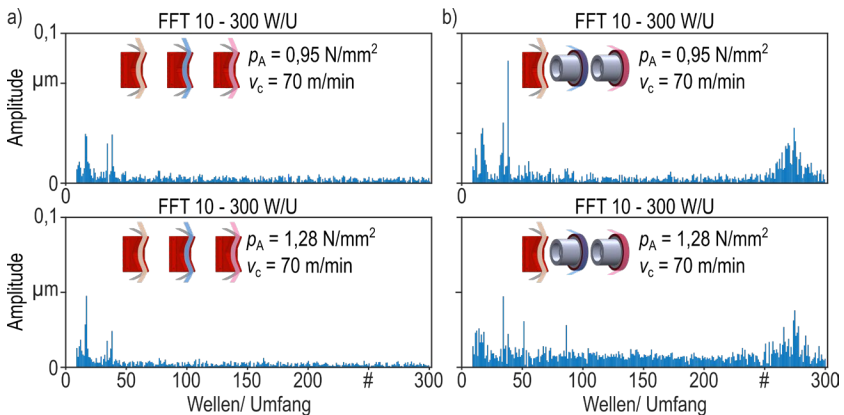
höherem Materialabtrag auch die Riefentiefe reduziert wird, sodass eine vorherige Plateau-Struktur abgetragen wird und eine verhältnismäßig ebene Oberfläche ohne signifikante Spitzen und Riefen resultiert. Die zugehörigen Darstellungen der 3D-Topographien weisen vereinzelt tiefe Riefen auf. Aufgrund der gleichmäßigen Ausprägung und der Orientierung auf der Oberfläche lassen sich diese der Microfinishbearbeitung der vorherigen Bearbeitungsstufen zuordnen.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	Var.	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 µm
Härte:	58 ±2 HRC	KSS-Strategie:	KSS ($V=3,3$ l/min)	Kornauftrag:	Gerichtet
Ösz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	410 1/min	Bandvorschubgeschw. v_B:	0 mm/min
Ösz.-frequenz $f_{\text{Ös}}$:	10,5 Hz	Prozesszeit t:	Var.	Res. Schnittgeschw. v_c:	70 m/min
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 6-24: Darstellung der Oberflächentopographie anhand der gemittelten Rautiefe sowie den Materialtraganteilskenngößen a-d) sowie zugehörige Rauheitsprofile und Abbott-Kurven a2-d2) und die 3D-Topographie a3-d3) nach der dritten Bearbeitungsstufe unter Einsatz einer Andrückrolle a,b) sowie des FFA c,d)

Neben der Oberflächentopographie beeinflusst die mehrstufige Bearbeitung auch die Reduktion der radialen Welligkeiten, wie Abbildung 6-25 zeigt. Hier sind die Amplituden für das Spektrum von 10 bis 300 Wellen pro Umfang mittels FFT dargestellt. Neben den Andrückelementen, die auf der zweiten und dritten Prozessstufe variiert wurden, sind unterschiedliche Flächenpressungen für die Bearbeitung in der dritten Prozessstufe berücksichtigt. Die Darstellung verdeutlicht, dass tendenziell mit höherer Flächenpressung geringere radiale Welligkeiten auftreten. Besonders deutlich wird dies im Spektrum von etwa 40 Wellen pro Umfang, in dem die Amplitudenwerte für die Flächenpressung von $p_A = 1,28 \text{ N/mm}^2$ deutlich geringer ausfallen als für die Bearbeitung mit $p_A = 0,95 \text{ N/mm}^2$. In diesem Spektrum ist der Einfluss der Flächenpressung unabhängig vom Andrückelement analog.



Werkstoff (Härte):	16MnCr5 (58 ±2 HRC)	Andrückelement:	Var.	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μm
Breite Versuchsabsatz b_W:	13 mm	KSS-Strategie:	MMS	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	410 m/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	10,5 Hz	Prozesszeit t:	10 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	Var.
Einstelldruck p_n:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 6-25: FFT der radialen Welligkeit nach drei Prozessstufen unter Berücksichtigung der Flächenpressung für den Einsatz a) des FFA auf allen Prozessstufen und b) einer Kombination des FFA (1. Prozessstufe) mit dem Einsatz einer Andrückrolle (2. und 3. Prozessstufe)

Bei Betrachtung der Umfangswelligkeiten mit höheren Frequenzen zeigt sich jedoch ein ungleichmäßiges Bild für die Andrückelemente. Während bei Bearbeitung mit FFA auch hier bei höherer Flächenpressung geringere Wellenamplituden resultieren, sind diese bei der Andrückrolle größer. Dieser Effekt kann möglicherweise mit Bandverschleiß oder einer höheren Ausgangswelligkeit in Umfangsrichtung

korrelieren. Es lässt sich jedoch nicht eindeutig festhalten, ob dies einen wiederkehrenden Effekt oder möglicherweise eine Prozessunregelmäßigkeit darstellt. Im Gegensatz dazu zeigt sich jedoch im Vergleich der Andrückelemente eine deutliche Reduzierung der hochfrequenten Wellenamplituden durch den Einsatz des FFA im Gegensatz zur Andrückrolle. Dies ist deckungsgleich mit den bereits betrachteten FFT-Analysen nach einstufiger Bearbeitung, die in Abbildung 6-21 gezeigt sind. Verglichen mit diesen radialen Welligkeiten sind die hier dargestellten Amplituden noch einmal geringer, was eine zusätzliche Abnahme über die nachfolgenden Prozessstufen bedeutet.

6.5 Microfinishbearbeitung zur Reduktion von Schallemissionen

Durch die Reduktion der Oberflächenrauheit und Erzeugung tribologisch geeigneter Topographien für Gleit-Reibkontakte eignet sich das Microfinishen zur Fertigung von Lagerbauteilen und Lagerstellen an Antriebswellen. Ein weiterer Vorteil des Verfahrens ist die bereits vorgestellte Reduzierung radialer Welligkeiten aufgrund der besonderen Kontaktsituation in Form des Flächenkontakts mit verhältnismäßig großer Werkzeug-Werkstück-Umschlingung. Im Rahmen von Analogieversuchen, die bei der Firma Nagel Technologies durchgeführt werden konnten, wurde der Einfluss geschliffener und microgefinishter Oberflächen mit entsprechend typischen radialen Welligkeiten auf das mögliche Einsatzverhalten untersucht. Hierzu wurde die bearbeitete Versuchsprobe zwischen Spitzen gespannt und bei Rotation mit einem Gegenkörper in Kontakt gebracht. Die Normalkraft beim Andrücken des Gegenkörpers betrug $F_n = 80 \text{ N}$ und wurde über ein Finish-Anbaugerät aufgebracht. Abbildung 6-26 Teil b) zeigt hierzu den Aufbau des Analogieversuchs.

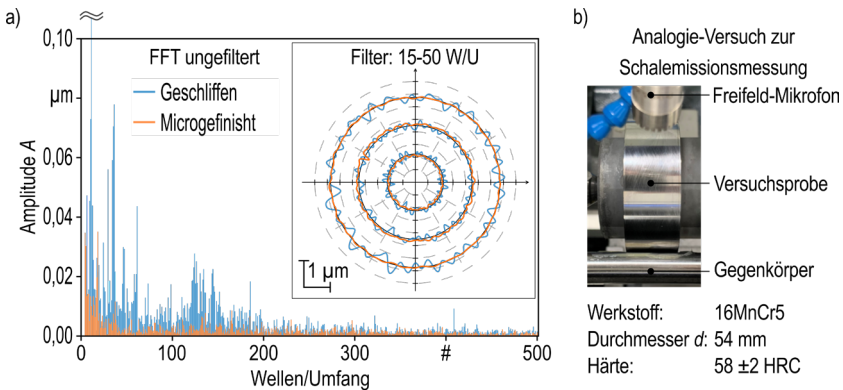


Abbildung 6-26: FFT-Darstellung der radialen Welligkeiten a) und Aufbau des Analogieversuchs b) zur Untersuchung des Einflusses auf die Schallemissionen; angelehnt an [BTB21]

Des Weiteren sind in Abbildung 6-26 a) die radialen Welligkeiten zweier exemplarischer Bauteile gegenübergestellt. Hierbei sind die Wellen pro Umfang für eine geschliffene und eine microgefinishte Oberfläche mittels Fast-Fourier-Transformation aufgetragen. Die geschliffene Oberfläche weist hierbei deutlich größere Amplitudenwerte auf. Besonders prägnant im Vergleich sind, unter den größeren Wellenzahlen, die hohe Amplitude bei ca. 60 Wellen pro Umfang und das Spektrum von 120 bis 130 Wellen pro Umfang. Der Einfluss insbesondere der radialen Welligkeiten auf das Einsatzverhalten ist in Abbildung 6-27 dargestellt. Neben der Darstellung des messtechnisch erfassten Schalldruckpegels sind die Spektrogramme der gemessenen Frequenzen dargestellt.

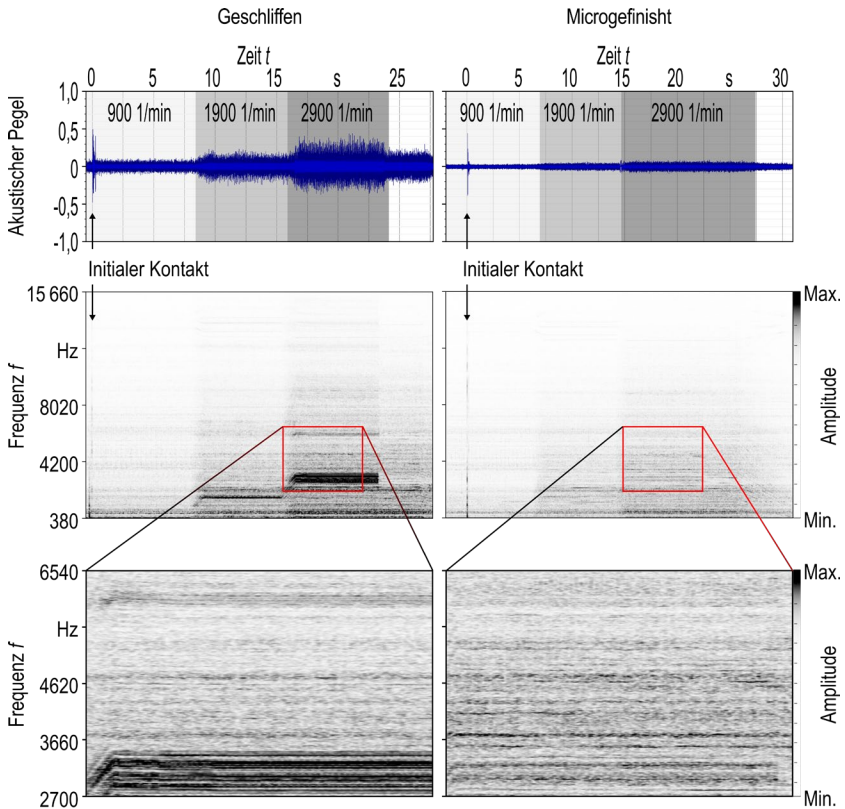


Abbildung 6-27: Schalldruckmessung und Frequenzbandanalyse für den Analogieversuch mit geschliffenem und microgefinishtem Bauteil bei stufenweiser Erhöhung der Drehzahl; angelehnt an [BTB21]

Innerhalb des Analogieversuchs wurde die Drehzahl in mehreren Stufen variiert, um die Abhängigkeit der auftretenden Signale von den Drehzahlen und der vorliegenden radialen Welligkeit zu verdeutlichen. Durch die höhere radiale Welligkeit werden Schwingungen in der Kontaktzone induziert, die sich über die Schalldruckmessung erfassen lassen. Die stärkere Ausprägung des Schalldrucks für die geschliffene Oberfläche verdeutlicht hier bereits die Abhängigkeit. Die Spektralanalyse der geschliffenen Oberfläche weist insbesondere bei der höchsten Drehzahl von $n = 2900$ 1/min signifikante Frequenzbänder auf. Das prägnanteste mit maximaler Ausprägung liegt hier im Bereich von $f = 2700$ bis ca. 3500 Hz. Etwas weniger stark ausgeprägt sind die Frequenzbereiche zwischen 5600 und 6300 Hz.

Die genannten auffälligen Frequenzbereiche stehen im direkten Zusammenhang mit den radialen Welligkeiten des geschliffenen Bauteils. Bei Multiplikation der Wellenzahl mit der Drehzahl pro Sekunde ergibt sich die Frequenz der Wellenkontakte am stehenden Gegenkörper. Diese Berechnung ergibt für die entsprechenden Wellenzahlen von 60 bzw. 130 W/U, unter Berücksichtigung der Drehzahl von $n = 2900$ 1/min Frequenzen von $f = 2900$ Hz (für 60 W/U) und $f = 5800$ bis 6300 Hz (für 120 - 130 W/U).

Die Schallemissionen im Analogieversuch verdeutlichen die Zusammenhänge zwischen dem auftretenden Frequenzspektrum und der vorliegenden radialen Welligkeit des Bauteils. Das Frequenzspektrum wiederum steht in direktem Zusammenhang mit der Geräuschentwicklung, weshalb das Microfinishen zur Optimierung der NVH-Eigenschaften rotationssymmetrischer Bauteile geeignet ist. Die im Analogieversuch für das geschliffene Bauteil auffälligen Frequenzspektren sind beim microgefinishten Bauteil deutlich geringer ausgeprägt, da die Amplituden dieser Wellen nach dem Microfinishen deutlich kleiner sind.

7 Herstellung technischer Funktionsflächen durch angepasste flexible Federstahl-Andrückelemente

Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen Prozesskinematik und resultierender Formgenauigkeit in Bezug auf die axiale Kontur ergeben sich Herausforderungen für den Microfinishprozess als letzten Bearbeitungsschritt bei der Konditionierung rotationssymmetrischer Funktionsflächen. Hierzu gibt es in der industriellen Anwendung verschiedene Ansätze zur Erreichung der Anforderungen an die axiale Kontur. Diese sind der Einsatz gradiertter Andrückrollen mit axial variierender Rollenhärte oder einer entsprechenden Profilierung sowie der Einsatz von Finishbändern mit Bereichen ohne Kornbelegung [Sch19]. Beide Ansätze führen jedoch zu einer reduzierten Werkzeug-Werkstück-Umschlingung. Ein weiterer, bisher weniger verbreiteter Lösungsansatz ist die Anpassung des FFA. Dies wird als zielführend betrachtet, da die größere Kontaktlänge gleichzeitig die Homogenität der Oberfläche sowie die Reduzierung der radialen Welligkeiten positiv beeinflusst. Die Anpassung des FFA beschreibt im Rahmen dieser Arbeit eine mittig eingebrachte Aussparung des Federstahls, welcher als Andrückelement dient. Für die bereits in *Kapitel 4.3.2* vorgestellten, angepassten FFA ergeben sich veränderte Kontaktbedingungen. Im Bereich der Aussparungen liegen in der Theorie nur wenig kleine Kontaktflächen vor, wohingegen in den Randbereichen größere und homogenere Kontaktflächen vorliegen. Ziel dieser Verteilung der Flächenpressung ist die Beeinflussung des Bearbeitungsergebnisses mit Fokus auf die axiale Kontur des Werkstückes beim Microfinishen mit Bandwerkzeug.

Abbildung 7-1 zeigt schematisch den Werkzeugkontakt auf den Wellenabsätzen für unterschiedliche Andrückkräfte sowie die resultierende Kontaktlänge aufgrund der Werkzeug-Werkstück-Umschlingung und eine Gegenüberstellung der resultierenden Kontaktflächen im mittleren sowie im Randbereich der angepassten FFA. Für die Gegenüberstellung der Kontaktfläche wurde diese in vier Bereichen ermittelt. Jeder Bereich ist hierbei 3 mm breit. Für niedrige Andrückkräfte ergibt sich bei der größeren Aussparung aufgrund der geringeren Steifigkeit eine größere Kontaktlänge aufgrund der Verformung des Federstahlbands. Mit zunehmender Andrückkraft nehmen die Unterschiede ab und die Kontaktlänge folgt einem degressiven Trend.

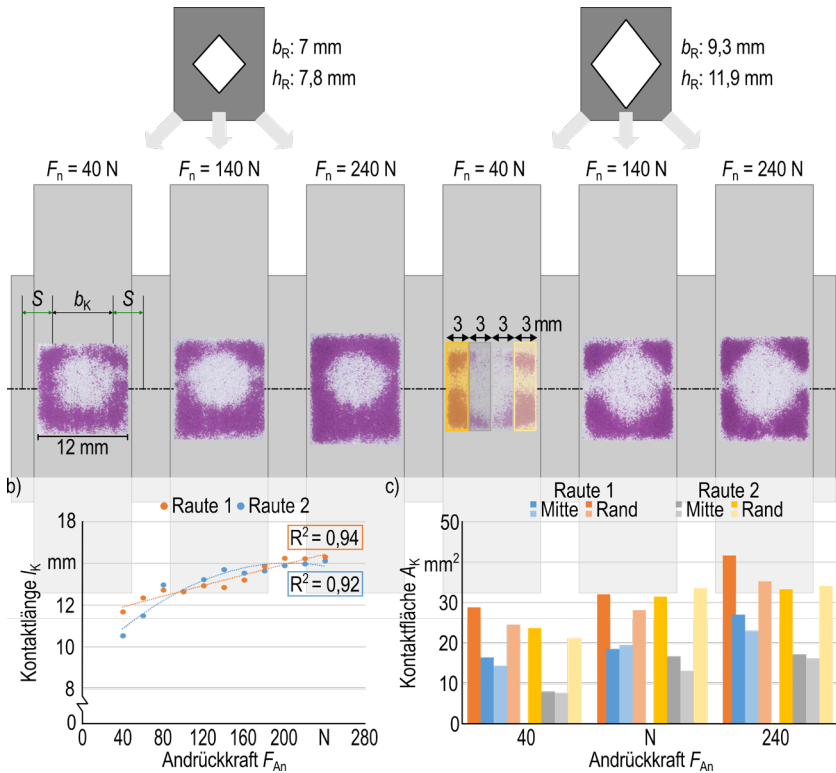


Abbildung 7-1: Werkzeugkontakt für angepasste FFA – a) Schematische Darstellung inkl. Flächenmessung, b) resultierende Kontaktlänge und c) Gegenüberstellung der Kontaktflächen A_K in der Werkzeugmitte und -rand

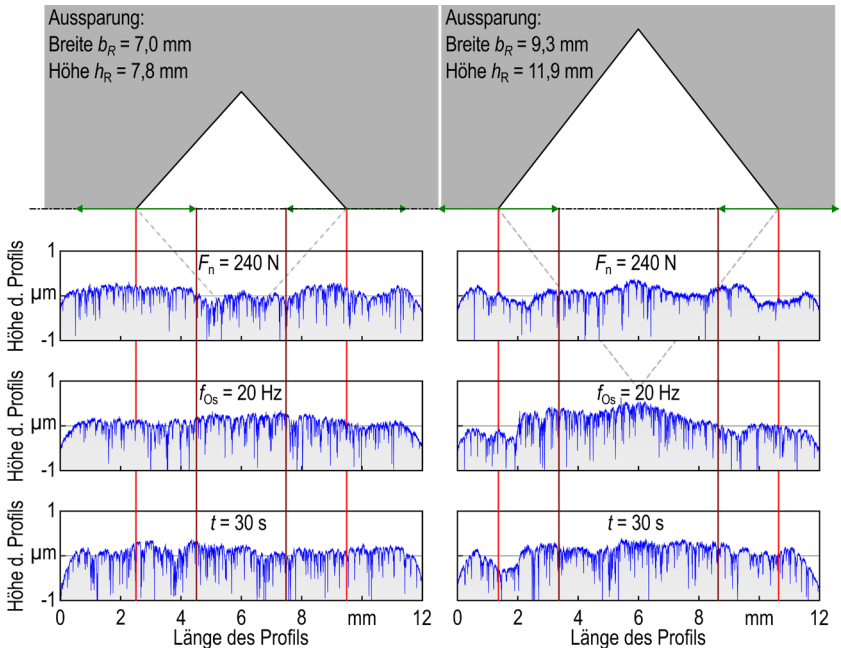
Im Gegensatz zum FFA ohne Aussparung (vgl. Abbildung 5-4) sind die Kontaktlängen jedoch geringer. Möglicherweise führt die Einbringung der Aussparungen mittels Laserstrahlschneiden zu einer thermischen Beeinflussung des Federstahls, die wiederum das elastische Verformungsvermögen des Federstahls reduziert. Hierbei könnte die lokal hohe Wärmeeinbringung zu Veränderung der Eigenspannungszustände führen, die die Reduktion des elastischen Verformungsvermögens begründen würden. In diesem Falle ergibt sich hieraus eine geringere Kontaktlänge, sodass der Effekt der Aussparung im Kontaktbereich verstärkt wird. Mit einer größeren Kontaktlänge würde eine noch größere Kontaktfläche im Mittenbereich des Werkzeugs vorliegen. Dieser Zusammenhang ist auch in der Betrachtung der Kontaktflächen zu erkennen, in dem für die höchste Andrückkraft eine größere

Kontaktfläche in der Mitte vorliegt. Aufgrund der zunehmenden Werkzeug-Werkstück-Umschlingung resultiert hierbei die größere Kontaktfläche, wie dies auch im schematischen Bild des Werkzeugkontaktes für Raute 1 bei $F_{An} = 240 \text{ N}$ zu sehen ist. Für die größere rautenförmige Aussparung ergeben sich im Gegensatz dazu geringe Unterschiede in der Verteilung der Kontaktfläche. Die geringen Unterschiede zwischen den beiden äußeren Bereichen des Werkzeugkontaktes lassen sich auf eine Abweichung von der parallelen Ausrichtung zwischen Welle und Werkzeug bzw. Finish-Anbaugerät zurückführen.

7.1 Beeinflussung der axialen Kontur durch angepasste FFA

Wie bereits für das FFA und die Andrückrolle dargestellt, ergibt sich bei der Microfinishbearbeitung mit Band eine ungleichmäßige Verteilung des Materialabtrags, die in der Regel zu konkav ausgeprägten Konturen im Bearbeitungsbereich führt. Dieses Profil ist für viele typische Funktionsflächen wie bspw. Lagerflächen, die mittels Microfinishes hergestellt werden, zu vermeiden. Die Anwendung des angepassten FFA ist darauf ausgelegt, durch die veränderte Verteilung der Kontaktfläche den Materialabtrag im Randbereich der Bearbeitung in Relation zur Mitte zu erhöhen und so die entstehende axiale Kontur zielgerichtet zu beeinflussen. Der Einfluss der angepassten FFA auf die entstehende axiale Kontur wird im Folgenden genauer untersucht und hinsichtlich der Wechselwirkungen mit unterschiedlichen Prozessparametern analysiert.

Aus der veränderten Verteilung der Kontaktfläche ergibt sich die Einflussnahme auf den Bearbeitungsprozess und das Bearbeitungsergebnis. Abbildung 7-2 zeigt hierzu die ungefilterten Profile gefinishter Absätze über eine Länge von 12 mm. Hierbei kann ein Einfluss der Aussparung detektiert werden, der zu einer deutlichen Veränderung des Profils unabhängig der Prozessparameter führt. Für die kleinere rautenförmige Aussparung (7*7,8 mm) kann der äußere Profilabfall als signifikant bezeichnet werden. Im Vergleich fällt dieser bei längerer Bearbeitungsdauer sowie eine größere Oszillationsfrequenz größer aus. Im Gegensatz dazu zeigen sich bei Bearbeitung mit dem angepassten flexiblen Federstahl-Andrückelement mit größerer Aussparung (9,3*11,9 mm) starke Profiländerungen im Übergang von Mitte zum Rand. Eingezeichnet sind als Hilfslinien die Oszillationsgrenzen bezogen auf die äußere Kante der Aussparung.



Werkstoff (Härte):	16MnCr5 (58 ±2 HRC)	Andrückelement:	Var.	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μm
Breite Versuchsabsatz b_V:	13 mm	KSS-Strategie:	MMS	Kornauftrag:	Gerichtet
Weitere Prozessparameter:					
Osz.-Amplitude S:	±2 mm	Drehzahl n:	586 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	15	Prozesszeit t:	20 s	Res. Schnittgeschw. v_C:	100 m/min
Einstelldruck p_n:	3,5 bar	Res. Andrückkraft F_{An}:	140 N	Res. Flächenpressung p_A:	1,12 N/mm ²

Abbildung 7-2: Ungefilterte Rauheitsprofile der Bearbeitung mit angepasstem FFA mit a) 7*7,8 mm und b) 9,3*11,9 mm Aussparung

Ausgehend von den äußeren Kanten ergibt sich hier für die Profile ein Abfallen und dann im mittleren Bereich ein Anstieg der Profilhöhe. Der Übergang hierzu liegt hierbei innerhalb des Oszillationsbereichs. Für höhere Oszillationsfrequenzen und insbesondere für eine längere Prozesszeit nimmt dieser Effekt zu. Erklärt werden kann der Effekt mit dem Einfluss der verteilten Flächenpressung und einem stärkeren Materialabtrag am Randbereich. Zwar weist der Mittenbereich des Werkzeugs weiterhin eine verhältnismäßig große Kontaktfläche auf, jedoch bewirkt die Oszillation, dass es zu einem partiellen Eingriff des Werkzeugs kommt. Hierbei liegt nur ein Teil des Werkzeugs auf dem Werkstück auf und die Andrückkraft wirkt auf eine kleinere

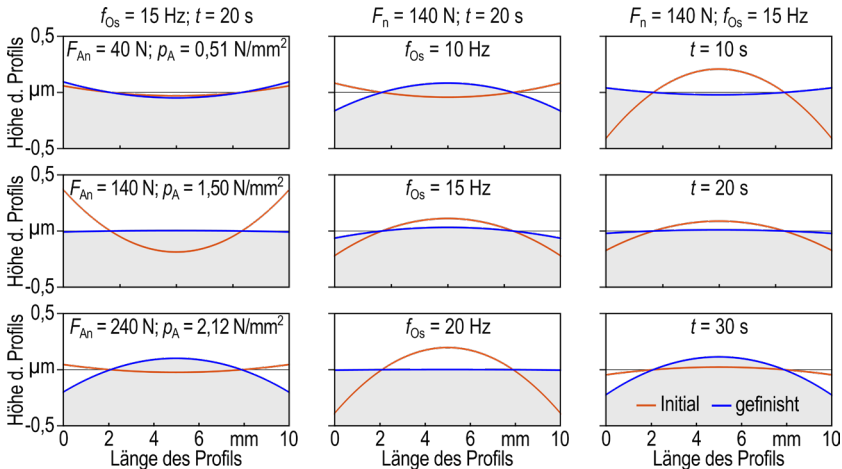
Fläche, sodass die Flächenpressung höher ist. Hierbei kommt es vermutlich, durch den Werkzeugrandbereich, der vollständig auf dem Werkstück aufliegt, zu höheren Materialabträgen im Randbereich des Werkstücks.

Tendenziell lässt sich von den dargestellten ungefilterten Profilen auf die Entstehung konvexer Konturen, aufgrund der Microfinishbearbeitung mit ausgearbeitetem FFA, schließen. Um die Bearbeitung hinsichtlich der Ergebnisse genauer zu analysieren, werden Konturmessungen zur Analyse genutzt. Hierbei wird explizit die resultierende Kontur betrachtet und in Relation zu Prozessparametern und Aussparung des FFA analysiert.

7.1.1 Einfluss der Aussparung

Die Verteilung der Flächenpressung über das Finishband hat, wie bereits vorgestellt, einen erheblichen Einfluss auf das Bearbeitungsergebnis. Um diesen Effekt gezielt nutzen zu können, sind die beschriebenen Aussparungen im flexiblen Federstahl-Andrückelement eingebracht worden. Durch die gleichmäßigere Verteilung der Kontaktflächen über die Summe an Mikrokontakten im mittleren sowie im Randbereich des Werkzeugs, ist theoretisch auch ein vergleichbares Verhältnis aktiver Schneiden vorhanden. Durch die im Verhältnis gestiegene Anzahl aktiver Schneiden im Randbereich des Finishwerkzeugs gegenüber dem mittleren Bereich lässt sich der Materialabtrag im Randbereich in Relation zur Mitte theoretisch steigern. Hieraus abgeleitet sollten Konturen mit hoher Geradheit oder sogar konvexer Ausprägung entstehen. Die Analyse der entstehenden axialen Konturen unter Einsatz der angepassten FFA mit Rautenausparung bestätigen diese Annahme grundsätzlich. Abbildung 7-3 zeigt hierfür die Gegenüberstellung je eines initialen Profils zu einem Profil nach der Bearbeitung unter Einsatz des FFA mit einer rautenförmigen Aussparung der Maße $7 \times 7,8 \text{ mm}$ ($b_{\text{RF}} \times h_{\text{RF}}$).

Durch die Bearbeitung mit dem angepassten flexiblen Federstahl-Andrückelement wird in nahezu allen Fällen eine Kontur mit nach oben gewölbtem (konvexem) Profil erzeugt. Die entsprechenden Ausprägungen sind jedoch sehr gering und bewegen sich im Submikrometerbereich. Für eine geringe Normalkraft $F_n = 40 \text{ N}$ wird der erzielte Materialabtrag als zu gering eingeschätzt, um eine entsprechende Veränderung der axialen Kontur zu erzeugen. Dahingegen findet mit Erhöhung der Andrückkraft F_{An} eine Zunahme der Konvexität statt. Bei Betrachtung der Oszillationsfrequenz zeichnet sich eine Erhöhung der konvexen Profilhöhe bei geringen Oszillationsfrequenzen ab. Mit Zunahme der Prozesszeit hingegen ergibt sich eine Steigerung der Konvexität. Mit fortlaufender Prozesszeit wird der Materialabtrag sukzessive höher, und der Effekt wird verstärkt.



Werkstoff (Härte):	16MnCr5 (58 $\pm$ 2 HRC)	Andrückelement:	FFA-R1	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Korngröße d_K:	30 μm
Breite Versuchsabsatz b_W:	13 mm	KSS-Strategie:	MMS	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	$\pm 2 \text{ mm}$	Drehzahl n:	525 m/min	Bandvorschubgeschw. v_B:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{os}:	Var.	Prozesszeit t:	Var.	Res. Schnittgeschw. v_c:	$\sim 90 \text{ m/min}$
Einstelldruck p_{in}:	Var.	Res. Andrückkraft F_{An}:	Var.	Res. Flächenpressung p_A:	Var.

Abbildung 7-3: Resultierende Konturen in Abhängigkeit von den Prozessparametern Normalkraft F_n , Oszillationsfrequenz f_{os} und Prozesszeit t bei Einsatz des FFA mit rauteenförmiger Aussparung R1 (7*7,8 mm)

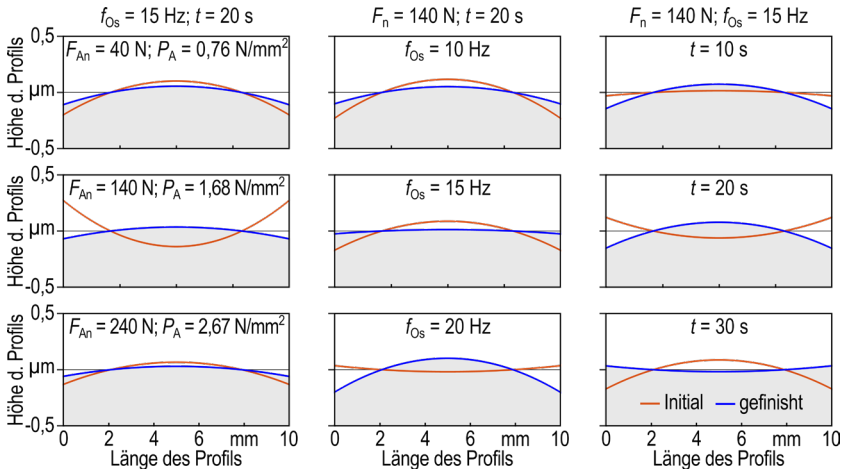
Gleichzeitig ist für die verhältnismäßig kleinen Profilhöhen von einem Einfluss der initialen Kontur auszugehen. Initial konvex ausgeprägte Konturen können zusätzliche Mikrokontakte oder lokal höhere Flächenpressungen im mittleren Bereich begünstigen, wodurch in diesen Bereichen ein höherer Materialabtrag stattfindet. Dies führt zu einer insgesamt geringeren Konvexität zu Prozessende. Für initial konkave Konturen mit vergleichsweise großer Ausprägung wiederum ist der erforderliche Materialabtrag zur Erzeugung einer konvexen Kontur relativ hoch. Bei Betrachtung des Versuchs mit $F_{An} = 140 \text{ N}$ ist zu erkennen, dass für diesen Ausgangszustand nur eine geringe Konvexität erreicht werden kann.

Die Kontaktlänge von ca. $l_K = 12$ bis 16 mm, die sich für das FFA mit kleiner Aussparung ergibt, ist im Verhältnis zur Höhe $h_{RF} = 7,8 \text{ mm}$ der rauteenförmigen Aussparung, deutlich größer. Hieraus ergibt sich, dass auch im mittleren Bereich des Werkzeugs ein stetiger Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück vorliegt und insbesondere bei höherer Andrückkraft die Kontaktfläche in der Mitte größer ist als die

Kontaktfläche im Randbereich des Werkzeugs. Daher ist der Materialabtrag in der Mitte weiterhin relativ hoch im Vergleich zum Randbereich. Damit ist die Herstellung konvexer Konturen nur eingeschränkt möglich, und es resultieren Konturen mit sehr kleiner Konvexität.

Für das angepasste FFA mit größerer rautenförmiger Aussparung (9,3*11,9 mm) ist der Einfluss auf die axiale Kontur stärker ausgeprägt. In Abbildung 7-4 lässt sich erkennen, dass mit größerer Aussparung konvexe Konturen mit höherer Profilhöhe erzeugt werden können. Hierbei werden mit Ausnahme des Versuchs mit einer Prozesszeit von $t = 30$ s konvexe Profile erzeugt, die sich jedoch in ihrer Ausprägung durchaus unterscheiden, was auf Prozesswechselwirkungen zurückzuführen ist. Auffällig ist bei der Betrachtung der geringe Einfluss der Andrückkraft F_{An} . Unabhängig von der Einstellung ergeben sich konvexe Profile ähnlicher Ausprägung. Im Gegensatz zur Bearbeitung mit kleiner rautenförmiger Aussparung ist jedoch auch der Einfluss der initialen Kontur geringer. Die Verteilung der Flächenpressung auf Mitten- und Randbereich ist, wie bereits in Abbildung 7-1 für die Aussparung mit 9,3*11,9 mm dargestellt, über den gesamten Bereich der betrachteten Andrückkräfte von $F_{An} = 40$ bis 240 N nahezu gleichmäßig. Hieraus lässt sich der geringe Einfluss der Flächenpressung auf die Beeinflussung der axialen Kontur ableiten. Dass, im Gegensatz zum angepassten FFA mit kleiner Aussparung, bereits für geringe Andrückkräfte eine konvexe Kontur entsteht, folgt aus der höheren Flächenpressung. Diese ergibt sich aufgrund der insgesamt kleineren Kontaktfläche durch die große Aussparung von 9,3*11,9 mm im angepassten flexiblen Federstahl-Andrückelement.

Unabhängig von der gewählten Aussparung bleibt jedoch der Einfluss initial konvexer Konturen. Durch die anzunehmende Steigerung der Mikrokontakte im Mittenbereich durch diese Form kommt es hier zum stärkeren Abtrag. Das Resultat ist eine Verringerung der Konvexität durch die Microfinishbearbeitung. Verglichen mit der kleineren Aussparung fällt diese Abnahme der Konvexität jedoch geringer aus. Dieser Einfluss der initialen Kontur lässt sich auch in den drei identischen Versuchen erkennen, in denen die initial konvexe Kontur die geringste Konvexität nach der Bearbeitung aufweist, während die initial konkave mit geringer Ausprägung die höchste Konvexität erzeugt.



Werkstoff (Härte): 16MnCr5 (58 ±2 HRC)		Andrückelement: FFA-R2	Abrasivkorn: D
Durchmesser d: 54 mm		Wz.-breite b_{Wz}: 12 mm	Korngröße d_K: 30 µm
Breite Versuchsabsatz b_W: 13 mm		KSS-Strategie: MMS	Kornauftrag: Gerichtet
Os.-Amplitude S: ±2 mm	Drehzahl n: 525 m/min	Bandvorschubgeschw. v_B: 0 mm/min	
Os.-frequenz f_{Os}: Var.	Prozesszeit t: Var.	Res. Schnittgeschw. v_c: ~90 m/min	
Einstelldruck p_{in}: Var.	Res. Andrückkraft F_{An}: Var.	Res. Flächenpressung p_A: Var.	

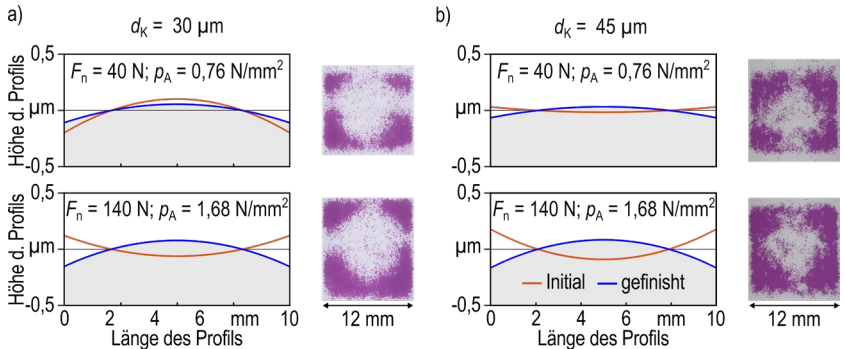
Abbildung 7-4: Resultierende Konturen in Abhängigkeit von den Prozessparametern Normalkraft F_n , Oszillationsfrequenz f_{os} und Prozesszeit t bei Einsatz des FFA mit rautenförmiger Aussparung R2 (9,3*11,9 mm)

Für die Betrachtung der Prozesszeit ergibt sich bei $t = 30 \text{ s}$ die einzige konkave Kontur nach der Bearbeitung. Neben der Beeinflussung der initialen Kontur, die zu tendenziell höherem Materialabtrag in der Mitte führt, begünstigt die vergleichsweise lange Prozesszeit in Kombination mit der verhältnismäßig hohen Flächenpressung den Werkzeugverschleiß. Durch die Werkzeugoszillation und die erhöhte Belastung des Finishbandes im Randbereich beim Überlaufen der Werkstückkante ist der Werkzeugverschleiß hier meist höher [Goe16]. Durch den Verschleiß des Werkzeugs in Form von Zusetzungen, wird der weitere Materialabtrag erschwert. Da die Zusetzungen insbesondere im Randbereich des Werkzeugs auftreten, wird vor allem an den Bauteilkanten im weiteren Prozessverlauf weniger Material abgetragen. Somit wird der eigentliche Effekt des angepassten FFA über die lange Prozesszeit nivelliert.

7.1.2 Einfluss der Korngröße

Zur Steigerung der Effekte bei der Bearbeitung mit ausgespartem FFA wurden zusätzliche Versuche unter Einsatz eines Finishbandes mit Korngröße $d_K = 45 \text{ µm}$

durchgeführt. Grundsätzlich lässt sich erwarten, dass durch eine Steigerung des Materialabtrags der Effekt des angepassten FFA stärker ist. Die resultierenden axialen Konturen für die Bearbeitung mit den unterschiedlichen Korngrößen, die in Abbildung 7-5 gegenübergestellt sind, weisen allerdings keine signifikante Erhöhung der Konvexität auf.



Werkstoff (Härte): 16MnCr5 (58 ±2 HRC)	Andrückelement: FFA-R2	Abrasivkorn: D
Durchmesser d: 54 mm	Wz.-breite b_{Wz}: 12 mm	Korngröße d_K: Var.
Breite Versuchsabsatz b_W: 13 mm	KSS-Strategie: MMS	Kornauftrag: Gerichtet
Osz.-Amplitude S: ±2 mm	Drehzahl n: 525 m/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}: 0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}: 15 Hz	Prozesszeit t: 20 s	Res. Schnittgeschw. v_c: ~90 m/min
Einstelldruck p_m: Var.	Res. Andrückkraft F_{An}: Var.	Res. Flächenpressung p_A: Var.

Abbildung 7-5: Einfluss auf die axiale Kontur beim Microfinishen mit angepasstem FFA (9,3*11,9 mm) unter Variation der Flächenpressung und für die unterschiedlichen Korngrößen a) $d_K = 30 \mu\text{m}$ sowie b) $d_K = 45 \mu\text{m}$

Wie bei der Bearbeitung mit der Korngröße $d_K = 30 \mu\text{m}$ lassen sich auch mit $d_K = 45 \mu\text{m}$ konvexe Konturen erzeugen. Allerdings sind die Unterschiede zwischen diesen gering. Ursächlich hierfür ist die mit zunehmender Korngröße größere Anzahl an Mikrokontakten im Bereich der Aussparung. Diese lässt sich anhand der qualitativen Darstellungen der Druckmessfolien erkennen. Für die größere Korngröße liegen hier deutlich mehr Kontakte vor, als dies bei der kleineren Korngröße der Fall ist. Hierdurch steigt letztlich die Anzahl der aktiven Schneiden im Mittenbereich, und der Abtrag dort wird erhöht. Das Verhältnis des Materialabtrags zwischen Randbereich und Mittenbereich nimmt wieder ab, sodass der Effekt zur Erzeugung konvexer Konturen limitiert ist.

7.2 Beeinflussung der Oberflächengüte durch angepasste FFA

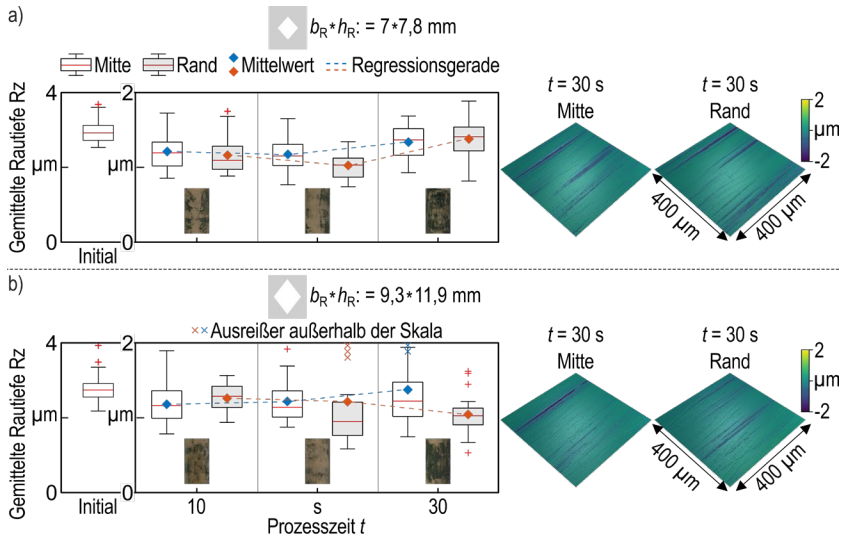
Die gleichmäßigere Verteilung der Flächenpressung bezogen auf die Mitte und den Randbereich des Werkzeugs hat auch einen Einfluss auf die resultierende Oberflächengüte bei Gegenüberstellung der jeweiligen Werkstückbereiche. Während für die Bearbeitung mit Andrückrolle und FFA ohne Aussparung im Randbereich durch den geringeren Materialabtrag höhere Rauheiten erzeugt werden, lässt sich diese Differenz durch die angepassten FFA reduzieren. Abbildung 7-6 stellt hierfür die gemittelte Rautiefe R_z im Bereich der Werkstückmitte und im Werkstückrandbereich, bei unterschiedlichen Prozesszeiten, dar.

Hierbei zeigt sich neben dem Einfluss der Bearbeitungszeit auch ein Einfluss der jeweiligen Aussparung am flexiblen Federstahl-Andrückelement. Die initialen R_z -Werte der geschliffenen Proben beziehen sich auf die genutzten Werkstückabsätze der Versuche und umfassen insgesamt 36 Einzelmessungen. Unter Ausschluss der Ausreißer unter den insgesamt 36 Einzelmessungen liegen die R_z -Werte zwischen $R_z = 2 - 3,5 \mu\text{m}$. Die initiale Rauheit wurde hierbei für eine Messstrecke von $l_m = 4,0 \text{ mm}$ ermittelt. Die Rauheiten der gefinishten Oberfläche beziehen sich auf einen Bereich von je $l_m = 3 \text{ mm}$ Messlänge. Diese verwendete Messstrecke ergibt sich aus der Unterteilung der Gesamtmessstrecke ($l_{m,\text{Ges}} = 12 \text{ mm}$) in vier gleiche Abschnitte zur Betrachtung des Rand- und Mittenbereichs. Den Auswertungen für den Mitten- und Randbereich liegen jeweils insgesamt 24 Messungen zugrunde, die entsprechend zu Boxplots zusammengefasst sind.

Grundsätzlich zeigt sich an der für die microgefinishten Absätze festgelegten Skala die Reduktion der R_z -Werte für alle Prozesszeiten. Für die Bearbeitung mit der kleineren rautenförmigen Aussparung ($7 \times 7,9 \text{ mm}$) ergeben sich für die Prozesszeiten $t = 10$ und 20 s identische R_z -Werte. Mit Zunahme der Prozesszeit auf $t = 30 \text{ s}$ steigen die Rauheitswerte tendenziell an. Im Randbereich des Werkstücks ergibt sich ein anderer Zusammenhang. Mit Zunahme der Prozesszeit auf 20 s resultieren geringere R_z -Werte im Randbereich. Jedoch nehmen diese bei längerer Prozesszeit von $t = 30 \text{ s}$ wieder zu, und auch die Verteilung der Messwerte steigt deutlich.

Wie bereits bei Betrachtung der axialen Kontur zu erkennen war, nimmt mit zunehmender Prozesszeit die Wirkung der angepassten Verteilung der Flächenpressung durch die Aussparung am flexiblen Federstahl-Andrückelement zu. Damit geht einher, dass die längere Prozesszeit von 20 s auch zu niedrigeren R_z -Werten im Randbereich des Werkstücks führt, da hier der Materialabtrag tendenziell höher ist. Dass dieser Effekt bei 10 s Prozesszeit noch nicht auftritt, lässt sich auch auf die initial konvexe Kontur zurückführen. Diese bewirkt eine höhere Anzahl an Mikrokontakten im Mittenbereich des Werkstücks und führt so zu weniger Materialabtrag im Randbereich.

In diesem Fall ergeben sich vergleichbare Materialabtragsraten und letztlich ähnliche Rz-Werte. Im Vergleich der Finishband-Aufnahmen fällt jedoch auf, dass bei $t = 10$ s die aus dem Materialabtrag hervorgehende Zusetzung des Werkzeugs vorrangig im Randbereich vorliegt. Bei 20 s liegt diese ausschließlich und vorrangig im rechten Randbereich vor, was auf einen höheren Materialabtrag in diesem Bereich schließen lässt.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Aussparung:	Var.	Korngröße d_K:	30 µm
Härte:	58 ± 2 HRC	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Kornauftrag:	Gerichtet
Osz.-Amplitude S:	± 2 mm	Drehzahl n:	525 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{fB}:	0 mm/min
Osz.-frequenz f_{Os}:	10,5 Hz	Prozesszeit t:	Var.	Res. Schnittgeschw. v_c:	90 m/min
Einstelldruck p_m:	3,5 bar	Res. Andrückkraft F_{An}:	140 N	Res. Flächenpressung p_A:	1,68 N/mm ²

Abbildung 7-6: Gemittelte Rautiefe Rz im Mitten- und Randbereich des Werkstücks bei Einsatz der angepassten FFA a,b) für unterschiedliche Prozesszeiten und exemplarische 3D-Topographien für $t = 30$ s

Für die Bearbeitung mit $t = 30$ s ergibt sich bereits ein Einfluss von Werkzeugverschleiß, der sich auch an der abgebildeten Aufnahme des Finishbands erkennen lässt. Aufgrund der Zusetzung des Finishbandes ist der weitere Materialabtrag erschwert, und es kommt vermehrt zu Mikrofurchen und Mikropflügen. Dies führt zu höheren Rz-Werten durch die Zunahme an Spitzen durch das häufigere Auftreten von Aufwürfen entlang der Bearbeitungsriefen. Gleichzeitig zeigen die 3D-Topographien,

dass weiterhin tiefere Riefen der Schleifbearbeitung in der Oberfläche vorliegen, welche ebenso die gemittelte Rauheit R_z beeinflussen.

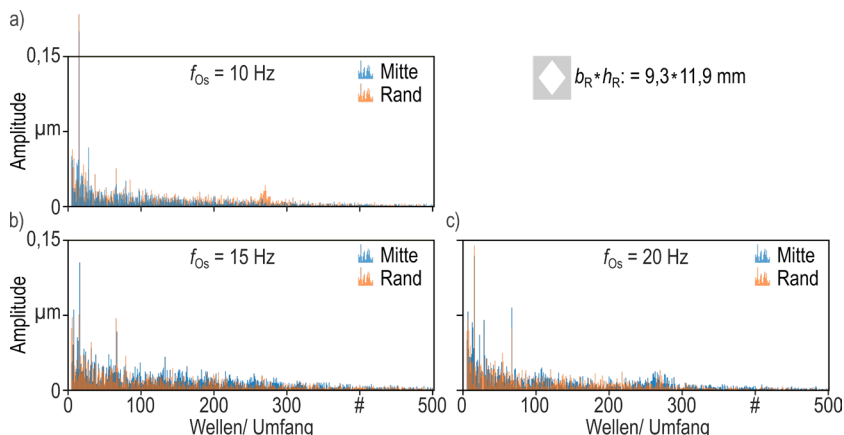
Für die größere rautenförmige Aussparung (9,3*11,9 mm) ergibt sich grundsätzlich kein Einfluss der betrachteten Prozesszeiten auf die R_z -Werte im Bereich der Werkstückmitte. In Gegenüberstellung mit dem Randbereich resultieren jedoch bei längeren Prozesszeiten tendenziell geringere R_z -Werte für diesen. Die relativ gleichverteilten Kontaktflächen zwischen Werkzeugmitte und -rand ist gleichbedeutend mit einer ähnlichen Anzahl an aktiven Schneiden für die Bereiche. Dies führt grundsätzlich, im Vergleich zur Bearbeitung ohne Aussparung, zu einer relativen Zunahme des Materialabtrags im Randbereich. Auffällig ist hierbei allerdings die starke Zunahme der Streuung sowie das häufigere Auftreten von Ausreißern. Für die Prozesszeit von $t = 30$ s führt der Verschleiß des Finishbands durch Zusetzen zu ungleichmäßiger Bearbeitung und damit zunehmender Messwertstreuung. Dies lässt sich auch am dargestellten Bereich des eingesetzten Finishbands erkennen.

7.3 Beeinflussung der radialen Welligkeit durch angepasste FFA

Bezogen auf die sich verändernden Eingriffsbedingungen und die veränderte theoretische Anzahl an Korneingriffen wird auch die radiale Welligkeit exemplarisch betrachtet. Hierbei wird die Fast-Fourier-Transformation für zwei Messstellen am Wellenabsatz ausgewertet. Ziel der Analyse ist die Überprüfung möglicher Abweichungen durch die ungleichen Materialabträge in der Mitte des Absatzes verglichen zum Rand des Werkstückabsatzes durch den Einsatz des ausgesparten FFA.

Die radialen Welligkeiten im Bereich der Mitte und des Randes des gefinishten Absatzes sind in Abbildung 7-7 für Bearbeitungen mit unterschiedlicher Oszillationsfrequenz gegenübergestellt. Grundsätzlich sind die Amplituden der radialen Welligkeiten im dargestellten Spektrum von 5 – 500 W/U gering und weisen Amplituden kleiner als $0,2 \mu\text{m}$ auf.

Da höhere Oszillationsfrequenzen eine Steigerung des Materialabtrags begünstigen, sind die radialen Welligkeiten für diese Bearbeitungen tendenziell geringer. Dies ist insbesondere in den maximalen Amplituden zu sehen. Diese liegen für die niedrigste Oszillationsfrequenz von $f_{0s} = 10$ Hz über $0,15 \mu\text{m}$, während für die höheren Oszillationsfrequenzen von 15 und 20 Hz die maximalen Amplituden kleiner als $0,15 \mu\text{m}$ sind.



Werkstoff:	16MnCr5	Andrückelement:	FFA-R2	Abrasivkorn:	D
Durchmesser d:	54 mm	Aussparung:	9,3x11,9 mm	Korngröße d_K:	30 μm
Härte:	58 ± 2 HRC	Wz.-breite b_{Wz}:	12 mm	Kornauftrag:	Gerichtet
Os.-Amplitude S:	$\pm 2 \text{ mm}$	Drehzahl n:	525 1/min	Bandvorschubgeschw. v_{FB}:	0 mm/min
Os.-frequenz f_{0s}:	Var.	Prozesszeit t:	20 s	Res. Schnittgeschw. v_c:	90 m/min
Einstelldruck p_{in}:	3,5 bar	Res. Andrückkraft F_{An}:	140 N	Res. Flächenpressung p_A:	1,68 N/mm ²

Abbildung 7-7: FFT-Darstellung der radialen Welligkeit im Bereich der Werkstückmitte und des Randbereichs für die Bearbeitung bei unterschiedlichen Oszillationsfrequenzen f_{0s} = a) 10, b) 15 und c) 20 Hz

Bei Betrachtung der Unterschiede zwischen Randbereich und Mitte lassen sich nur geringfügige Unterschiede erkennen. Allerdings ist hierbei tendenziell zu erkennen, dass die höheren Oszillationsfrequenzen den Materialabtrag am Randbereich erhöhen, sodass hier etwas geringere radiale Welligkeiten vorliegen, insbesondere im Bereich der höheren Anzahl an Wellen pro Umfang. Im Gegensatz dazu ist bei $f_{0s} = 10 \text{ Hz}$ die radiale Welligkeit im Mittenbereich niedriger.

Über die Oszillation kann die Anzahl der Werkzeugüberläufe innerhalb der Prozesszeit über den Randbereich des Werkstücks erhöht oder gesenkt werden. Entsprechend einer Erhöhung der Oszillationsfrequenz ergibt sich eine Steigerung der axialen Überläufe und somit eine Erhöhung der Eingriffe der Schneidkörner und daraus resultierend eine Erhöhung des Materialabtrags bei gleichzeitiger Erhöhung der Schneidenraumüberdeckung. Das Resultat ist ein homogeneres Bearbeitungsergebnis und somit auch eine stärkere Reduzierung radialer Welligkeiten im Vergleich zur niedrigeren Oszillationsfrequenz bezogen auf den Randbereich.

8 Handlungsempfehlung zur Prozessauslegung beim Microfinishen mit Band

Aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren auf den Microfinishprozess mit Bandwerkzeug ist die Prozessauslegung komplex und zeitaufwendig. Zusätzlich ist die Übertragbarkeit von bestehenden auf neue Prozesse aufgrund des elastischen Werkzeugverhaltens nur eingeschränkt möglich, da bspw. Veränderungen des Werkstückdurchmessers die Kontaktfläche und damit die resultierende Flächenpressung beeinflussen. Im Folgenden werden auf Basis der innerhalb dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse Handlungsempfehlungen formuliert, die helfen können, die Prozessauslegung zu vereinfachen. Berücksichtigt werden die im Rahmen der Arbeit betrachteten funktionsrelevanten Eigenschaften Oberflächentopographie, Geradheit und Rundheit anhand der Messgrößen Rauheit und Materialanteilskenngößen, axialer Kontur und radialer Welligkeit.

Unabhängig von den Zielgrößen lässt sich für die Prozessperipherie allgemein festhalten, dass der Einsatz von Kühlschmierstoff zu besseren Bearbeitungsergebnissen führt. Aufgrund der geringen thermischen Belastung bei der Bearbeitung von Stahlwerkstoffen ist der Einsatz einer Minimalmengenschmierung ausreichend, da keine Prozesskühlung benötigt wird. Die Möglichkeit, Microfinishprozesse ohne Kühlschmierstoff durchzuführen, sollte nur bei Realisierung eines konstanten Bandvorschubs genutzt werden, da die Zusetzung des Finishbandes bereits während der initialen Prozessphase stattfindet und infolgedessen zu einer unzureichenden Bearbeitung führt. Daraus ergibt sich zusätzlich, dass die Anwendung der Trockenbearbeitung für besonders große Kontaktlängen, wie sie bspw. beim FFA vorliegen, nicht zielführend ist. Aufgrund der großen Umschlingung und damit starken Umlenkung des Bandes ist ein konstanter Bandtransfer nicht gewährleistet.

Gemeinsam ist den im Rahmen dieser Arbeit betrachteten Zielgrößen ist die Abhängigkeit vom Materialabtrag, der von unterschiedlichen Faktoren beeinflusst wird. Neben der Wahl des Bandwerkzeugs und der Prozessparameter hat auch die Wahl des Andrückelements einen signifikanten Einfluss auf den Materialabtrag und somit auf das Bearbeitungsergebnis. Darüber hinaus sind auch die initiale Oberflächentopographie und axiale Kontur sowie radiale Welligkeit relevant für das spätere Bearbeitungsergebnis. Zur besseren Nachvollziehbarkeit der Handlungsempfehlungen dient die schematische Darstellung in Abbildung 8-1 als Übersicht.

Für die Betrachtung der Oberflächentopographie wird hierbei zwischen Plateau-Topographie und „Spiegelglanz“-Topographie unterschieden, da diese Zielvorgabe für die Prozessauslegung wesentlich ist. Für die Herstellung einer Plateau-Topographie mit einem hohen Riefen-zu-Spitzen-Verhältnis wird der Einsatz von Finishbändern mit

elektrostatisch gerichtet aufgetragenen Schneidkörnern der Korngröße $d_K \geq 30 \mu\text{m}$ als zielführend angesehen, um im ersten Prozessschritt die initiale Topographie abzutragen und gleichmäßig tiefe, sich kreuzende Riefen zu erzeugen.

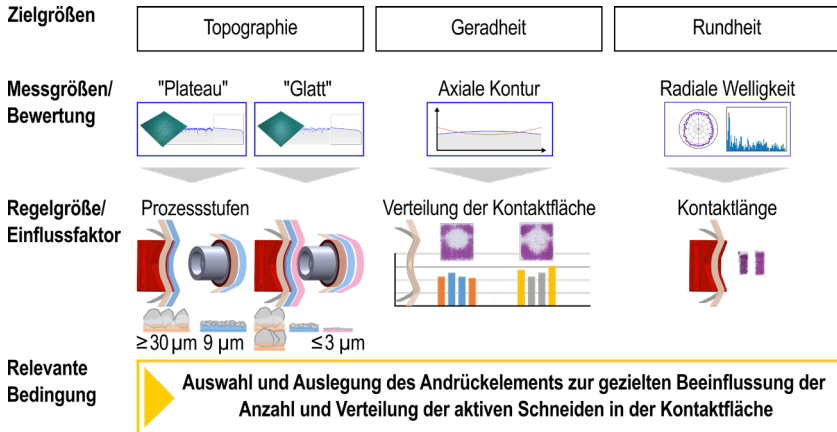


Abbildung 8-1: Schematische Abbildung zur Beschreibung der Handlungsempfehlung

Zur Erhöhung des Materialtraganteils und der Erzeugung einer Plateau-Topographie sollten nachfolgend mit schwerkraftgestreuten Finishbändern kleinerer Korngrößen ein oder zwei Bearbeitungsschritte folgen. Diese dienen vorrangig dem Abtrag der Profilsitzen und somit der Erhöhung des Materialtraganteils. Hierbei ist zu beachten, dass die Korngröße um etwa den Faktor drei kleiner ist als die der vorherigen Bearbeitung. So wird gewährleistet, dass eine Beeinflussung der Topographie durch das Einbringen weiterer verhältnismäßig tiefer Riefen vermieden wird. Für den Einsatz sehr kleiner Korngrößen $d_K \leq 3 \mu\text{m}$ sind hierbei höhere Flächenpressungen zu empfehlen, um einen ausreichenden Korneingriff zu gewährleisten und das bestmögliche Bearbeitungsergebnis zu erzielen (vgl. Abbildung 6-23).

Für die Herstellung einer „Spiegelglanz“-Topographie, die sich durch besonders geringe Kennwerte mit Bezug auf die Rauheit und Materialtraganteilkenngrößen R_k , R_{pk} und R_{vk} auszeichnet, sollte die erste Prozessstufe in Abhängigkeit von der initialen Topographie gewählt werden. Für periodische Profile, wie sie nach dem Drehen oder Außenrund-Einsteichschleifen vorliegen, wird hierbei ein höherer Materialabtrag benötigt, sodass elektrostatisch gerichtete Finishbänder geeignet sind. Bei aperiodischen Profilen, die R_z -Werte von $R_z < 2 \mu\text{m}$ aufweisen, lässt sich bereits mit schwerkraftgestreuten Finishbändern ein ausreichend hoher Materialabtrag erzielen. Nach der ersten Bearbeitungsstufe sollte die initiale Topographie abgetragen sein und

eine gefinishte Topographie mit geringen Riefentiefen vorliegen. Die weiterführenden Prozessschritte dienen jeweils dem vollständigen Abtrag der vorherigen Topographie und der vorliegenden Riefen und Spitzen. Dies bedeutet, dass, verglichen mit dem Plateau-Finishen, die Materialabträge auf diesen Prozessstufen höher sein müssen. Dies kann neben der Erhöhung der Prozesszeit durch eine Erhöhung der Anzahl an aktiven Schneiden erreicht werden. Gleichzeitig sind aber auch hier höhere Flächenpressungen notwendig, um eine ausreichende Korneingriffstiefe zu ermöglichen. Der Einsatz von Kühlschmierstoff ist bei der Feinstbearbeitung unabdingbar, um das Zusetzen des Bandes zu verhindern und gleichzeitig den Abtransport von abgetragenen Material zu gewährleisten.

Bei Berücksichtigung der axialen Kontur der Bearbeitungsstelle beim Microfinishen ergibt sich die Notwendigkeit, die Kontaktfläche des Werkzeugs anzupassen, um die benötigte Gradierung des Materialabtrags zu gewährleisten. Neben dem Einsatz von Finishbändern mit lokal variierender Kornaufbringung können grundsätzlich auch gradierte oder profilierte Andrückrollen genutzt werden [Sch19]. Allerdings sind diese aufgrund der geringeren Kontaktlänge hinsichtlich ihres Einflusses begrenzt und weniger flexibel hinsichtlich der Anpassung an variierende Anforderungen. Demgegenüber ist die Anpassung des FFA durch die teilweise Aussparung ein geeigneter Lösungsansatz zur gezielten Beeinflussung der lokalen Anzahl an aktiven Schneiden innerhalb der Kontaktfläche. Durch eine Erhöhung der Anzahl an aktiven Schneiden im Randbereich in Relation zur Mitte des Werkzeugs lässt sich so ein erhöhter Materialabtrag am Rand erzielen. Gleichbedeutend mit der relativen Steigerung des Materialabtrags ergibt sich für die gesamte Bearbeitungsstelle ein homogeneres Bearbeitungsergebnis, sodass Abweichungen in der Rauheit reduziert werden können. Grundsätzlich sollte bei der Auslegung des angepassten FFA berücksichtigt werden, dass die vorgesehene Aussparung so gestaltet ist, dass dennoch in jedem Bereich der herzustellenden Funktionsfläche ausreichend Korneingriffe stattfinden. Dies ist notwendig, um neben der gewünschten axialen Kontur auch die Erzeugung der vorgegebenen Topographie und radialen Welligkeit durch die Bearbeitung sicherzustellen.

Mit Fokus auf die radiale Welligkeit empfiehlt sich die Erhöhung der Kontaktlänge. Durch die damit steigende Anzahl an aktiven Schneiden und das Überdecken der radialen Wellen erfolgt ein besserer Abtrag, und die radiale Welligkeit kann deutlich reduziert werden. Zur Steigerung der Kontaktlänge eignet sich der Einsatz des FFA, das bereits bei niedrigen Flächenpressungen eine höhere Kontaktlänge aufweist als eine vergleichsweise weiche Elastomer-Andrückrolle der Härte $H_R = 60$ Shore A. Auch der Einsatz angepasster FFA kann für die Minimierung der radialen Welligkeiten genutzt

werden und erzeugt, wie bei der Topographie, gleichmäßige Bearbeitungsergebnisse für den Rand- und Mittenbereich.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass durch die Auswahl und Auslegung des Andrückelements die Anzahl und Verteilung der aktiven Schneiden in der Wirkzone gesteuert werden kann. Auf diese Weise lässt sich der Materialabtrag bezogen auf die Bearbeitungsstelle beeinflussen und das Prozessergebnis maßgeblich beeinflussen. Bei der Prozessauslegung sollte daher immer berücksichtigt werden, in welchen Bereichen der Bearbeitungsstelle ein höherer oder ggf. niedrigerer Materialabtrag benötigt wird. Gleichzeitig beeinflusst die Andrückkraft die Kontaktfläche und damit die Kontaktlänge sowie die resultierende Flächenpressung und Einzelkornbelastung, die für den Materialabtrag relevant sind. Zur besseren Abschätzung der sich ergebenden Flächenpressungen werden im Folgenden die im Rahmen der Arbeit erstellten empirischen Modelle zur Ermittlung der Flächenpressung erläutert.

8.1 Empirische Ersatzmodelle zur Approximation der Flächenpressung

Die für die Erstellung von Regressionsmodellen herangezogenen Daten beruhen auf Mehrfachmessungen und Mittelwertbildung. Durch die Zusammenführung der Messdaten bei Variation der Prozessparameter lassen sich Regressionsmodelle erstellen, auf deren Basis die resultierende Flächenpressung näherungsweise ermittelt werden kann. Solche Modelle sind bereits in Kapitel 5 für drei unterschiedlich harte Andrückrollen, bei Variation des Werkstückdurchmessers, aufgeführt. Im Rahmen der Arbeit wurden weitere Daten ermittelt, aus denen Regressionsmodelle erstellt werden können. Mithilfe der zugehörigen Regressionsgleichung können in Abhängigkeit von den variierten Parametern auch für die nicht experimentell bestimmten Parameterwerte resultierende Flächenpressungen berechnet werden. Die Berechnung beschränkt sich hierbei auf den jeweils experimentell betrachteten Parameterraum. Innerhalb dieser Grenzen können die dargestellten Regressionsgleichungen genutzt werden, um die sich ergebende Flächenpressung bei vergleichbaren Rahmenbedingungen abzuschätzen. Wenn bspw. der Werkstückdurchmesser variiert wird, sollte nach Möglichkeit eine vergleichbare Andrückrolle hinsichtlich Härte H_R und Werkzeugbreite b_{WZ} zugrunde liegen, um eine möglichst genaue Abschätzung zu erreichen. Dies bedeutet, dass auch das verwendete Finishband berücksichtigt werden sollte, da neben der Elastizität des Bandes auch die Korngröße, -konzentration und -aufbringung die resultierende Kontaktfläche beeinflussen [BWK+17]. Anhand von Abbildung 8-2 ist die mögliche Verwendung der Regressions-Kennlinien dargestellt. Hierbei kann anhand der empirischen Ersatzmodelle ein Transfer eines bestehenden Prozesses auf einen Prozess mit verändertem Werkstückdurchmesser erfolgen. Durch den Wechsel des Andrückelements lässt sich in diesem Fall die gleiche Flächenpressung realisieren. Da gleichzeitig die Andrückkraft einen höheren Betrag annimmt, liegt für diese

Bearbeitung gleichzeitig eine größere Kontaktfläche vor. Für die vorliegende Korngröße $d_K = 30 \mu\text{m}$ bedeutet die steigende Anzahl aktiver Schneiden prinzipiell einen höheren Materialabtrag. Dies kann bei sehr kurzen Prozesszeiten das Bearbeitungsergebnis im Vergleich zum Ausgangsprozess beeinflussen, sodass hier ggf. die Prozesszeit durch eine Verringerung angepasst werden muss. Für kleine Korngrößen $d_K \leq 9 \mu\text{m}$ sollte bei einem entsprechenden Transfer darauf geachtet werden, dass mit größeren Kontaktflächen die Einzelkornbelastung abnimmt, wodurch der Materialabtrag erschwert wird. In diesem Fall wird der Einsatz von Andrückrollen mit einer Härte außerhalb des betrachteten Bereichs von $H_R = 60$ bis 90 Shore A als zielführend angesehen, um die gewünschte Flächenpressung bei gleicher Kontaktfläche zu erreichen und so vergleichbare Einzelkornbelastungen zu gewährleisten.

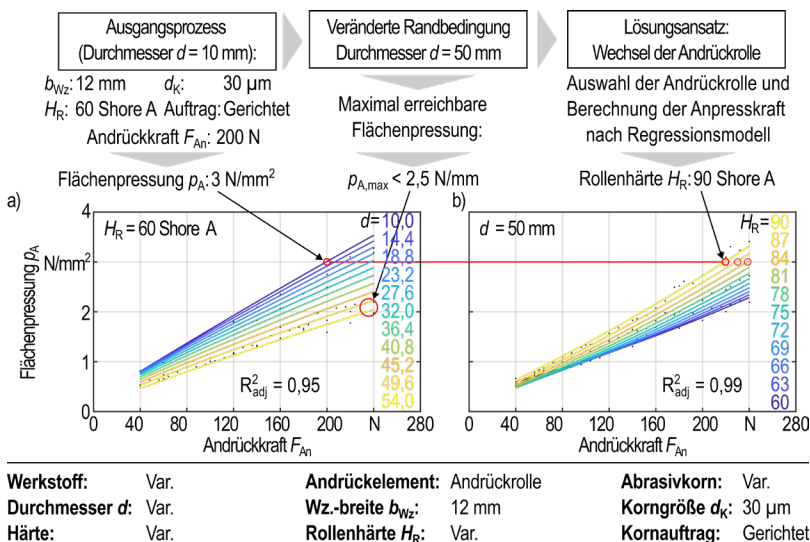


Abbildung 8-2: Exemplarische Regressionsmodelle der Flächenpressung für variierende Werkstückdurchmesser a) und Rollenhärten b) in Abhängigkeit von der Andrückkraft

Neben der visuellen Abschätzung durch die Regressionslinien können die Regressionsgleichungen für die betrachteten Parameterräume herangezogen werden, um die Flächenpressung zu berechnen. Alle ermittelten Ersatzmodelle sowie die Regressionsgleichungen werden im Anhang dieser Arbeit zur Verfügung gestellt und können so als Basis zur Abschätzung vorhandener Flächenpressungen genutzt werden.

9 Zusammenfassung und Ausblick

Technische Funktionsflächen, wie beispielsweise Lagerstellen an Antriebswellen, erfordern eine gezielte Auslegung, um auch unter den tribologischen Belastungen ihren Einsatzzweck zu erfüllen. Hierzu werden hohe Anforderungen an die Oberflächen hinsichtlich ihrer Form- und Lagetoleranz sowie Oberflächengüte gestellt. Zur Herstellung solcher Funktionsflächen mit guten Gleit-Reibeigenschaften haben sich Honbearbeitungen wie das Microfinishen etabliert. Häufig werden für die Bearbeitung Finishsteine eingesetzt, da sie einen höheren Materialabtrag und somit eine höhere Produktivität ermöglichen. Allerdings haben diese meist eine starre Bindung und müssen für den jeweiligen Werkstückdurchmesser gezielt profiliert werden. Zudem benötigt man für die Prozesse mit Honstein grundsätzlich Kühlschmierstoff, um ein Zusetzen des Werkzeugs zu verhindern. Sowohl aus diesen Gründen, als auch explizit für besondere Anforderungen, wie für die Bearbeitung nicht runder Komponenten, bspw. Nocken einer Nockenwelle, oder um besonders niedrige Rauheiten zu erzeugen, eignet sich der Einsatz von Bandwerkzeugen zur Microfinishbearbeitung. Ebenso ist das Bandfinishen für die Bearbeitung geringer Losgrößen oder bei häufig wechselnden Bauteilen flexibler einsetzbar, da eine Werkzeugvor- oder -aufbereitung nicht erforderlich ist und möglicher Werkzeugverschleiß durch einen Weitertransport des Bandes durch die Wirkstelle kompensiert werden kann. Darüber hinaus werden für Bandwerkzeuge in der Regel elastische Andrückelemente eingesetzt, die in Kombination mit der kraftinduzierten Prozessführung zu einem flächenhaften Kontakt zwischen Werkzeug und Werkstück führen. Dies ermöglicht eine einfache und vielseitige Anpassung der Kontaktfläche durch den Wechsel des Andrückelements oder die Variation der Andrückkraft F_{An} . Gleichzeitig erschwert die Auswahl an verfügbaren Andrückelementen und die Einflüsse auf den resultierenden Werkzeug-Werkstück-Kontakt die Vergleichbarkeit unterschiedlicher Prozesse, und aus dem elastischen Verhalten ergibt sich eine Vielzahl an Prozesswechselwirkungen, die das Prozessergebnis beeinflussen.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Bandfinishen unter Berücksichtigung unterschiedlicher Andrückelemente hinsichtlich seiner Prozesswechselwirkungen und Einflüsse zur Herstellung technischer Funktionsflächen untersucht. Hierbei wurden Regressionsmodelle zur Abschätzung der resultierenden Flächenpressung für die Verwendung elastischer Andrückrollen und flexibler Federstahl-Andrückelemente aufgestellt. Dies erfolgte auf Basis der Analysen von Einflüssen der Prozessrandbedingungen, wie dem Werkstückdurchmesser, der Härte und Breite der Andrückrolle sowie der Korngröße und -aufbringung des verwendeten Finishbandes auf die sich ergebende Kontaktfläche bei Variation der Andrückkraft. Hieraus konnten

Regressionsgleichungen zur Abschätzung der vorliegenden Flächenpressung p_A für unterschiedliche Randbedingungen abgeleitet werden. Darüber hinaus zeigten sich qualitative Unterschiede in den erzeugten Kontaktflächen bei Gegenüberstellung der Andrückrolle mit dem flexiblen Federstahl-Andrückelement, die auch das Prozessverhalten beeinflussen. Durch die in radialer Richtung höhere elastische Verformbarkeit des frei liegenden Federstahlbandes am FFA resultieren größere Kontaktlängen bzw. eine höhere radiale Umschlingung des Werkzeugs am Werkstück für gleiche Flächenpressungen. Gleichzeitig ist die entstehende Kontaktfläche beim FFA weniger homogen ausgeprägt, sodass in den axialen und radialen Randbereichen des Kontaktes eine geringere Dichte an Mikrokontakten vorliegt.

Im Prozesseinsatz führt die größere Umschlingung sowie die Bandführung entlang des Federstahlbands zu erhöhter Reibung und einem Stick-Slip-Effekt beim stetigen Bandvorschub während des Prozesses, sodass ein kontinuierlicher Bandtransport durch die Wirkstelle nicht gewährleistet werden kann. Neben diesem Effekt bewirkt die im axialen Randbereich auftretende geringere Anzahl an Mikrokontakten, dass in diesen Bereichen weniger Schneiden in Eingriff kommen. Dies verstärkt den Effekt eines in axialer Richtung gradierten Materialabtrags, der nach außen hin geringer ist als in der Mitte des bearbeiteten Bereichs. Hiermit verbunden sind höhere Rauheiten im Randbereich und die Tendenz, axiale Konturen mit konkaver Form zu erzeugen. Für Lagerflächen führt diese Formabweichung zu Spannungsspitzen im Randbereich und kann neben erhöhtem Verschleiß ein Bauteilversagen zur Folge haben. In radialer Richtung hingegen überwiegt ein positiver Einfluss der größeren Kontaktlänge des FFA verglichen mit der Andrückrolle. Die damit einhergehende größere Umschlingung des Werkstücks und damit größere Anzahl an aktiven Schneiden ermöglicht ein effizienteres Abtragen von Umfangswelligkeiten. Im Vergleich ergeben sich bei der Bearbeitung mit FFA geringere Umfangswelligkeiten, bei denen auch die Amplituden von Wellen mit hohen Wellenzahlen deutlich reduziert werden können.

Im Analogieversuch konnte der Effekt der reduzierten Umfangswelligkeiten bei Gegenüberstellung eines geschliffenen und eines gefinishten Bauteils dargestellt werden. Die nach dem Schleifprozess resultierenden Wellenamplituden im Bereich von etwa 60 W/U und 120 – 130 W/U erzeugen Vibrationen, die zu erhöhten Schallemissionen führen und in der Frequenzbandanalyse über den Bezug der Bauteildrehzahl klar zugeordnet werden konnten. Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die Microfinishbearbeitung einen Beitrag zur Optimierung der NVH-Eigenschaften für Bauteile im rotierenden Gleit-Reibkontakt, wie bspw. Lagerflächen, leisten kann.

Der Einsatz von Trockenbearbeitung beim Bandfinishen ist für den Einsatz des FFA nicht zielführend, da ein notwendiger Bandvorschub nicht gewährleistet werden kann.

Somit kommt es zum frühzeitigen Zusetzen des Finishbandes und es kann kein ausreichender Materialabtrag generiert werden. Demgegenüber sind die Unterschiede zwischen Überflutungsschmierung und Minimalmengenschmierung in Form eines initialen Auftrags auf das Finishband eher gering. Allerdings deuten die erzeugten Rz-Werte und die Betrachtung des Abfalls der gemessenen Tangentialkraft auf eine effizientere Bearbeitung unter MMS hin. In diesem Zusammenhang konnte eine Korrelation der Tangentialkraft F_t mit der Abnahme der Rz-Werte und der Reibung zwischen Werkzeug und Werkstück beschrieben werden. Hieraus lässt sich ableiten, dass die Tangentialkraft im Microfinishprozess zur Abschätzung geeigneter Bearbeitungszeiten genutzt werden kann, um die in Abhängigkeit vom Werkzeug realisierbare Oberflächenrauheit bei kürzester Prozessdauer zu erreichen.

Des Weiteren wurden explizit mittels rautenförmiger Aussparung angepasste FFA ausgelegt und mittels Laserstrahl schneiden gefertigt. Diese angepassten FFA zeigen besonderes Potenzial zur Verbesserung der Bearbeitungsergebnisse hinsichtlich der zuvor dargestellten axialen Inhomogenitäten der Rauheit und der resultierenden unerwünschten axialen Kontur mit konkaver Ausprägung. Durch die Aussparung in der Mitte des FFA und damit in der Mitte der Kontaktfläche kann das Verhältnis der Kontaktfläche zwischen Mitte und Randbereich des Werkzeugs angeglichen werden. Da die Flächenpressung insgesamt steigt, entstehen auch am Rand Kontaktflächen mit dichter Ausprägung der Mikrokontakte. Entsprechend der Kontaktflächen ergeben sich für die Bereiche auch eine vergleichbare Anzahl aktiver Schneiden, sodass der Materialabtrag ähnlich ausfällt. Für eine größere rautenförmige Aussparung $b_R \cdot h_R = 9,3 \cdot 11,9$ mm ergeben sich im Randbereich größere Kontaktflächen, sodass der Materialabtrag hier tendenziell größer ist als in der Mitte. Dies ermöglicht weitestgehend prozesssicher die Herstellung konvexer Konturen, wobei die Konvexität im Submikrometerbereich liegt.

Grundsätzlich lassen sich aus den Ergebnissen Handlungsempfehlungen zur Herstellung technischer Funktionsflächen mittels Microfinishen mit Band ableiten. Neben der Berücksichtigung der Kontaktlänge der Werkzeug-Werkstück-Umschlingung sollte die Verteilung der Mikrokontakte über die Werkzeugbreite berücksichtigt werden, um möglichst gleichmäßige Bearbeitungsergebnisse oder gezielt konvexe Konturen zu erzeugen. Darüber hinaus lassen sich weitere Untersuchungs- und Optimierungsbedarfe aus den gewonnenen Erkenntnissen ableiten, die das Verständnis der Prozesswechselwirkungen erhöhen und somit zur besseren Prozesskontrolle beitragen können. Hierzu zählt die Möglichkeit, durch simulative Ansätze die Flächenpressung, Kontaktlänge sowie die Anzahl der aktiven Schneiden vorherzusagen. Auf diesem Wege können Andrückelemente gezielt auf die geforderten

Bauteileigenschaften hinsichtlich Geradheit, Umfangswelligkeit oder Oberflächengüte ausgelegt werden.

Aufgrund der Begrenzung in der Versuchssperipherie beziehen sich die dargestellten Ergebnisse auf Andrückkräfte von $F_{An} = 40 - 240$ N. Eine weitere Erhöhung der Flächenpressung könnte unter Umständen zu einer homogenen Verteilung der Mikrokontaktflächen für das FFA führen und so den Prozess weiter beeinflussen, sodass die axiale Abweichung der Oberflächengüte möglicherweise reduziert werden kann. In diesem Zusammenhang können weitere Aussparungen anderer Formen und Größen genutzt werden, um bspw. bei größeren Höhen der Aussparung die Kontaktfläche im mittleren Bereich im Verhältnis weiter zu reduzieren. Alternative, thermisch neutrale Fertigungsmöglichkeiten wie bspw. das Wasserstrahlschneiden könnten hierbei verwendet werden, sodass die Kontaktlänge nicht durch eine Reduktion der Elastizität beeinflusst wird.

Zielführend könnte zusätzlich die detaillierte Analyse des Einflusses durch die initiale Bauteilgestalt sein, um diese in den Kontext zum Bearbeitungsziel zu setzen und so den tatsächlich benötigten Materialabtrag zu definieren. Mithilfe dieses Wissens zum Einfluss der initialen Oberflächengestalt kann eine Basis erstellt werden, um durch Anwendung von Machine Learning die Prozesse zu optimieren oder mit Einsatz geeigneter In-Prozess-Messtechnik den Prozess zu steuern. Denkbar wäre hier beispielsweise, auf Basis der im Prozess abnehmenden Tangentialkraft, Abbruchkriterien zu definieren, die die Prozesse bei erreichter Oberflächengüte vor dem eigentlichen Prozessende stoppen. Ebenso könnten geeignete In-Prozess-Messverfahren implementiert werden, um Kontur und Umfangswelligkeit In-Prozess zu erfassen und die Prozesse effizienter zu gestalten und mögliche Nachbearbeitungen zu reduzieren. Letztlich ist es erforderlich, die Einflüsse einer mehrstufigen Microfinishbearbeitung zu untersuchen, um sicherzustellen, dass im ersten Schritt gezielt eingestellte Funktionsparameter nicht wieder abgetragen werden und die funktionsrelevanten Eigenschaften nach der finalen Bearbeitungsstufe gewährleistet sind.

Insgesamt weist die Microfinishbearbeitung mit Band viel Potenzial zur gezielten Herstellung technischer Funktionsflächen auf, die es aufzugreifen und weiterzuentwickeln gilt. Die Vorteile aus der kraftinduzierten Prozessführung, der thermisch neutralen Bearbeitung und den Möglichkeiten, gezielt unterschiedliche Oberflächentopographien herzustellen und quasi jeden Werkstoff zu bearbeiten, können sicherlich für ein breites Anwendungsfeld eingesetzt werden, weshalb das Microfinishen auch in Zukunft ein relevantes Fein- und Feinstbearbeitungsverfahren sein wird.

Literaturverzeichnis

- [Abr16] Abrahams, H.: *Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle*, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2016.
- [AMR+22] Azarhoushang, B.; Marinescu, I. D.; Rowe, W. B.; Dimitrov, B.; Ohmori, H.: *Tribology and Fundamentals of Abrasive Machining Processes (Third Edition)*, Third Edition, William Andrew Publishing, 2022, 978-0-128-23777-9.
- [AYO+01] AOYAMA, E.; Yanagitani, K.; ONCHI, Y.; Hirogaki Toshiki; Irie, A.: *Study on super-finishing by CBN stone (estimation of cutting performance using average crossing angle)*, In: Journal of Materials Processing Technology, 118 (2001), 1-3, S. 429-435, 10.1016/S0924-0136(01)00867-6.
- [BAG14] Biermann, D.; Abrahams, H.; Goeke, S.: *Optimization of guide pads for the BTA deep hole drilling of high alloyed steels by microfinishing*, In: Production Engineering, 8 (2014), 1-2, S. 33-40, 10.1007/s11740-013-0505-z.
- [Bar18] Barton, K.: *Crankshaft Journal Finish*, In: Engine Professional, 11 (2018), Nr. 1, S. 64-70.
- [BBM+12] Bein, T.; Bös, J.; Mayer, D.; Melz, T.: *Advanced materials and technologies for reducing noise, vibration and harshness (NVH) in automobiles*, In: Jason Rowe (Hrsg.): Advanced Materials in Automotive Engineering, S. 254-298, 2012, 978-1-845-69561-3.
- [BCL+08] Bruzzone, A.; Costa, H. L.; Lonardo, P. M.; Lucca, D. A.: *Advances in engineered surfaces for functional performance*, In: CIRP Annals - Manufacturing Technology, 57 (2008), Nr. 2, S. 750-769, 10.1016/j.cirp.2008.09.003.
- [BGT+13] Biermann, D.; Goeke, S.; Tillmann, W.; Nebel, J.: *Improvement of wear resistant thermally sprayed coatings by microfinishing*, In: CIRP Annals, 62 (2013), Nr. 1, S. 559-562, 10.1016/j.cirp.2013.03.023.
- [BKH+14] Biermann, D.; Kansteiner, M.; Hess, S.; Joliet, R.: *Mikrofinishen mit MMS oder Druckluftkühlung*, In: VDI-Z Integrierte Produktion (2014), 7/8, S. 57-59.

- [BMS+20] Behrens, B.-A.; Meijer, A.; Stangier, D.; Hübner, S.; Biermann, D.; Tillmann, W.; Rosenbusch, D.; Müller, P.: *Static and oscillation superimposed ring compression tests with structured and coated tools for Sheet-Bulk Metal Forming*, In: Journal of Manufacturing Processes, 55 (2020), S. 78-86, 10.1016/j.jmapro.2020.04.007.
- [Bob13] Bobzin, K.: *Oberflächentechnik für den Maschinenbau*, 1. Aufl., Wiley-VCH, 2013, 978-3-527-33018-8.
- [Bos24] Burchardt, J.; Herhold, P.; Richenhagen, E.; Schaefer, T.; Goecke, H.: *Transformationspfade für das Industrieland Deutschland: Eckpunkte für eine neue industriepolitische Agenda*, Bundesverband der Deutschen Industrie e. V.; Institut der Deutschen Wirtschaft; Boston Consulting Group, 10. September 2024.
- [Bra80] Brandin, H.: *Einflussgrößen beim Außenrund-Kurzhubhonen*, In: Technische Mitteilungen. Haus der Technik e.V, 73 (1980), Nr. 8, S. 695-698.
- [Bre13] Breidenstein, B.: *Surface Integrity*, In: Laperrière, L.; Reinhart, G. (Hrsg.): *Encyclopedia of Production Engineering*, 1., st edition, S. 1188-1199, 2013, 978-3-642-20616-0.
- [BS12] Bargel, H.-J.; Schulze, G.: *Werkstoffkunde*, Springer Berlin Heidelberg, 2012, 978-3-642-17716-3.
- [BT06] Berns, H.; Theisen, W.: *Eisenwerkstoffe: Stahl und Gusseisen*, 3., vollst. neu bearb. u. erw., Springer, 2006, 3-540-29792-8.
- [BT19] Bosch, M.; Tilger, M.: *Superfinishen – das Verfahren für hochbeanspruchte und funktionale Oberflächen*, 8. Dortmunder Schleifseminar, Dortmund, 09.-10. Oktober 2019.
- [BTB21] Bosch, M.; Tilger, M.; Biermann, D.: *Durch Superfinishen die Geräuscentwicklung von Getriebewellen minimieren*, In: Schleifen + Polieren, 25 (2021), Nr. 3, S. 72-75.
- [BTT19] Biermann, D.; Tilger, M.; Timmermann, A.: *Echtzeit-Aufnahme der Oberflächenrauheit im Rahmen einer zweistufigen Microfinishbearbeitung*, In: Diamond Business, 70 (2019), Nr. 3, S. 80-87.
- [BWK+17] Biermann, D.; Wiederkehr, P.; Kansteiner, M.; Tilger, M.: *Einfluss der Andrückrollenhärte beim Microfinishen. Analyse der*

- Kontaktbedingungen und der erzielten Oberflächenrauheiten*
Microfinishing - Influence of the pressure roller hardness: Analysis of the contact conditions and the obtained surface roughness, In: wt Werkstattstechnik online, 107; Jg. 2017 (2017), 1/2, S. 59-65.
- [CH15] Czichos, H.; Habig, K.-H.: *Tribologie-Handbuch*, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015, 978-3-834-81810-2.
- [CLS10] Cannam, C.; Landone, C.; Sandler, M.: *Sonic visualiser*, In: Del Bimbo, A.; Chang, S.-F.; Smeulders, A. (Hrsg.): *Proceedings of the 18th ACM international conference on Multimedia*, S. 1467-1468, 2010, 978-1-605-58933-6.
- [CVC+16] Courbon, C.; Valiorgue, F.; Claudin, C.; Jacquier, M.; Dumont, F.; Rech, J.: *Influence of Some Superfinishing Processes on Surface Integrity in Automotive Industry*, In: *Procedia CIRP*, 45 (2016), S. 99-102, 10.1016/j.procir.2016.02.345.
- [D12780-1] DIN EN ISO 12780-1: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Geradheit - Teil 1: Begriffe und Kenngrößen der Geradheit*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 2014.
- [D13565-2] DIN EN ISO 13565-2: *Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Oberflächen mit plateauartigen funktionsrelevanten Eigenschaften*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, April 1998.
- [D21920-2] DIN EN ISO 21920-2: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit - Teil 2: Begriffe und Kenngrößen für die Oberflächenbeschaffenheit*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2022.
- [D4287] DIN EN ISO 4287: *Geometrische Produktspezifikation (GPS) – Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren – Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juli 2010.
- [D4768] DIN 4768: *Ermittlung der Rauheitskenngrößen Ra, Rz, Rmax mit elektrischen Tastschnittgeräten - Begriffe, Messbedingungen*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Mai 1990.
- [D683-17] DIN EN ISO 683-17: *Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle - Teil 17: Wälzlagerstähle*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Dezember 2023.

- [D683-2] DIN EN ISO 683-2: *Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle - Teil 2: Legierte Vergütungsstähle*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, September 2018.
- [D683-3] DIN EN ISO 683-3: *Für eine Wärmebehandlung bestimmte Stähle, legierte Stähle und Automatenstähle - Teil 3: Einsatzstähle*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, Juni 2022.
- [D8589-14] DIN 8589-14: *Fertigungsverfahren Spanen - Teil 14: Honen - Einordnung, Unterteilung, Begriffe*, Beuth Verlag GmbH, Berlin, September 2003.
- [EB99] Evans, C. J.; Bryan, J. B.: "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces, In: CIRP Annals, 48 (1999), Nr. 2, S. 541-556, 10.1016/S0007-8506(07)63233-8.
- [ESG+07] El Mansori, M.; Sura, E.; Ghidossi, P.; Deblaise, S.; Dal Negro, T.; Khanfir, H.: *Toward physical description of form and finish performance in dry belt finishing process by a tribo-energetic approach*, In: Journal of Materials Processing Technology, 182 (2007), 1-3, S. 498-511, 10.1016/j.jmatprotec.2006.09.009.
- [FYH+16] Furushiro, N.; Yamaguchi, T.; Hirooka, D.; Matsumori, N.; Tanada, K.: *Multistage Superfinishing of Sapphire with Vitrified-Bonded Diamond Superabrasive Stones*, In: ASPE - American Society for Precision Engineering (Hrsg.): 31st ASPE Annual Meeting 2016, S. 478-482, 2016, 978-1-510-88135-8.
- [G7] GfT-Arbeitsblatt 7: *Tribologie - Verschleiß, Reibung - Definitionen, Begriffe, Prüfung*, DIN Media GmbH, Berlin, September 2002.
- [GBS+14] Goeke, S.; Biermann, D.; Stickel, D.; Stemmer, P.; Fischer, A.; Geenen, K.; Huth, S.; Theisen, W.: *Enhancing the Surface Integrity of Tribologically Stressed Contacting Surfaces by an Adjusted Surface Topography*, In: Procedia CIRP, 13 (2014), Supplement C, S. 214-218, 10.1016/j.procir.2014.04.037.
- [GC14] Godi, A.; Chiffre, L. de: *Functional Surfaces in Mechanical Systems*, In: Santo, L.; Davim, P. J. (Hrsg.): Surface engineering techniques and applications: Research advancements, S. 1-44, 2014, 978-1-466-65218-7.

- [Goe16] Goeke, S.: *Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Microfinishes*, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2016.
- [Gri23] Grillenberger, H.: *Gleit- und Wälzlagerungen 2023*, In: VDI Wissensforum GmbH (Hrsg.): *Gleit- und Wälzlagerungen 2023*: 15. VDI-Fachtagung : Gestaltung – Berechnung – Einsatz : 13. und 14. Juni 2023, Schweinfurt Maininsel, (VDI-Berichte, 2415), S. 267-278, 2023, 9783181024157.
- [HAE12] Holmberg, K.; Andersson, P.; Erdemir, A.: *Global energy consumption due to friction in passenger cars*, In: *Tribology International*, 47 (2012), S. 221-234, 10.1016/j.triboint.2011.11.022.
- [HBT+24] Heining, I.; Bergmann, J. A.; Tilger, M.; Biermann, D.; Wiederkehr, P.: *Simulation of process forces and topographical characteristics of single grains in microfinishing processes*, In: *Production Engineering*, 18 (2024), Nr. 6, S. 975-982, 10.1007/s11740-024-01285-z.
- [Her82] Hertz, H.: *Ueber die Berührung fester elastischer Körper*, In: *Journal für die reine und angewandte Mathematik*, 1882 (1882), Nr. 92, S. 156-171, 10.1515/crll.1882.92.156.
- [Hil10] Hildebrandt, O.: *Superfinish - Ein innovatives Verfahren zur Verbesserung von Oberfläche und Form: Superfinish - an innovative process for improving surface and form*, In: Tawakoli, T. (Hrsg.): *Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung 2010 : neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis*, 8. Seminar, S. 12, 2010, 978-3-802-72957-7.
- [HYK+16] Hashimoto, F.; Yamaguchi, H.; Krajnik, P.; Wegener, K.; Chaudhari, R.; Hoffmeister, H.-W.; Kuster, F.: *Abrasive fine-finishing technology*, In: *CIRP Annals*, 65 (2016), Nr. 2, S. 597-620, 10.1016/j.cirp.2016.06.003.
- [Ita18] Itasse, S.: *Bandfinishwerkzeug passt sich dem Werkstück an*, In: *Maschinenmarkt* (2018), Nr. 19, S. 163-164.
- [Jos06] Jost, H. P.: *Tribology: How a word was coined 40 years ago*, In: *Tribology & Lubrication Technology*, 62 (2006), S. 24-28.

- [KDK22] Klink, U.; Dellin, M.; Kraushaar, S.: *Honen - Umweltbewusst und kostengünstig fertigen*, Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2022, 978-3-446-47007-1.
- [KHK+21] Krajnik, P.; Hashimoto, F.; Karpuschewski, B.; Da Silva, E. J.; Axinte, D.: *Grinding and fine finishing of future automotive powertrain components*, In: CIRP Ann. Manuf. Technol., 70 (2021), Nr. 2, S. 589-610, 10.1016/j.cirp.2021.05.002.
- [Kip23] Kipp, M.: *Feinstbearbeitung von Hartmetall unter Einsatz elastisch gebundener Diamantschleifwerkzeuge zur Präparation von Spannuten*, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2023.
- [KK05] Klocke, F.; König, W.: *Schleifen, Honen, Läppen*, 4., neu bearb. Aufl., Springer, 2005, 3-540-23496-9.
- [Kra12] Kramer, F.: *Numerische Untersuchungen zur Reduktion des turbulenten Reibungswiderstands durch aktiv und passiv oszillierende Wandstrukturen*, Dissertation, Technische Universität Berlin, 2012.
- [KRZ07] Khellouki, A.; Rech, J.; Zahouani, H.: *Influence of the belt-finishing process on the surface texture obtained by hard turning*, In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 221 (2007), Nr. 7, S. 1129-1137, 10.1243/09544054JEM776.
- [KRZ13a] Khellouki, A. b.; Rech, J.; Zahouani, H.: *Micro-scale investigation on belt finishing cutting mechanisms by scratch tests*, In: Wear, 308 (2013), 1-2, S. 17-28, 10.1016/j.wear.2013.09.016.
- [KRZ13b] Khellouki, A.; Rech, J.; Zahouani, H.: *Energetic analysis of cutting mechanisms in belt finishing of hard materials*, In: Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 227 (2013), Nr. 9, S. 1409-1413, 10.1177/0954405413487528.
- [LAE+16] Löffler, M.; Andreas, K.; Engel, U.; Schulte, R.; Groebel, D.; Krebs, E.; Freiburg, D.; Biermann, D.; Stangier, D.; Tillmann, W.; Weikert, T.; Wartzack, S.; Tremmel, S.; Lucas, H.; Denkena, B.; Merklein, M.: *Tribological measures for controlling material flow in sheet-bulk metal forming*, In: Production Engineering, 10 (2016), 4-5, S. 459-470, 10.1007/s11740-016-0695-2.

- [Mar76] Martin, K.: *Der Werkstoffabtragvorgang beim Feinbearbeitungsverfahren Honen*, In: Maschinenmarkt, Würzburg, 60 (1976), Nr. 82, S. 1074.
- [MB21] Meijer, A.; Biermann, D.: *Machining of Molds with Filigree Structures for Sheet-Bulk Metal Forming*, In: Merklein, M.; Tekkaya, A. E.; Behrens, B.-A. (Hrsg.): *Sheet Bulk Metal Forming, (Lecture Notes in Production Engineering)*, S. 147-171, 2021, 978-3-030-61901-5.
- [MBB11] Mang, T.; Bobzin, K.; Bartels, T.: *Industrial tribology: Tribosystems, friction, wear and surface engineering, lubrication*, Wiley-VCH, ©2011, 978-3-527-32057-8.
- [MBP18] Murčinková, Z.; Baron, P.; Pollák, M.: *Study of the Press Fit Bearing-Shaft Joint Dimensional Parameters by Analytical and Numerical Approach*, In: *Advances in Materials Science and Engineering* (2018), S. 1-10, 10.1155/2018/2916068.
- [MDM+20] Maucher, C.; Duntschew, J.; Möhring, H.-C.; Tilger, M.; Biermann, D.: *Controlling the Additive-Subtractive Process Chain*, In: *Proceedings of the 5th Metal Additive Manufacturing Conference 2020: Industrial Perspectives in Additive Technologies*, S. 211-222, 2020.
- [Mic99] Michel, S.: *Entwicklung einer kraftgeregelten Bandfinishtechnologie für die Präzisionsbearbeitung von Schwermaschinenbauteilen*, Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 1999.
- [MS62] Mulhearn, T. O.; Samuels, L. E.: *The abrasion of metals: A model of the process*, In: *Wear*, 5 (1962), Nr. 6, S. 478-498, 10.1016/0043-1648(62)90064-9.
- [MY92] Martin, K.; Yegenoglu, K.: *HSG-Technologie: Handbuch zur praktischen Anwendung*, Firma Guehring Automation GmbH, 1992.
- [Nag13] Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH: *Bandfinishwerkzeug optimiert die Bearbeitung von Kurbelwellen Flexibel am laufenden Band*, In: *mav maschinen anlagen verfahren* (2013), Nr. 10, S. 32.
- [Paf11] Paffrath, K.-U.: *Untersuchungen zum kraftgeregelten Langhubhonen auf multifunktionalen Bearbeitungszentren*, Dissertation, Technische Universität Dortmund, 2011.

-
- [Pau08] Paucksch, E.: *Zerspantechnik: Prozesse, Werkzeuge, Technologien*, 12., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage, Vieweg+Teubner, 2008, 978-3-834-89494-6.
- [PHB10] Paffrath, K.-U.; Heymann, T.; Biermann, D.: *Umweltfreundlicher Glanz - Super- /Micro-Bandfinishen ohne Kühlschmierstoff*, In: WB Werkstatt+Betrieb, 143 (2010), Nr. 3, S. 62-64.
- [PHW19] Popov, V. L.; Heß, M.; Willert, E.: *Handbook of Contact Mechanics: Exact Solutions of Axisymmetric Contact Problems*, Springer Nature, 2019, 978-3-662-58709-6.
- [Pop16] Popov, V.: *Kontaktmechanik und Reibung: Von der Nanotribologie bis zur Erdbebendynamik*, Springer Vieweg, 2016, 978-3-662-45975-1.
- [QCL+17] Qiu, M.; Chen, L.; Li, Y.; Yan, J.: *Bearing Tribology*, Springer Berlin Heidelberg, 2017, 978-3-662-53095-5.
- [RKG+08] Rech, J.; Kermouche, G.; Grzesik, W.; García-Rosales, C.; Khellouki, A.; García-Navas, V.: *Characterization and modelling of the residual stresses induced by belt finishing on a AISI52100 hardened steel*, In: Journal of Materials Processing Technology, 208 (2008), 1-3, S. 187-195, 10.1016/j.jmatprotec.2007.12.133.
- [Ros15] Rosenkranz, A.: *Tribologie an Oberflächen mit maßgeschneidertem topographischem Design*, Dissertation, Universität des Saarlandes, 2015.
- [Rud04] Rudloff, G.: *Der Superfinish-Prozess - Superfinish-Bearbeitung mit Band*, In: Tawakoli, T. (Hrsg.): *Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung: Neue Entwicklungen und Trends aus Forschung und Praxis*; 5. Seminar 'Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung' am 13.05.2004 Stuttgart, Als Ms. gedr, 1-20, 2004, 3-000-13657-6.
- [Rud08] Rudloff, G.: *Superfinish von Automobil-Komponenten mit Band*, In: Weinert, K.; Biermann, D. (Hrsg.): *Spanende Fertigung: Prozesse, Innovationen, Werkstoffe*, (5), 5.Ausgabe, 5. Ausgabe, 119-132, 2008, 3-802-72943-9.
- [SB01] Stout, K.; Blunt, L.: *A contribution to the debate on surface classifications—random, systematic, unstructured, structured and engineered*, In: International Journal of Machine Tools and

- Manufacture, 41 (2001), 13-14, S. 2039-2044, 10.1016/S0890-6955(01)00069-4.
- [Sch02] Schönherr, H.: *Spanende Fertigung*, Reprint 2018, Oldenbourg Verlag, 2002.
- [Sch09] Schlecht, B.: *Maschinenelemente 2*, 1., Auflage, Addison Wesley ein Imprint von Pearson Deutschland, 2009, 978-3-827-37146-1.
- [Sch19] Schmitz, T.: *Neue Perspektiven beim Bandfinishen mit gedrucktem Abrasiv - Ein Erfahrungsbericht zum Kurbelwellenfinish und Ausblick auf weitere Finishpotentiale*, In: Goldau, H.; Stolze, R. (Hrsg.): *Sensitive Fertigungstechnik: Tagungsband der 4. Fachtagung 2017*, S. 45-51, 2019, 978-3-844-06397-4.
- [Sch99] Schibisch, D. M.: *Kühles Band für beste Güte. Metallbearbeitung*, In: *Automobil Industrie*, 44 (1999), Nr. 10, S. 84-88.
- [SD14] Santo, L.; Davim, P. J.: *Surface engineering techniques and applications: Research advancements*, IGI Global, Hershey, Pennsylvania (701 E. Chocolate Avenue, Hershey, Pa., 17033, USA), 2014, 978-1-466-65218-7.
- [SF01] Schibisch, D. M.; Friedrich, U.: *Superfinish-Technologie: Feinste Oberflächen für höchste Präzision*, Verl. Moderne Industrie, 2001, 3-478-93253-X.
- [SGG+15] Stickel, D.; Goeke, S.; Geenen, K.; Huth, S.; Theisen, W.; Biermann, D.; Fischer, A.: *Reciprocating sliding wear of case-hardened spheroidal cast iron against 100Cr6 under boundary lubrication*, In: *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*, 229 (2015), Nr. 10, S. 1214-1226, 10.1177/1350650115576245.
- [SGG19] Schmiedeberg, J.; Goldau, H.; Genz, B.: *Innovative Technologien in der Präzisions-Wälzlagerfertigung*, In: Goldau, H.; Stolze, R. (Hrsg.): *Sensitive Fertigungstechnik: Tagungsband der 4. Fachtagung 2017*, S. 71-77, 2019, 978-3-844-06397-4.
- [SHS10] Sommer, K.; Heinz, R.; Schöfer, J.: *Verschleiß metallischer Werkstoffe: Erscheinungsformen sicher beurteilen ; mit zahlreichen Tabellen*, 1. Aufl., Vieweg + Teubner, 2010, 978-3-834-89775-6.

- [Sto17] Stolze, R.: *Methoden der Prozessführung für das Planfinishen durch Dreh-Seiten-Querschleifen*, 1. Auflage, Shaker, 2017, 978-3-844-05560-3.
- [SUJ+] Schröer, N.; Uhlmann, E.; Jochem, R.; Kohl, H.; Krüger, J.; Rethmeier, M.; Seliger, G.; Stark, R.: *Spannutschleifen von Hartmetall-Schaftwerkzeugen mit gradierten Schleifscheiben*, Dissertation, Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik; Fraunhofer IRB-Verlag.
- [SVT+21] Strodick, S.; Vogel, F.; Tilger, M.; Denstorf, M.; Kipp, M.; Baak, N.; Kukui, D.; Biermann, D.; Barrientos, M. M.; Walther, F.: *Innovative X-Ray Diffraction and Micromagnetics Approaches for Reliable Residual Stress Assessment in Deep Rolled and Microfinished Aisi 4140 Components*, In: SSRN Electronic Journal (2021), 10.2139/ssrn.3996922.
- [Tam17] Tamatam, L. R.: *Tribological performance of different crankshaft bearings in conjunction with textured shaft surfaces*, Master Thesis, Luleå University of Technology, 2017.
- [TB23] Tilger, M.; Biermann, D.: *Werkzeug-Einlaufverhalten beim Microfinishen/Analysis of the running-in behavior of metal-bonded diamond finishing tools – Tool run-in behavior during microfinishing*, In: wt Werkstattstechnik online, 113 (2023), 11-12, S. 482-488, 10.37544/1436-4980-2023-11-12-18.
- [TBA+19] Tilger, M.; Biermann, D.; Abdulgader, M.; Tillmann, W.: *The Effect of Machined Surface Conditioning on the Coating Interface of High Velocity Oxygen Fuel (HVOF) Sprayed Coating*, In: Journal of Manufacturing and Materials Processing, 3 (2019), Nr. 3, S. 79, 10.3390/jmmp3030079.
- [Tho08] Thomaier, M.: *Optimierung der NVH-Eigenschaften von Pkw-Fahrwerkstrukturen mittels Active-Vibration-Control*, Dissertation, Technische Universität Darmstadt, 2008.
- [TKS+17] Tilger, M.; Kipp, M.; Schumann, S.; Dereli, T. T.; Biermann, D.: *Structuring Surfaces by Microfinishing Using Defined Abrasive Belts*, In: Inventions, 2 (2017), Nr. 4, S. 33, 10.3390/inventions2040033.

- [Tön70] Tönshoff, T.: *Formgenauigkeit, Oberflächenrauheit und Werkstoffabtrag beim Langhubhonen*, Dissertation, Universität Karlsruhe, 1970.
- [TSB17] Tilger, M.; Siebrecht, T.; Biermann, D.: *Fundamental Investigations of Honing Processes Related to the Material Removal Mechanisms*, In: Schmitt, R. H.; Schuh, G. (Hrsg.): 7. WGP-Jahreskongress, S. 121-127, 2017, 978-3-863-59620-0.
- [USK15] Uhlmann, E.; Spur, G.; Kleinschnitker, M.: *Honing and Superfinishing*, In: Handbook of Ceramics Grinding and Polishing, S. 234-262, 2015, 978-1-455-77858-4.
- [Uts12] Utsch, P.: *Flexibles Bandfinishwerkzeug zur Kurbelwellenbearbeitung*, In: VDI-Z Integrierte Produktion, 154 (2012), Nr. 6, S. 28-30.
- [V2631-11] VDI/VDE Richtlinie 2631-11: *Formmesstechnik - Spektralanalyse (Fourieranalyse, Harmonische Analyse)* Blatt 11, Beuth Verlag GmbH, Berlin, July 2020.
- [VDI23] VDI Wissensforum GmbH: *Gleit- und Wälzlagerungen 2023: 15. VDI-Fachtagung : Gestaltung – Berechnung – Einsatz : 13. und 14. Juni 2023, Schweinfurt Maininsel*, VDI Verlag GmbH, Düsseldorf, (VDI-Berichte 2415), 2023, 9783181024157.
- [VM00] Varghese, B.; Malkin, S.: *Selection of Optimal Superfinishing Parameters*, In: Journal of Manufacturing Processes, 2 (2000), Nr. 2, S. 124-130, 10.1016/S1526-6125(00)70020-X.
- [VM98] Varghese, B.; Malkin, S.: *Experimental Investigation of Methods to Enhance Stock Removal for Superfinishing*, In: CIRP Annals, 47 (1998), Nr. 1, S. 231-234, 10.1016/S0007-8506(07)62824-8.
- [Wag13] Wagner, T.: *Planning and multi-objective optimization of manufacturing processes by means of empirical surrogate models*, Dissertation, 2013.
- [WB07] Weigmann, U.-P.; Bosch, M.: *Andrückeinrichtung für Schneidmittel sowie Vorrichtung und Verfahren zur Finishbearbeitung von Umfangsflächen an zylindrischen Werkstückabschnitten* Nagel Maschinen- und Werkzeugfabrik GmbH, IPC B24B 35/00, 2009.
- [Wei12] Weißbach, W.: *Werkstoffkunde: Strukturen, Eigenschaften, Prüfung*, 18., überarb. Aufl, Vieweg + Teubner, 2012, 978-3-834-81587-3.

- [Wei95] Weiss, E.: *Finishbearbeitung mit Folien*, In: Honen in Forschung und industrieller Anwendung, Qualität in der Fertigung, Fachtagung, 3; S. 13-24 (1995).
- [WS86] Whitney, W.; Schwab, B.: *Crankshaft surfaces: Finishing methods, surface characterization and their influence on wear*, In: Wear, 108 (1986), Nr. 4, S. 345-356, 10.1016/0043-1648(86)90012-8.
- [WW93] Weiss, Z.; Weiss, E.: *Qualitätssicherung der Wälzlager beim Schleifen und Kurzhubhonen*, In: Salje, E.; Tönnshoff, H.; Westkämper, E. (Hrsg.): Jahrbuch Schleifen, Honen, Läppen und Polieren: Verfahren und Maschinen, (57), Bd. 57, S. 349-365, 1993, 3-802-72910-2.
- [ZM83] Zum Gahr, K. H.; Mewes, D.: *Werkstoffabtrag beim Furchungsverschleiß*, In: Metall, 37 (1983), Nr. 12, S. 1212-1217.
- [Zum81] Zum Gahr, K.-H.: *Abrasiver Verschleiss metallischer Werkstoffe*, In: VDI - Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.): Fortschritt-Berichte der VDI Zeitschriften, (Reihe 5: Grund- und Werkstoffe, 57), Bd. 57, 1981.
- [Zum87] Zum Gahr, K.-H.: *Microstructure and wear of materials*, Elsevier, 1987, 978-0-444-42754-0.
- [Zum98] Zum Gahr, K. H.: *Wear by hard particles*, In: Tribology International, 31 (1998), Nr. 10, S. 587-596, 10.1016/S0301-679X(98)00079-6.

Studentische Arbeiten

Im Rahmen dieser Dissertation wurden studentische Arbeiten ausgegeben und betreut. Ausgewählte Ergebnisse dieser studentischen Arbeiten finden inhaltliche Verwendung in dieser Dissertation und werden im Folgenden aufgeführt. Den Bearbeiterinnen und Bearbeitern gilt an dieser Stelle ein besonderer Dank für ihren Fleiß und Einsatz.

L. Brinker: Simulative Ermittlung der Flächenpressung beim Microfinishen mit elastischen Andrückrollen mithilfe der Finite Element Methode. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2021

Verwendet in Kapitel 5

M. Pochanina: Empirische Parametrisierung der Flächenpressung unter Berücksichtigung des elastischen Werkzeugsystems beim Microfinishen. Bachelorarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2022

Verwendet in Kapitel 5

L. Vogel: Untersuchung des Microfinishprozesses zur gezielten Einstellung der Eigenschaften rotationssymmetrischer Funktionsflächen Masterarbeit. Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2022

Verwendet in Kapitel 4, 5 und 6

G. Günther: Einsatz angepasster Anpresselemente beim Microfinishen mit Band zur gezielten Beeinflussung der Geradheit an Lagerstellen. Fachwissenschaftliche Projektarbeit, Institut für Spanende Fertigung, TU Dortmund, 2024

Verwendet in Kapitel 4 und 7

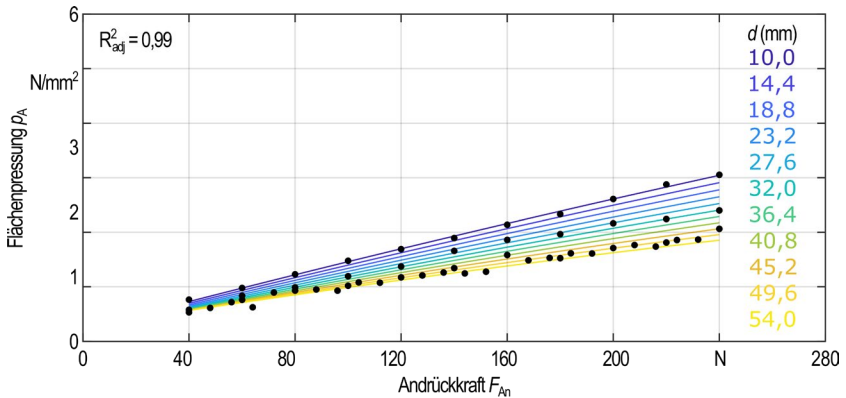
Anhang

Regressionsmodelle und Regressionsformeln für die Flächenpressung

Nachfolgend sind Regressionsmodelle und Regressionsgleichungen für die Flächenpressung in Abhängigkeit vom Werkstückdurchmesser und der Andrückkraft unter Berücksichtigung unterschiedlicher Andrückrollenbreiten, -härten und variierender Finishbänder aufgeführt. Aufgrund der besseren Übersicht beginnt die Darstellung auf der folgenden Seite.

Regressionsmodelle für variierende Durchmesser ($b_{Wz} = 12 \text{ mm}$; $H_R = 60 \text{ Shore A}$):

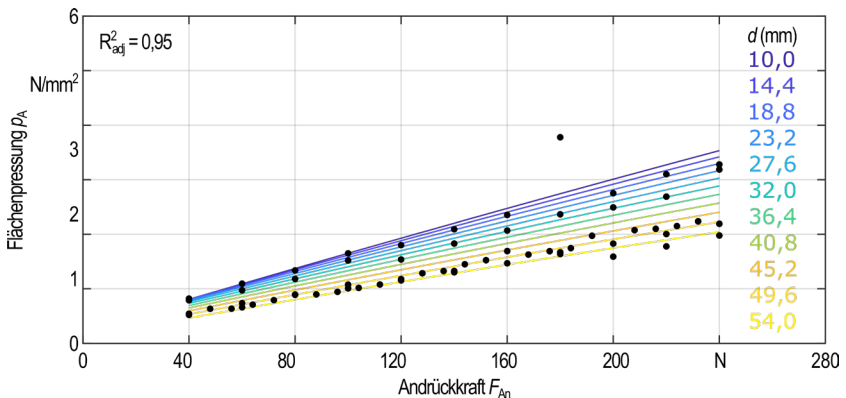
Korngröße/-auftrag $d_K = 9 \mu\text{m}$ (gestreut)



Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Rollenhärte H_R : 60 Shore A Korngröße d_K : 9 μm Kornauftrag: Gestreut

$$p_A = 1,5488 + 0,90104 * F_{An} - 0,33785 * d - 0,044557 * F_{An}^2 - 0,2567 * F_{An} * d + 0,043779 * d^2$$

Korngröße/-auftrag $d_K = 30 \mu\text{m}$ (gerichtet)

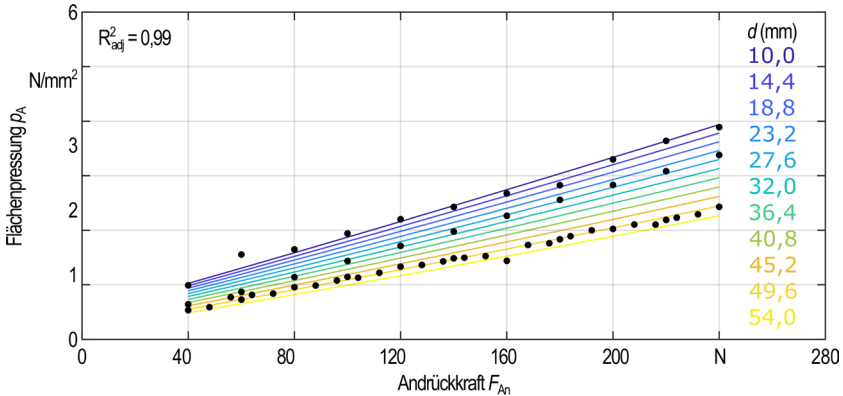


Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Rollenhärte H_R : 60 Shore A Korngröße d_K : 30 μm Kornauftrag: Gerichtet

$$p_A = 0,14582 + 0,015863 * F_{An} + 0,010222 * d - 3,26412e^{-6} * F_{An}^2 - 0,00013062 * F_{An} * d - 0,00019941 * d^2$$

Regressionsmodelle für variierende Durchmesser ($b_{Wz} = 12 \text{ mm}$; $H_R = 80 \text{ Shore A}$):

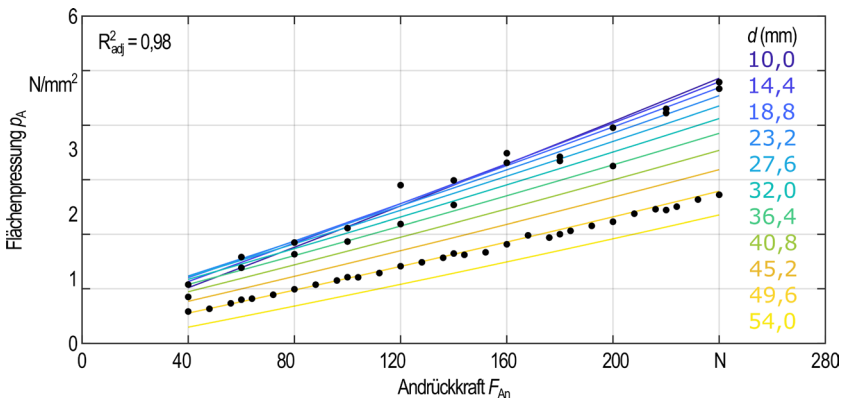
Korngröße/-auftrag $d_K = 9 \mu\text{m}$ (gestreut)



Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Rollenhärte H_R : 80 Shore A Korngröße d_K : 9 μm Kornauftrag: Gestreut

$$p_A = 1,9274 + 1,1732 * F_{An} - 0,55286 * d + 0,031817 * F_{An}^2 - 0,28321 * F_{An} * d - 0,030032 * d^2$$

Korngröße/-auftrag $d_K = 30 \mu\text{m}$ (gerichtet)

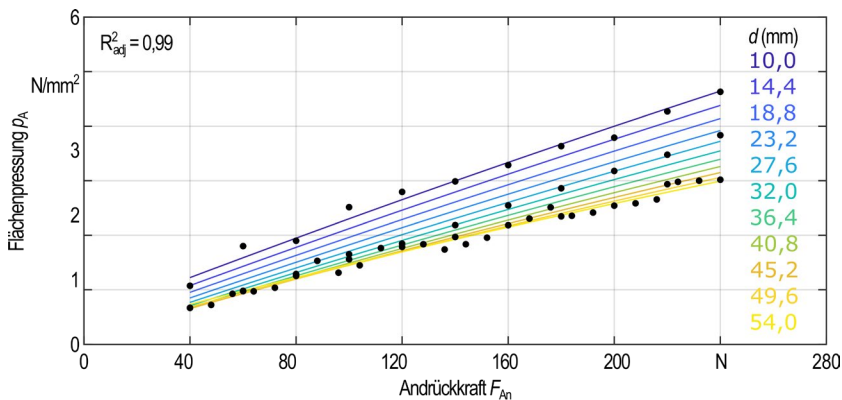


Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Rollenhärte H_R : 80 Shore A Korngröße d_K : 30 μm Kornauftrag: Gerichtet

$$p_A = 2,6089 + 1,4749 * F_{An} - 0,80764 * d + 0,038454 * F_{An}^2 - 0,44584 * F_{An} * d - 0,51531 * d^2$$

Regressionsmodelle für variierende Durchmesser ($b_{Wz} = 12 \text{ mm}$; $H_R = 90 \text{ Shore A}$):

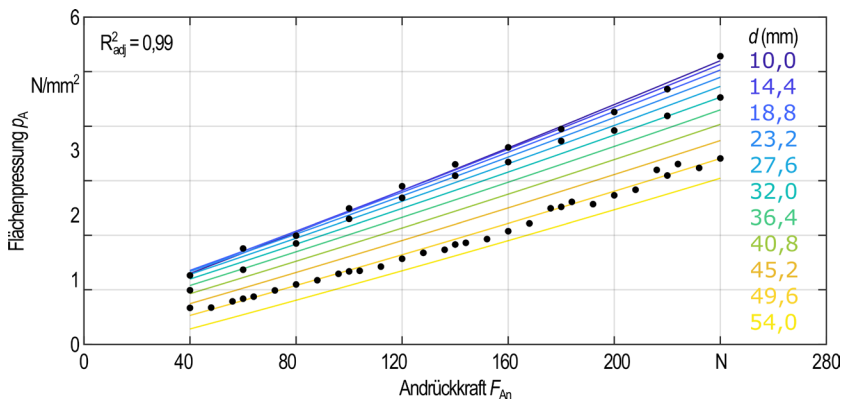
Korngröße/-auftrag $d_K = 9 \text{ } \mu\text{m}$ (gestreut)



Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Rollenhärte H_R : 90 Shore A Korngröße d_K : 9 μm Kornauftrag: Gestreut

$$p_A = 2,1914 + 1,4194 * F_{An} - 0,53527 * d - 0,063417 * F_{An}^2 - 0,29005 * F_{An} * d + 0,2695 * d^2$$

Korngröße/-auftrag $d_K = 30 \text{ } \mu\text{m}$ (gerichtet)

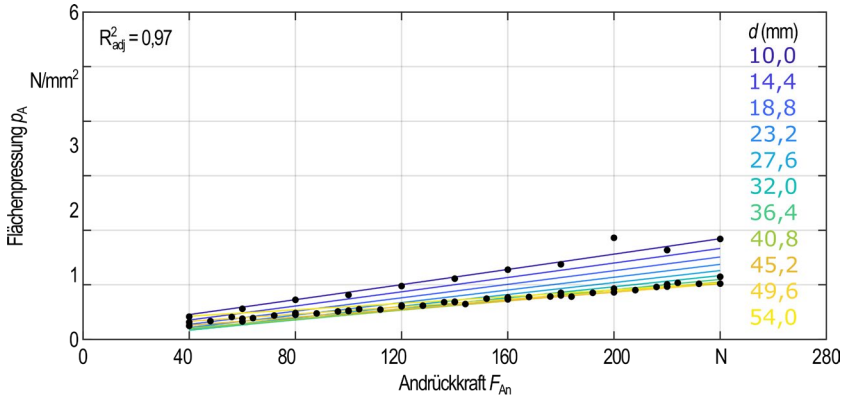


Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Rollenhärte H_R : 90 Shore A Korngröße d_K : 30 μm Kornauftrag: Gerichtet

$$p_A = 2,8235 + 1,6667 * F_{An} - 0,79341 * d + 0,039751 * F_{An}^2 - 0,28439 * F_{An} * d - 0,40696 * d^2$$

Regressionsmodelle für variierende Durchmesser ($b_{Wz} = 50 \text{ mm}$; $H_R = 80 \text{ Shore A}$):

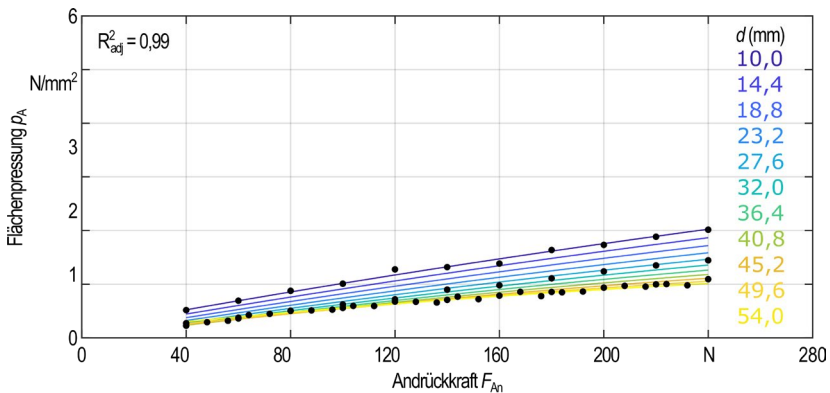
Korngröße/-auftrag $d_K = 9 \mu\text{m}$ (gestreut)



Wz.-breite b_{Wz} : 50 mm Rollenhärte H_R : 80 Shore A Korngröße d_K : 9 μm Kornauftrag: Gestreut

$$p_A = 0,66002 + 0,50085 * F_{An} - 0,2104 * d + 0,007952 * F_{An}^2 - 0,19569 * F_{An} * d + 0,27099 * d^2$$

Korngröße/-auftrag $d_K = 30 \mu\text{m}$ (gerichtet)

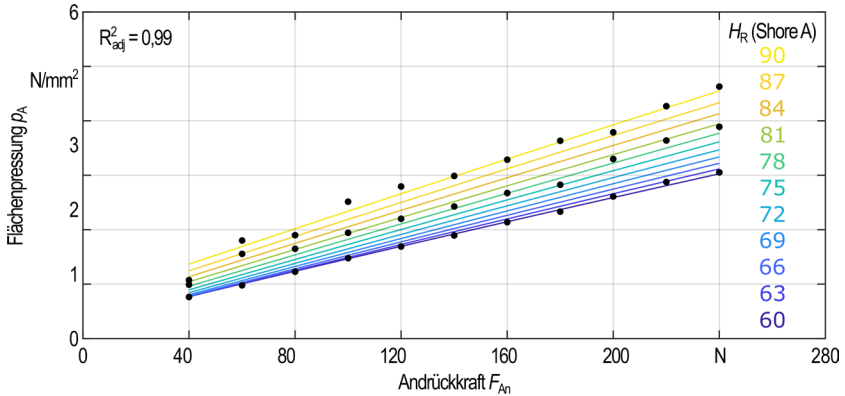


Wz.-breite b_{Wz} : 50 mm Rollenhärte H_R : 80 Shore A Korngröße d_K : 30 μm Kornauftrag: Gerichtet

$$p_A = 0,85517 + 0,5525 * F_{An} - 0,30812 * d - 0,050081 * F_{An}^2 - 0,10839 * F_{An} * d + 0,16063 * d^2$$

Regressionsmodelle für variierende Andrückrollenhärten ($b_{Wz} = 12 \text{ mm}$; $d = 10 \text{ mm}$)

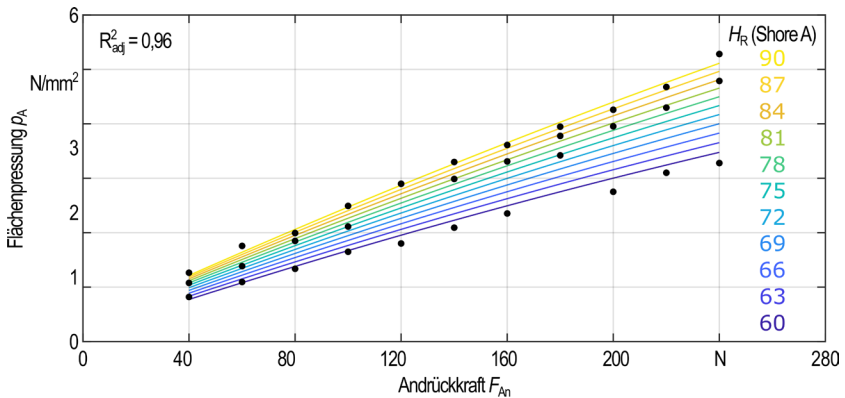
Korngröße/-auftrag $d_K = 9 \text{ } \mu\text{m}$ (gestreut)



Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Wkst.-durchmesser d : 10 mm Korngröße d_K : 9 μm Kornauftrag: Gestreut

$$p_A = 3,6695 + 0,0026243 * F_{An} - 0,10271 * H_R - 2,1694e^{-6} * F_{An}^2 + 0,00015437 * F_{An} * H_R + 0,00077585 * H_R^2$$

Korngröße/-auftrag $d_K = 30 \text{ } \mu\text{m}$ (gerichtet)

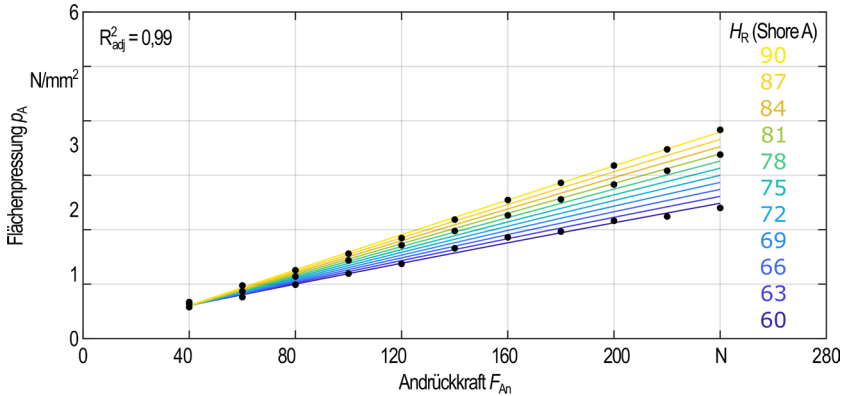


Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Wkst.-durchmesser d : 10 mm Korngröße d_K : 30 μm Kornauftrag: Gerichtet

$$p_A = -1,2684 + 0,0044517 * F_{An} + 0,034459 * H_R - 1,0358e^{-5} * F_{An}^2 + 0,00019941 * F_{An} * H_R - 0,00018499 * H_R^2$$

Regressionsmodelle für variierende Andrückrollenhärten ($b_{Wz} = 12 \text{ mm}$; $d = 30 \text{ mm}$)

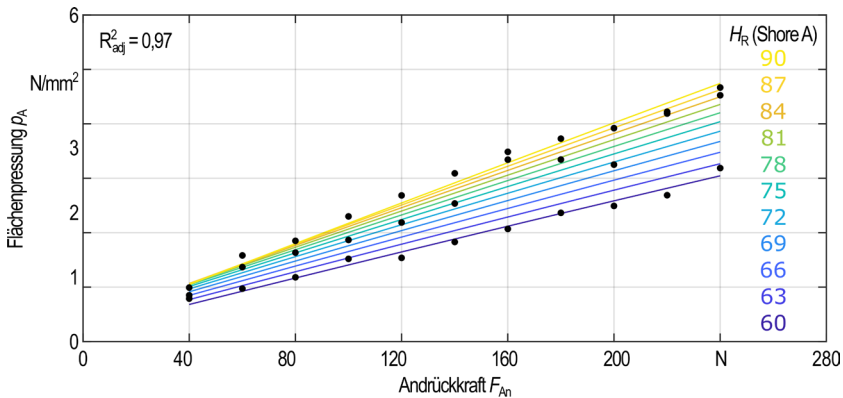
Korngröße/-auftrag $d_K = 9 \text{ }\mu\text{m}$ (gestreut)



Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Wkst.-durchmesser d : 30 mm Korngröße d_K : 9 μm Kornauftrag: Gestreut

$$p_A = 0,95788 - 0,002956 * F_{An} - 0,01507 * H_R - 2,5908e^{-6} * F_{An}^2 + 0,00021781 * F_{An} * H_R + 4,2709e^{-5} * H_R^2$$

Korngröße/-auftrag $d_K = 30 \text{ }\mu\text{m}$ (gerichtet)

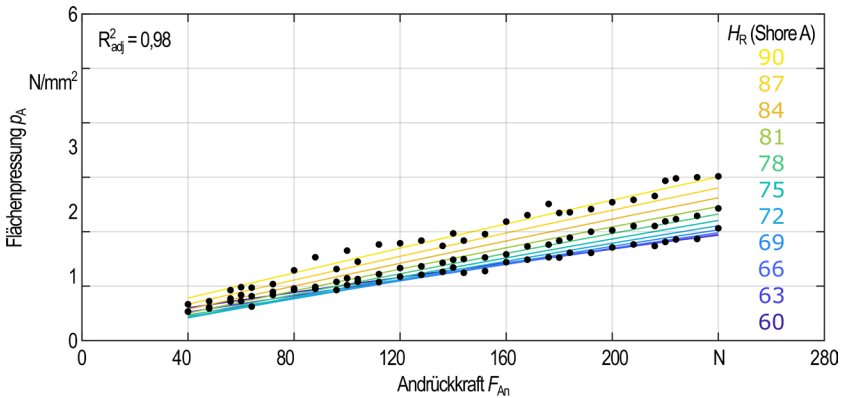


Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Wkst.-durchmesser d : 30 mm Korngröße d_K : 30 μm Kornauftrag: Gerichtet

$$p_A = -3,5084 - 0,0009322 * F_{An} + 0,10047 * H_R - 2,0303e^{-6} * F_{An}^2 + 0,00022203 * F_{An} * H_R - 0,00064749 * H_R^2$$

Regressionsmodelle für variierende Andrückrollenhärten ($b_{Wz} = 12 \text{ mm}$; $d = 50 \text{ mm}$)

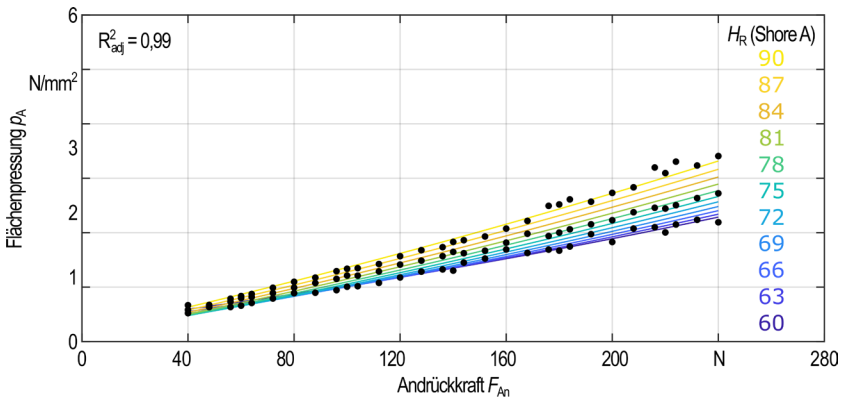
Korngröße/-auftrag $d_K = 9 \text{ }\mu\text{m}$ (gestreut)



Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Wkst.-durchmesser d : 50 mm Korngröße d_K : 9 μm Kornauftrag: Gestreut

$$p_A = 6,695 - 0,001464 * F_{An} - 0,1775 * H_R - 2,6813e^{-6} * F_{An}^2 + 0,00014833 * F_{An} * H_R + 0,0011839 * H_R^2$$

Korngröße/-auftrag $d_K = 30 \text{ }\mu\text{m}$ (gerichtet)



Wz.-breite b_{Wz} : 12 mm Wkst.-durchmesser d : 50 mm Korngröße d_K : 30 μm Kornauftrag: Gerichtet

$$p_A = 3,9361 - 0,0040076 * F_{An} - 0,096249 * H_R - 9,0579e^{-6} * F_{An}^2 + 0,00016558 * F_{An} * H_R + 0,00060587 * H_R^2$$

Regressionsformeln der dargestellten 3D-Regressionsmodelle

Im Folgenden sind die Regressionsformeln der dargestellten Regressionsmodelle aufgeführt. Die Regressionsmodelle wurden auf Basis einer von Dr. Tobias Hütter geb. Wagner am ISF entwickelten Methode. Die Modellierung basiert auf statistischen Methoden und berücksichtigt über Optimierungsschleifen automatisch die Auswahl des Modells mit der höchsten Aussagekraft. Hierzu werden die Eingangsparameter rechnerisch standardisiert. Anhand der Koeffizienten der resultierenden Funktionsgleichung lässt sich damit der Einfluss der Parameter auf die Zielgröße abschätzen [Wag13]. Die Koeffizienten sind für die Darstellung auf die vierte Nachkommastelle gerundet. Die resultierenden Funktionsgleichungen sind auf der folgenden Seite in Zuordnung zur jeweiligen Abbildung tabellarisch aufgelistet:

5-3 a)	$p_A = \log (0,6463 + 0,65 * 10^{-3} * F_{An} + 0,0126 * F_{An}^2 - 2,93 * 10^{-4} * d - 2,11 * 10^{-5} * d^2)$
5-3 b)	$p_A = \log (-0,233 + 0,063 * F_{An} + 0,019 * F_{An}^2 - 1,94 * 10^{-4} * d - 0,11 * 10^{-3} * d^2 + 7,94 * 10^{-6} * F_{An} * d)$
5-3 c)	$p_A = 0,153 + 0,036 * F_{An} + * F_{An}^2 - 0,022 * d - 1,33 * 10^{-4} * d^2 - 8,33 * 10^{-4} * F_{An} - 3,9 * 10^{-6} * d)$
6-3 a)	$Rz = 0,035 + * p_{Fl} + 4,38 * 10^{-3} * p_{Fl}^2 - 1,83 * 10^{-3} * v_c + 2,40 * 10^{-4} * v_c^2$
6-3 b) / 6-4 a)	$Rz = \log (-0,0452 + 0,338 * p_{Fl} + 0,033 * p_{Fl}^2 - 0,042 * v_c)$
6-4 b)	$Rz = 6,045 - 8,343 * p_{Fl} - 0,013 * p_{Fl}^2 - 3,746 * v_c - 4,93 * 10^{-5} * v_c^2$
6-6 a)	$m = 12,633 - 33,521 * p_{Fl} + 0,021 * p_{Fl}^2 - 14,638 * v_c - 1,13 * 10^{-5} * v_c^2$
6-6 b)	$m = 9,581 - 27,082 * p_{Fl} + 0,046 * p_{Fl}^2 + 11,175 * v_c - 2,55 * 10^{-4} * v_c^2$
6-7 a)	$Rz = 1,182 - 2,032 * p_{Fl} + 2,51 * 10^{-3} * p_{Fl}^2 + 1,034 * v_c - 1,23 * 10^{-5} * v_c^2$
6-7 b) / 6-8 a)	$Rz = -1,847 + 4,011 * p_{Fl} + 6,63 * 10^{-3} * p_{Fl}^2 - 1,815 * v_c - 2,8 * 10^{-5} * v_c^2$
6-8 b)	$Rz = -5,258 + 6,524 * p_{Fl} + 8,6 * 10^{-3} * p_{Fl}^2 - 2,285 * v_c - 2,21 * 10^{-5} * v_c^2$
6-10 a)	$Rz = 1,657 + * t + 0,047 * t^2 - 0,011 * v_c - 5,87 * 10^{-3} * v_c^2 + 4,032 * v_c^2$
6-10 b)	$Rz = 2,113 - 0,069 * t - 0,019 * t^2 - 6,47 * 10^{-6} * v_c + 9,33 * 10^{-5} * v_c^2$
6-22 a)	$Rz = \log (-0,981 - 0,673 * p_{Fl} - 6,59 * 10^{-3} * v_c)$
6-22 b)	$Rz = \log (0,021 - 1,829 * p_{Fl} - 1,85 * 10^{-3} * v_c)$
6-23 a)	$Rz = \log (-3,054 - 0,259 * p_{Fl} + 6,4 * 10^{-3} * v_c)$
6-23 b)	$Rz = \log (-2,496 - 0,611 * p_{Fl} + 2,92 * 10^{-3} * v_c)$

Bisher erschienene Bände der Schriftenreihe des ISF

- Band H3 Surmann, T.: Simulation der Dynamik von Dreh- und Fräsprozessen. Habilitationsschrift, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8794-2
- 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 H1 Mehnen, J.: *Mehrkriterielle Optimierverfahren für produktionstechnische Prozesse*. Habilitationsschrift, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2005, ISBN 978-3-8027-8760-9
- Band 118 Berger, S.: *Simulationsgestützte Werkzeugauslegung zur Unterdrückung von Spansegmentierung durch die gezielte Spanraumbegrenzung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2025, ISBN 978-3-8027-8933-5
- Band 117 Baumann, J.: *Grundlagenuntersuchung zum Einfluss einer Funktionsflächenstrukturierung von Fräswerkzeugen auf die Prozessstabilität*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2025, ISBN 978-3-8027-8934-2
- Band 116 Saelzer, J.: *Reibung und Schmierung in der Spanbildungszone*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2025, ISBN 978-3-8027-8932-8
- Band 115 Felinks, N.: *Hochleistungsprozesskette zur effizienten Massenfertigung von Innengewinden in Aluminiumgussgehäusen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2025, ISBN 978-3-8027-8931-1
- Band 114 Rinschede, T.: *Konturieren kleiner Tiefbohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2025, ISBN 978-3-8027-8930-4
- Band 113 Gerken, J.: *Technologische Analyse des Ejektorbohrens zur Entwicklung strömungsoptimierter Werkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8929-8

- Band 112 Schmidt, R.: *Untersuchung zum Einfluss des thermomechanischen Belastungskollektivs auf die Oberflächenkonditionierung beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8928-1
- Band 111 Meijer, A.: *Werkzeug- und Prozessentwicklung für das Mikrohartfräsen von pulvermetallurgischem Schnellarbeitsstahl*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8927-4
- Band 110 Alammari, Y.: *Fundamental Investigation on Interrupted Machining of Challenging Materials with MQL*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2024, ISBN 978-3-8027-8926-7
- Band 109 Kipp, M.: *Feinstbearbeitung von Hartmetall unter Einsatz elastisch gebundener Diamantschleifwerkzeuge zur Präparation von Spannuten*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2023, ISBN 978-3-8027-8925-0
- Band 108 Nickel, J.: *Analyse und Modellierung der thermomechanischen Beeinflussung der Randzoneneigenschaften beim Einlippentiefbohren von Bauteilen aus Vergütungsstahl*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2023, ISBN 978-3-8027-8924-3
- Band 107 Zelinko, A.: *Magnetabrasives Polieren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2022, ISBN 978-3-8027-8923-6
- Band 106 Bückner, M.: *Neue Methoden zur Entwicklung und Herstellung von Hochleistungswerkzeugen für die Bohrbearbeitung von Inconel 718*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2021, ISBN 978-3-8027-8922-9
- Band 105 Jaeger, J.-P.: *Wendeltiefbohren kleinster Durchmesser in schwer zerspanbare Werkstoffe mit kryogener Minimalmengenschmierung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2021, ISBN: 978-3-8027-8921-2
- Band 104 Bathe, T.: *Untersuchungen zur Topographie- und Umfangsgestaltoptimierung von Einlippentiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2020, ISBN: 978-3-8027-8920-5

- Band 103 Hannich, S.: *Experimentelle und simulative Untersuchungen zum stirnseitigen Fließbohren von Leichtbauwerkstoffen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019
- Band 102 Kansteiner, M.: *Grundlagenuntersuchungen zum Einsatzverhalten von diamantimprägnierten Werkzeugen beim Kernbohren von hochfestem Beton*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8918-2
- Band 101 Fuß, M.: *Entwicklung eines Verfahrens zur Herstellung von tiefen nicht kreisförmigen Bohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8917-5
- Band 100 Metzger, M.: *Innenkonturieren und Walzen tiefgebohrter Grundbohrungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8916-8
- Band 99 Aßmuth, R.: *Schneidkantenpräparation durch Druckluft-Nassstrahlspanen mit Industrierobotern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8915-1
- Band 98 Wolf, M.: *Abstimmung der Präparationsprozesse in der Herstellungskette von PVD-beschichteten Vollhartmetall-Wendelbohrern*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8913-7
- Band 97 Freiburg, D.: *Hochvorschubfräsen zur Strukturierung von Werkzeugoberflächen für die Blechmassivumformung*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN 978-3802789120
- Band 96 Tiffe, M.: *Charakterisierung grundlegender Mechanismen für die Simulation der Spanbildung mithilfe der FEM*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN 978-3-8027-8911-3
- Band 95 Schumann, S.: *Mehrskalige Modellierung und Simulation des Hochleistungs-Innenrundschältschleifens*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2019, ISBN: 978-3-8027-8914-4

- Band 94 Böhmer, J. C.: *Untersuchung und Simulation des Randschichtverhaltens inhomogener Spritzschichtstrukturen beim Honen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2018, ISBN: 978-3-8027-8799-7
- Band 93 Hense, R.: *Simulation und Optimierung der Fräsbearbeitung von Verdichterschaukeln*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8798-0
- Band 92 Krebs, E.: *Simulationsgestützte Mikrofräsbearbeitung gehärteter Werkzeugstähle zur Herstellung filigraner Formelemente und funktionaler Oberflächenstrukturen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8797-3
- Band 91 Habermeier, J.: *Technologische Untersuchungen der Bearbeitung nickel-reduzierter Stahlgusslegierungen für Turbinengehäuse*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN: 978-3-8027-8796-6
- Band 90 Liu, Y.: *Technologische Untersuchungen zum flexiblen Einsatz des Fließbohrens*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2017, ISBN 978-3-8027-8795-9
- Band 89 Özkaya, E.: *FEM-based software system for the efficient 3D tapping simulation and tool optimization using CFD simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8793-5
- Band 88 Abrahams, H.: *Untersuchungen zum Führungsleistenverschleiß und zur Prozessdynamik beim BTA-Tiefbohren austenitischer Stähle*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8792-8
- Band 87 Kirschner, M.: *Tiefbohren von hochfesten und schwer zerspanbaren Werkstoffen mit kleinsten Durchmesser*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8791-1
- Band 86 Goeke, S.: *Oberflächenstrukturierung tribologisch beanspruchter Funktionsflächen durch Mikrofinishen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8790-4

- Band 85 Iovkov, I.: *Technologische Analyse des Tiefbohrrens mit Minimalmengenschmierung und simulationsbasierte Kompensation des Mittenverlaufs*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8787-4
- Band 84 Rautert, C.: *Untersuchungen zum Bohrschleifen faserverstärkter Werkstoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8789-8
- 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 82 Rausch, S.: *Modellgestützte Endbearbeitung hartstoffbeschichteter Tiefziehwerkzeuge*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2016, ISBN 978-3-8027-8785-0
- 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 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 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 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 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 75 Upmeyer, T.: *Einlippentiefbohren teilkristalliner thermoplastischer Kunststoffe*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8782-9

- 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 73 Schlenker, J.: *Spanende Mikrobearbeitung von Titan und Titanlegierungen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2015, ISBN 978-3-8027-8777-5
- 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 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 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 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 68 Feldhoff, M.: *Modellgestützte Werkzeug- und Prozessentwicklung des Bohrschleifens faserverstärkter Duromere*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8771-3
- Band 67 Machai, C.: *Grundlagenuntersuchung zur Zerspanung von β -Titanlegierungen unterschiedlicher Mikrostruktur*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2012, ISBN 978-3-8027-8772-0
- 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 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 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 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 62 Würz, E.: *Schleifbearbeitung von Keramik-Hartmetall-Verbunden*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8767-6
- Band 61 Engbert, T.: *Fließbohrbearbeitung und Innengewindefertigung an Leichtbaustrukturen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8764-5
- 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 59 Kessler, N.: *Thermische Mittenverlaufsbeeinflussung beim BTA-Tiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8763-8
- 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 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 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 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 54 Marschalkowski, K.: *Beitrag zur Prozessentwicklung für das Hochleistungssinnenrund-Schäl Schleifen mit galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheiben*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2011, ISBN 978-3-8027-8758-4
- 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 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 51 Mohn, T.: *Schleifen thermisch gespritzter Verschleißschuttschichten auf Bearbeitungszentren – Prozessgestaltung und Simulation*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8751-5
- Band 49 Rautenberg, J.: *Simultane fünfachsige Fräsbearbeitung von Aluminiumstrukturbauteilen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2010, ISBN 978-3-8027-8754-6
- 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 47 Kersting, M.: *Entwicklung und Anwendung eines adaptiven Schwingungsdämpfers für das Einlippentieftiefbohren*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8749-2
- Band 46 Bergmann, S.: *Beitrag zur Zerspanung intermetallischer γ -Titanaluminide durch Bohren, Gewindebohren und Fräsen*. Dissertation, Technische Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2009, ISBN 978-3-8027-8746-1
- 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 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 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 42 Hammer, N.: *Spanende Bearbeitung endlos stahlverstärkter Aluminiummatrixstrangpressprofile*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8742-3
- 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 40 Wittkop, S.: *Einlippentiefbohren nichtrostender Stähle*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8740-9
- 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 38 Zhang, L.: *Accuracy Enhancement of a Hexapod Machine Tool*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2007, ISBN 978-3-8027-8738-6
- Band 37 Petzoldt, V.: *Formgedächtnistechnik – Tiefbohren und Mikrofräsen von Ni-Ti*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8737-4, 978-3-8027-8737-9
- 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 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 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 33 Surmann, T.: *Geometrisch-physikalische Simulation der Prozessdynamik für das fünfachsige Fräsen von Freiformflächen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2006, ISBN 3-8027-8733-1, 978-3-8027-8733-1

- 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 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 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 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 28 Koehler, W.: *Analyse des Einflusses der Schneidenform auf den Hochleistungsbohrprozess*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8728-5
- Band 27 Loichinger, A.: *Analyse und Optimierung der Kühlschmierstoffversorgung rotierender Werkzeuge*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8726-9
- 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 25 Schulte, M.: *Profilschleifen von Hartlegierungen und Hartverbundwerkstoffen mit konventionellen Schleifmitteln*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8725-0
- 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 23 Guntermann, G.: *Aspekte des Hochgeschwindigkeits-Hartfräsens im Werkzeug- und Formenbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2004, ISBN 3-8027-8723-4
- 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 21 Schwietering, C.: *Technologische Aspekte der mikromechanischen Fräsbearbeitung mit Schaftwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8721-8
- 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 19 Opalla, D.: *Hochleistungsbohren metallischer Werkstoffe mit Wendelbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8716-1
- Band 18 Löbke, H.: *Tiefbohren auf Bearbeitungszentren*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8718-8
- 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 16 Liedschulte, M.: *Untersuchungen zum Bohren von Magnesiummatrix-Verbundwerkstoffen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2003, ISBN 3-8027-8719-6
- 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 14 Meng, J.: *Freiformflächenmanipulation für den Werkzeug-, Formen- und Modellbau*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8714-5
- Band 13 Bruchhaus, T.: *Tribologische Untersuchungen zur Optimierung von BTA-Tiefbohrwerkzeugen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2001, ISBN 3-8027-8713-7
- Band 12 Mehnen, J.: *Evolutionäre Flächenrekonstruktion*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8712-9
- Band 11 Schulte, K.: *Stahlbearbeitung mit Wendeschneidplatten-Bohrern bei reduziertem Kühlschmierstoffeinsatz*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8710-2
- Band 10 Schroer, M.: *Reiben von Vergütungsstahl mit Einschnitten-Reibahlen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 2000, ISBN 3-8027-8711-0

- Band 9 Schneider, M.: *Auswirkungen thermomechanischer Vorgänge beim Werkzeugschleifen*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8708-0
- Band 8 Albersmann, F.: *Simulationsgestützte Prozessoptimierungen für die HSC-Fräsbearbeitung*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8709-9
- 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 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 5 Thamke, D.: *Technologische und ökonomische Aspekte der Trocken- und Minimalmengenbearbeitung am Beispiel des Einlippentiefbohrns*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN: 3-8027-8707-2
- Band 4 Enseltmann, A.: *HSC-Hartfräsen von Formen und Gesenken*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1999, ISBN 3-8027-8703-X
- Band 3 Willsch, C.: *Außenrund-Einsteichschleifen von Cermet*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1998, ISBN 3-8027-8702-1
- 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 1 Adams, F.-J.: *Einsatzverhalten von symmetrischen, hartmetallbestückten Kurzlochbohrern*. Dissertation, Universität Dortmund, Vulkan Verlag, Essen, 1996, ISBN 3-8027-8700-5

Technische Universität Dortmund

Institut für Spanende Fertigung

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dirk Biermann

Baroper Straße 303

44227 Dortmund

Tel.: 0231 755-2782

E-Mail: dirk.biermann@tu-dortmund.de

Internet: www.isf.de

ISBN 978-3-8027-8936-6