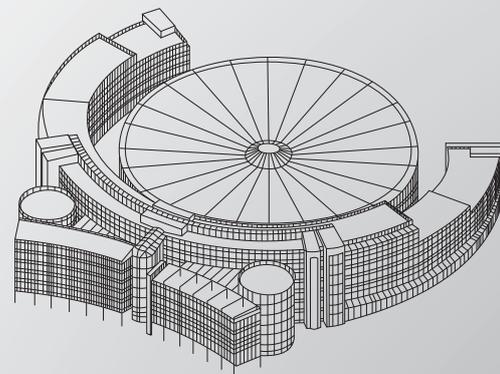


# BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN



Clemens Bäcker

## **Kinematisch modulierte Schleifprozesse zur Strukturierung von tribologisch beanspruchten Funktionsoberflächen**

# BERICHTE AUS DEM PRODUKTIONSTECHNISCHEN ZENTRUM BERLIN

Clemens Bäcker

## **Kinematisch modulierte Schleifprozesse zur Strukturierung von tribologisch beanspruchten Funktionsoberflächen**

**Herausgeber:**

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

Prof. Dr.-Ing. R. Jochem

Prof. Dr.-Ing. H. Kohl

Prof. Dr.-Ing. J. Krüger

Prof. Dr.-Ing. M. Rethmeier

Prof. Dr.-Ing. G. Seliger

Prof. Dr.-Ing. R. Stark

**Kontaktadresse:**

Fraunhofer-Institut für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik IPK  
Pascalstraße 8-9  
10587 Berlin  
Telefon 030 39006-0  
Fax 030 39110-37  
E-Mail [info@ipk.fraunhofer.de](mailto:info@ipk.fraunhofer.de)  
URL [www.ipk.fraunhofer.de](http://www.ipk.fraunhofer.de)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek  
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der  
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im  
Internet über [www.dnb.de](http://www.dnb.de) abrufbar.  
ISBN (Print): 978-3-8396-1235-4

**D 83**

Zugl.: Berlin, TU, Diss., 2016

Druck: Mediendienstleistungen des  
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB, Stuttgart

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

© by **FRAUNHOFER VERLAG**, 2017

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB  
Postfach 800469, 70504 Stuttgart  
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart  
Telefon 0711 970-2500  
Fax 0711 970-2508  
E-Mail [verlag@fraunhofer.de](mailto:verlag@fraunhofer.de)  
URL <http://verlag.fraunhofer.de>

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Soweit in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z.B. DIN, VDI) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert worden ist, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen.

# Kinematisch modulierte Schleifprozesse zur Strukturierung von tribologisch beanspruchten Funktionsoberflächen

vorgelegt von  
Diplom-Ingenieur  
Clemens Bäcker  
aus Berlin

von der Fakultät V – Verkehrs- und Maschinensysteme  
der Technischen Universität Berlin  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor der Ingenieurwissenschaften  
- Dr.-Ing. -  
genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Vorsitzender: Prof. Dr.-Ing. Dietmar Göhlich

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

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Prof. h.c. Bernhard Karpuschewski

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 01.12.2016

Berlin 2017

D83



## Vorwort des Herausgebers

Im Spannungsfeld aus Erhöhung der Leistungsdichte und Gewährleistung einer hohen Funktionssicherheit beziehungsweise Zuverlässigkeit steht eine nachhaltige Ressourcennutzung immer häufiger auf der Agenda von Industrie und Forschung. Eine gezielte Strukturierung von tribologisch beanspruchten Flächen kann zu einer Verbesserung der Schmierbedingungen im Wälzkontakt und somit zu einer Steigerung der Lebensdauer führen, wodurch ein Beitrag zur Verbesserung der Nachhaltigkeit dieser Bauteile geleistet werden kann. Der vorliegende Stand der Technik stellt im Hinblick auf Oberflächenstrukturen von Funktionsflächen vorrangig Erkenntnisse für plane oder zylindrische Funktionsflächen sowie vereinzelte wissenschaftliche Untersuchungen zur Oberflächenstrukturierung von Zahnflanken zur Verfügung. Darüber hinaus beschränkt sich das derzeit verfügbare Wissen zur Oberflächenstrukturierung von Zahnrädern hauptsächlich auf kleinmodulige Zahnräder aus dem Automotive-Bereich.

Von diesem Wissen ausgehend bestand das Ziel dieser Arbeit darin, durch die Entwicklung und Analyse unterschiedlicher Schleiftechnologien zur gezielten Oberflächenstrukturierung von verschiedenen Funktionsflächen, eine Wissensbasis über die Zusammenhänge zwischen den Stellgrößen der kinematisch modulierten Schleifprozesse und der Oberflächenstruktur sowie dem Einsatzverhalten der strukturierten Oberflächen zu erarbeiten. Die Arbeit fokussiert sich zunächst auf die Analyse der Eingriffsverhältnisse bei kinematisch modulierten Schleifprozessen. Vor dem Hintergrund einer Veränderung der Korneingriffsbahnen beim Einsatz einer kinematischen Modulation wurde unterstützend ein numerisches Modell entwickelt, welches eine Einflussanalyse der Stellgrößen der Modulationsbewegung auf die 3D-Oberflächenstrukturen und die Oberflächenkennwerte ermöglicht. Die simulierten Oberflächenstrukturen dienen darüber hinaus als Eingangsgröße für Elastohydrodynamik(EHD)-Simulationen. Im Rahmen der nachfolgenden technologischen Untersuchungen zum Rundschleifen und Verzahnungsschleifen stand die systematische Klärung der Zusammenhänge zwischen den Stellgrößen der kinematisch modulierten Schleifprozesse, der Schleifscheibenspezifikation, den Stellgrößen des Konditionierprozesses sowie den Kenngrößen des Prozesses und des Arbeitsergebnisses im Vordergrund. Abschließend erfolgte eine Übertragung der Erkenntnisse auf Prü fzahnräder, um eine Untersuchung des Einsatzverhaltens der strukturierten Oberflächen im Rahmen von Fresstragfähigkeitsuntersuchungen von ein satzgehärteten Zahnrädern durchzuführen.

Die gewonnenen Erkenntnisse dokumentieren eindrucksvoll das Einsatzpotenzial von kinematisch modulierten Schleifprozessen für geometrisch einfache und komplexe Funktionsflächen. Die entwickelten Technologien ermöglichen neben einer gezielten Oberflächenstrukturierung eine Verbesserung der Oberflächenkennwerte unter Einsatz geeigneter Stellgrößen für die kinematische Modulation. Dadurch lassen sich im Sinne einer nachhaltigen Fertigungsprozessentwicklung die Schmierbedingungen im EHD-Kontakt und somit das Einsatzverhalten von tribologisch hochbeanspruchten Funktionsflächen verbessern. Die Arbeit dient darüber hinaus als Grundlage für weitere Forschungsaktivitäten im Bereich der Oberflächenstrukturierung durch kinematisch modulierte Schleifprozesse.



## Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Werkzeugmaschinen und Fabrikbetrieb (IWF) der Technischen Universität Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. h. c. Dr.-Ing. Eckart Uhlmann als Leiter des Fachgebiets Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik am IWF der TU Berlin und als Leiter des Fraunhofer-Instituts für Produktionsanlagen und Konstruktionstechnik (IPK) für die Förderung und Unterstützung meiner Tätigkeit sowie für die hilfreichen Anregungen in Bezug auf meine Arbeit. Herrn Professor Dr.-Ing. habil. Prof. h. c. Bernhard Karpuschewski, dem geschäftsführenden Leiter des Instituts für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung (IFQ) sowie Lehrstuhlleiter am Lehrstuhl Zerspantechnik an der Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg danke ich für die Übernahme des Korreferats und das dieser Arbeit entgegengebrachte Interesse. Bei Herrn Professor Dr.-Ing. Dietmar Göhlich, Leiter des Fachgebiets Methoden der Produktentwicklung und Mechatronik an der Technischen Universität Berlin, bedanke ich mich für die Übernahme des Vorsitzes im Promotionsausschuss.

Allen Mitarbeitern des IWF und des IPK aus den Fachabteilungen sowie der Werkstatt und der Verwaltung danke ich für ihre uneingeschränkte Unterstützung und die gemeinsame Zeit während meiner Tätigkeit am Institut in den wissenschaftlichen und administrativen Belangen. Unter den Kollegen des Fachgebiets Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik gilt mein besonderer Dank den Herren Dipl.-Ing. Leif Hochschild und Dipl.-Ing. Michael List für die erfolgreiche und sehr gute Zusammenarbeit sowie den konstruktiven fachlichen Austausch zu jeder Zeit. Ein außerordentlicher Dank gilt meinen ehemaligen studentischen Mitarbeitern M.Sc. Alexander Mädels, M.Sc. Sven Pavliček und Dipl.-Ing. Immanuel Winker für ihr großes Engagement sowie für ihre Ausdauer und Gründlichkeit bei der Unterstützung der experimentellen Arbeiten. Für die frühe nachhaltige Förderung meiner wissenschaftlichen Laufbahn am Institut und für das entgegengebrachte Vertrauen möchte ich den Herren Dr.-Ing. Mathias Kirchgatter, Dr.-Ing. Christoph Hübner und Dipl.-Ing. Gregor Hasper recht herzlich danken.

Für die wertvollen Hinweise und Anregungen während der Korrekturen des Manuskripts danke ich den Herren Professor Dr.-Ing. Tom Hühns und Dr.-Ing. Robert Gerstenberger. Auch den Kollegen im Raum PTZ 224, insbesondere den Herren Robert Gerstenberger und Falk Protz, danke ich für eine äußerst angenehme Arbeitsatmosphäre. Darüber hinaus möchte ich mich bei der Firma Niles Werkzeugmaschinen GmbH für die Unterstützung während meiner Tätigkeit als studentischer und Wissenschaftlicher Mitarbeiter bedanken. Stellvertretend sei an dieser Stelle Herr André Weiß sowohl für den fachlichen Austausch, als auch für die Gespräche abseits der Arbeit erwähnt.

Meiner gesamten Familie und vor allem meiner Frau Cindy bin ich für die jahrelange Unterstützung und den eingeräumten Freiraum für meine Tätigkeit am Institut von ganzem Herzen dankbar. Auch möchte ich meinen Freunden für die Motivation zur Fertigstellung dieser Arbeit danken.



---

# Inhaltsverzeichnis

0	Formel- und Kurzzeichen.....	III
0.1	Formelzeichen.....	III
0.2	Kurzzeichen.....	X
1	Einleitung.....	1
2	Stand der Erkenntnisse.....	3
2.1	Zahnräder.....	3
2.2	Zahnradschleifverfahren.....	5
2.2.1	Kontinuierliches Wälzschleifen.....	6
2.2.2	Diskontinuierliches Profilschleifen.....	7
2.2.3	Diskontinuierliches Teilwälzschleifen.....	8
2.2.4	Endbearbeitung von Verzahnungen.....	9
2.3	Herstellung von strukturierten Oberflächen.....	13
2.3.1	Spanende Fertigungsverfahren.....	14
2.3.2	Abtragende Fertigungsverfahren.....	17
2.4	Elastohydrodynamischer Kontakt.....	19
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	25
4	Versuchsbedingungen und Messmethoden.....	29
4.1	Versuchsmaschinen.....	29
4.2	Schleifscheiben und Abrichtwerkzeuge.....	31
4.3	Versuchswerkstücke.....	33
4.4	Zahnradprüfstand.....	37
4.5	Mess- und Analyseeinrichtung.....	38
4.5.1	Prozesskräfte beim Verzahnungsschleifen.....	38
4.5.2	Mikrostruktur der Versuchsbauteile.....	40
4.5.3	Makrogeometrie der Zahnräder.....	42
4.5.4	Topographie der Schleifscheibe.....	42
5	Eingriffsverhältnisse beim kinematisch modulierten Schleifprozess.....	44
5.1	Simulation der Eingriffsbedingungen beim kinematisch modulierten Schleifprozess.....	45
5.2	Einkornritzversuch.....	47
5.3	Modellvorstellung für die Eingriffsverhältnisse.....	55
6	Numerische Simulation von erzeugbaren Oberflächenstrukturen.....	57
6.1	Motivation und Randbedingung.....	57
6.2	Berechnungsmodell.....	58
6.3	Plausibilitätsprüfung.....	63
7	Analogieprozess für das kinematisch modulierte Verzahnungsschleifen.....	72
7.1	Randbedingungen.....	72
7.2	Kinematisch modulierter Rundschleifprozess.....	77
7.3	Verifikation der numerischen Simulation.....	91
7.4	Konditionierprozess.....	92
7.5	Variation der Schleifscheibenspezifikation.....	97
7.6	Empirisches Prozessmodell.....	99

8	Kinematische Modulation beim Verzahnungsschleifen.....	101
8.1	Kinematisch modulierter Profilschleifprozess .....	103
8.2	Kinematisch modulierter Teilwälzschleifprozess .....	109
8.3	Kinematisch modulierter topologischer Generierungsschleifprozess .....	129
9	Einsatzverhalten strukturierter Oberflächen.....	139
9.1	Simulation der Schmierfilmbildung .....	139
9.2	Auslegung und Herstellung der Prü fzahnräder.....	140
9.3	Einfluss der Oberflächenstruktur der Zahnflanken auf die Fresstragfähigkeit .....	142
10	Anwendungshinweise für kinematisch modulierte Schleifprozesse .....	145
11	Zusammenfassung und Ausblick .....	149
12	Literatur und Normen .....	154

---

## 0 Formel- und Kurzzeichen

### 0.1 Formelzeichen

Zeichen	Einheit	Bezeichnung
A	°	Position der A-Achse
$A_A$	$\mu\text{m}^2$	Querschnittsfläche der Aufwürfe
$A_{AL}$	$\mu\text{m}^2$	Querschnittsfläche des linken Aufwurfs
$A_{AL\Delta}$	$\mu\text{m}^2$	Relative Querschnittsfläche des linken Aufwurfs
$A_{AR}$	$\mu\text{m}^2$	Querschnittsfläche des rechten Aufwurfs
$A_{AR\Delta}$	$\mu\text{m}^2$	Relative Querschnittsfläche des rechten Aufwurfs
$A_F$	-	Funktionsparameter
$A_{fa}$	mm	Amplitude der kinematischen Modulation
$B_F$	-	Funktionsparameter
$C_F$	-	Funktionsparameter
$C_1$	$\text{mm}^{-3}$	Gradient der statischen Schneidenanzahl
$D_A$	mm	Außendurchmesser des Lagerrings
$D_I$	mm	Innendurchmesser des Lagerrings
$D_F$	-	Funktionsparameter
E	eV	Energie
$E_F$	-	Funktionsparameter
F	N	Prozesskraft beim Finishing mit elastischen Schleifscheiben
$F_f$	$\mu\text{m}$	Profil-Gesamtabweichung
$F_F$	-	Funktionsparameter
$F_{n,R}$	N	Normalkraft im Berührungspunkt zweier Wälzkörper
$F_{n,Z}$	N	Normalkraft im Berührungspunkt zweier Zahnflanken
$F_n$	N	Schleifnormalkraft
$F_{n\_EHD}$	N	Resultierende Normalkraft im Schmierspalt
$F_p$	$\mu\text{m}$	Teilungs-Gesamtabweichung
$F_t$	N	Schleiftangentialkraft
$F_{t\_EHD}$	N	Resultierende Tangentialkraft im Schmierspalt
$F_x$	N	Kraftkomponente in X-Richtung

$F_{x1-4}$	N	Kraftkomponente der Quarzkristallplatten in X-Richtung
$F_y$	N	Kraftkomponente in Y-Richtung
$F_{y1-4}$	N	Kraftkomponente der Quarzkristallplatten in Y-Richtung
$F_z$	N	Kraftkomponente in Z-Richtung
$F_{z1-4}$	N	Kraftkomponente der Quarzkristallplatten in Z-Richtung
$F_\beta$	$\mu\text{m}$	Flankenlinien-Gesamtabweichung
G	mm	Bogenlänge auf dem Teilkreis
I	-	Intensität bei der EDX-Analyse
K	%	Kornvolumenkonzentration
$K_s$	-	Korrekturfaktor der kinematischen Modulation
$L_g$	$\mu\text{m}$	Mittlere Kornabstand
$L_{g,i}$	$\mu\text{m}$	Kornabstand der Radialsegmente
$L_{g,1}$	$\mu\text{m}$	Kornabstand zwischen dem 1. und 2. Segment
$P_{\text{max}}$	kW	Maximale Spindelleistung
$P_{m,i}$	-	Mittelpunkt der Schleifscheibensegmente
$R_1$	mm	Radius von Wälzkörper 1
$R_2$	mm	Radius von Wälzkörper 2
Ra	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittelwert der Profilorordinaten
$R_m$	mm	Radius des modellierten Werkstücks
$R_{mr}(5\%; c)$	%	Materialanteil in einer Tiefe c zur Referenzschnittlinienhöhe 5 %
Rmax	$\mu\text{m}$	Maximale Rautiefe
Rq	$\mu\text{m}$	Quadratischer Mittelwert der Profilorordinaten
$R_{t,s}$	$\mu\text{m}$	Wirkrautiefe der Schleifscheibe
Rz	$\mu\text{m}$	Größte Höhe des Profils
$R^2$	-	Bestimmtheitsmaß
Sa	$\mu\text{m}$	Arithmetischer Mittelwert der Flächenordinaten
Sk	$\mu\text{m}$	Kernhöhe
$S_{mr}(5\%; c)$	%	Flächenhafter Materialanteil in einer Tiefe c zur Referenzschnittlinienhöhe 5 %
Spk	$\mu\text{m}$	Reduzierte Spitzenhöhe
Sq	$\mu\text{m}$	Quadratischer Mittelwert der Flächenordinaten
Svk	$\mu\text{m}$	Reduzierte Talhöhe
Sz	$\mu\text{m}$	Maximale Höhe der Oberfläche

T	°C	Ölspritztemperatur
T <sub>s</sub>	mm	Periodenlänge der kinematischen Modulation
T <sub>s,min</sub>	mm	Minimale Periodenlänge der kinematischen Modulation
M <sub>x</sub>	Nm	Moment in X-Richtung
M <sub>y</sub>	Nm	Moment in Y-Richtung
M <sub>z</sub>	Nm	Moment in Z-Richtung
U <sub>d</sub>	-	Abrichtüberdeckungsgrad
U <sub>d1</sub>	-	1. Abrichtüberdeckungsgrad
U <sub>d2</sub>	-	2. Abrichtüberdeckungsgrad
U <sub>w</sub>	-	Anzahl der Werkzeugumdrehungen in der Simulation
V <sub>w</sub>	mm <sup>3</sup>	Spanungsvolumen
V' <sub>w</sub>	mm <sup>3</sup> /mm	Bezogenes Spanungsvolumen
V <sub>mc</sub>	ml/m <sup>2</sup>	Kernmaterialvolumen
V <sub>mp</sub>	ml/m <sup>2</sup>	Spitzenmaterialvolumen
V <sub>vc</sub>	ml/m <sup>2</sup>	Kernleervolumen
V <sub>vv</sub>	ml/m <sup>2</sup>	Leeres Talvolumen
W <sub>k</sub>	mm	Zahnweite über k Messzähne oder Messlücken
a	mm	Achsabstand zweier Zahnräder
a <sub>e</sub>	mm	Zustellung
a <sub>ed</sub>	mm	Abrichtzustellung
a <sub>e,rot</sub>	mm	Rotatorische Zustellung
a <sub>e,tan</sub>	mm	Tangentiale Zustellung
a <sub>F</sub>	-	Funktionsparameter
a <sub>fa</sub>	m/s <sup>2</sup>	Beschleunigung der kinematischen Modulation
a <sub>fa,max</sub>	m/s <sup>2</sup>	Maximale Beschleunigung der kinematischen Modulation
a <sub>p</sub>	mm	Eingriffsbreite der Schleifscheibe
a <sub>Rr</sub>	µm	Reale Ritztiefe
a <sub>Rt</sub>	µm	Theoretische Ritztiefe
b	mm	Breite des Zahnrades bzw. der Zahnstange
b <sub>F</sub>	-	Funktionsparameter
b <sub>Hub</sub>	mm	Vorschubweg pro Wälzung
b <sub>m</sub>	mm	Breite des modellierten Werkstücks

$b_{Rr}$	$\mu\text{m}$	Reale Ritzbreite
$b_{Rt}$	$\mu\text{m}$	Theoretische Ritzbreite
$b_s$	mm	Breite der Schleifscheibe
$b_{s,eff}$	mm	Breite des aktiven Schleifscheibenprofils
$b_{s,i}$	mm	Breite der Schleifscheibensegmente
$b_w$	mm	Werkstückbreite
$C_F$	-	Funktionsparameter
$C_k$	$\text{mm}^{-3}$	Theoretische Korndichte im Schleifbelag
$d_a$	mm	Kopfkreisdurchmesser
$d_{eq}$	mm	Äquivalenter Schleifscheibendurchmesser
$d_F$	-	Funktionsparameter
$d_g$	mm	Mittlerer Korndurchmesser
$d_{mod}$	mm	Modulationsdurchmesser
$d_s$	mm	Schleifscheibendurchmesser
$f$	mm	Längsvorschub
$f_{ab}$	-	Relative Spanvolumen
$f_{DH}$	Hz	Doppelhubfrequenz
$f_{H\alpha}$	$\mu\text{m}$	Profil-Winkelabweichung
$f_{H\beta}$	$\mu\text{m}$	Flankenlinien-Winkelabweichung
$f_f$	$\mu\text{m}$	Profil-Formabweichung
$f_{fa}$	Hz	Frequenz der kinematischen Modulation
$f_{fa,max}$	Hz	Grenzfrequenz der kinematischen Modulation
$f_p$	$\mu\text{m}$	Teilungs-Einzelabweichung
$f_r$	mm	Radialvorschub
$f_{\beta f}$	$\mu\text{m}$	Flankenlinien-Formabweichung
$h$	$\mu\text{m}$	Schmierfilmdicke der ideal-glaten Oberfläche
$h_{min}$	$\mu\text{m}$	Minimale EHD-Schmierfilmdicke
$h_{cu}$	$\mu\text{m}$	Spanungsdicke
$h_{cu,max}$	$\mu\text{m}$	Maximale Spanungsdicke
$h_{Rr}$	$\mu\text{m}$	Reale Aufwurfhöhe
$h_{Rr,red}$	$\mu\text{m}$	Reale reduzierte Aufwurfhöhe
$h_T$	$\mu\text{m}$	Tatsächliche Schmierfilmdicke
$h_0$	$\mu\text{m}$	Zentrale EHD-Schmierfilmdicke

$i_{DH}$	-	Doppelhubzahl
$k$	$N/mm^2$	Belastungsintensität
$l_g$	$\mu m$	Geometrische Kontaktlänge
$l_m$	$\mu m$	Höhe des Oktaeders
$m$	mm	Modul des Zahnrades
$m_n$	mm	Normalmodul des Zahnrades
$n_{Spindel}$	$min^{-1}$	Minimale Spindeldrehzahl
$n_{max}$	$min^{-1}$	Maximale Spindeldrehzahl
$n_w$	$min^{-1}$	Drehzahl der Werkstückspindel
$q$	-	Geschwindigkeitsverhältnis
$q_d$	-	Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis
$q_{d1}$	-	1. Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis
$q_{d2}$	-	2. Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis
$q_m$	$mm^3$	Volumens eines Abrasivkorns
$r_P$	mm	Profilradius der Abrichtrolle
$r_s$	mm	Schleifscheibenradius
$r_{s,i}$	mm	Spezifischer Schleifscheibenradius der Radialsegmente
$r_{tip}$	mm	Tastspitzenradius
$s$	%	Schlupf
$t_R$	$\mu m$	Korneingriffstiefe
$r_w$	mm	Radius des Werkstücks
$u_a$	m/s	Umfangsbewegung von Wälzkörper a
$u_b$	m/s	Umfangsbewegung von Wälzkörper b
$u_A$	cm/s	Abrollgeschwindigkeit
$u_1$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit von Wälzkörper 1
$u_2$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit von Wälzkörper 2
$v_c$	m/s	Schnittgeschwindigkeit
$\overline{v_c}$	m/s	Mittlere resultierende Schnittgeschwindigkeit
$v_d$	m/s	Ritzel-Teilkreisgeschwindigkeit
$v_{GR}$	m/s	Gleitgeschwindigkeit
$v_f$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit
$v_{fa,mod}$	mm/min	Axiale Modulationsgeschwindigkeit
$v_{fa,mod,max}$	mm/min	Maximale axiale Modulationsgeschwindigkeit

$\overline{V_{fa}}$	mm/min	Mittlere axiale Modulationsgeschwindigkeit
$V_{f,mod}$	mm/min	Modulationsgeschwindigkeit
$\overline{V_{f,mod}}$	mm/min	Mittlere resultierende Modulationsgeschwindigkeit
$V_{fr}$	mm/min	Radiale Vorschubgeschwindigkeit
$V_{fx}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit in X-Richtung
$V_{fy}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit in Y-Richtung
$V_{fz}$	mm/min	Vorschubgeschwindigkeit in Z-Richtung
$V_s$	m/s	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
$V_{sd}$	m/s	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit beim Abrichten
$V_{w\ddot{a}lz,rot}$	mm/min	Rotatorische Wälzgeschwindigkeit
$V_{w\ddot{a}lz}$	mm/min	Translatorische Wälzgeschwindigkeit
$V_w$	mm/min	Werkstückgeschwindigkeit
$V_1$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit von Zahnrad 1
$V_2$	m/s	Umfangsgeschwindigkeit von Zahnrad 2
$W_m$	mm	Mittlere Maschenweite
$Z$	-	Zähnezahl
$Z_g$	$\mu\text{m}$	Schneidenraumtiefe
$Z_{fa}$	mm	Amplitudenauslenkung
$Z_{fa,max}$	mm	Maximale Amplitudenauslenkung
$Z_0$	mm	Gangzahl der Schleifschnecke
$\alpha_n$	$^\circ$	Normaleingriffswinkel
$\alpha_P$	$^\circ$	Profilwinkel
$\alpha_s$	$^\circ$	Strukturwinkel
$\alpha_{s,max}$	$^\circ$	Maximaler Strukturwinkel
$\alpha_{sw}$	$^\circ$	Schwenkbereich der A-Achse
$\beta$	$^\circ$	Schrägungswinkel
$\beta_{sw}$	$^\circ$	Schwenkbereich der B-Achse
$\gamma$	-	Peklenikzahl zur Orientierung von Rauheiten
$\lambda_c$	mm	Grenzwellenlänge
$\mu$	-	Schleifkraftverhältnis
$\eta$	$\text{Nmm}^{-2}\text{s}$	Dynamische Viskosität
$\sigma_a$	$\mu\text{m}$	Rauheit von Wälzkörper a

$\sigma_b$	$\mu\text{m}$	Rauheit von Wälzkörper b
$\sigma_g$	$\mu\text{m}$	Standartabweichung der stochastischen Kornverteilung
$\varphi_s$	$\mu\text{m}$	Phasenverschiebung der kinematischen Modulation
$\chi$	$^\circ$	Kennwinkel zur Beschreibung der Schneidenform quer zur Schleifrichtung
$\Delta x$	mm	Versatz des Schleifkorns innerhalb der Kontaktzeit

## 0.2 Kurzzeichen

Zeichen	Bezeichnung
BRISK	Beschleunigungsverhalten der Maschinenachsen
C	Kohlenstoff
ct.	Karat
Cr	Chrom
CBN	Kubisch kristallines Bornitrid
CD	Continuous Dressing
CNC	Computerized Numerical Control
CVD	Chemical vapor deposition
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Ethanol
ECM	Electrochemical machining
EDX	Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy
EHD	Elastohydrodynamik
Eht	Einsatzhärte tiefe
Fe	Eisen
FEPA	Federation of the European Producers of Abrasives
FVA	Forschungsvereinigung Antriebstechnik e. V.
FZG	Forschungsstelle für Zahnräder und Getriebebau
HCL	Chlorwasserstoff
HRC	Härte nach Rockwell nach Skala C
HV 10	Härte nach Vickers mit Prüfkraft 10 Kilopond
H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Wasserstoffperoxid
ICAM	Industrial Charge Amplifier Manufacturing
ISF®	Isotropic Superfinishing
LNS	Low-Noise-Shifting
Mn	Mangan
NC	Numerical Control
P	Phosphor
QKL	Verzahnungsqualität
REM	Rasterelektronenmikroskop
Ref.	Referenzversuche

RIE	Reactive-ion etching
S	Schwefel
Si	Silizium
SiC	Siliziumkarbid
SK	Sinterkorund
SOFT	Beschleunigungsverhalten der Maschinenachsen
VRM	Variable Rate Methode
2D	Zweidimensional
3D	Dreidimensional
16MnCr5	Einsatzstahl
20MnCr5	Einsatzstahl
100Cr6	Wälzlagerstahl
{Z}	Ganzzahlig



---

# 1 Einleitung

Eine nachhaltige Ressourcennutzung steht sowohl in der Industrie als auch in der Wissenschaft immer mehr im Fokus der Forschungsaktivitäten. So können eine Erhöhung der Leistungsdichte, Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit von Maschinenelementen sowie eine Verringerung des Energieverbrauches während der Fertigung und im Betrieb einen entscheidenden Beitrag zur Ressourceneffizienz liefern [TÜR15b]. Sowohl Offshore- als auch Onshore-Windkraftanlagen bieten ein großes Potenzial für eine ressourcenschonende Energieerzeugung und stellen im Bereich der erneuerbaren Energien immer noch einen zukunfts-trächtigen Markt dar [BOL04, VAT12]. So könnten bis zum Jahr 2030 ungefähr 25.000 MW Offshore-Windleistung bereitgestellt werden [BUU02]. Ein entscheidender Faktor für den ökonomischen und ökologischen Erfolg der Offshore-Windkraftanlagen stellt die Zuverlässigkeit der einzelnen Komponenten des Antriebsstranges dar, da die Instandhaltung insbesondere auf See mit einem hohen Kosten- und Ressourceneinsatz verbunden ist [PRE04, MUS07, FRA09, DEU10, HÖH11, VAT12]. Das Getriebe einer Windkraftanlage mit seinen Zahnradpaarungen ist hierbei eine wichtige Komponente des Antriebsstranges und bestimmt die Wartungszyklen auf entscheidende Weise mit [HÖH11].

In den letzten Jahren wurde die im Rahmen der Energiewende angestrebte Leistungssteigerung von Windkraftanlagen mit einer Erhöhung des Rotordurchmessers bei sinkender Drehzahl und steigendem Moment erreicht [VAT09, BUW13, ROH14]. Dieser Trend wird sich vermutlich auch in den kommenden Jahren weiter fortsetzen, was zu deutlich größeren Belastungen an den Zahnrädern und im Getriebe führt [FRA09, VAT09, VAT12]. Um das Risiko eines Ausfalls aufgrund von Grübchenbildung und Fressschäden bei solch hochbelasteten Getrieben zu reduzieren, werden die Zahnräder meist im Anschluss an die Feinbearbeitung einem zusätzlichen Endbearbeitungsprozess unterzogen, wodurch sich die geforderten hohen Oberflächenqualitäten erzielen lassen [STA13].

Neben der applikationsbedingten Auswahl der Zahnradgeometrie hängt die Lebensdauer eines Zahnrades maßgeblich auch von der Oberflächenbeschaffenheit und Randzoneneigenschaft der Zahnflanke sowie vom Schmierstoff und von der Schmierfilmausprägung im Wälzkontakt ab [TÖN00b, TÖN00a, KRA01b, GES02a, KRA02, LIU03, LÜT07, THE07, KAR08, SHW08, KLO09, WIN09, KOL10, LIH10, KOL13, REJ13, BRE14a, OKA14, PAT14, BRE15, KAP15b, WEN16]. Aufgrund der Gleitbewegung zwischen den Zahnflanken und zu geringen Schmierfilmdicken kann sich der Zustand der Mischreibung mit Scherung einstellen, was mikroskopische Oberflächenschäden zur Folge haben kann. Eine Reduktion der Oberflächenrauheit in Kombination mit einer gezielten Oberflächenstruktur der Zahnflanke kann bei applikationsgerechter Zahngeometrie zu einer Verbesserung der Schmierbedingungen und zu einer Erhöhung der Lebensdauer von Zahnradpaarungen führen.

Eine zusätzliche überlagerte Bewegung parallel zur Funktionsfläche führt neben der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  und der Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe  $v_s$  zu einer Veränderung der Korneingriffsbahnen bei der Schleifbearbeitung und somit zu einer Beeinflussung der Oberflächenstruktur der Funktionsfläche. Dieser kinematisch modulierte Verzahnungsschleifprozess kann im Vergleich zu herkömmlichen Endbearbeitungsprozessen neben einer Reduzierung der Oberflächenrauheit eine zusätzlich gezielte Oberflächenstrukturierung auf den Zahnflanken ermöglichen, um die Schmierbedingungen im Wälzkontakt zu verbessern und die Lebensdauer der Zahnräder zu steigern. Dem Verständnis der Wirkzu-

sammenhänge zwischen dem kinematisch modulierten Schleifprozess und der Oberflächenstruktur auf den Zahnflanken kommt daher eine besondere Bedeutung zu. Vor diesem Hintergrund ist die Wechselwirkung zwischen den erzeugbaren Oberflächenstrukturen auf der Zahnflanke mit den Schmierbedingungen und dem Einsatzverhalten der kinematisch moduliert geschliffenen Zahnrädern in modelhaften Einsatztest zu analysieren. Darüber hinaus soll durch die vorliegende wissenschaftliche Arbeit ein Beitrag zur Steigerung der Ressourceneffizienz von Zahnrädern geleistet werden.

---

## 2 Stand der Erkenntnisse

Im ersten Abschnitt des Kapitels wird eine kurze Einführung zur Anwendung und Fertigungsroute von Zahnrädern gegeben, um im Anschluss die einzelnen Zahnradschleifverfahren zur Hartbearbeitung von Zahnrädern vorzustellen. Dabei wird auf das kontinuierliche Wälzschleifen, das diskontinuierliche Profil- und Teilwälzschleifen sowie auf die Finishingbearbeitung von Verzahnungen genauer eingegangen. Der zweite Abschnitt befasst sich mit der Herstellung von strukturierten Oberflächen, wobei zwischen spanenden und nicht spanenden Verfahren unterschieden wird. Im Anschluss werden die Eigenschaften sowie Verschleißerscheinungen im elastohydrodynamischen Zahnkontakt beschrieben.

### 2.1 Zahnräder

Zahnräder zählen zu den zentralen Elementen des Maschinen- und Fahrzeugbaus und dienen insbesondere der formschlüssigen Übertragung und Wandlung von Drehzahlen und Drehmomenten zwischen der Antriebsmaschine und einer Arbeitsmaschine. Diese rotations-symmetrischen Körper mit einer am Umfang eingebrachten Verzahnung kommen in vielen technischen Bereichen, wie beispielsweise dem Automotivebereich, Marineanwendungen und verschiedensten Windkraftanlagen sowie Werkzeugmaschinen oder in Form von unterschiedlichsten Getriebearten zum Einsatz. Stirnräder, Zahnstangen, Kegelräder und Schenken sind Beispiele für gängige Zahnradarten. Ein großes Marktsegment für Zahnräder wird derzeit durch den hohen Bedarf an Planetengetrieben in Windkraftanlagen gebildet [KAR08, BUW13, STA13]. Bild 2-1 gibt einen Überblick über verschiedene Zahnradarten.

a) Ritzelwellen, innen- und außenverzahnte, gerad- und schrägverzahnte Stirnräder



b) Innenverzahntes Stirnrad für Planetengetriebe

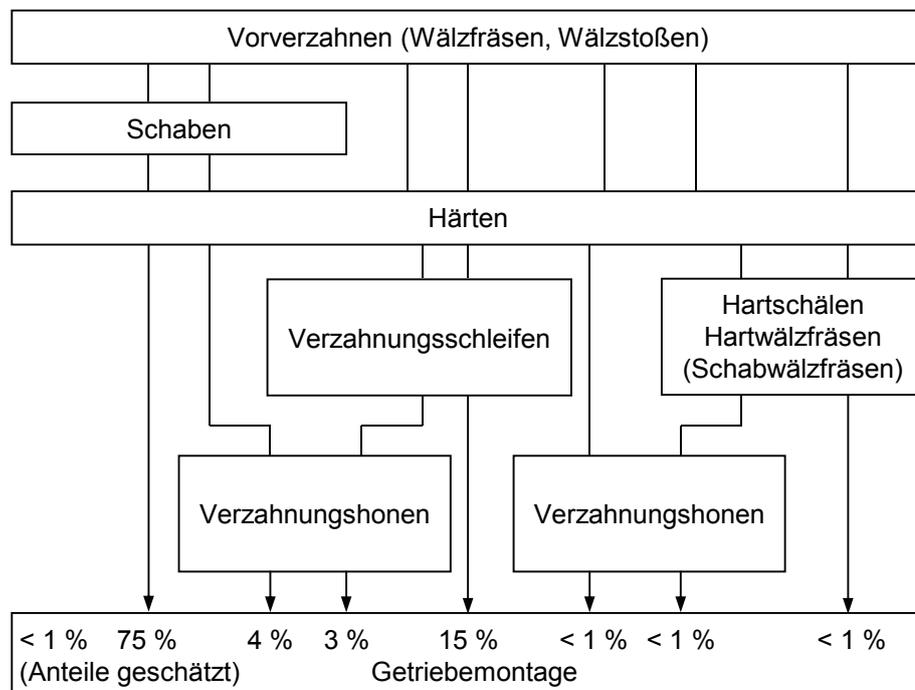


Bild 2-1: Zahnradarten [ZAH15]; a) Ritzelwellen, innen- und außenverzahnte, gerad- und schrägverzahnte Stirnräder; b) innenverzahnte Stirnräder für Planetengetriebe

Eine Baugruppe aus einem oder mehreren Zahnradpaaren wird als Zahnradgetriebe bezeichnet. Dieses lässt sich nach mehreren Gesichtspunkten, wie zum Beispiel der Bauart, dem Verwendungszweck, der Anwendungsmöglichkeit, der Übersetzung und der Verzahnungsart/Radform sowie dem Flankenlinienverlauf einteilen. Nach DIN 868 werden die Zahnradpaare entsprechend der gegenseitigen Lage der Radachsen sowie der Richtung der Flanken in Wälzgetriebe und Schraubwälzgetriebe unterteilt. Zum Wälzgetriebe zählen das Stirnradgetriebe sowie das Kegelradgetriebe, bei denen in den Funktionsflächen reines Wälzen auftritt. Dagegen kreuzen sich bei Schraubwälzgetrieben die Radachsen der Zahnräder,

was zu einem Gleiten und Wälzen der Funktionsflächen (Hyperboloide) führt. Die Schraubwälzgetriebe werden unterschieden in Stirradschraubgetriebe, Kegelradschraubgetriebe und Schneckenradgetriebe [STW12, WIH14].

Die Prozesskette zur Herstellung von einsatzgehärteten Zahnrädern setzt sich aus mehreren Fertigungsschritten zusammen. Zu Beginn kann die Verzahnung entweder mithilfe eines Präzisionsschmiedprozesses oder einer Weichbearbeitung in Form von Dreh-, Wälzfräs- oder Wälzstoßprozessen hergestellt werden. Im Anschluss erfolgt eine Wärmebehandlung der Bauteile, um die Härte und Festigkeit der Funktionsflächen von den Zahnrädern deutlich zu verbessern. Durch die Wärmebehandlung kommt es zu unvermeidbaren Härteverzügen der Zahnräder, was sich in makrogeometrischen Verzahnungsabweichungen widerspiegelt [STB12]. Aus diesem Grund ist eine Nachbearbeitung von Funktionsflächen, wie beispielsweise der Lagersitzbohrung und Zahnflanken erforderlich. Auch im Hinblick auf die geforderten Randzonen- und Oberflächeneigenschaften der Zahnflanken erfolgt zumeist im Anschluss eine Hartfeinbearbeitung durch Schleifverfahren. Ein Beispiel für die Fertigungsfolgen zur Verzahnungsherstellung in der Großserienfertigung von PKW-Getrieben kann dem Bild 2-2 entnommen werden [SCH04, KLO05, KAR08, BAU11, DEN11].



**Bild 2-2:** Fertigungsfolgen zur Verzahnungsherstellung in der Großserienfertigung von PKW-Getrieben [BAU11]

Steigende Qualitätsanforderungen an Zahnrädern hinsichtlich der Belastung und der Geräuschentwicklung erfordern immer wieder eine Optimierung von Bearbeitungsprozessen sowie die Entwicklung neuer Prozessstrategien und den Einsatz bisher nicht genutzter Fertigungsverfahren. Anhand der Anforderungen an Formfehler und die Oberflächenqualität lassen sich die Laufgeräusche der Zahnräder beeinflussen.

Dagegen kann mithilfe von Flankenmodifikationen und einer verbesserten Oberflächenbeschaffenheit die maximale Belastung von Zahnrädern erhöht werden. Die erforderlichen Ziele

für die Feinbearbeitung zur Erreichung einer maximalen Tragfähigkeit und eines minimalen Laufgeräuschs sind in Bild 2-3 zusammenfassen [KAR08, PAT14].

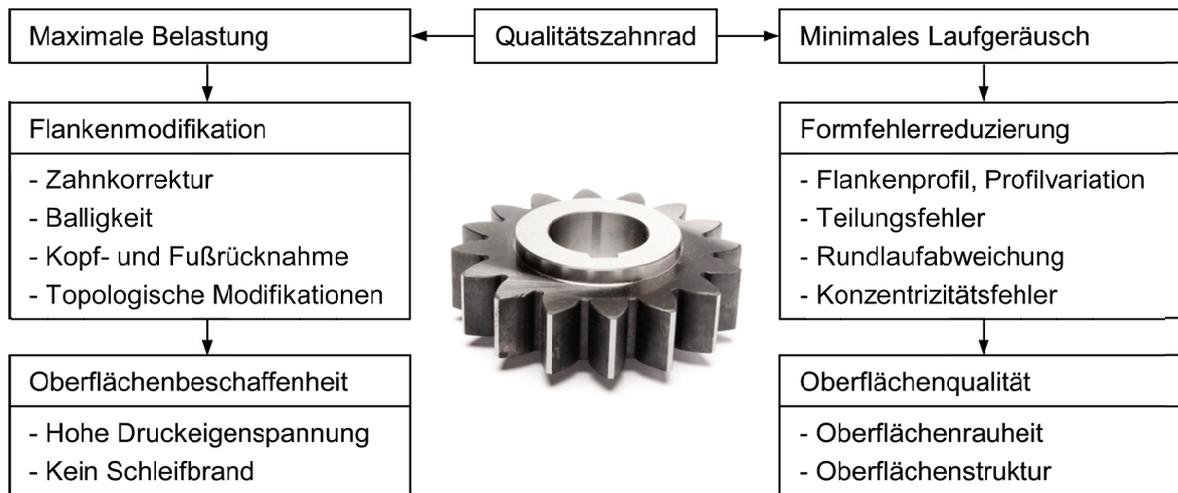


Bild 2-3: Ziele der Feinbearbeitung von Zahnrädern nach [KAR08]

## 2.2 Zahnradschleifverfahren

Die Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern mittels Schleifen kann durch verschiedene Verfahren realisiert werden. Eine Unterteilung lässt sich nach DIN 8589-11 [DIN8589-11] gemäß der erzeugenden Fläche in Wälz- und Profilschleifverfahren unterteilen. Eine weitere Untergliederung beider Verfahren erfolgt hinsichtlich der kontinuierlich und diskontinuierlich Teilbewegung. In der Industrie kommen überwiegend das diskontinuierliche Teilwälzschleifen mit Teller-, Doppelkegel- und Tellerscheiben, das kontinuierliche Wälzschleifen mit Zylinderschnecke sowie das diskontinuierliche Profilschleifen mit profilierten Schleifscheiben und das kontinuierliche Profilschleifen mit Globoidschleifschnecke zum Einsatz. Bild 2-4 zeigt eine Klassifizierung der unterschiedlichen Zahnradschleifverfahren für Zahnräder [DIN8589-11, DIN8580, DIN8589-0, SCH04, BAU11].

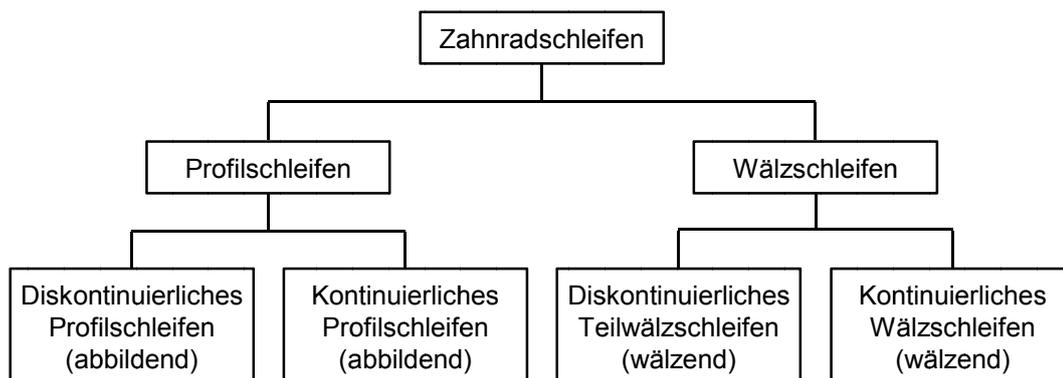


Bild 2-4: Zahnradschleifverfahren [DIN8580, KLO05]

Beim Profilschleifen werden die Zahnücken durch ein abbildendes Verfahren mit einer mit dem Sollprofil abgerichteten Schleifscheibe bearbeitet. Die Kontaktbedingungen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück können idealisiert für den diskontinuierlichen und konti-

nuierlichen Profilschleifprozess als Linienkontakt beschrieben werden. Das Wälz- und Teilwälzschleifen unterscheidet sich dahingegen, dass die Zahnform durch eine Abwälzkinematik zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück erzeugt wird, wobei das Bezugsprofil der Schleifscheibe einer Zahnstange entspricht. Hierbei kann idealisiert ein Punktkontakt zwischen dem Werkzeug und Werkstück angenommen werden [SCH04, BAU11]. Aufgrund der Relevanz für diese Forschungsarbeit werden im Folgenden nur das kontinuierliche Wälzschleifen, das diskontinuierliche Profil- und Teilwälzschleifen sowie derzeitige Finishingbearbeitungen von Verzahnungen genauer beschrieben.

### 2.2.1 Kontinuierliches Wälzschleifen

Die Bearbeitung von außenverzahnten Stirnrädern wird bei dem kontinuierlichen Wälzschleifen mit einer Schleifscheibe durchgeführt, welche im Stirnschnitt ein entsprechendes Zahnstangenprofil aufweist. Die Erzeugung der Evolvente auf der Zahnflanke erfolgt durch die kontinuierliche Abwälzbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstücke, wobei die Form der Evolvente im Hüllschnittverfahren erzeugt wird [SUL93]. Die Bearbeitung in Zahnflankenrichtung erfolgt mittels einer axialen Vorschubbewegung  $v_f$ . Die Zerspanleistung des Verfahrens ist hinsichtlich der erzielbaren Verzahnungsqualität begrenzt, was sich in Form von Änderungen in der Profil-Formabweichung  $f_f$  äußert. Eine Verschlechterung der Profil-Formabweichung  $f_f$  kann einerseits durch zu hohe Axialvorschübe  $v_f$  und andererseits durch eine ungleichmäßige Kräfteaufteilung, die aufgrund einer ungeraden Anzahl von Berührungspunkten verursacht wird, hervorgerufen werden [BRE14b]. Die Art der Flankenberührung beim kontinuierlichen Wälzschleifen hängt dabei von Modul  $m_n$ , Zähnezahl  $z$ , Eingriffswinkel  $\alpha_n$  und Schrägungswinkel  $\beta$  sowie von der Gangzahl der Schleifscheibe  $z_0$  ab. Durch den kontinuierlichen Eingriff der Schleifscheibe sind Teilungsabweichungen im Vergleich zu den diskontinuierlichen Verfahren als deutlich geringer einzustufen [SUL89, SCH04, KLO05, STW08, BAU11, DEN11]. Eine Prinzipskizze des kontinuierlichen Wälzschleifens mit einer Schleifscheibe ist in Bild 2-5 dargestellt.

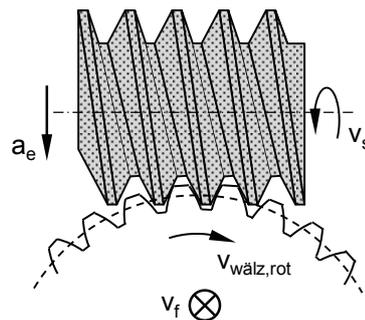


Bild 2-5: Kontinuierliches Wälzschleifen mit einer Schleifscheibe [DIN8589-11, SPU14]

Das kontinuierliche Wälzschleifen wird vorrangig für die Bearbeitung von kleinen und mittleren Stirnzahnräder im Modulbereich  $m_n$  von 0,5 mm bis 8 mm eingesetzt [KLO05, BAU11]. Die Bearbeitung von Stirnradzahnungen mit einem Modul  $m_n \leq 14$  mm lassen sich mit innovativen Werkzeugmaschinenkonzepten realisieren [REI07]. Aufgrund der hohen Produktivität wird dieses Verfahren überwiegend für die Serienfertigung eingesetzt [SUL89, DEN11]. Die Bearbeitung der außenverzahnten Stirnräder erfolgt vorrangig mit konventionellen Schleif-

werkzeugen [MEI79a, DEN05b, STW08, STI09, KLO12, KLO13a, KLO13c, REJ14, OPH15a, OPH15b]. In den letzten Jahren werden darüber hinaus vermehrt Forschungsarbeiten zum Einsatz von abrichtbaren CBN-Schleifschnecken für das kontinuierliche Wälzschleifen vorgestellt, die zu einer Verbesserung des Arbeitsergebnisses sowie zu einer Verringerung der Prozesszeit führen sollen [JAM96, DEN05b, DEN05a, DEN06b, DEN12, DEN13, KLO13b, SCT13, REJ13, SCT14].

### 2.2.2 Diskontinuierliches Profilschleifen

Die Feinbearbeitung von außen- und innenverzahnten Stirnrädern kann mithilfe des diskontinuierlichen Zahnflanken-Profilschleifprozesses erfolgen, bei dem das Achsschnittprofil des Schleifwerkzeugs dem Stirnschnittprofil der Zahnflanke entspricht. Die Grenze der Kontaktzone kann dabei als Berührlinie zwischen Werkstück und Werkzeug dargestellt werden, die sich mathematisch beschreiben lässt und für schrägverzahnte Stirnräder räumlich verläuft. Die Bearbeitung der Zähne erfolgt diskontinuierlich [SCH04, KLO05, BAU11, DEN11]. Die Zustellung bei der Bearbeitung der Zahnflanken mit dem diskontinuierlichen Zahnflanken-Profilschleifen kann mithilfe verschiedener Strategien erfolgen, radial und tangential sowie rotatorisch. Bei der Schleifbearbeitung mit radialer Zustellung wird das Abtrennen des Aufmaßes an den Zahnflanken durch die Zustellung  $a_e$  der mittig zur Zahnflanke positionierten Schleifscheibe in Richtung Zahngrund realisiert. Dabei hat die Schleifscheibe aufgrund der Eingriffsbedingungen in den ersten Schleifhüben zunächst nur im Fußbereich der Zahnflanke Kontakt, wogegen der Bereich der Kopfflanke und der Zahnfußausrundung erst in den letzten Hüben abgeschliffen wird. Dies führt zu einem höheren Risiko einer Randzonenschädigung. Die Schleifstrategie mit radialer Zustellung kann hierbei sowohl in der Einflanken- als auch in der Zweiflankenbearbeitung erfolgen, wobei der Zweiflankenschliff deutliche Vorteile hinsichtlich der Bearbeitungszeit gegenüber der Einflankenbearbeitung aufweist. Eine tangentiale Zustellung  $a_{e,tan}$  der Schleifscheibe führt zu einem größeren Abtrennbetrag im Bereich des Fußes. Dagegen kommt es bei einer rotatorischen Zustellung  $a_{e,rot}$  der Schleifscheibe zum Abschleif eines konstanten Aufmaßes in äquidistanter Richtung der Evolvente, was ein konstantes Zeitspannungsvolumen entlang des Profils zur Folge hat. Die Strategien mit tangentialer und rotatorischer Zustellung lassen sich nur mit einer einflankigen Bearbeitung realisieren [SCH04, KLO05, BAU11, DEN11]. Im Bild 2-6 ist die Kinematik des diskontinuierlichen Profilschleifens eines außenverzahnten Stirnrades mit radialer Zustellung  $a_e$  dargestellt.

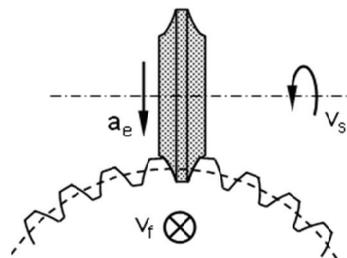


Bild 2-6: Diskontinuierliches Profilschleifen mit profilierter Schleifscheibe nach [DIN8589-11]

Beim diskontinuierlichen Zahnflanken-Profilschleifprozess kommt es während der Bearbeitung aufgrund der großen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück zu einer ein-

geschränkten Kühlschmierstoffzufuhr an die Wirkstelle, was die Zerspanleistung hinsichtlich der Gefahr einer Randzonenschädigung begrenzt. Durch die während des Schleifprozesses hohe Wärmeeinbringung in das Werkstück kann es zu Randzonenschädigungen auf der Zahnflankenoberfläche kommen, die sich in Form von Schleifbrand, Rissen, Härteabfall in der Randschicht des Werkstücks sowie Neu- oder Aufhärtung äußern können. Der Einfluss der Stellgrößen wie Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  und Zustellung  $a_e$  haben im Vergleich zu den wälzenden Verfahren nur einen geringen Einfluss auf die Verzahnungsqualität [SCH04, KLO05, BAU11, DEN11].

Aufgrund der hohen Flexibilität wird dieses Verfahren überwiegend für kleine und mittlere Serien größerer Werkstücke eingesetzt [DEN11]. Als Werkzeuge kommen meist konventionelle Schleifscheiben zum Einsatz. Dafür liegen bereits fundierte Erkenntnisse über die technologischen Zusammenhänge sowie die Eingriffsbedingungen vor [ESC96, TÜR02, SCH04, GRI06, GOR11, BRE13]. Darüber hinaus können für Spezialanwendungen galvanisch gebundene Schleifscheiben eingesetzt werden. Im Rahmen von verschiedenen Forschungsprojekten werden derzeit die Potenziale von keramisch und metallisch gebundenen CBN-Schleifscheiben untersucht, mit dem Ziel das Arbeitsergebnis zu verbessern sowie die Prozesszeit zu verringern [BOU94, KEM00, KLO13b, SCT14, DEN15].

### 2.2.3 Diskontinuierliches Teilwälzschleifen

Ein weiteres diskontinuierliches Zahnflanken-Schleifverfahren stellt das Teilwälzschleifen dar, bei dem sich die Wälzbewegung in einen translatorischen und einen rotatorischen Anteil zerlegt. Die Bearbeitung der Zahnräder kann dabei mittels Teller- oder Doppelkegelscheiben erfolgen, wodurch eine Flexibilität hinsichtlich der Bearbeitung von unterschiedlichen Modulen und Zähnezahlen gegeben ist. Die Bearbeitung mit Tellerscheiben ermöglicht hohe Verzahnungsqualitäten und komplexe Zahnflankenmodifikationen. Da aufgrund der kleinen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück nur geringe Schleifkräfte auftreten, kann diese Bearbeitung aufgrund verringerter Temperaturen in der Kontaktzone auch ohne Kühlschmierstoff erfolgen. Bei der Teilwälzschleifbearbeitung mit Tellerscheiben wird in Nullgrad und Alphagrad-Schleifmethoden unterschieden, wobei diese jeweils nach Lage der Schleifscheibe zur vertikalen Achse, Lage der Schleifscheibe zur Flankenrichtung, Winkel des Innenkegels sowie Eingriff der Schleifscheibe charakterisiert werden. Für die unterschiedlichen Schleifmethoden ergeben sich in Abhängigkeit der Eingriffsbedingungen der Schleifscheibe unterschiedliche Oberflächenstrukturen. Das resultierende Schliffbild bei der Kreuzschliffmethode stellt aufgrund einer sich kreuzenden Struktur eine Besonderheit im Vergleich zu den anderen Zahnflankenoberflächen dar [MEI79b, HIN83, GEI03, KLO05, BAU11]. Eine Prinzipskizze des diskontinuierlichen Teilwälzschleifens mit Doppelkegelscheibe kann dem [Bild 2-7](#) entnommen werden.

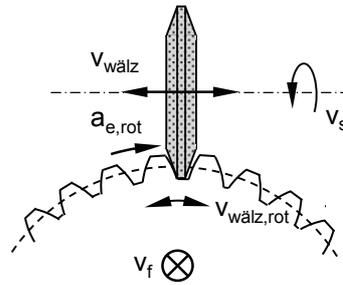


Bild 2-7: Diskontinuierliches Teilwälzschleifen mit Doppelkegelscheibe nach [DIN8589-11]

Bei der Teilwälzschleifbearbeitung mit Doppelkegelscheibe entspricht das Profil der Schleifscheibe einem einzelnen Zahnstangenzahn, welches sich auf dem Werkstück abwälzt. Dabei bewegt sich die ellipsenförmige Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück längs des Zahnflankenprofils und des Schleifscheibenprofils. Die aktuelle Wälzstellung hat einen entscheidenden Einfluss auf das lokale Zeitspannungsvolumen und somit auf die lokal auftretenden Werkstücktemperaturen. Der größere Werkstückdurchmesser am Zahnflankenkopf im Vergleich zum Zahnflankenfuß führt in diesem Bereich zu höheren Wälzgeschwindigkeiten  $v_{w\ddot{a}lz}$ , was höhere Spannungsquerschnitte während der Bearbeitung zur Folge hat. Aufgrund der translatorischen Bewegung der Schleifscheibe während der Wälzbewegung bildet sich ein Polygon durch die endliche Anzahl von Hüllschnitten aus, was zu einer verfahrensbedingten Profil-Formabweichung  $f_f$  führt. Mithilfe eines geeigneten Überlaufs oder eines höheren Überdeckungsgrades lässt sich die Profil-Formabweichung  $f_f$  auf der Zahnflanke verringern, was jedoch eine Erhöhung der Bearbeitungszeit zur Folge hat. Die wesentlichen Stellgrößen beim Teilwälzschleifverfahren mit Doppelkegelscheiben hinsichtlich der Verzahnungsqualität und der Randzonenschädigung des Werkstücks stellen die Doppelhubzahl  $i_{DH}$ , Wälzgeschwindigkeit  $v_{w\ddot{a}lz}$  und Zustellung  $a_e$  dar [MEI79a, MEI79b, HNI96, KLO05, BAU11, HIR12].

Im Rahmen von Forschungsprojekten wurden bereits ausführlich die Bewegungs- und Eingriffsverhältnisse beim Teilwälzschleifen von Stirnrädern sowohl mit Tellerscheiben als auch mit Doppelkegelscheiben analysiert und bewertet [MEI79a, MEI79b, HIN83]. Das Verfahren kann zur Realisierung komplexer Verzahnungsmodifikationen sowie zur Erzeugung hoher Verzahnungsqualitäten eingesetzt werden [KLO05]. Konventionelle Schleifscheiben kommen auch bei diesem Verfahren vermehrt zum Einsatz [MEI79a, MEI79b, KLO05].

#### 2.2.4 Endbearbeitung von Verzahnungen

Hochbelastete Zahnräder werden meist nach der konventionellen Zahnradbearbeitung einer anschließenden Oberflächenbehandlung unterzogen, um den Verschleiß der Zahnräder im Einsatz zu reduzieren. Die verbesserten Oberflächenqualitäten führen dabei einerseits zu einer Reduzierung der Gefahr von Graufleckigkeit (micropitting) sowie zu einer Geräuschverringern im Getriebe und andererseits zu einem reduzierten Abrieb in der Einlaufphase. Die Finishingbearbeitung der Zahnräder erfolgen derzeit durch den Einsatz von elastischen sowie metallisch gebundenen Feinstschleifscheiben, dem Verzahnungshonen oder durch zusätzliche Gleitschleif- oder Trowalisierprozesse. Dabei zeigen die Verfahren jedoch Grenzen im Hinblick auf die Bearbeitung von großmoduligen Zahnrädern für Getriebe von Windkraft-

anlagen auf [WGY91, KÖL00, TÖN00b, TÖN00a, KRA01a, KRA02, NIS03, SRO03, KRA05, HAN07, FIS08, RÖS08, SHW08, VUC08b, VUC08a, BRI09, WIN09, KOL10, HEI13, WAG13, ANT14, DEN14a, SON14, KAM16, WEN16].

### Finishingbearbeitung mit elastisch gebundenen Schleifscheiben

Mithilfe des Einsatzes von elastisch gebundenen Schleifscheiben lassen sich die Oberflächenqualitäten von tribologisch beanspruchten Bauteilen wie Führungswellen, Kurbelwellen und Zahnrädern deutlich verbessern [SUL89, BRI09, HEI13, WAG13, ANT14]. BRINKSMEIER und HEINZEL ET AL. [BRI09, HEI13] führten Untersuchungen zum Feinschleifen von kleinmoduligen Zahnrädern mit elastisch gebundenen Schleifscheiben durch. Dabei konnte eine deutliche Steigerung der Oberflächenqualität an den Zahnflanken durch den zusätzlichen Finishingprozess erreicht werden. Der Materialanteil R<sub>mr</sub> (5 %; -0,250 µm) ließ sich mithilfe des Feinschleifprozesses auf über 60 % erhöhen, ohne dabei thermische Randzonenschädigungen auf der Zahnflankenoberfläche zu erzeugen. Eine große Herausforderung des Finishingverfahrens mit elastisch gebundenen Schleifscheiben stellt jedoch die aufgrund der variierenden Eingriffsbedingungen entlang der Evolventen unterschiedliche Belastung am Werkzeug dar, siehe Bild 2-8. Die unterschiedlichen Radialkräfte entlang der Evolvente führen zu variierenden elastischen Verformungen an der Schleifscheibe, was sich in einer Verschlechterung der Form- und Maßgenauigkeiten der Profillinie widerspiegelt. Darüber hinaus ist die Übertragbarkeit auf großmodulige Zahnräder bisher noch nicht möglich, da die Gefahr der Schleifbrandentstehung und des Profilfehlers deutlich höher ist [WAG13, KAM16]. Beim Feinstpolierschleifen mit kunstharzgebundenen Edelkorund- und Siliziumkarbidschleifscheiben konnten vergleichbare Oberflächenqualitäten erreicht werden, wobei die Zahnflanken-geometrieabweichungen deutlich geringer ausfallen [KAM16].

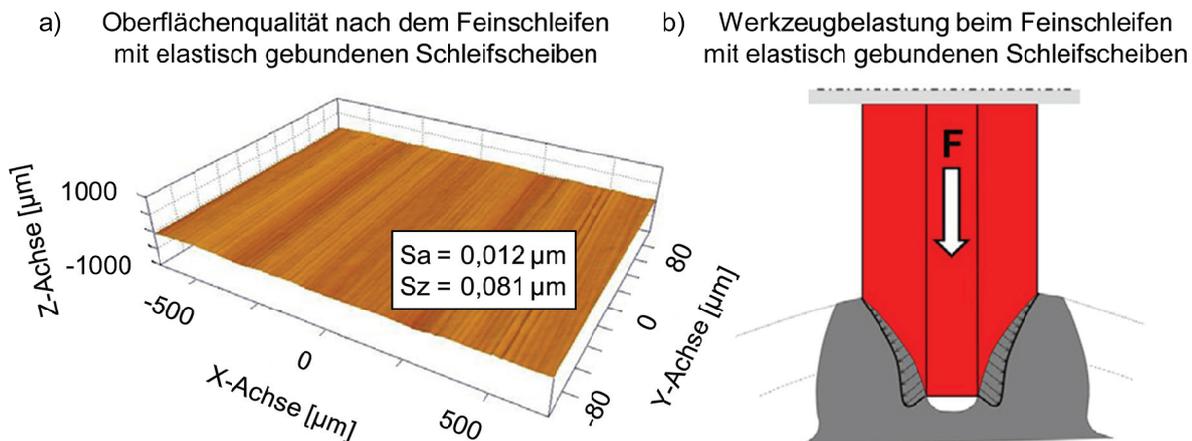


Bild 2-8: Feinschleifen von Zahnrädern mit elastisch gebundenen Schleifscheiben [HEI13, WAG13]; a) Oberflächenqualität; b) Werkzeugbelastung

Die KAPP GRUPPE [KAP15a] berichtet darüber hinaus über den industriellen Einsatz der elastisch gebundenen Schleifscheiben sowohl für das Profil- als auch für das Wälzschleifen auf modernen Verzahnungsschleifmaschinen. Beim Profilschleifen wird neben der konventionellen eine elastisch gebundene Schleifscheibe in der gleichen Aufspannung montiert. Dagegen wird beim Wälzschleifen ein kombiniertes Schleifwerkzeug, bestehend aus konventio-

neller und elastisch gebundener Schleifscheibe, zur Bearbeitung von Verzahnungen in einer Aufspannung verwendet. REISHAUER [WEN16] stellt einen ähnlichen Ansatz vor, mit dem die Oberflächengüte der Verzahnung unter Einsatz einer Verbundschleifschnecke erheblich verbessert werden kann.

DENKENA ET AL. [DEN14a] wählten dagegen den Einsatz von metallisch gebundenen CBN-Feinschleifscheiben für das Zahnflanken-Profil schleifen als Ansatz zur Verbesserung der Oberflächengüte von Zahnflanken. Neben der höheren Verschleißbeständigkeit von CBN bietet die höhere Wärmeleitfähigkeit gegenüber Korund zudem Potenzial hinsichtlich des Eigenspannungszustandes in den Zahnflanken. Thermische Beanspruchungen während der Schleifbearbeitung können Zugeigenspannungen durch plastische Verformung induzieren. Erste Ergebnisse zeigen eine deutliche Verbesserung der Oberflächenkennwerte nach der Bearbeitung, die einen positiv Einfluss auf die Lebensdauer und das Geräuschverhalten erwarten lassen.

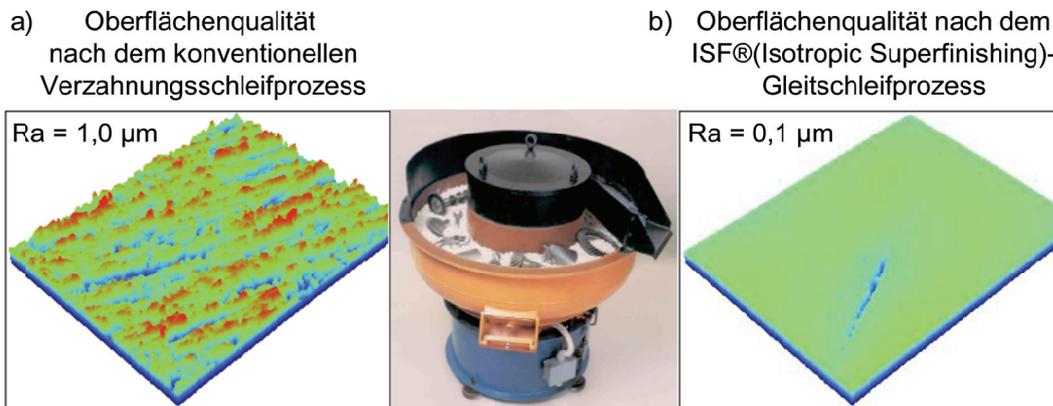
### *Gleitschleifprozesse*

Das Gleitspanen gehört nach DIN 8580 [DIN8580] zur Hauptgruppe der trennenden Fertigungsverfahren und wird nach DIN 8589-17 [DIN8589-17] in die Verfahren Gleitschleifen und Gleitlappen unterteilt. Gleitschleifen ist hierbei als Spanen definiert, bei dem zwischen Werkstücken und einer Vielzahl von losen Schleifkörpern unregelmäßige Relativbewegungen stattfinden, die eine Spanabnahme bewirken. Die Unterscheidung zwischen Gleitschleifen und Gleitlappen bezieht sich auf das Medium, durch welches Späne abgetrennt werden. Im Falle des Gleitschleifens ist dies ein abrasiver Schleifkörper, im Falle des Gleitlappens ein in einer Flüssigkeit verteilter pulverförmiger Zusatz [DIN8589-17].

Nach NISKANEN ET AL. [NIS13] kommen derzeit zwei weitere Finishingprozesse für Zahnräder zum Einsatz. Zum einen das Gleitlappen mit abrasiven Partikeln aus Aluminiumoxid, wobei diese mit Wasser, Reinigungsmitteln und kleinen Zink-Zylindern gemischt werden, und zum anderen der ISF®(Isotropic superfinishing)-Gleitschleifprozess, bei dem mithilfe von keramischen Schleifkörpern und einer aktiven Chemikalie die Werkstückoberfläche bearbeitet wird. Die Prozesszeit für die Finishingbearbeitung der Zahnräder mit dem ISF®-Prozess ist im Vergleich zum Gleitlappen deutlich kürzer, weshalb dieser vermehrt bei der Getriebeherstellung zum Einsatz kommt. Während der ISF®-Bearbeitung entsteht eine chemische Reaktion der Werkstückoberfläche mit der aktiven Chemikalie. Im Anschluss wird die Oberflächenqualität durch das Abtrennen der Rauheitsspitzen verbessert, wobei eine Reibgeschwindigkeit zwischen den Gleitschleifkörpern und der Werkstückoberfläche eine Voraussetzung dafür darstellt [NIS03, SRO03, WIN04, SRO05b, HAN07, FIS08, RÖS08, VUC08b, BEL13, SON14].

Oberflächenqualitäten auf der Zahnflanken von ca.  $R_a = 0,05 \mu\text{m}$  und  $R_z = 0,7 \mu\text{m}$  lassen sich mit diesem Verfahren erreichen, wobei die Oberflächen keine Oberflächenschädigungen sowie Spannungs- und Rauheitsspitzen aufweist [SRO05b]. Beim Abtrennen der Rauheitsspitzen kann zu Veränderungen der ursprünglichen Profilstruktur führen, was mithilfe einer geeigneten Prozessführung verringert werden kann [SRO05b]. Darüber hinaus werden durch den ISF®-Prozess keine Oberflächenspannungen in der Werkstückoberfläche erzeugt. Ein Vergleich der Oberflächenqualität nach dem Schleif- und Finishingprozess ist in [Bild 2-9](#)

dargestellt. NISKANEN [NIS03] und andere Autoren konnten darüber hinaus anhand von Einsatztests nachweisen, dass die gefinishten Zahnräder sowohl eine höhere Lebensdauer als auch ein verbessertes Einlaufverhalten aufweisen [KRA01a, KRA02, NIS03, SRO03, WIN04, KRA05, SRO05b, FIS08, RÖS08, VUC08b, WIN09, KOL10, KOL13].



**Bild 2-9:** Oberflächenqualität [REM13]; a) nach dem konventionellen Verzahnungsschleifprozess; b) nach dem ISF®-Gleitschleifprozess

### *Verzahnungshonen*

Ein weiteres Verfahren für die Finishingbearbeitung stellt das Verzahnungshonen dar, welches in der Praxis auch als kontinuierliches Wälzschraubschleifen, Wälzhonen, Schabschleifen oder auch Coronieren bezeichnet wird [DIN8589-14]. Die Kinematik setzt sich dabei aus einer Wälzbewegung zwischen dem Werkstück und Werkzeug sowie einer durch den Achskreuzwinkel resultierenden axialen Bewegung zusammen. Aufgrund des kinematischen Zusammenhangs bei diesem Verfahren kommt es ober- und unterhalb des Wälzpunktes zu unterschiedlichen resultierenden Schnittgeschwindigkeiten, was sich in unterschiedlichen Strukturen auf der Oberfläche widerspiegelt. Die Schnittgeschwindigkeiten beim Verzahnungshonen sind gegenüber dem Wälzschleifen deutlich geringer. Darüber hinaus kann durch eine zusätzliche Oszillationsgeschwindigkeit in Richtung der Werkstückachse die Oberflächenrauheit verringert werden. Neben der verfahrensspezifischen Oberfläche lassen sich mit diesem Finishingverfahren günstige Eigenspannungszustände in der Werkstückrandzone durch die mechanische und sehr geringe thermische Beanspruchung erreichen. Die Oberflächen- und Randzoneneigenschaften können dabei zu einem verbesserten Einsatzverhalten der Zahnräder führen [KÖL00, RÜT00, TÖN00b, TÖN00a, MAR01, KLO05, VUC08a, KLO09, BAU11, DEN11, JOL14].

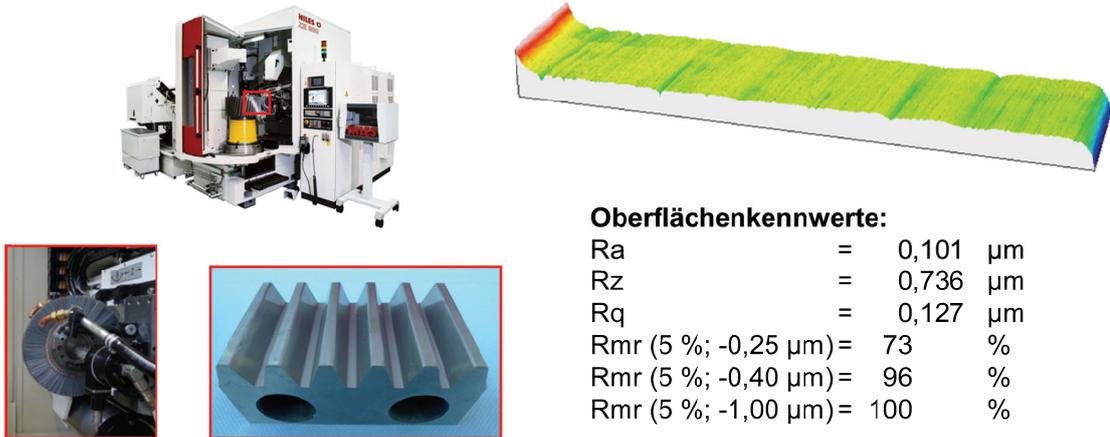
### *Finishingbearbeitung mit Bürstwerkzeugen*

Derzeit rücken neben den herkömmlichen Finishingbearbeitungen für Zahnräder bisher nicht genutzte Fertigungsverfahren für die Serienfertigung in den Fokus. Durch den Einsatz von filamentbesetzten Abrasivwerkzeugen für das Oberflächenfinishing von Zahnrädern können einerseits das Arbeitsergebnis verbessert und andererseits zusätzliche, kostenintensive Prozessschritte außerhalb der Schleifmaschine substituiert werden [LAN07, NAG14, UHL14a, DVO16b, DVO16a]. Die Bürstbearbeitung zeigt ein hohes Potenzial im Vergleich zu alternativen Konzepten der maschinenintegrierten Finishingbearbeitung [LAN07, BRU15, UHL16],

die zurzeit nur eingeschränkt prozesssicher hinsichtlich der Formgenauigkeit und der thermischen Randzonenschädigung bei der Bearbeitung großmoduliger Zahnräder sind. Eine beispielhafte Oberfläche nach der Bürstbearbeitung kann dem [Bild 2-10](#) entnommen werden [UHL14a].

a) Bürsten einer Zahnstange

b) Oberfläche nach der Bürstbearbeitung



**Bild 2-10:** Bürsten von Verzahnungen nach [UHL14a];  
a) Bürsten einer Zahnstange; b) Oberfläche nach der Bürstbearbeitung

## 2.3 Herstellung von strukturierten Oberflächen

Strukturierte Oberflächen lassen sich nach EVANS ET AL. [EVA99] als Oberflächen definieren, bei denen ein Strukturmerkmal zur Erreichung einer spezifischen Funktionsfähigkeit vorgesehen ist. Oberflächenstrukturen haben einen Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften, wie beispielsweise Reibung, Wärmeübertragung sowie optische Eigenschaften. Eine Verbesserung der Mikrostruktur kann hierbei die Funktionsweise der Oberfläche deutlich verbessern. Insbesondere Oberflächenstrukturen aus der Natur dienen oft als Inspiration für technische Oberflächen [MIL99, MAL13]. Als Beispiele lassen sich hierbei die Mikrostrukturen des Lotusblattes, die Haut eines Haies oder eines Chamäleons sowie die Nanostrukturen eines Schmetterlingflügels nennen, die jeweils zu einer Verbesserung der Funktionsweise führen [MIL99, MAL13]. Die Oberflächenphänomene von Mikro- und Nanostrukturen spielen eine entscheidende Rolle bei Entwicklungen in der Elektronik, Informationstechnologie, Energie, Optik, Tribologie und Biologie [EVA99, RAM07, BRU08].

Aufgrund der steigenden Anforderungen an gleitenden und wälzenden Funktionsflächen hinsichtlich der Randzonen- und Oberflächeneigenschaften werden immer häufiger Ansätze einer gezielten Oberflächenstrukturierung verfolgt, um die Lebensdauer der Bauteile zu erhöhen und damit die Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz des Produkts zu verbessern. Dabei beeinflussen die Oberflächeneigenschaften maßgeblich das tribologische Verhalten, welche eine Änderung der Schmierbedingungen im Kontakt sowie der Reibungsverluste und des Verschleißes im Einsatz zur Folge haben [CAM72, CLA92, JEN96, BRU08, BRN12, ERC12, GOE15]. Derzeit sind die Analyse verschiedener Verfahren zur gezielten Oberflächenstrukturierung und die Charakterisierung strukturierter Oberflächen anhand geeigneter Kennwerte Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten [EVA99, MIL99, MAS00, SAW00, WEN02, HES05, DOR06, RAM07, BRU08, DEN08b, DEN08a, DEN09b, BRI10, DEN10a,

OLI10, KON11, UHL11, XIE11, LEN12, HIY13, KIR14, UHL14b, GOE15]. Im Folgenden werden die wichtigsten spanenden und nicht spanenden Verfahren zur gezielten Oberflächenstrukturierung von Funktionsflächen vorgestellt, mit denen sich die tribologischen Eigenschaften von Oberflächen beeinflussen und verbessern lassen.

### 2.3.1 Spanende Fertigungsverfahren

Für die Oberflächenstrukturierung von Funktionsflächen können spanende Fertigungsverfahren zum Einsatz kommen [KÖL00, RÜT00, MAR01, WEN02, KLM03, HES05, DEN08c, DEN08b, DEN08a, VUC08a, DEN09b, BRI10, DEN10a, OLI10, KON11, UHL11, XIE11, HOF12, BRI12, HIY13, SUP13, KIR14, UHL14b, GOE15, BIE16, CHE16, ISL16, MOH17, PER17, SIL17]. Im Folgenden werden unterschiedliche Ansätze zur gezielten Oberflächenstrukturierung vorgestellt, wobei nur auf die Dreh- und Schleifbearbeitung sowie auf die Honbearbeitung eingegangen wird.

#### *Drehbearbeitung*

In der Literatur wird über zwei Verfahren zur Oberflächenstrukturierung mit geometrisch bestimmter Schneide berichtet. Zum einen lassen sich durch eine Drehbearbeitung mit rotierendem Werkzeug [DEN08c, DEN08b, DEN08d, DEN10a] Mikrostrukturen in die Werkstückoberfläche einbringen, wobei die Dichte der Strukturelemente über den Vorschub verändert werden kann. Anhand von Tribotests konnte ein positiver Einfluss der Strukturdichte und der Anordnung der Strukturelemente in Gleitrichtung auf den Reibungskoeffizienten identifiziert werden. Zum anderen lassen sich in Abhängigkeit der Prozessparameter mit einem piezoelektrisch angetriebenen Werkzeug bei der Drehbearbeitung [DEN08b, DEN08d, DEN10a] gezielt Oberflächenstrukturen auf dem Werkstück erzeugen, wobei sich die resultierende Geschwindigkeit aus der Vorschub-, Schnitt- und Oszillationsgeschwindigkeit zusammensetzt.

Ein positiver Einfluss einer durch die Drehbearbeitung hergestellten spiralförmigen Nut in Verbindung mit einer zusätzlichen Graphiteindringung auf den Reibungskoeffizienten und den Gleitweg bei Trockenreibung konnte im Rahmen von Tribotests festgestellt werden [HIY13]. Ein weiterer Ansatz zur Herstellung von Mikrostrukturen auf der planen Stirnfläche des Werkstücks stellt der Einsatz eines piezoelektrisch angetriebenen Drehwerkzeugs dar [BRI10, KON11, BRI12].

#### *Schleifbearbeitung*

KAPP [KAP10] berichtete über eine gezielte Oberflächenstrukturierung durch einen Hartfeinbearbeitungsprozess. Mithilfe einer speziellen Bearbeitungstechnologie, dem sogenannten Wälzschleifen mit Struktur-Shiften, können definierte Oberflächenstrukturen auf der Zahnflankenoberfläche erzeugt werden, die sowohl zu einer Verbesserung des Materialanteils als auch der Reibungseigenschaften der Verzahnung führen können. Die Oberflächenstruktur und die Oberflächenkennwerte haben einen Einfluss auf den Getriebewirkungsgrad, was den Einsatz von kleinen Zahnradbaugrößen und damit Gewichts- und Bauraumeinsparungen für die Getriebe ermöglicht [WEN16]. Die Herstellung von Oberflächenstrukturen mit dem soge-

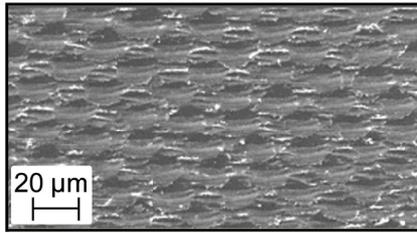
nannten Low-Noise-Shifting (LNS) führt nach SCHÄCKE [SCP03] zu einer deutlichen Geräuschminimierung, die auf eine verbesserte Laufruhe der Zahnräder zurückzuführen ist [STW08]. TÜRICH [TÜR15a] berichtet von einer alternativen Prozessstrategie zur gezielten Oberflächenstrukturierung von Zahnrädern, der sogenannten Variable Rate Method (VRM). Dabei wird mithilfe einer Variation der Vorschubgeschwindigkeit beim Wälzschleifen eine unterbrochene Oberflächenstruktur auf der Zahnflanke realisiert, die hinsichtlich der Geräuschemission optimiert ist.

Für die schleiftechnische Herstellung von Riblet-Strukturen für Verdichterschaufeln entwickelten DENKENA ET AL. [DEN06a, DEN09b, DEN10a, DEN10b] und WANG [WAB10] eine innovative Abrichtstrategie. Beim Abrichten der Siliziumkarbid(SiC)-Schleifscheiben mit Diamant-Profilrollen ließen sich die Profilspitzen mithilfe einer Shift-Kinematik im Vergleich zum konventionellen Einsatz von Diamant-Profilrollen deutlich reduzieren. Zudem konnte ein positiver Einfluss einer geringen Vorschubgeschwindigkeit sowie der Gegenlaufstrategie beim Abrichten auf die Qualität der Profilspitzen identifiziert werden, was eine verbesserte Qualität der Struktur zur Folge hatte. Weiterführende Entwicklungen werden derzeit durchgeführt, um gekrümmte Riblet-Strukturen auf den Trag- und Deckscheiben eines Pumpenimpellers fertigungstechnisch zu realisieren [DEN14b]. Darüber hinaus wurden Mikrostrukturen mithilfe mehrschichtiger, metallisch gebundener Diamantwerkzeuge hergestellt. Zur Realisierung von Dreiecksprofilen wurden die Schleifwerkzeuge mittels Kontaktersion abgerichtet [DEN10c].

Mithilfe eines Abrichtprozesses unter Einsatz eines piezogetriebenen Einkorndiamantabrichters lassen sich dagegen Strukturen in die Schleifscheibenoberfläche einbringen, die sich bei einer geeigneten Synchronisation zwischen der Werkstückgeschwindigkeit und der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit beim Außenrundscheifen auf die Funktionsfläche des Bauteils übertragen [OLI10]. Zusätzlich konnte eine Reduzierung der Schleifleistung beim Einsatz einer strukturierten Schleifscheibentopographie festgestellt werden. Die Mikrostrukturen im Bauteil können durch zweifaches Überscheifen mit einem Versatz im Schleifeingriff verkleinert werden.

Durch den Einsatz von profilierten Diamantschleifscheiben können pyramidenförmige Mikrostrukturen auch auf einer Siliziumoberfläche hergestellt werden [XIE11]. Dafür wurde ein 60°-V-Profil in die metallisch gebundene Diamantschleifscheibe mit einem SiC-Abrichtwerkzeug eingebracht. Die pyramidenförmigen Mikrostrukturen wurden mithilfe sich durchkreuzender Werkzeugwege realisiert. Metallisch gebundene Schleifscheiben zur schleiftechnischen Strukturierung einer Oberfläche können alternativ mithilfe eines elektroerosivem Abrichtprozesses konditioniert werden, um ein bogenförmiges und keilförmiges Profil auf der Schleifscheibe zu erzeugen [GUO15].

Beim ultraschallunterstützten Schleifen von Keramikwerkstücken erfolgt eine Überlagerung der konventionellen Vorschubgeschwindigkeit mit einer weiteren Geschwindigkeitskomponente im Ultraschallbereich. Die Überlagerung der beiden Geschwindigkeiten führt zu einer gezielten Oberflächenstruktur auf dem Werkstück. Die Ultraschallbewegung ist dabei senkrecht zu den bearbeiteten Funktionsflächen, wodurch ein „Kreuzmuster“ als Schliffbild auf der Werkstückoberfläche entsteht. [Bild 2-11](#) stellt eine optische Aufnahme der Oberflächenstruktur nach dem ultraschallunterstützten Schleifen dar.



**Prozessparameter:**

Schleifwerkzeug:	D54 C200
Kühlschmierung:	Lösung, 4 %
Werkstück:	ZrO <sub>2</sub> - MgO
Schnittgeschwindigkeit:	$v_c = 2,7 \text{ m/s}$
Schwingfrequenz:	$f_{US} = 18,5 \text{ kHz}$
Amplitude:	$A_1 = 0 \text{ µm}$
	$A_2 = 9 \text{ µm}$

**Bild 2-11:** Oberflächenstruktur beim ultraschallunterstützten Schleifen [SAM10]

WENDA [WEN02] befasste sich ausführlich mit verschiedenen Verfahren zur Mikrostrukturierung von keramischen Werkstoffen und Hartmetall. Für die technologischen Untersuchungen wurden Mikroschleifscheiben, Mikroschleifstifte und Mikrohohlschleifstifte eingesetzt. Unter Einsatz der geeigneten Versuchparameter wurden mit den Mikroschleifscheiben sich kreuzende Säulen auf allen Werkstoffspezifikationen geschliffen. Die Qualifizierung der Schleifstifte erfolgte hingegen für die Herstellung geschlossener Mikrostrukturen bzw. von Bohrungen. Durch umfangreiche Untersuchungen konnten Technologien für die verschiedenen Werkzeug-Werkstück-Kombinationen mit dem Ziel der Fertigung kleinster Strukturgrößen erarbeitet werden. HESSELBACH ET AL. [HES05] untersuchten dagegen den Einsatz von CBN-Schleifwerkzeugen für die Mikrostrukturierung von gehärtetem Stahl mit hohem Aspektverhältnis, wobei er die Spezifikation der CBN-Feinstschleifscheibe als Haupteinflussgröße auf das Arbeitsergebnis identifizierte. Eine Mikrostrukturierung von Abformwerkzeugen stellten THIEL ET AL. [THI00] mit profilierten, keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben her. Eine weitere Möglichkeit stellt das großflächige Strukturieren von Siliziumwafern unter Einsatz einer Strukturwalze dar, welches ein schnelles und kostengünstig Verfahren zur Oberflächenstrukturierung von Siliziumsolarzellen darstellt [LEI04].

Mithilfe eines Spezialwerkzeugs lassen sich alternativ definierte Ritzspuren in die Funktionsfläche zur gezielten Oberflächenstrukturierung einbringen [KIR14, SIL17]. Das CBN-Schleifwerkzeug ist dabei durch ein definiertes Kornmuster gekennzeichnet, bei der die Kornhöhe sowie der Abstand der CBN-Körner in Umfangs- und Breitenrichtung gleich sind. Durch eine geeignete Abstimmung der Prozesskinematik und des Kornsetzmusters lässt sich eine Vielzahl von unterschiedlichen Mikrostrukturierungen realisieren. Weitere Untersuchungen zur Oberflächenstrukturierung mit einem Ritzwerkzeug zeigen neben der Schnittgeschwindigkeit einen deutlichen Einfluss der Schneidkantenometrie auf die Oberflächenqualität und die Grat-Bildung [DEN08a].

UHLMANN ET AL. [UHL11, UHL14b] führten schleiftechnische Untersuchungen zur Einflussbestimmung einer überlagerten Hubgeschwindigkeit sowie einer Werkzeugneigung auf die Oberflächenstruktur des Werkstücks durch. In Bezug auf eine zusätzliche Oszillationsbewegung beim Planschleifen von Hartmetall konnte ein Zusammenhang zwischen der schleiftechnisch eingebrachten Oberflächenstruktur und den tribologischen Eigenschaften identifiziert werden. Darüber hinaus lassen sich mithilfe einer definierten Neigung des Werkzeugs beim Planschleifen die Oberflächenstruktur sowie die Oberflächenkennwerte gezielt verändern. Die Oberflächenstruktur eines Plan-Hubschleifprozesses im Vergleich zur Oberfläche eines konventionellen Schleifprozesses ist in Bild 2-12 dargestellt.

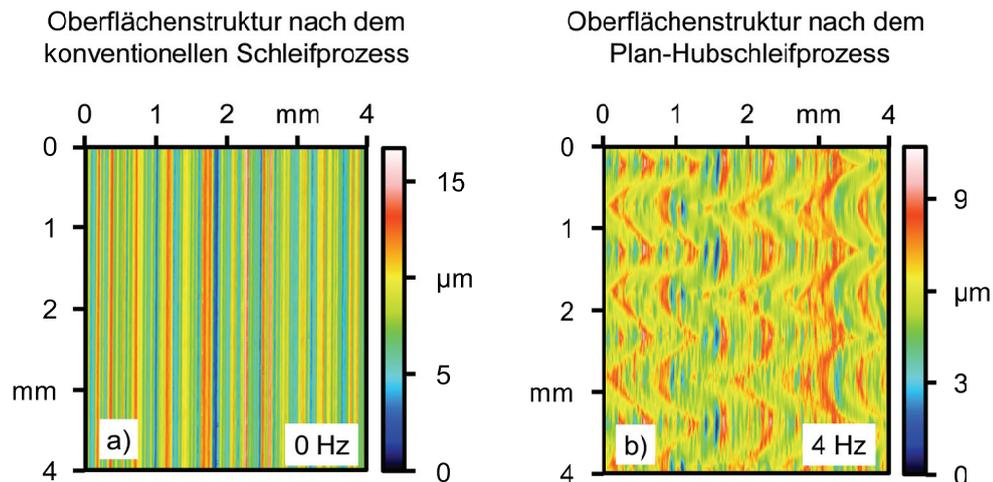


Bild 2-12: Oberflächenstrukturen;  
 a) konventioneller Schleifprozess; b) Plan-Hubschleifprozess [UHL11]

### Honbearbeitung

Eine weitere Möglichkeit zur Oberflächenstrukturierung mittels einem spanenden Fertigungsverfahren stellt die Honbearbeitung von Funktionsflächen dar, wodurch sich Form-, Maßgenauigkeit und Oberflächengüte des Werkstücks verbessern lassen [HAA99, KHE07, WIT11, UTS12, SPU14]. Dabei ist die Honbearbeitung von Zylinderlaufflächen eine seit Jahren etablierte Technologie, mit der sich eine definierte Kreuzstruktur auf der Oberfläche zur Reduzierung der Reibung und Verbesserung der Schmierbedingungen im Kontakt herstellen lässt. Die Kreuzstruktur entsteht hierbei durch eine Überlagerung der Geschwindigkeitskomponenten und lässt sich mithilfe der Prozessparameter variieren [KLO05]. Für Zahnräder hingegen wird das Verzahnungshonen angewendet, mit dem sich eine geräuschgünstige Oberflächenstruktur auf den Zahnflanken erzeugen lässt. Auf der Zahnflankenoberfläche entstehen vom Zahnkopf und Zahnfuß zum Schraubwälzkreis verlaufende Oberflächenstrukturen, welche im Vergleich zu den geschliffenen Oberflächen unsystematische Ritzspuren aufweisen. Darüber hinaus lässt sich die Oberflächenrauheit der Zahnflanken mithilfe des Verzahnungshonprozesses deutlich reduzieren. Neben einer Geräuschreduzierung können auch die Schmierbedingungen durch die Oberflächenstruktur verbessert werden [KÖL00, RÜT00, MAR01, VUC08a, KLO09].

### 2.3.2 Abtragende Fertigungsverfahren

Neben den bereits vorgestellten spanenden Fertigungsverfahren, lassen sich Oberflächenstrukturen auch mit einer Vielzahl von abtragenden Fertigungsverfahren realisieren [DIN8590]. Im Folgenden werden derzeitige Forschungsaktivitäten für die häufig angewendete Laserbearbeitung [EVA99, DUM00, ABE01b, ABE01a, ETS04, ERD05, KOV05, SCS05, SIF06, RAM07, ZUM07, BRU08, PEL08, RAP08, WAN08, LEN12, KLO15, MUR17] sowie für weitere Verfahren genauer vorgestellt [FRA99, MAS00, THI00, WAX03, RAM07, CAO09, SCA11].

### Laserbearbeitung

Eine seit einigen Jahren erfolgreich in der Industrie angewendete Technologie zur Oberflächenstrukturierung ist die Laserstrukturierung von Zylinderlaufbahnen, die nach der konventionellen Honbearbeitung durchgeführt wird. Dadurch wird zu dem bereits vorhandenen hohen Materialanteil eine offene Struktur erzeugt, die eine Haftung des Schmierstoffes sicherstellt. Das Einbringen dieser definierten Öl-Rückhaltetaschen in die Oberfläche bei gleichzeitig geringer Rauheit führt zu einer deutlichen Reduzierung der Reibung sowie des Ölverbrauchs im Betrieb [ABE01b, ABE01a, GEH07]. Darüber hinaus wird von einer Oberflächenstrukturierung eines Kolbenrings mit Grübchen berichtet, wobei diese einen Durchmesser von 100  $\mu\text{m}$  und eine Tiefe von 10  $\mu\text{m}$  aufweisen [ETS04]. Die Ergebnisse aus tribologischen Untersuchungen zeigen unter Vollschmierung eine deutliche Reduzierung der Reibung um ca. 30 % im Vergleich zu den nicht-strukturierten Kolbenringen.

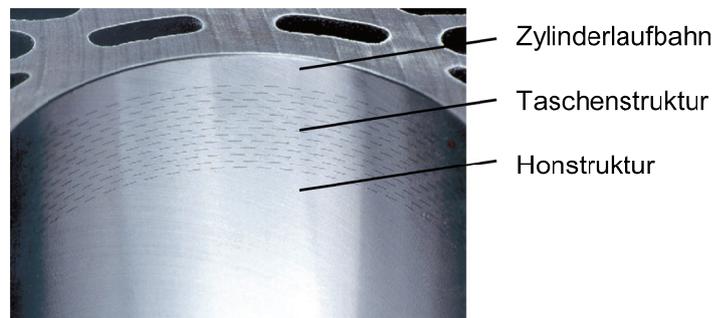


Bild 2-13: Zylinderlaufbahn nach der Laserhonbearbeitung [GEH14]

Ergebnisse zur Mikrostrukturierung von Oberflächen aus Keramik und Stahl werden in einer Vielzahl von Veröffentlichungen [DUL02, SCS05, WÖP07, ZUM07] dargestellt. Einerseits wurden runde Mikrogrübchen mit einem Durchmesser von 90  $\mu\text{m}$  bzw. 65  $\mu\text{m}$  und einer Tiefe von 10  $\mu\text{m}$  auf der Werkstückoberfläche generiert, andererseits wurde eine Mikrostrukturierung mithilfe von Nuten mit einer Breite von 100  $\mu\text{m}$  und einer Tiefe von 10  $\mu\text{m}$  hergestellt. Bei der Orientierung der Nuten wird zwischen senkrecht und parallel zur Gleitrichtung sowie einer Kreuzstruktur unterschieden. Die Ergebnisse aus den tribologischen Untersuchungen zeigen im Vergleich zur polierten Oberfläche eine deutliche Reduzierung des Reibungskoeffizienten während des Einlaufes sowie des Verschleißes vom Gegenkörper unter Einsatz der gekreuzten Mikrostruktur und der Mikrogrübchen. Diese positiven Einflüsse der Oberflächenstruktur konnten auch für anderen Gleitpaarungen und Texturparameter bestätigt werden [HAE01, ERD05, WÖP07, WAN08, MAM11, PIS11a, PIS11b]. In weiterführenden Untersuchungen konnte die Dichte der Mikrogrübchen als wesentliche Einflussgröße auf die Schmierbedingungen im Kontakt identifiziert werden, wobei die Geometrie der Grübchen nur einen geringen Einfluss aufzeigt [WAK03]. DUMITRU ET AL. [DUM00] bestätigten den positiven Einfluss runder Strukturelemente auf den Gleitweg für andere Werkstoffpaarungen. Der Durchmesser liegt hierbei im Bereich von 5 - 10  $\mu\text{m}$  und die Tiefe im Bereich von 5 - 8  $\mu\text{m}$ . Das tribologische Verhalten von mikrostrukturierten Oberflächen unter Einsatz von Schmiermittel auf Basis von Molybdändisulfid wurde von RAPOPORT ET AL [RAP08] untersucht. Auch hier ließ sich ein geeigneter Bereich für die Dichte und die Tiefe der Mikrogrübchen identifizieren, die zu einem reduzierten Reibungskoeffizienten und zu einem reduzierten Verschleiß im Einsatz führen.

### *Weitere Verfahren*

Mikrostrukturierungen lassen sich darüber hinaus auch mit weiteren abtragende Fertigungsverfahren erzeugen [DIN8590]. Unter anderem werden Verfahren wie die Mikrofunken- und -drahterosion, das LiGA-Verfahren sowie das elektrochemische Abtragen (ECM) oder die Mikroprägung eingesetzt [FRA99, MAS00, THI00, RAM07]. So stellten WANG ET AL. [WAX03] eine Mikrostruktur mittels reaktivem Ionenätzen (RIE) her. Die experimentelleren Untersuchungen zeigen einen Anstieg der Tragfähigkeit beim Einsatz von Oberflächen mit Mikrogrübchen. Mithilfe einer Optimierung des Verhältnisses der Tiefe zum Durchmesser sowie der Verteilung der Grübchen ließ sich die kritische Last in tribologischen Untersuchungen bis auf das 2,5-fache steigern. SCHUBERT ET AL. [SCA11] stellten eine Mikrostruktur von Werkstückoberflächen durch elektrochemisches Abtragen mit geschlossenem elektrolytischen Freistrahle her. Im Rahmen von Tribotests wurde eine Reduzierung des Reibungskoeffizienten beim Einsatz der Oberflächenstruktur mit einer Dichte von 10 % im Vergleich zur unstrukturierten Oberfläche nachgewiesen. Beim Vergleich der Ergebnisse der Strukturen mit unterschiedlicher Dichte wird zusätzlich deutlich, dass ein minimaler Materialanteil für eine Reduzierung des Reibungskoeffizienten notwendig ist.

## 2.4 Elastohydrodynamischer Kontakt

In zahlreichen Bereichen des Maschinenbaus kommt es aufgrund des Kontaktes der Wirkflächen verschiedener Maschinenelementen zu Reibungseffekten, was Verschleiß und hohe Energieverluste zur Folge hat. Die Reibungs- und Verschleißvorgänge in den Kontaktstellen sind dabei häufig mit einer Reduzierung der Zuverlässigkeit und Funktionssicherheit von Maschinen verbunden. Die Kontaktfläche von Maschinenelementen lässt sich in zwei Grundformen unterteilen. Zum einen die Kontaktfläche bei einer konformen Paarung, wie beispielsweise in einem Gleitlager, bei der es zu Pressungen in der Größenordnung von 10 MPa kommt. Zum anderen werden beispielsweise die Kontaktflächen bei Zahnradpaarungen und Wälzlager als nichtkonforme Paarungen bezeichnet, bei denen Druckspannungen von 1 GPa und höher auftreten können. Um Reibung und Verschleiß im nichtkonformen Kontakt zu reduzieren ist ein Schmierstoff für die Bildung eines elastohydrodynamischen Schmierfilmes erforderlich. Im Folgenden werden auf den elastohydrodynamischen Effekt und auf die tribologischen Schädigungsformen im Zahnkontakt ausführlicher eingegangen [VAN95, WIŚ00, CZI10].

### *Elastohydrodynamischer Effekt*

Die Elastohydrodynamik (EHD) befasst sich mit der Schmierung von Kontaktflächen unter Einbeziehung der Verformung. Dabei beschreibt der Begriff elastohydrodynamische Schmierung zwei Phänomene. Zum einen die hydrodynamische Schmierfilmbildung, die aufgrund einer Schmierkeilwirkung einer strömenden, viskosen Flüssigkeit zu einem Druckaufbau im Schmierpalt führt. Zum anderen treten während des Kontaktes elastische Verformungen an den Kontaktflächen der Körper auf. Diese führen in Verbindung mit der Viskositätszunahme des Schmiermittels in der Hochdruckzone zu einer signifikanten Steigerung der hydrodynamischen Tragkräfte [VAN95, WIŚ00, CZI10].

Im Bild 2-14 wird das Schmierpaltprofil sowie die Druckverteilung im Zahnkontakt mit elastohydrodynamischen Effekt verdeutlicht, wobei sowohl der Hertzsche als auch der hydrodynamische Druck dargestellt sind. Der Hertzsche Druck ist hierbei der Spannungsverlauf für die Berührungsfläche zweier elastischer Körper ohne hydrostatische Wirkung. Aufgrund der hydrostatischen Keilwirkung am Eintritt kommt es zu einem Druckaufbau im Schmierpalt. In der Mittelzone entsteht eine durch die stationäre elastische Verformung der Eindrückung im EHD-Kontakt hervorgerufene Druckspitze (Petrusevich Spitze), die annähernd der Verteilung der Druckspannung nach Hertz entspricht [HER81]. Die bei höheren Belastungen vorhandene zweite Druckspitze entsteht aufgrund der sich aus elastischem Werkstoffverhalten am Kontaktauslauf ergebenden Schmierpaltverengung. Die Lage der Druckspitze hängt dabei von den Geschwindigkeiten im EHD-Kontakt ab [VAN95, WIŚ00, CZI10]. Neben den Kennwerten der Reynoldsschen Differentialgleichung, wie die Geschwindigkeiten der Kontaktpartner, die Spalthöhe und die dynamische Viskosität des Schmierstoffs, können die Schmierfilmeigenschaften bei hochbelasteten Tribokontakten auch durch die Veränderung der Oberflächenstruktur mit beeinflusst werden [WIŚ00, ZHU01, SPE11].

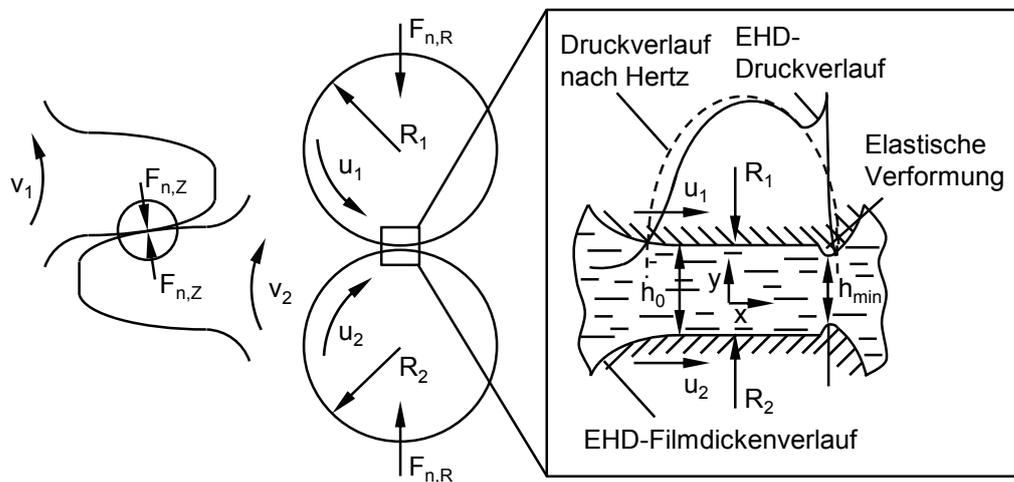


Bild 2-14: Prinzipskizze eines Schmierpaltprofils mit Druckverteilung im Zahnkontakt nach [GES02a]

In Bild 2-15 ist die Gleitgeschwindigkeit entlang des Zahnprofils als Prinzipskizze dargestellt. Deutlich wird, dass die höchsten Gleitgeschwindigkeiten am Zahnkopf vorliegen. Dagegen erreicht die Gleitgeschwindigkeit am Teilkreis fast den Wert Null. In Bezug auf die Belastungsintensität sowie die Geschwindigkeit des Zahnrades lassen sich nach DUDLEY [DUD81] drei Bereiche der Schmierung unterscheiden, siehe Bild 2-15. Der K-Faktor ist hierbei als sogenannte Belastungsintensität zu verstehen. Im Bereich I ist die Geschwindigkeit so gering, dass sich kein elastohydrodynamischer Schmierfilm aufbauen kann. Reibung und Verschleiß werden durch die Eigenschaften der Zahnflanken und Oberflächenschicht bestimmt. Im Bereich II ist die notwendige Geschwindigkeit für den Aufbau eines Schmierfilmes vorhanden, wobei dieser nicht dick genug für eine Trennung der Zahnflanken ist. Eine ausreichende Geschwindigkeit liegt im Bereich III vor, in dem die Zahnflanken durch einen elastohydrodynamischen Schmierfilm vollständig separiert sind.

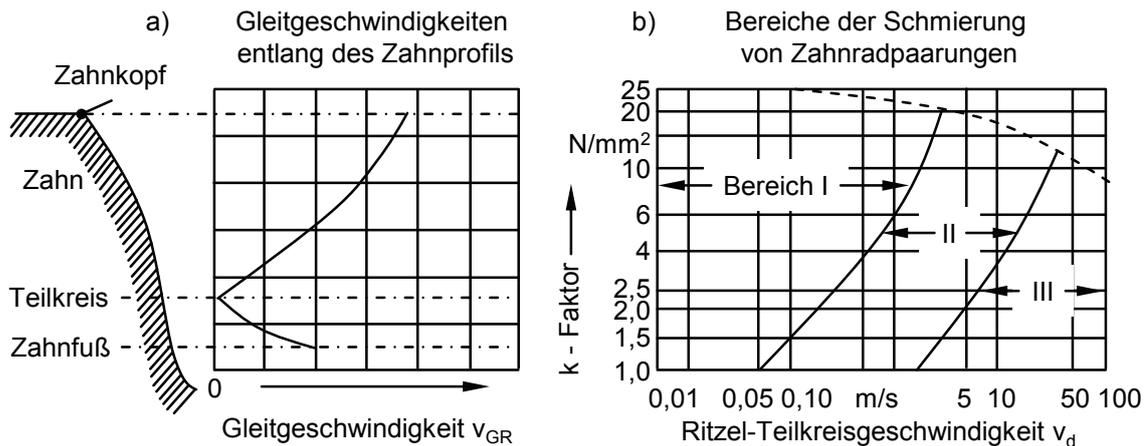


Bild 2-15: Wälzgetriebe;  
 a) Gleitgeschwindigkeiten entlang des Zahnprofils [CZI10]; b) Bereiche der Schmierung von Zahnradpaarungen in Abhängigkeit von den Betriebsbedingungen nach [DUD81]

### Tribologische Schädigungsformen

Im hochbelasteten Zahnkontakt können die verschiedenen Verschleißmechanismen, wie Adhäsion, Abrasion, Tribooxidation und Oberflächenzerrüttung, zu unterschiedlichen Verschleißerscheinungen an der Zahnflanke führen. Der Verschleiß als kontinuierlicher Abtrag, das Fressen (Scuffing) als plötzlicher Abtrag sowie die Graufleckigkeit (Micro Pitting) und die Grübchenbildung (Pitting) als Ermüdung sind die ausschlagenden Verschleißerscheinungen für den hochbelasteten Zahnkontakt, die im Folgenden genauer beschrieben werden sollen. Darüber hinaus lassen sich weitere Schadensbilder, wie Flanken-, Zahneck-, Ermüdungsbruch sowie Gewaltbruch am Zahnfuß und Stillstandsmarkierungen an den Zahnflanken definieren [DIN3979, ISO10825, LOO96, WIŚ00, GES02b, STW12, BEE14, WIH14, VDI3822].

Bei langsamen Umfangsgeschwindigkeiten der Zahnräder tritt aufgrund eines zu geringen elastohydrodynamischen Schmierfilms bevorzugt kontinuierlicher Verschleiß auf. Mithilfe des Einsatzes von Schmierstoffen mit hoher Viskosität sowie mit Verschleißschutzadditiven kann dem Verschleißfortschritt entgegengewirkt werden. Im Vergleich zu einer Paarung aus einem einseitiggehärteten Ritzel mit vergütetem Rad ist der Verschleiß bei nitrierten Zahnradpaarungen deutlich geringer [GES02b].

Fresserscheinungen werden auf ein Versagen des Schmierfilms zwischen den Kontaktpartnern zurückgeführt, wobei man zwischen Kalt- und Warmfressen unterscheidet. Das Kaltfressen tritt häufig nur bei niedrigen Umfangsgeschwindigkeiten und niedrigviskosen Ölen auf, was überwiegend bei vergüteten Zahnrädern mit niedrigen Verzahnungsqualitäten festzustellen ist. Dem Kaltfressen kann mithilfe einer höheren Schmierfilmdicke und Ölzähigkeit, durch Profilmodifikationen der Zahnflanke sowie einer verringerten Flankenformabweichung und Flankenrauheit entgegengewirkt werden. Dagegen kommt es beim Warm-Fressen (Scuffing) aufgrund der hohen Belastung im Kontaktbereich zu Temperaturerhöhungen. Dies kann ein Abreißen oder örtliches Verdampfen des elastohydrodynamischen Schmierfilms der chemischen Schutzschicht zur Folge haben, sodass es zum örtlichen Verschweißen der Oberflächen kommt. Infolge der Gleitbewegungen zwischen den Kontaktpartnern werden die

Schweißstellen getrennt, was zunächst starke Aufrauhungen und weiterführend tiefe Fressriefen entstehen lässt. Dabei kann bereits das einmalige Auftreten eines Fressschadens die Zahnflanke augenblicklich zerstören. Das Fressen tritt in den Bereichen der hohen Gleitgeschwindigkeit im Zahnfuß und Zahnkopf auf. Eine Verbesserung der Fresstragfähigkeit lässt sich auch hier mithilfe einer höheren Schmierstoffviskosität und durch oberflächenaktive Additive erreichen, deren Wechselwirkung mit der Zahnflanke durch die Oberflächenstruktur beeinflusst werden kann [DIN3979, LOO96, WIŚ00, GES02b, SCB10].

Die Graufleckigkeit ist eine Werkstoffermüdung im Oberflächenrandbereich bis 25 µm und erfolgt im Bereich unterhalb des Wälzkreises. Der Oberflächenrauheit und -struktur kommt hierbei eine besondere Bedeutung zu, da eine geringe Rauheit die Spannung im oberflächennahen Bereich verringern und somit das Ausbruchverhalten beeinflussen kann. Aufgrund feiner und eng beieinanderliegender Ausbrüche kommt es zu einer mattgrauen, schuppenartigen Struktur auf der geschädigten Zahnflankenoberfläche. Die Gefahr im Hinblick auf Folgeschäden ist bei der Graufleckigkeit im Vergleich zur Grübchenbildung deutlich geringer, da die Schädigungen nur geringe Oberflächentiefen aufweisen. Die Gefahr der Graufleckigkeit kann mithilfe einer geringen Oberflächenrauheit der Zahnflanken, von zähen Schmierölen, speziellen Öladditive sowie einer verbesserten Kühlung oder einer Verkupferung der Zahnflanken reduziert werden [GES02b, LIH10, SCB10, BEE14].

Aufgrund von wechselnden mechanischen Spannungen in den Oberflächenbereichen entstehen Beschädigungen an den Funktionsflächen der Zahnräder, was als Grübchenbildung bezeichnet wird. Durch die Materialermüdung kommt es zum Entstehen und Wachsen von Rissen bis hin zur Abtrennung von Partikeln und Bildung von Grübchen. Die werkstoffmechanischen Vorgänge der Grübchenbildung lassen sich dabei in vier Phasen unterteilen. Die Akkumulation der Energie durch Aufstauung der Versetzungen des Kristallgitters in einer günstigen orientierten Gleitebene wird als Phase I beschrieben. Gefolgt von Phase II erreicht die akkumulierte Energie den Wert der Energie der freien Oberfläche, so dass ein Mikroriss an der Oberfläche entsteht. Im Anschluss neigt sich die Rissebene aufgrund der Verschiebung der Oberflächenschicht (Phase III). Die letzte Phase ist charakterisiert durch das Gleiten des Materials entlang der Rissebene, was eine Zunahme der Pressung in den Mikrokontaktbereichen und somit die Grübchenbildung zur Folge hat. Die Grübchenbildung tritt in den meisten Fällen unterhalb des Wälzkreises auf, wo ein negativer Schlupf zwischen den Zahnflanken vorliegt. Neben der Hertz'schen Pressung sind Schubspannungen, Temperaturwechselspannungen sowie die Rauheit und Welligkeit der Zahnflanke maßgebliche Einflussgrößen auf die Kontaktspannung und somit auf die Ermüdung des Werkstoffes. Durch die Zunahme der Ausbröckelungen an den Zahnflanken im weiteren Lauf kommt es zu Schwingungs- und Lärmerscheinungen sowie zu einem eventuellen Zahnbruch. Neben der einflussreichen Härte der Zahnflanke kann mithilfe von großen Zähnezahlen bei kleinen Modulen bzw. höheren Profilüberdeckungen sowie kleineren Flankenformabweichungen die Gefahr der Grübchenbildung reduziert werden [DIN3979, WIŚ00, GES02b, SCB10]. In [Bild 2-16](#) ist als Beispiel ein Grübchenschaden und ein Fressschaden eines Zahnrades nach ISO 10825 dargestellt [ISO10825].

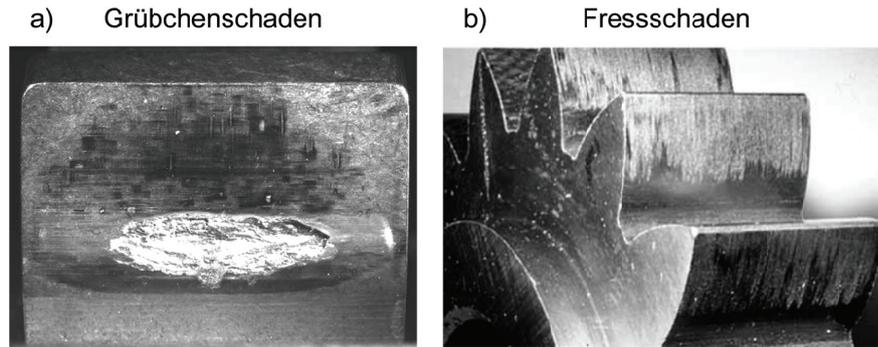


Bild 2-16: Schadensbilder am Zahnrad;  
a) Grübchenschaden [DGM06]; b) Fressschaden [HÖH06]

### *Zahnflankenoberflächenstruktur als Einflussgröße*

Zahlreiche Forschungsarbeiten haben sich bereits mit dem Einsatzverhalten und den Verschleißmechanismen von Zahnradern befasst. Dabei wurden Untersuchungen von verschiedenen Einflussgrößen sowohl im Analogieprozess auf einem 2-Scheiben-Prüfstand als auch auf einem Zahnradprüfstand durchgeführt, um die relevanten Kenngrößen im EHD-Kontakt zu bestimmen [PRE90, KAG91, MAN95, TOB01, KRI03, LIU03, RAD05, LÜT07, STE07, KRE08, KLE12]. Im Folgenden wird auf die Forschungsarbeiten eingegangen, die sich insbesondere mit der Zahnflankenoberflächenstruktur als Einflussgröße beschäftigt haben.

KREIL [KRE08] stellte anhand der Ergebnisse einen deutlichen Einfluss der Oberflächenfein- gestalt auf die Schmierfilmdicke und den Druckverlauf im EHD-Kontakt fest. Die Veränderungen zeigen eine starke Abhängigkeit von der Orientierung der Oberflächenstruktur sowie der im Kontakt vorliegenden Summengeschwindigkeit. Für Rauheitsriefen quer zur Bewegungsrichtung bauen sich höhere Schmierfilmdicken im Vergleich zu Rauheitsriefen parallel zur Bewegungsrichtung der Scheiben auf. KLEIN [KLE12] bestätigte diese Tendenzen, wobei zusätzlich noch eine starke Abhängigkeit der Reibungszahl von der Oberflächenrauheit und -orientierung vorlag. Mithilfe der neu entwickelten Testmethode „Praxisnaher Pittingtest“ stellte RADEV [RAD05] eine Verhinderung der Graufleckenbildung während der Einsatztests von trovalisierter Prüfzahnradern mit verringerter Oberflächenrauheit fest. LIU [LIU03] untersuchte unter anderem den Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Grauflecken- tragfähigkeit von Zahnradgetrieben. Bei gleichem Rauheitskennwert  $R_a$  wurden kein signifi- kanter Unterschied hinsichtlich der Ausbreitung und Form der Graufleckigkeit festgestellt, wobei sich eine höhere Graufleckentragfähigkeit für mit unterschiedlichen Fertigungsverfah- ren geschliffen Prüfradpaarung nachweisen ließ. LIU [LIU03] bestätigte eine geringere Grauf- leckenbildung bei verbesserter Zahnflankenrauheit. Diese Erkenntnisse wurden von LÜT- ZIG [LÜT07] auch für Großgetriebe nachweisen. Darüber hinaus wurde ein positiver Einfluss von Kopfrücknahmen auf die Graufleckentragfähigkeit identifiziert. Im Hinblick auf die Grüb- chenbildung wurden Untersuchungen von PREXLER [PRE90] zum Einfluss der Rauhtiefe, Struktur und Strukturorientierung des Wälzflächenprofils durchgeführt. Eine Erhöhung der Wälzflächenrauhtiefe äußerte sich in einem Anstieg der Reibungszahl sowie der Grübchen- bildung.

ZHU ET AL. [ZHU01] stellten einen Ansatz zur Einflussbestimmung der Oberflächenrauheit und -struktur auf die EHD-, Mischreibungs- und Grenzschmierbedingungen vor. Hierfür wur-

den Topographien unterschiedlicher Rauheit und Struktur vermessen und Simulationen zur Bestimmung der Schmierfilmdicke durchgeführt. Unter Mischreibungsbedingungen beeinflusst die Struktur und Rauheit der Oberfläche die Kontaktfläche der Rauheitsspitzen sowie die Lastverteilung, wohingegen sich der Einfluss auf EHD- und Grenzschmierung als nicht signifikant herausstellte. Weitere Autoren [LUB88, KWE89, AIX96a, ERC12] führten numerische Simulationen zur Einflussbestimmungen von schleiftechnisch eingebrachten Oberflächenstrukturen auf die Schmierbedingungen durch, wobei der Fokus der Analysen auf den hydrodynamischen und elastohydrodynamischen Kontakt lag. Alle wissenschaftlichen Arbeiten kamen zu dem Ergebnis, dass die geringsten Schmierfilmdicken bei einer parallel zu den Schleifriefen verlaufenden Gleitrichtung auftreten. Im Vergleich dazu werden die bei einer Gleitbewegung senkrecht zu den Schleifspuren größeren Schmierfilmdicken auf die Mikro-EHD-Mechanismen sowie den geringeren Schmiermittelaustritt zurückgeführt. In einigen wissenschaftlichen Veröffentlichungen konnte der Effekt einer Oberflächenstruktur auf die Reibungseigenschaften im Schmierkontakt anhand von experimentellen Untersuchungen nachgewiesen werden [XIA04, MMA05, SIN05]. BRUNETIÈRE ET AL. [BRN12] erzielten darüber hinaus anhand einer numerischen Analyse vergleichbare Reibungseigenschaften von unterschiedlichen rauen Oberflächen mithilfe einer geeigneten Anordnung und des Aspektverhältnisses der Oberflächenstrukturen.

---

### 3 Zielsetzung und Vorgehensweise

Im Hinblick auf eine nachhaltige Ressourcennutzung und steigende Anforderungen an die Belastbarkeit von Zahnrädern rücken neue Verfahrensvarianten zur Zahnradfertigung in den Fokus. Ziel ist eine Maximierung der Bauteillebensdauer, Minimierung des Energiebedarfs im Betrieb, Verringerung des Materialeinsatzes, Einsparung von Schmierstoffen und Reduzierung von Geräuschemissionen bei gleichzeitiger Gewährleistung einer hohen Funktionssicherheit. Offshore-Windkraftanlagen bieten ein großes Potenzial für eine ressourcenschonende Energieerzeugung, wobei jedoch der ökonomische und ökologische Nutzen der Anlagen stark von der Zuverlässigkeit der einzelnen Getriebekomponenten abhängt, da die Instandhaltung auf See mit einem hohen Ressourceneinsatz verbunden ist. Darüber hinaus wird sich auch aufgrund der Energiewende die Leistungssteigerung von Windkraftanlagen mit einer Erhöhung des Rotordurchmessers bei sinkender Drehzahl und steigendem Moment in den kommenden Jahren weiter fortsetzen, was zu deutlich höheren Belastungen der Zahnflanken im Einsatz führen wird [VAT09, BUW13, ROH14].

Die Hartfeinbearbeitung von Zahnrädern ist eine seit vielen Jahren etablierte Fertigungstechnologie, wobei überwiegend das kontinuierliche Wälzschleifen und das diskontinuierliche Zahnflanken-Profil schleifen zum Einsatz kommen. Die hohen Anforderungen an Zahnrädern hinsichtlich der Genauigkeit und der Oberflächenqualität können oft nur mit den Hartfeinbearbeitungsverfahren erreicht werden. Aufgrund der Prozesskinematik entstehen bei diesen Verzahnungsschleifprozessen unidirektionale Schleifspuren auf der Zahnflankenoberfläche. Um die Oberflächenkennwerte deutlich zu verbessern, werden hochbelastete Zahnräder nach der konventionellen Schleifbearbeitung zusätzlich einem anschließenden Endbearbeitungsprozess unterzogen. Dabei geht es vorrangig um die Reduzierung der Rauheitsspitzen und somit um eine Verbesserung der Oberflächenqualität.

Der Endbearbeitungsprozess nimmt in Bezug auf die Prozesskette zur Herstellung von Zahnrädern eine immer bedeutendere Rolle in der produktionswissenschaftlichen Forschung sowie in der Industrie ein. Dabei fokussieren die derzeitigen Ansätze zur Endbearbeitung von Zahnflankenoberflächen vorrangig eine Reduzierung der Rauheitsspitzen und eine Erhöhung des Materialanteils. Durch die Anwendung eines Finishingprozesses zur gezielten Oberflächenstrukturierung können die Schmierfilmbedingungen im Zahnkontakt verbessert und somit die Tragfähigkeit der Zahnflanken im Betrieb erhöht werden. Im Hinblick auf die schleiftechnische Strukturierung von Zahnflankenoberflächen zur Verbesserung der Schmierbedingungen im Wälzkontakt liegen derzeit nur eng begrenzte Erkenntnisse der Grundlagenforschung vor.

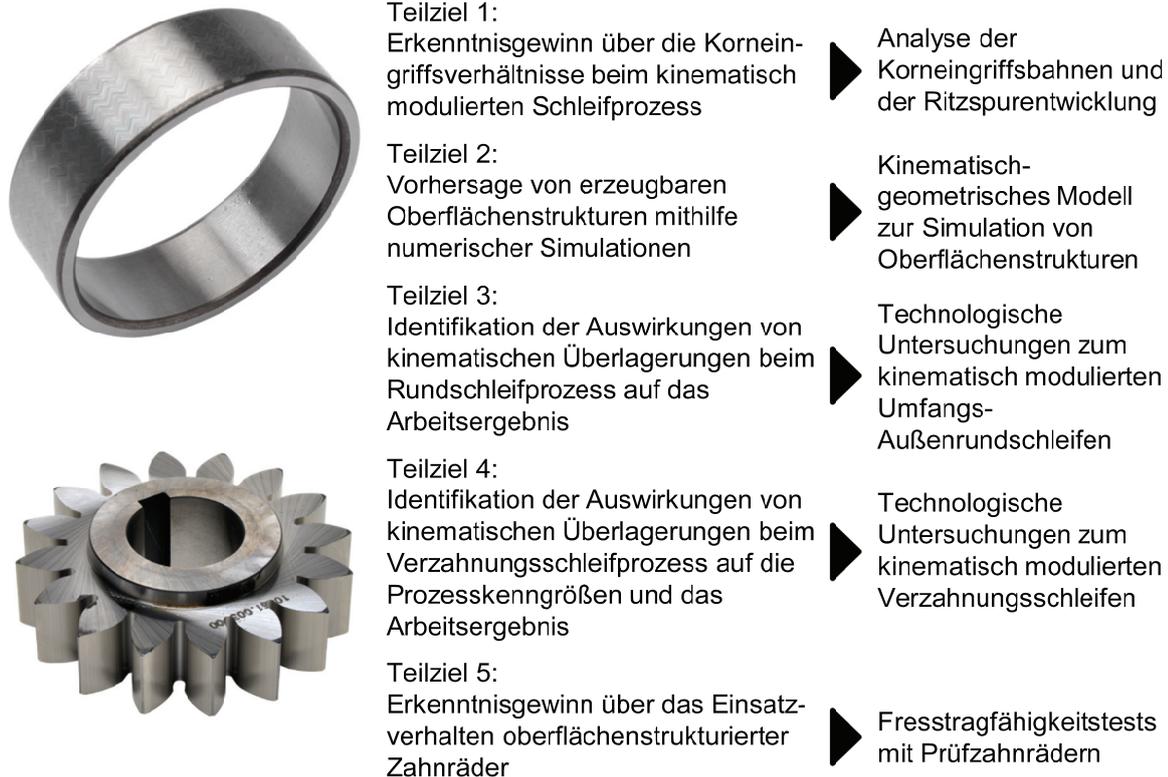
Das große Potenzial von Oberflächenstrukturen auf Funktionsflächen konnte bereits in vielen Untersuchungen im wissenschaftlichen und industriellen Umfeld nachgewiesen werden. Bisher beschränken sich die Oberflächenstrukturierungen überwiegend auf plane und runde Funktionsflächen. Eine wesentliche Voraussetzung für eine Technologie zur schleiftechnischen Oberflächenstrukturierung von Zahnflanken ist die Schaffung von Wissen über den Zusammenhang zwischen den Stellgrößen bei der kinematischen Modulation und die Kenngrößen des Arbeitsergebnisses.

Vor diesem Hintergrund ist das **Hauptziel** dieser Arbeit, einen Beitrag zur prozesssicheren Oberflächenstrukturierung von Zahnrädern durch kinematisch modulierte Schleifprozesse zu

leisten. Durch die gezielte Analyse der kinematischen Modulation beim Schleifen soll eine Wissensbasis über die Wirkzusammenhänge zwischen den Stellgrößen beim kinematisch modulierten Schleifen und der Oberflächenstruktur sowie dem Einsatzverhalten der Zahnräder geschaffen werden. Die strukturierte Vorgehensweise zur Erreichung des Hauptziels ergibt sich anhand einer Untergliederung in definierte Teilziele, die in [Bild 3-1](#) aufgelistet sind.

### Hauptziel:

### Prozesssichere Oberflächenstrukturierung von großmoduligen Zahnrädern durch kinematisch modulierte Schleifprozesse



[Bild 3-1](#): Zielsetzung und Vorgehensweise

### Teilziel 1: Erkenntnisgewinn über die Korneingriffsverhältnisse beim kinematisch modulierten Schleifprozess

Das charakteristische Merkmal des kinematisch modulierten Schleifprozesses ist die Überlagerung einer zusätzlichen Geschwindigkeit zur Vorschub- und Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit. Im Rahmen dieses Teilziels findet eine gezielte Untersuchung zu den Korneingriffsverhältnissen beim kinematisch modulierten Schleifprozess statt. Dafür werden zunächst die Basistopographieelemente beim Schleifen analysiert und beschrieben, wobei die Beschreibung anhand von geometrischen Kennwerten wie beispielweise Tiefe, Ausrichtungswinkel, Länge und Lage der Ritzspuren auf der Werkstückoberfläche erfolgt. Zur Analyse der Korneingriffsverhältnisse beim kinematisch modulierten Schleifen werden mikrogeometrische Spannungskenngrößen bestimmt und Einkornritzversuche durchgeführt, was die Grundlage für die Charakterisierung von 3D-Oberflächenstrukturen darstellt.

**Teilziel 2: Vorhersage von erzeugbaren Oberflächenstrukturen mithilfe numerischer Simulationen**

Voraussetzung für die Analyse des Einflusses von kinematisch modulierten Schleifprozessen auf die Oberflächenkennwerte und Oberflächenstruktur ist der Aufbau einer numerischen Modellierung von 3D-Oberflächenstrukturen. Der Ansatz zielt ab auf die Bereitstellung eines Werkzeugs und eines Werkstücks sowie einer entsprechenden Kinematik zueinander. Auf Basis der modellierten Oberflächenstruktur erfolgt eine systematische Analyse und Beschreibung der Topographieelemente in Abhängigkeit der Stellgrößen bei der kinematischen Modulation, um geometrische Zusammenhänge sowie geeignete 3D-Oberflächenkennwerte für die Struktur zu identifizieren.

**Teilziel 3: Identifikation der Auswirkungen von kinematischen Überlagerungen beim Rundschleifprozess auf das Arbeitsergebnis**

Dieses Teilziel beinhaltet die Identifizierung und Analyse der Auswirkungen von kinematischen Überlagerungen auf das Arbeitsergebnis in einem Analogieprozess mit einfacher Bearbeitungskinematik. Dafür erfolgt eine systematische Untersuchung des Einflusses der Stellgrößen der kinematischen Modulation auf die Oberflächenstruktur und Oberflächenkenngrößen der Bauteile. Zusätzlich soll der Einfluss der Einsatzvorbereitung hinsichtlich einer variablen und flexiblen Einstellung der Höhe der Riefenstruktur bestimmt werden. Dafür erfolgt eine Variation der Stellgrößen beim Abrichtprozess, um die Schleifscheibentopographie gezielt zu verändern. Des Weiteren wird der Einsatz von konventionellen und hochharten Schleifwerkzeugen zur Oberflächenstrukturierung untersucht und anhand des Arbeitsergebnisses verglichen.

**Teilziel 4: Identifikation der Auswirkung von kinematischen Überlagerungen beim Verzahnungsschleifprozess auf die Prozesskenngrößen und das Arbeitsergebnis**

Die ausführliche Ermittlung der Wechselwirkungen zwischen kinematischen Kenngrößen und dem Arbeitsergebnis sowie den Prozesskenngrößen beim Verzahnungsschleifen bildet die Grundlage für die erfolgreiche Schaffung neuer Kenntnisse zur Oberflächenstrukturierung von Zahnflanken. Im Zentrum der technologischen Untersuchungen steht insbesondere die systematische Analyse des Einflusses der Stellgrößen der kinematischen Modulation auf die 3D-Oberflächenkennwerte sowie die Profil- und Flankenlinie der Werkstücke. Zur Klärung der Wirkmechanismen dient zusätzlich neben der Beurteilung des Arbeitsergebnisses die Analyse der Prozesskräfte beim kinematisch modulierten Schleifprozess.

**Teilziel 5: Erkenntnisgewinn über das Einsatzverhalten der oberflächenstrukturierten Zahnräder**

Die Analyse der Wechselwirkung zwischen den Zahnflankenoberflächenstrukturen und den mechanischen Kontaktbedingungen durch eine veränderte Schmierfilmausprägung erfolgt mithilfe von Einsatztests. Hierfür werden konventionell geschliffene Zahnräder mit oberflächenstrukturierten Prüfzahnradern im Rahmen eines Fresstragfähigkeitstests verglichen.

Unter Einbeziehung der Ergebnisse der numerischen Simulation und des Analogieprozesses werden zwei Strukturen im Hinblick auf die Versagensmechanismen im Fresstragfähigkeitstest analysiert. Anhand des Verschleißbildes an den Zahnflanken wird der Einfluss der Oberflächenstrukturen bestimmt und deren Nutzen bewertet.

## 4 Versuchsbedingungen und Messmethoden

Im folgenden Kapitel werden die Versuchsbedingungen und Messmethoden für die technologischen Untersuchungen beschrieben. Zunächst werden die beiden Versuchsmaschinen für die kinematisch modulierten Schleifversuche sowie die dafür eingesetzten Schleifscheiben und Abrichtwerkzeuge vorgestellt. Daran anschließend erfolgen die Charakterisierung der Versuchswerkstücke und die Beschreibung des Zahnradprüfstands. Abschließend werden die verwendeten Mess- und Analyseinrichtungen dargestellt. Für ein besseres Verständnis über die unterschiedlich eingesetzten Verfahren, Schleifscheiben und Werkstücke dient Tabelle 4-1 für eine Gesamtübersicht.

Tabelle 4-1: Gesamtübersicht über die eingesetzten Schleifprozesse, Schleifscheiben sowie Versuchsmaschinen und Versuchswerkstücke

Verfahren	Kinematik	Schleifscheiben	Maschine	Versuchswerkstücke
Rundschleifbearbeitung (Analogieprozess)	konventionell / kinematisch moduliert	konventionell	Niles ZE 800	Lagerringe
		hochhart	Schaudt PF 51	
Profilschleifbearbeitung		konventionell	Niles ZE 800	Zahnstange
Teilwälzschleifbearbeitung			Niles ZE 800	Zahnräder / Prüfverzahnung
Topologisches Generierungsschleifen	kinematisch moduliert	hochhart	Niles ZE 800	

### 4.1 Versuchsmaschinen

Die technologischen Untersuchungen zur definierten Oberflächenstrukturierung im Analogieprozess und beim Verzahnungsschleifen mit jeweils konventionellen Schleifscheiben erfolgten auf einer CNC-Zahnrad-Profilschleifmaschine ZE 800 der Fa. NILES WERKZEUGMASCHINEN GMBH, Berlin, Deutschland, welche in Bild 4-1 zusammen mit den technischen Daten dargestellt ist. Auf der Verzahnungsschleifmaschine lassen sich Zahnräder bis zu einem Kopfkreisdurchmesser  $d_a = 800$  mm bearbeiten, wobei die maximale Modulgröße  $m_n = 20$  mm betragen kann.



**CNC-Zahnrad-Profilschleifmaschine**

Typ: ZE 800  
 Hersteller: NILES WERKZEUGMASCHINEN  
 GMBH, Berlin, Deutschland  
 Baujahr: 2011

**Translatorische Achsen**

Verfahrweg: 400 x 575 x 175 mm<sup>3</sup>  
 Vorschubgeschwindigkeit:  $v_f = 12.000$  mm/min

**Rotatorische Achsen**

Schwenkbereich A:  $\alpha_{sw} = \pm n \cdot 360^\circ$   
 Schwenkbereich B:  $\beta_{sw} = \pm 45^\circ$

**Schleifspindel**

Max. Leistung:  $P_{max} = 18$  kW  
 Max. Drehzahl:  $n_{max} = 4.165$  min<sup>-1</sup>

**Bild 4-1:** CNC-Zahnrad-Profilschleifmaschine ZE 800 der  
 Fa. NILES WERKZEUGMASCHINEN GMBH [NIL11]

Die Versuchsmaschine verfügt über eine hohe statische und dynamische Stabilität, womit sie sich für Schleifbearbeitungen mit komplexen Bewegungsüberlagerungen eignet. Die drei translatorischen Achsen X, Y und Z sind mit Direktantrieben durch Präzisions-Kugelgewindetriebe sowie direkten Linearwegmesssystemen ausgestattet. Die Rotationsachsen A und B verfügen über elektrische Direktantriebe mit inkrementalen Drehwinkel-messsystem. Die Schleifspindel der Maschine hat eine maximale Leistung  $P_{max}$  von 18 kW, wobei eine maximale Drehzahl  $n_{max}$  von  $4.165 \text{ min}^{-1}$  realisiert werden kann. Zum Abrichten des Schleifwerkzeuges steht eine CNC-Abrichteinrichtung zur Verfügung. Des Weiteren ist die Zahnrad-Profilschleifmaschine sowohl mit einer Auswucht- und Körperschallmesstechnik als auch mit einer integrierten Messeinrichtung zur Zahnradvermessung ausgestattet. Bei der Schleifbearbeitung kommt Schleiföl Macron 2425 S-14 der DEUTSCHEN SHELL HOLDING GMBH, Hamburg, Deutschland, zum Einsatz [SHE05]. Die Steuerung der Schleifmaschine erfolgt über eine Sinumerik 840D der Fa. Siemens, München, Deutschland. Weiterhin ermöglichen die vorhandenen Schleifprogramme auf der Maschine die Vorbearbeitung der Versuchszahnräder und die Herstellung der Prüfzahnräder für die Einsatztests.

Die experimentellen Untersuchungen zur Oberflächenstrukturierung im Analogieprozess mit hochharten Schleifscheiben wurden hingegen auf einer CNC Universal-Rundschleifmaschine PF 51 der Fa. SCHAUDT MIKROSA BWF GMBH, Stuttgart, Deutschland, durchgeführt. Die Versuchsmaschine ist mit Zyklen für das Außenrund-, Innenrund- und das Unrundschleifen ausgestattet. Zudem lassen sich aufgrund der guten Dämpfungseigenschaften der Maschine dynamisch kinematische Überlagerungen realisieren. In **Bild 4-2** sind die wesentlichen Kenndaten dieses Maschinensystems festgehalten.



### CNC Universal-Rundschleifmaschine

Typ: PF 51 UIB 1000  
 Hersteller: SCHAUDT MIKROSA BWF GMBH,  
 Stuttgart, Deutschland  
 Baujahr: 2002

### Translatorische Achsen

Verfahrweg: 300 x 1150 mm<sup>2</sup>  
 Vorschubgeschw.:  $v_f = 15.000$  mm/min

### Rotatorische Achsen

Werkstückspindel:  $n_w = 1.000$  min<sup>-1</sup>  
 Schwenkbereich B:  $\beta_{sw} = -45$  bis  $+190$  °

### Schleifspindel

Max. Leistung:  $P_{max} = 25$  kW  
 Max. Drehzahl:  $n_{max} = 8.000$  min<sup>-1</sup>

**Bild 4-2:** CNC-Universal-Rundschleifmaschine PF 51 der Fa. SCHAUDT MIKROSA BWF GMBH

Die Maschine zeichnet sich durch eine Außenschleifspindel mit einer Antriebsleistung von 25 kW aus, mit der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeiten von  $v_s = 200$  m/s erreicht werden können. Für das Abrichten der Schleifwerkzeuge steht neben der üblichen Tisch-Abrichteinheit mit stehendem und rotierendem Abrichtwerkzeug, eine Abrichteinheit zum Continuous Dressing (CD) mit Diamantabrichtrollen zur Verfügung. Die Schleifbearbeitung erfolgt mit einer 5-prozentigen Kühlschmierstoff-Emulsion vom Typ Castrol Syntilo XPS der Firma DEUTSCHE BP AG, Hamburg, Deutschland.

## 4.2 Schleifscheiben und Abrichtwerkzeuge

Für die Schleifbearbeitung von gehärtetem Stahl im Analogie- und im Verzahnungsschleifprozess kamen sowohl konventionelle Sinterkorund- als auch hochharte CBN-Schleifscheiben zum Einsatz. In Tabelle 4-2 sind die eingesetzten Schleifscheiben entsprechend ihrer Geometrie und Schleifscheibenspezifikation sowie hinsichtlich des entsprechenden Einsatzzwecks aufgelistet. Die Korngrößen für die jeweiligen Werkzeuge sind nach DIN ISO 8486 [DINISO8486-1] und FEPA-Standard [FEPA42-1, FEPA61-2009] spezifiziert. Mit den keramisch gebundenen Sinterkorund- und CBN-Schleifscheiben des Typs 1A1 wurden die technologischen Untersuchungen zum Rundschleifen durchgeführt. Dabei wurden die konventionelle Schleifscheibe auf der Zahnrad-Profilenschleifmaschine und die hochharte Schleifscheibe auf der Universal-Rundschleifmaschine eingesetzt. Die experimentellen Untersuchungen zum Verzahnungsschleifen erfolgten mit den jeweils entsprechend profilierten konventionellen Sinterkorundschleifscheiben. Darüber hinaus kam eine galvanisch gebundene CBN-Schleifscheibe als Werkzeug für den topologischen Generierungsschleifprozess zum Einsatz, wobei die Schleifscheibe einen definierten Kopfradius von 2 mm aufweist.

Tabelle 4-2: Schleifscheibenspezifikationen

Hersteller		Geometrie	Schleifscheibenspezifikation	Einsatzzweck
Burka-Kosmos		350 x 40 x 127 mm	SK13w 70/80 G/H 10 V 10	Rundschleifen
Krebs & Riedel		340 x 30 x 100 mm	21B 126X24 V8116-150	Rundschleifen
Burka-Kosmos		350 x 40 x 127 mm	SK13w 70/80 G/H 10 V 10 SK13w 46/2 - H 10 V	Profilschleifen
		350 x 40 x 127 mm	SK13w 70/80 G/H 10 V 10	Teilwälzschleifen
Dr. Kaiser		300 x 55 x 80 mm	SG30-B25CH-300-4-3,5- R2-80-55-TK	Topologisches Generierungsschleifen

Die Einsatzvorbereitung der konventionellen Schleifscheiben sowie der keramisch gebundenen CBN-Schleifscheibe erfolgte ausnahmslos in der Schleifmaschine mit Diamantabrichtwerkzeugen. Zum Abrichten der keramisch gebundenen CBN-Schleifscheibe wurde ein Mehrkorn-Ultrapräzisionsabrichter der Fa. MÖSSNER GMBH, Pforzheim, Deutschland, der Spezifikation UPM 384/14 eingesetzt. Die Einsatzvorbereitung der konventionellen Schleifscheiben für den Analogieprozess sowie für das Verzahnungsschleifen erfolgte hingegen mit einer Diamantformrolle der Fa. Dr. KAISER DIAMANTWERKZEUGE GMBH & Co. KG, Celle, Deutschland, des Typs NC10. Das Abrichtwerkzeug weist einen Radius  $r_p = 2$  mm auf. Aufgrund der hohen Flexibilität wird diese Formrollenspezifikation häufig für das Abrichten von profilierten Schleifscheiben verwendet [LIE01, TÜR06]. Darüber hinaus sind derzeit auch Abrichtwerkzeuge mit gesetzten CVD-Diamanten am Markt verfügbar, welche jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht zum Einsatz gekommen sind [LIE14]. Eine Auflistung der verwendeten Konditionierwerkzeuge ist in Tabelle 4-3 dargestellt.

Tabelle 4-3: Abrichtwerkzeuge

Hersteller		Abrichtwerkzeugspezifikation	Abrichtwerkzeug
Dr. Kaiser		NC10 G 160 4 3 R2 25 25	Diamantformrolle
Möfner		UPM 384/14	Mehrkorn-Ultrapräzisionsabrichter

### 4.3 Versuchswerkstücke

Die technologischen Untersuchungen für den Analogieprozess werden an Lagerringen aus 100Cr6 durchgeführt, welche im durchgehärteten und bereits fertig bearbeiteten Zustand vorlagen. Typisches Einsatzgebiet dieses Wälzlagerstahls ist der Einsatz in verschiedenen Komponenten der Antriebstechnik. Bei den Versuchswerkstücken handelt es sich um Innenringe eines Nadellagers der Spezifikation IR 809025 JNS der Fa. WHD-WÄLZLAGER GMBH, Neuss, Deutschland. Die Spezifikation der Versuchswerkstücke für den Analogieprozess kann der Tabelle 4-4 entnommen werden.

Tabelle 4-4: Spezifikation der Versuchswerkstücke für den Analogieprozess

Nadellager-Innenring IR 809025 JNS	
	Werkstoff: 100Cr6 (1.3505)
	Wärmebehandlung: durchgehärtet
	Härteangaben des Herstellers: 62 HRC $\pm$ 2 HRC
	Toleranzen nach: DIN 620
	Außendurchmesser $d_A$ : 80 mm / 90 mm
	Innendurchmesser $d_i$ : 70 mm / 80 mm
	Breite $b_w$ : 25 mm

Für eine Kontrolle des Gefügezustands der Versuchswerkstücke aus 100Cr6 für den Analogieprozess wurde ein Schliiffbild von einer Werkstückprobe mit geeigneten Abmaßen erstellt. Der Wälzlagerstahl 100Cr6 bildet nach der Wärmbehandlung ein martensitisches Gefüge mit eingelagerten Karbiden. Eine gleichmäßige Verteilung der martensitischen Matrix und der verteilten Karbide führt dabei zu einem homogenen Gefüge mit einer hohen Oberflächenhärte. Eine Gefügaufnahme des Versuchswerkstoffes 100Cr6 ist in Bild 4-3 dargestellt, wobei die eingelagerten Karbide als weiße Punkte identifiziert werden können.

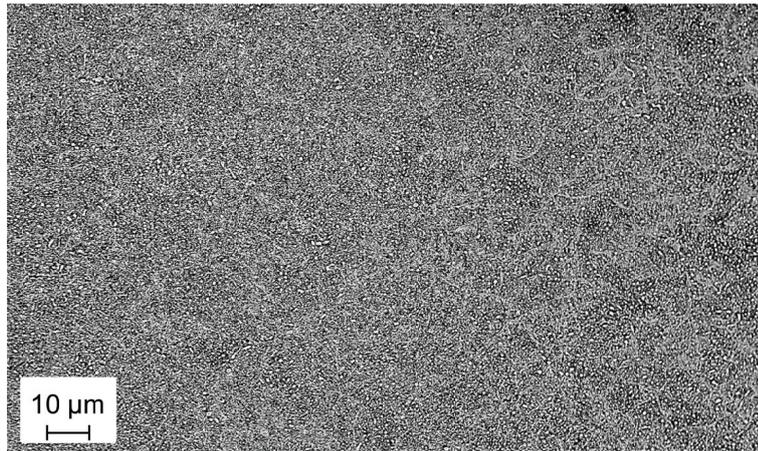


Bild 4-3: Gefügebildaufnahme des Versuchswerkstoffes 100Cr6 für den Analogieprozess

Für die technologischen Untersuchungen beim Verzahnungsschleifen werden Versuchszahnstangen und Versuchszahnräder aus 16MnCr5 verwendet. Zur Bestimmung des Einsatzverhaltens kommen Prüfzahnräder aus 20MnCr5 zum Einsatz. Diese beiden Einsatzstähle sind typische Zahnradwerkstoffe für die verschiedensten industriellen Anwendungen. Die Zahnräder wurden nach der Vorbearbeitung wärmebehandelt, um eine harte und verschleißfeste Randzone auf der Zahnflankenoberfläche zu erzeugen. Diese wird durch Zugabe von Kohlenstoff und einer geeigneten Wärmebehandlung erzeugt, wodurch sich ein martensitisches Gefüge mit den entsprechenden Eigenschaften in der Randzone einstellt. Für die Versuchszahnräder wurde eine Randschichthärte von ca. 62 HRC (750 HV 10) sowie eine Einsatzhärtungstiefe (Eht) von ca. 2 mm in Normalenrichtung der Zahnflankenoberfläche realisiert, um ausreichend Spannungsvolumen für die technologischen Untersuchungen bereitzustellen. Bei den Prüfzahnradern erfolgte die Wärmebehandlung hingegen mit dem Ziel, die nach DIN ISO 14635 [DINISO14635-1] geforderte Randschichthärte von 60 HRC (700 HV 10) bis 62 HRC (750 HV 10) sowie Einsatzhärtungstiefe (Eht) von 0,6 - 0,9 mm zu erreichen, um die Vergleichbarkeit für die Verschleißuntersuchungen der Zahnräder zu gewährleisten.

Die Zahnstangen weisen ein Modul  $m_n = 9$  mm und ein Profilwinkel von  $\alpha_p = 20^\circ$  bei einer Verzahnungsbreite von  $b = 22$  mm. Die Versuchszahnräder haben dagegen ein Normalmodul von  $m_n = 7$  mm, einen Eingriffswinkel von  $\alpha_n = 20^\circ$  und eine Zähnezahl von  $z = 21$ . Die Verzahnungsbreite für die Versuchszahnräder beträgt  $b = 100$  mm. Aufgrund der guten Handhabbarkeit der Zahnräder lassen sich die Oberflächenstrukturen der Zahnräder nach der Schleifbearbeitung auf einem externen Oberflächenmessgerät vermessen. Für die Einsatztests zur Bestimmung der Fresstragfähigkeit werden Prüfzahnräder des Verzahnungstyps A verwendet, wobei diese ein Normalmodul von  $m_n = 4,5$  mm und eine Zähnezahl von  $z = 16$  bzw.  $z = 24$  haben. Der Eingriffswinkel  $\alpha_n$  beträgt bei diesen Zahnrädern ebenfalls  $20^\circ$ . Die Geometrien der Prüfzahnräder sind entsprechend der DIN ISO 14635 [DINISO14635-1, DINISO14635-3, DINISO14635-2] festgelegt, um Montage und Einsatz im Zahnradverspannungsprüfstand sicherzustellen. Die Spezifikation der Versuchswerkstücke für den Verzahnungsschleifprozess sind in Tabelle 4-5 zusammengefasst.

Tabelle 4-5: Spezifikation der Versuchswerkstücke für den Verzahnungsschleifprozess

Versuchszahnstange			
	Werkstoff:	16MnCr5 (1.7131)	
	Härte:	50 HRC ± 2 HRC	
	Modul $m_n$ :	9 mm	
	Lückenanzahl:	5	
	Zahnbreite b:	22 mm	
	Profilwinkel $\alpha_p$ :	20 °	
Versuchszahnräder			
	Werkstoff:	16MnCr5 (1.7131)	
	Wärmebehandlung:	einsatzgehärtet	
	Härteangabe des Herstellers:	62 HRC ± 2 HRC	
	Einsatzhärtungstiefe (Eht):	2 mm ± 0,5 mm	
	Modul $m_n$ :	7 mm	
	Zähnezahl z:	21	
	Zahnbreite b:	100 mm	
	Eingriffswinkel $\alpha_n$ :	20 °	
Prüfzahnräder			
		Rad	Ritzel
	Werkstoff:	20MnCr5 (1.7147)	20MnCr5 (1.7147)
	Wärmebehandlung:	einsatzgehärtet	einsatzgehärtet
	Härteangabe des Herstellers:	60 - 62 HRC	60 - 62 HRC
	Einsatzhärtungstiefe (Eht):	0,6 - 0,9 mm	0,6 - 0,9 mm
	Modul $m_n$ :	4,5 mm	4,5 mm
	Zähnezahl z:	16	24
	Zahnbreite b:	20 mm	20 mm
	Eingriffswinkel $\alpha_n$ :	20 °	20 °

Für eine metallographische Analyse des Gefügestandes vom Versuchswerkstoff 16MnCr5 wurde ein Schliffbild einer Werkstückprobe mit geeigneten Abmaßen erstellt. Dafür wurde ein einzelner Zahn aus der Probe mithilfe der Drahterosion herausgetrennt, welcher im Anschluss durch mehrere Polierprozessschritte mit abnehmender Korngröße in der Lappsuspension gefinisht wurde. Nach der Oberflächenfinishbearbeitung der Werkstückprobe erfolgte eine Ätzung (HCL + H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> + C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH in der Mischung 25:1:2) für die Sichtbarmachung der Korngrenzen. Die REM-Aufnahme des Gefüges sowie das Ergebnis der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) sind in Bild 4-4 dargestellt. Hierbei sind die Martensitplatten im Gefüge deutlich zu erkennen. Die Zusammensetzung des Einsatzstahls 16MnCr5 wird erwartungsgemäß von den dominierenden Elementen Chrom und Eisen bestimmt.

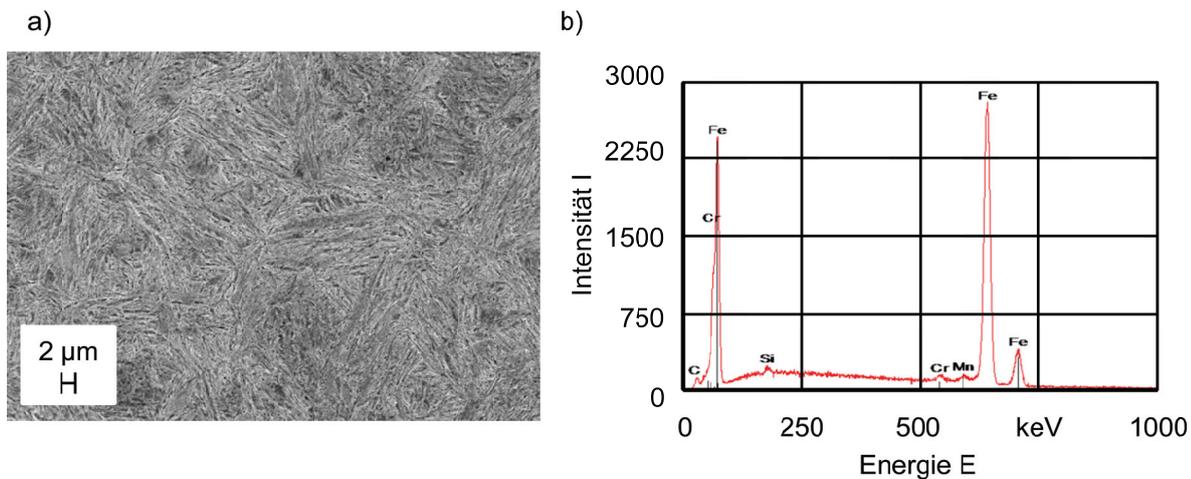


Bild 4-4: Metallographische Analyse des Versuchswerkstoffes 16MnCr5;  
a) Gefügebild; b) EDX-Analyse

Beim Versuchswerkstoff 20MnCr5 führt die metallographische Analyse des Gefügestandes in Form eines Schliffbilds der Werkstückprobe sowie der EDX-Analyse zu sehr ähnlichen Ergebnissen. Die REM-Aufnahme des Gefüges sowie das Ergebnis der energiedispersiven Röntgenspektroskopie (EDX) für den Werkstoff 20MnCr5 sind in Bild 4-5 dargestellt

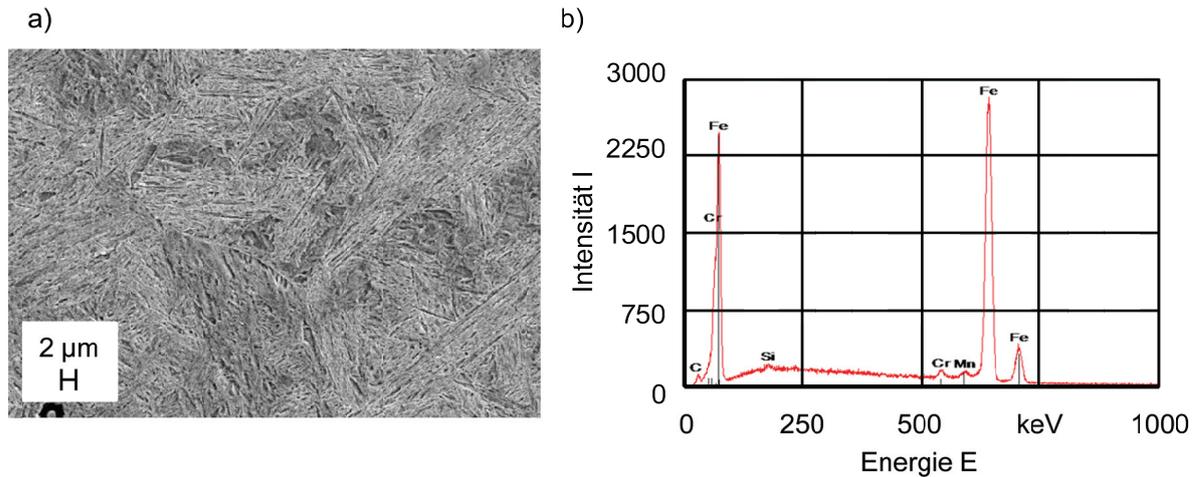


Bild 4-5: Metallographische Analyse des Versuchswerkstoffes 20MnCr5;  
 a) Gefügaufnahme; b) EDX-Analyse

Die chemische Zusammensetzung der beiden Einsatzstähle kann der [Tabelle 4-6](#) entnommen werden. Hierbei unterscheiden sich beide Werkstoffspezifikationen in erster Linie hinsichtlich des Kohlenstoffgehalts C. Dieser beträgt für 16MnCr5 ca. 0,16 % und für 20MnCr5 ca. 0,20 %, wobei der Mangengehalt Mn für die beiden legierten Stähle bei ca. 1,25 % liegt.

Tabelle 4-6: Werkstoffspezifikationen von 16MnCr5 und 20MnCr5 nach DIN EN 10084 [DINEN10084]

Bezeichnung	Behandlung	Zusammensetzung in %					
		C	Si max.	Mn	P max.	S	Cr
16MnCr5	einsatzgehärtet	0,14...0,19	0,4	1,0...1,3	0,025	≤ 0,035	0,8...1,3
20MnCr5		0,17...0,22	0,4	1,1...1,4	0,025	≤ 0,035	1,0...1,3

#### 4.4 Zahnradprüfstand

Die Versuche zur Fresstragfähigkeit der strukturierten Zahnräder und der Referenzzahnäder werden auf einem FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand nach DIN 14635 [DINISO14635-1, DINISO14635-3, DINISO14635-2] durchgeführt. Der Zahnradprüfstand ist charakterisiert durch einen geschlossenen Momentenkreislauf, so dass der Antriebsmotor nur die auftretende Verlustleistung zu kompensieren hat. Die Vorspannung im Momentenkreislauf wird mithilfe einer Belastungskupplung realisiert, an der mittels eines Hebels und Gewichten das gewünschte Drehmoment aufgebracht wird. Dabei ist das aufgebrachte Drehmoment proportional zu der Verdrehung der Torsionswelle. Die Betriebsbedingungen sind durch die Prüfparameter Belastung, Umfangsgeschwindigkeit und Öltemperatur sowie den Schmierstoff festgelegt. Zum Erreichen der geforderten Öltemperatur ist der Prüfgetriebekasten mit einer Heizung und einem Temperatursensor versehen. Der prinzipielle Aufbau des FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstands ist in [Bild 4-6](#) dargestellt.

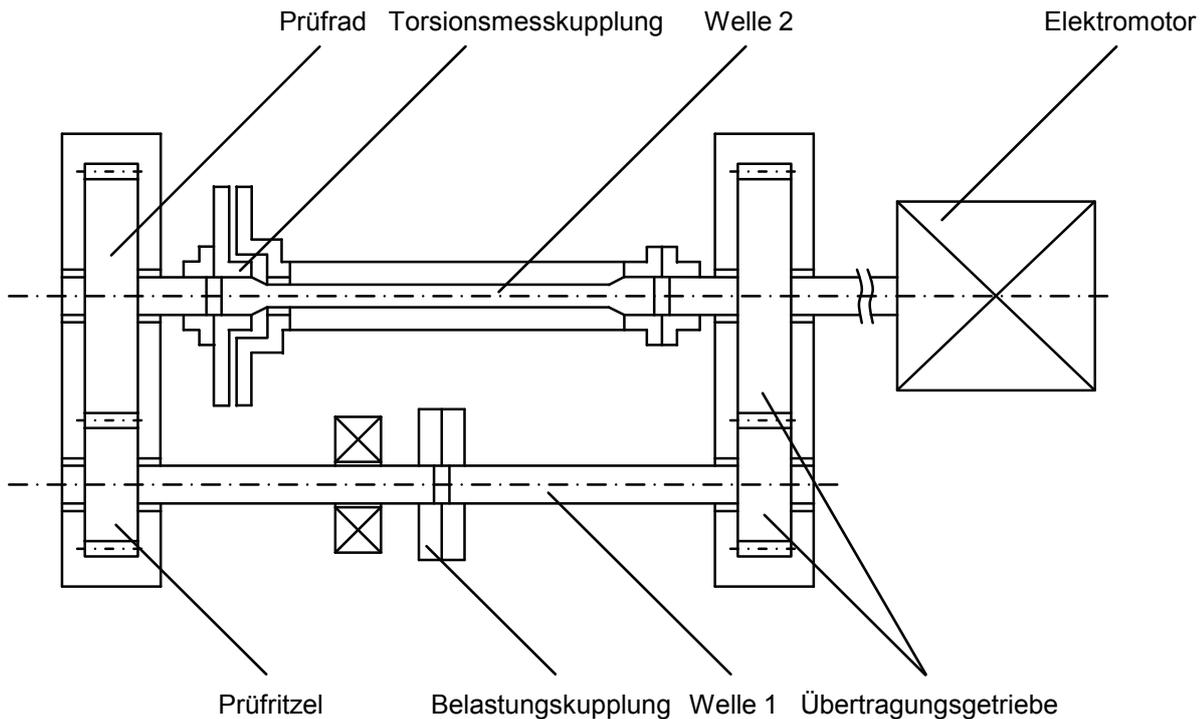


Bild 4-6: Prinzipskizze des FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstands [DINISO14635-1]

Für das Prüfverfahren zur Fresstragfähigkeit werden die Prüfzahnräder nach DIN 14635 [DINISO14635-1, DINISO14635-3, DINISO14635-2] verwendet, die im FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand einen Achsabstand von  $a = 91,5 \text{ mm}$  aufweisen. Auf dem FZG-Zahnrad-Verspannungsprüfstand lassen sich neben der Fresstragfähigkeit auch Versuche zur Grübchen- und Verschleißtragfähigkeit bei Tauchschmierung durchführen.

## 4.5 Mess- und Analyseinrichtung

Im folgenden Unterkapitel werden die verwendete Mess- und Analyseinrichtung ausführlich vorgestellt. Zunächst wird die Messeinrichtung zur Bestimmung der Prozesskraft beim Verzahnungsschleifen beschrieben. Daran anschließend werden die Methoden zur Charakterisierung der Mikrostruktur der Versuchsbauteile sowie der Makrogeometrie der Zahnräder erläutert. Abschließen erfolgt die Beschreibung zur Charakterisierung der Schleifscheibentopographie.

### 4.5.1 Prozesskräfte beim Verzahnungsschleifen

Bei der Schleifbearbeitung treten Trennvorgänge auf mikroskopischer Ebene sowie variierende Einzelkorneingriffe auf, was eine Herausforderung bei der Beurteilung des Prozessverhaltens darstellt. Die systematische Analyse und Bestimmung der Prozesskräfte beim kinematisch modulierten Verzahnungsschleifen stellt daher eine wichtige Voraussetzung zur Klärung der Wirkmechanismen bei der Oberflächenstrukturierung durch kinematische Überlagerungen dar. Dabei müssen sowohl die statischen als auch dynamischen Anteile der

Schleifkräfte exakt bestimmbar sein, um eine genauen Prozessanalyse der hochdynamischen Schleifbearbeitung realisieren zu können.

Mithilfe der in Zusammenarbeit mit der Fa. KISTLER INSTRUMENTE AG, Winterthur, Schweiz, entwickelten Kraftmesseinrichtung lassen sich dynamische und quasi-statische Kraftkomponenten sowie -momente beim Verzahnungsschleifen erfassen, wobei die Bestimmung der Absolutwerte der auftretenden Prozesskräfte bei einseitigem Spannaufbau der Versuchszahnräder erfolgt. Die Erfassung der Schleifkräfte wird mithilfe der piezoelektrischen Messmethode realisiert. Dabei geben die Quarzkristallelemente eine zu der einwirkenden Kraft proportionale Ladung ab. In dem 6-Komponenten Dynamometer vom Typ Z21384 ([Bild 4-7](#)) der Fa. KISTLER INSTRUMENTE AG, Winterthur, Schweiz, sind 4 Quarzkristallplatten eingebaut, die unter hoher Vorspannung zwischen der Grund- und Deckplatte parallel geschaltet sind. Das 6-Komponenten Dynamometer ist mittels einer zusätzlichen Grundplatte auf dem Werkstückspanntopf der Zahnflanken-Profileschleifmaschine montiert, was eine Messung der dynamischen und quasi-statischen Kraftkomponenten  $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$  sowie eine Berechnung der Momente  $M_x$ ,  $M_y$ ,  $M_z$  bei der Verzahnungsschleifbearbeitung ermöglicht. Das Dynamometer zeichnet sich dabei durch eine hohe Steifigkeit und Eigenfrequenz (ca. 2,0 kHz) aus, womit sich die Bearbeitungskräfte von dynamischen Schleifprozessen messen und bestimmen lassen. Eine Ansprechschwelle von ca. 0,01 N ermöglicht zudem das Messen von kleinsten dynamischen Änderungen bei hohen Kräften. Zum Schutz gegen das Eindringen von Spritzwasser und Kühlschmiermittel wurde ein zusätzliches Sperrluftgehäuse appliziert, womit es der Schutzklasse IP67 entspricht und sich zusätzlich mögliche Temperatureinflüsse auf das Dynamometer vermeiden lassen.



**Spezialdynamometer**

Typ: Z21384  
 Hersteller: KISTLER INSTRUMENTE AG,  
 Winterthur, Schweiz

**Technische Daten**

$F_x/F_y$ :	$\pm 36$	kN
$F_z$ :	-12/72	kN
$M_x/M_y$ :	$\pm 750$	Nm
$M_z$ :	$\pm 2.000$	kN
Sensoren: 9067C/68C		

[Bild 4-7](#): 6-Komponenten Dynamometer vom Typ Z21384 der Fa. KISTLER INSTRUMENTE AG

Für die Bestimmung und Auswertung der Schleifkräfte beim Verzahnungsschleifen wurde eine Messkette entwickelt, dessen prinzipieller Aufbau in [Bild 4-8](#) dargestellt ist. Die Ladungen der Quarzkristallelemente werden über ein 9-adriges Anschlusskabel vom Typ 1679 A der Fa. KISTLER INSTRUMENTE AG, Winterthur, Schweiz, an einen hochisolierenden Signal-Verteilerkasten vom Typ 5405 A derselben Firma übertragen. Nachdem die Signale zwei programmierbare, industrielle ICAM-Ladungsverstärker vom Typ 5073A411 der Fa. KISTLER INSTRUMENTE AG, Winterthur, Schweiz durchlaufen, werden diese über eine Messkarte vom Typ USB 6251 der Fa. NATIONAL INSTRUMENTS GMBH, München, Deutschland, an einen Messrechner übertragen. Darüber hinaus wird die aktuelle Position der Werkstückachse (A-Position) mithilfe einer zweiten Messkarte derselben Firma aufgenommen. Die Erfassung der Spannungssignale erfolgt mit der Datenerfassungs- und Verarbeitungssoftware LabView

(Version 9.0 der Fa. NATIONAL INSTRUMENTS GMBH, München, Deutschland). Die Verarbeitung und Auswertung der Messdaten werden mittels der Software Matlab der Fa. MATHWORK GMBH, Aachen, Deutschland, durchgeführt.

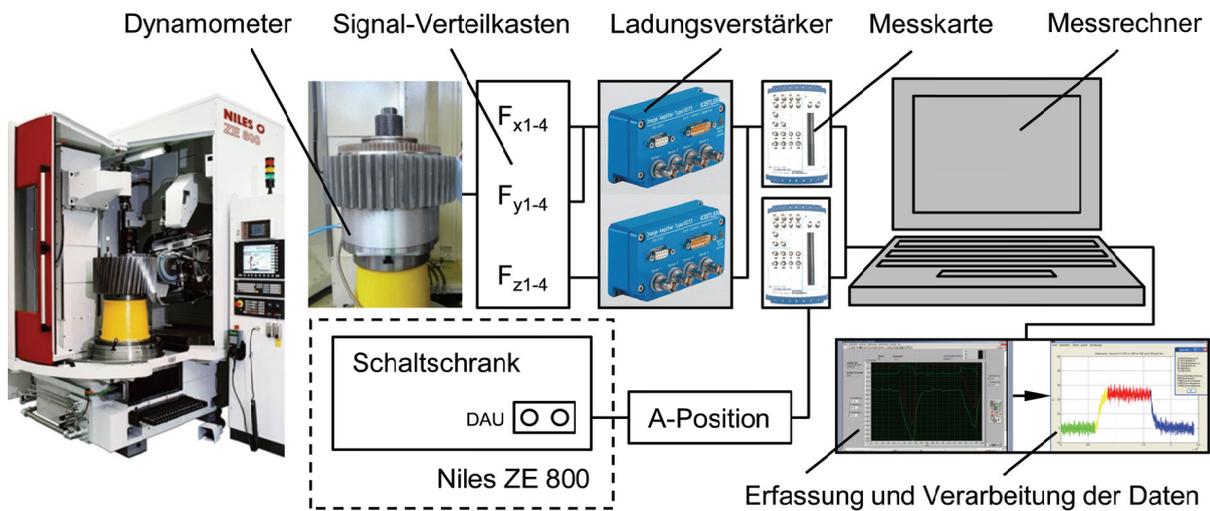


Bild 4-8: Prinzipieller Aufbau der Kraftmesseinrichtung beim Verzahnungsschleifen

Für die technologischen Untersuchungen werden die Schleifnormalkraft  $F_n$  und die Schleiftangentialkraft  $F_t$  mithilfe der Kraftmesseinrichtung bestimmt. Dabei berechnet sich die Schleifnormalkraft  $F_n$  aus den sich zeitlich veränderlichen Kraftvektoren  $F_x$  und  $F_y$  in Abhängigkeit der aktuellen A-Position des Werkstückspanntopfes. Die Schleiftangentialkraft  $F_t$  ergibt sich dagegen aus dem Kraftvektor  $F_z$ . Für die Bestimmung der Schleifkräfte in Abhängigkeit der A-Position des Werkstückspanntopfes und der jeweiligen Zahnücke wurde ein dafür speziell entwickelter Algorithmus verwendet.

#### 4.5.2 Mikrostruktur der Versuchsbauteile

Die Charakterisierung der Oberflächenstruktur erfolgte sowohl für die Analogiebauteile als auch für die Zahnstangen und Zahnräder mithilfe des nach dem Tastschnittverfahren arbeitenden Messsystems Hommel-Etamic Nanoscan 855 von der Fa. HOMMEL-ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland (Bild 4-9). Mit dem Messsystem können Oberflächentopographien mit einer Auflösung bis 0,6 nm erfasst werden, wobei der Messbereich bis 24 mm betragen darf. Neben den üblichen 2D-Rauheits- und Konturmessungen können mit dem Messgerät auch Flächenmessungen durchgeführt werden, indem die gewünschte Anzahl an parallelen Einzelmessstrecken und deren Abstand voneinander angegeben werden. Eine 3D-Messung sowie die Anwendung flächenhafter Kenngrößen ist erforderlich, um die erzeugten Oberflächen mit lokal ausgeprägten Strukturen charakterisieren zu können [DON95, CHI00, DEN08d, SEE11].

Dabei ist die Größe des Messfeldes zur Bestimmung der 3D-Oberflächenkennwerte abhängig von der Periodenlänge  $T_s$  der kinematischen Modulation, wobei der Abstand zwischen zwei Profillinien immer 5  $\mu\text{m}$  beträgt. Das Messsystem verfügt über drei translatorische Achsen und eine rotatorische Werkstückachse, die somit eine Aufspannung und eine Vermessung der Analogiebauteile ermöglicht. Für die taktile Erfassung der Oberflächenstruktur

stand ein Taster mit einer Diamanttastspitze bei einem Tastspitzenradius  $r_{tip}$  von  $2\ \mu\text{m}$  und einem Tastspitzenwinkel von  $60\ \text{Grad}$  zur Verfügung.



Quelle: HOMMEL-ETAMIC



Quelle: IWF

#### CNC-Rauheits- und Konturmessgerät

Typ:	Nanoscan 855
Hersteller:	HOMMEL-ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland
Baujahr:	2009

#### Technische Daten

Messbereich:	24 mm
Auflösung:	0,6 nm
Messpunktabstand:	0,5 $\mu\text{m}$
Abstand der Einzeltaststrecken:	5 $\mu\text{m}$

#### Taster

Tastspitzenradius:	2 $\mu\text{m}$
Tastspitzenwinkel:	60 °
Tastarmlänge:	90 mm
Tastarmaufnahme:	Magnetisch

**Bild 4-9:** CNC-Rauheits- und Konturmessgerät  
Hommel-Etamic Nanoscan 855 von der Fa. HOMMEL-ETAMIC GMBH

Zur Auswertung der gemessenen Oberflächendaten wurde die 3D-Topografie-Analysesoftware Hommel Map Premium der Fa. HOMMEL-ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland, verwendet. Diese Analysesoftware bietet umfangreiche Auswertemöglichkeiten von Oberflächendaten, mit denen 2D-Kenngrößen gemäß DIN EN ISO 4287 [DINENISO4287] und 3D-Kenngrößen gemäß DIN EN ISO 25178 [DINENISO25178-2] bestimmt werden können. Als Rauheitsfilter wurde ein robuster Gaußscher Flächenfilter mit der Grenzwellenlänge  $\lambda_c = 0,8\ \text{mm}$  für die Profilmessungen der Werkstückoberfläche angewendet. Der robuste Gaußsche Flächenfilter zeigt im Vergleich zum herkömmlichen Gaußfilter eine gute Resistenz bei vereinzelt hohen Spitzen, tiefen Riefen sowie Ausreißern, welche einen Einfluss bei der Berechnung der Mittellinie und somit auf die Oberflächenkennwerte haben [BRI02a, SEE11, DINENISO16610-71, DINENISO16610-21]. Die Charakterisierung der Oberflächenstruktur der Versuchsbauteile erfolgte anhand der 3D-Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  sowie den Kenngrößen des Materialvolumens  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  nach DIN EN ISO 25178-2 [DINENISO25178-2]. Für ein besseres Verständnis der 3D-Oberflächenkennwerte im Vergleich zu den 2D-Oberflächenkennwerten werden im Rahmen dieser Arbeit folgende Begriffe verwendet: quadratischer Mittelwert der Flächenordinaten  $S_q$ , arithmetischer Mittelwert der Flächenordinaten  $S_a$ , maximale Höhe der Oberfläche  $S_z$ . Die Kenngrößen der Materialvolumina aus der Materialanteilskurve, welche der Abbott-Firestone-Kurve aus der 2D-Analyse entspricht, dienen hierbei zur strukturorientierten 3D-Bewertung geometrischer Eigenschaften für tribologische Oberflächen [BÖH92]. Diese Kennwerte erlauben eine integrale Beurteilung der Funktionsflächen hinsichtlich ihres Einlaufverhaltens, mechanischer Belastbarkeit sowie ihrer Ölaufnahme [ABB33, SAN82, BAT01, LEM03, WIE10, GER11]. Darüber hinaus erfolgte die Bestimmung des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250\ \mu\text{m}$ ) anhand der 3D-Abbottkurve sowie des Strukturwinkels  $\alpha_s$  für die strukturierten Oberflächen [ABB33].

### 4.5.3 Makrogeometrie der Zahnräder

Eine Beurteilung des Arbeitsergebnisses für den Verzahnungsschleifprozess erfolgte anhand geometrischer Kennwerte wie Form-, Maß- und Lagegenauigkeit der geschliffenen Zahnräder [VDI/VDE2607, VDI/VDE2612, VDI/VDE2613]. Diese können in der Zahnflanken-Profilschleifmaschine mithilfe eines integrierten Messsystems bestimmt werden, welches mit einem LP2-Messtaster der Fa. RENISHAW LTD, New Mills, Großbritannien ausgestattet ist. Die Bestimmung der geometrischen Kennwerte erfolgte jeweils vor und nach der Bearbeitung, wobei konstante Temperaturverhältnisse in der Maschine sichergestellt wurden. Zudem wurde die hochpräzise Meßeinrichtung regelmäßig in kurzen Abständen kalibriert. Die technischen Merkmale des Mess- und Kalibriertaster können dem Bild 4-10 entnommen werden.



#### **Mess- und Kalibriertaster**

Typ: LP2  
Hersteller: RENISHAW LTD, New Mills,  
Großbritannien

#### **Technische Daten**

Wiederholgenauigkeit: 0,6  $\mu\text{m}$   
Messunsicherheit: 0,08  $\mu\text{m}$

#### **Taster**

Tastradius: 1 mm  
Tasterform: Rubinkugel

Bild 4-10: Mess- und Kalibriertaster von der Fa. RENISHAW LTD [NIL14]

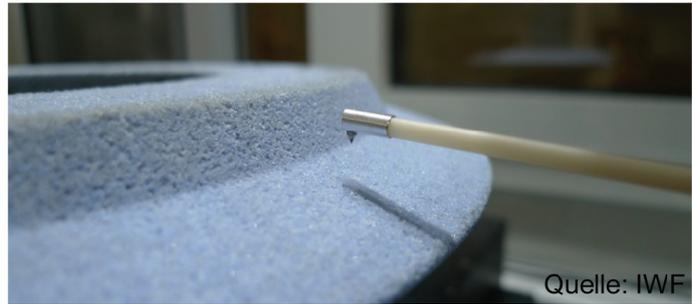
Durch eine umfangreiche Auswertesoftware lassen sich die Verzahnungsqualität nach DIN 3961 [DIN3961, DIN21772] bestimmen, wobei die Bewertung der Profil- und Flankenlinie anhand der Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$ ,  $f_{H\beta}$  und Formabweichung  $f_f$ ,  $f_{\beta f}$  sowie der Gesamtabweichung  $F_f$ ,  $F_\beta$  erfolgt [DIN3962-1, DIN3962-2]. Darüber hinaus wird die Teilungseinzelabweichung  $f_p$  und die Teilung-Gesamtabweichung  $F_p$  und die Zahnweite  $W_k$  für die komplett bearbeiteten Zahnräder ausgewertet [DIN3962-1, DIN21773]. Die Verzahnungsqualität (QKL) nach DIN 3961 [DIN3961] wird entsprechend des DIN-Verzahnungstoleranzsystems festgelegt.

### 4.5.4 Topographie der Schleifscheibe

Die Charakterisierung der Schleifscheibentopographie anhand von Kenngrößen erfolgt unter Zuhilfenahme eines taktilen Messinstruments. Die Topographie der Schleifscheibe wird hierfür mit dem in Bild 4-11 dargestellten CNC-Rauheits- und Konturmessgerät Hommel-Etamic Nanoscan 855 von der Fa. HOMMEL-ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland, vermessen. Für die taktile Erfassung der Schleifscheibentopographie kam ein Taster mit einer Diamanttastspitze bei einem Tastspitzenradius  $r_{\text{tip}}$  von 10  $\mu\text{m}$  und einem Tastspitzenwinkel von 60 Grad zum Einsatz. Zur Auswertung der gemessenen Schleifscheibenoberfläche wurde die 3D-Topografie-Analysesoftware Hommel Map Premium der Fa. HOMMEL-ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland, verwendet. Anhand der dreidimensionalen Darstellung der Schleifscheibenoberfläche lassen sich Höhen-, Funktions- und Abstandseigenschaften nach DIN EN ISO 25178-2 bestimmen [DINENISO25178-2]. Darüber hinaus

kann die mikroskopische Schleifscheibengeometrie mit den Kenngrößen der Abbottkurve sowie einer Schleifkornverteilung weiter charakterisiert werden [HÜB09, HÜB12].

- a) CNC-Rauheits- und Konturmessgerät    b) Vermessung der Schleifscheibentopographie



**Bild 4-11:** Bestimmung der Schleifscheibentopographie;  
a) CNC-Rauheits- und Konturmessgerät Hommel-Etamic Nanoscan 855  
von der Fa. HOMMEL-ETAMIC GMBH; b) Vermessung der Schleifscheibentopographie

---

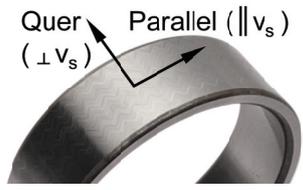
## 5 Eingriffsverhältnisse beim kinematisch modulierten Schleifprozess

Die Eingriffsbedingungen beim kinematisch modulierten Schleifprozess sind ein wesentlicher Einflussfaktor für die Oberflächenentstehung und somit für die Oberflächenstruktur. Zunächst werden an einer beispielhaften Funktionsfläche die Unterschiede hinsichtlich der Oberflächenkennwerte zwischen dem konventionellen und dem kinematisch modulierten Schleifverfahren vorgestellt. Anhand einer vereinfachten Simulation der Eingriffsbedingungen beim kinematisch modulierten Schleifen sowie mithilfe von Ergebnisse aus Einkornitzversuchen wird eine Modellvorstellung für die Eingriffsbedingung beim kinematisch modulierten Schleifprozess erarbeitet.

Die Rauheitskennwerte der Werkstückoberfläche hängen stark von der Geometrie und Form der vorhandenen Ritzspuren ab, die sich in Abhängigkeit der Eingriffsbedingung bei der kinematischen Modulation verändern können. Eine kinematisch moduliert geschliffene Oberfläche ( $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$ ;  $A_{fa} = 2,5 \text{ mm}$ ) wurde im Vergleich zur konventionell geschliffenen Oberflächen anhand der klassischen 2D-Rauheitsparameter  $R_a$ ,  $R_z$  und  $R_{max}$  charakterisiert, wobei diese jeweils parallel und senkrecht zur Umfangsrichtung des Werkstückes mittels eines taktilen Rauheitsmesssystems bestimmt wurden [DINENISO4287, VDA2006]. Die restlichen Prozessparameter sind für beide durchgeführten Rundschleifprozesse gleich. Tabelle 5-1 zeigt eine Übersicht über die ermittelten Rauheitskennwerte von mit und ohne kinematischer Modulation geschliffenen Lagerringen.  $R_{max}$  ist hierbei die maximale Rautiefe, d. h. die größte Einzelrautiefe auf der Gesamtstrecke [VDA2006].

Beim Vergleich der zwei geschliffenen Oberflächen wird der Einfluss der kinematischen Modulation auf die Oberflächenkenngrößen deutlich. Die Messungen quer zur bevorzugten Riefenrichtung ergeben einen deutlich höheren arithmetischen Mittelwert der Profilordinaten mit  $R_a = 3,275 \text{ }\mu\text{m}$  für den konventionell geschliffenen Lagerring im Vergleich zum kinematisch moduliert geschliffenen Lagerring mit  $R_a = 0,273 \text{ }\mu\text{m}$ . Darüber hinaus wurden Rauheitsmessungen parallel zur bevorzugten Riefenrichtung durchgeführt, um einen eventuellen Einfluss der Strukturriefen auf die Ergebnisse der 2D-Rauheitsmessungen zu ermitteln. Dabei lassen sich geringere Rauheitskennwerte im Vergleich zu den Messungen quer zur bevorzugten Riefenrichtung identifizieren, was auf geringere Rillen in Umfangsrichtung zurückzuführen ist. Bei Betrachtung der Rauheitskennwerte  $R_a$ ,  $R_z$  und  $R_{max}$  können höhere Werte für den kinematisch moduliert geschliffenen Lagerring in Umfangsrichtung festgestellt werden. Durch die Modulationsbewegung werden neben den herkömmlichen Schleifriefen zusätzliche Strukturen erzeugt, die quer zur Umfangsrichtung verlaufen und somit die parallel zur bevorzugten Riefenrichtung ermittelten Oberflächenkennwerte beim kinematisch moduliert geschliffenen Lagerring erhöhen. Diese Erhöhung ist jedoch gering, da die Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe  $v_s$  im Vergleich zur Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  immer noch stark dominierend ist.

Tabelle 5-1: Parallel und quer zur bevorzugten Riefenrichtung ermittelte Rauheitskennwerte von den mit und ohne kinematische Modulation geschliffenen Lagerringen

		Ohne kinematische Modulation		Mit kinematischer Modulation ( $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$ ; $A_{fa} = 2,5 \text{ mm}$ )	
		Parallel	Quer	Parallel	Quer
Ra	$\mu\text{m}$	0,247	3,275	0,273	0,398
Rz	$\mu\text{m}$	0,351	20,673	1,387	2,916
Rmax	$\mu\text{m}$	0,449	25,156	1,491	3,841

### 5.1 Simulation der Eingriffsbedingungen beim kinematisch modulierten Schleifprozess

In welcher Weise die kinematische Modulation Einfluss auf die Eingriffsbedingungen beim Schleifprozess hat, soll anhand eines vereinfachten Simulationsmodells überprüft und analysiert werden. Dafür wird als Prozesskinematik eine Planschleifbearbeitung zu Grunde gelegt. Der Einsatz einer kinematischen Modulation bei der Schleifbearbeitung wird mithilfe einer zusätzlichen überlagerten Hubgeschwindigkeit realisiert. Die axiale Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  ist hierbei senkrecht zur Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und zur Werkstückgeschwindigkeit  $v_w$ . Diese zusätzliche Modulationsbewegung führt im Vergleich zum konventionellen Rundschleifprozess zu einer Erhöhung der resultierenden Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , wobei der geringe Anstieg der Geschwindigkeit als vernachlässigbar einzustufen ist. Darüber hinaus ist aufgrund der zusätzlichen Bewegung mit geringfügig längeren Korneingriffsbahnen  $l_g$  zu rechnen. Eine Prinzipskizze der Geschwindigkeitsvektoren bei der Planschleifbearbeitung mit und ohne kinematische Modulation ist für das Gegenlaufschleifen in Bild 5-1 dargestellt.

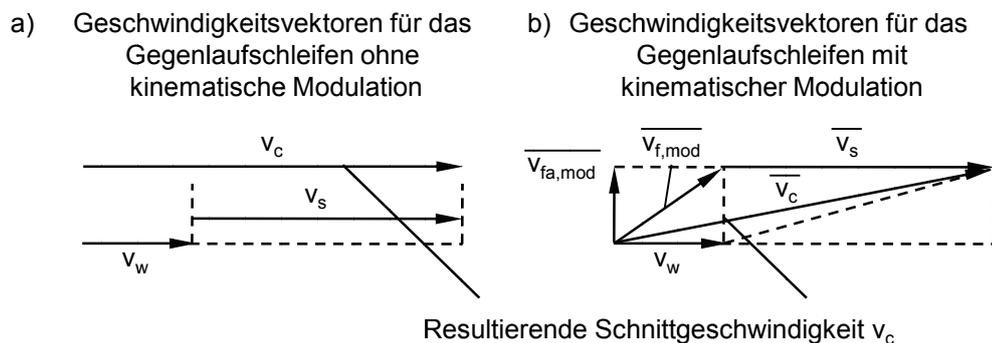


Bild 5-1: Geschwindigkeitsvektoren für das Gegenlaufschleifen; a) ohne kinematische Modulation; b) mit kinematischer Modulation

Die Simulation der Eingriffsbedingungen erfolgt für ein einzelnes Schleifkorn, wobei als vereinfachte Korngeometrie ein Ellipsoid gewählt wurde. Eine ebene Oberfläche für das Werk-

stückmodell wird in Form eines Dixelmodells, einer zweidimensionalen Matrix der Größe  $m \times n$ , generiert. Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess setzt sich hierbei aus der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$ , der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  sowie der Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  zusammen. Mithilfe einer Interpolation der Korneingriffsbahn und einer Durchdringungsrechnung lassen sich näherungsweise die Länge der Korneingriffsbahn  $l_g$  sowie die maximale Spanungsdicke  $h_{cu,max}$  für das einzelne Schleifkorn bestimmen. Eine Prinzipskizze des Simulationsmodells zur Bestimmung der Eingriffsbedingungen beim Einsatz einer kinematischen Modulation sowie die verwendeten Modellparameter sind in Bild 5-2 dargestellt. Elastische und plastische Verformungen bei der Spanbildung sowie Kornverschleiß und Maschinensteifigkeiten wurden bei der Simulation nicht berücksichtigt.

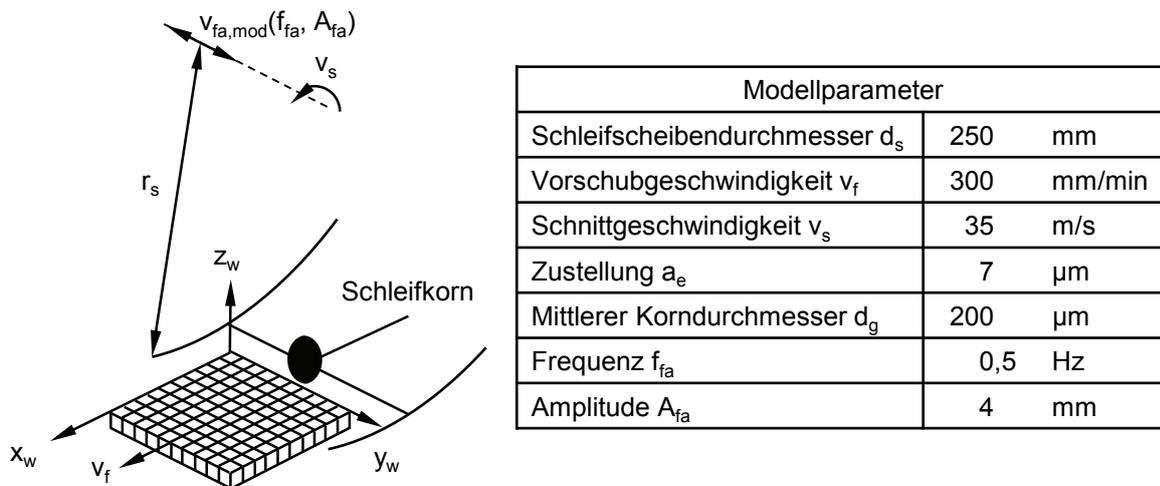


Bild 5-2: Prinzipskizze des Simulationsmodells zur Bestimmung der Eingriffsbedingungen bei kinematischer Modulation mit den Modellparametern

Mithilfe des entwickelten Modells zur Bestimmung der Eingriffsbedingungen beim kinematisch modulierten Schleifprozess wurde eine Simulation für das einzelne Schleifkorn und mit den festgelegten Prozessstellgrößen durchgeführt, um die maximale Spanungsdicke  $h_{cu,max}$  sowie die Länge der Korneingriffsbahn  $l_g$  zu bestimmen. Die Ergebnisse zur Simulation des Einkornritzversuchs mit und ohne kinematischer Modulation sind in Tabelle 5-2 aufgelistet. Dabei ist zusätzlich die maximale unverformte Spanungsdicke  $h_{cu,max}$  nach dem Modell von KASSEN [KAS69] angegeben, welches auf geometrischen und kinematischen Zusammenhängen basiert. Anhand der ermittelten Werte wird zunächst deutlich, dass sich die mikrogeometrischen Spanungskenngrößen  $h_{cu,max}$  aus der Simulation und nach KASSEN [KAS69] kaum unterscheiden. Darüber hinaus lässt sich ein geringer Anstieg der Spanungsdicke  $h_{cu,max}$  sowie der Länge der Korneingriffsbahn  $l_g$  beim Einsatz einer kinematischen Modulation feststellen. Dieser Zusammenhang kann auf die Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  zurückgeführt werden, die eine Verlängerung der Korneingriffsbahn  $l_g$  und somit einen marginalen Anstieg der Spanungsdicke  $h_{cu,max}$  zur Folge hat. Aufgrund der dominierenden Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe  $v_s$  wird diese Veränderung der Eingriffsbedingungen beim Einsatz einer kinematischen Modulation jedoch als nicht signifikant eingestuft.

Tabelle 5-2: Ergebnisse zur Simulation des Einkornritzversuchs im Vergleich zum Modell von KASSEN [KAS69]

	Simulationsmodell		Maximale Spannungs- dicke $h_{cu,max}$ nach KAS- SEN [KAS69]
	Ohne kinemati- sche Modulation	Mit kinematischer Modulation	
Maximale Spannungs- dicke $h_{cu,max}$	1,1445 $\mu\text{m}$	1,1497 $\mu\text{m}$	1,187 $\mu\text{m}$
Länge der Korneingriffsbahn $l_g$	1379,00 $\mu\text{m}$	1386,00 $\mu\text{m}$	

Der Einfluss der kinematischen Modulation auf die simulierte Ritzspur bei mehrfacher Umdrehung des Werkzeugs  $U_w$  wird in Bild 5-3 deutlich, wobei exemplarisch nur eine Bewegungsrichtung der kinematischen Modulation betrachtet wird. Aufgrund der zusätzlichen Querbewegung des Schleifkorns kommt es zu einer seitlichen Verschiebung der einzelnen Ritzspuren, wogegen bei der Simulation ohne Modulation lediglich nur eine Ritzspur entsteht.

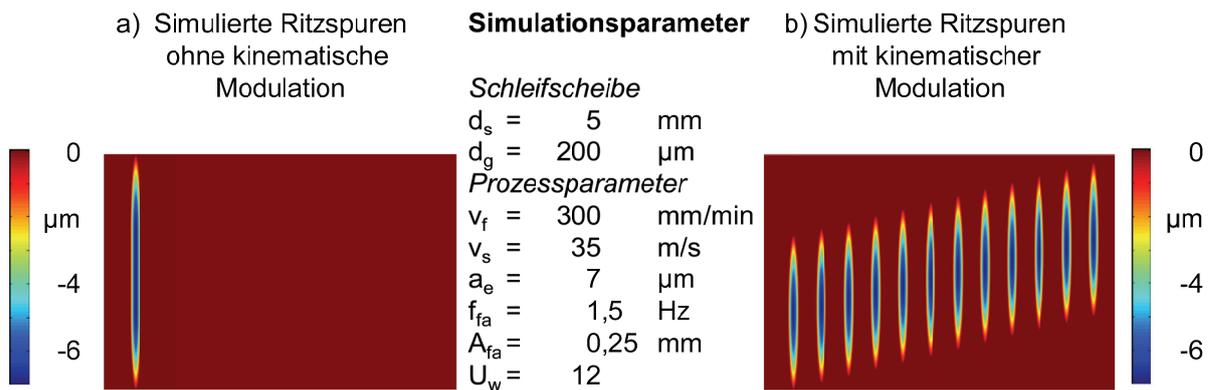


Bild 5-3: Simulierte Ritzspuren; a) ohne kinematische Modulation; b) mit kinematischer Modulation

## 5.2 Einkornritzversuch

Neben der Simulation des Korneingriffs unter Einsatz einer kinematischen Modulation ist die Bestimmung der elasto-plastischen Anteile bei der Spanbildung für eine Modellvorstellung der Eingriffsbedingung von großer Bedeutung. Aufgrund der komplexen Eingriffsbedingungen bei den Schleifverfahren ist die Bestimmung des Einflusses einer kinematischen Modulation auf die Oberflächenausbildung der Ritzspur nur schwer möglich. Für eine detaillierte Untersuchung der Ritzspur- und Oberflächenentstehung bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung sind daher Analogieuntersuchungen in Form von Einkornritzversuchen zielführend. Anhand einer Analyse des Ritzspuraufwurfs sowie der Oberflächenausbildung ist eine Übertragung der Zusammenhänge vom Einkornritzversuch auf den realen Schleifprozess möglich.

Einerseits lassen sich Einkornritzuntersuchungen zur systematischen Analyse des Einsatzes verschiedener Kornwerkstoffe bei unterschiedlichen Werkstoffarten durchführen, um Aussa-

gen über die Verschleißmechanismen der Kornspezifikationen treffen zu können [KÖN87, LUD94, EDI97, MÜL02, ZEP05, KLO06]. Andererseits kann auch die Ritzspur des Abrasivkorns bestimmt und analysiert werden, um die plastische Formänderung bei der Spanbildung zu bestimmen [UHL94, BRI02b, GIW03, ZEP05, DEN06a, VUC08a, DEN09a, AUR11, STM12, KAN15].

Voraussetzung für die Durchführung von Einkornritzversuchen ist zunächst eine Probenvorbereitung. Dafür wurden Werkstückproben aus 20MnCr5 mit geeigneten Abmaßen für das Warmeinbetten bereitgestellt. Der Einbettprozess für die Werkstückproben erfolgte an einer Einbettpresse unter Verwendung von Bakelit, einem duroplastischen Kunststoffgranulat. Bei einer Temperatur von 180 - 190 °C und unter einem Druck von 80 - 90 bar wird das Warmeinbetten der 20MnCr5-Werkstückproben durchgeführt. Im Anschluss des Einbettprozesses wurde in verschiedenen Polierschritten mit abnehmender Korngröße die erforderliche Finishingbearbeitung durchgeführt. Zur Minimierung des Schleifkornverschleißes wurden für die Durchführung der Ritzuntersuchungen Werkzeuge mit einem angeschliffenen Naturdiamanten verwendet, wobei die Korngröße nicht variiert wurde. Die Versuche wurden zudem unter Einsatz von Kühlschmierstoff durchgeführt, um das Verschleißrisiko der Ritzwerkzeuge zu reduzieren. Sowohl die Ritzprobe als auch das Ritzwerkzeug sind zusammen mit den technischen Merkmalen in Bild 5-4 dargestellt.

a) Ritzprobe



**Ritzprobe**

Werkstoff: 20MnCr5  
Oberfläche: Poliert

**Ritzwerkzeug**

Abrasivkorn: Naturdiamant  
Korngröße: 0,25 ct.

b) Ritzwerkzeug



Bild 5-4: Einkornritzversuche;  
a) Ritzprobe; b) Ritzwerkzeug

Die Ritzuntersuchungen wurden auf der Verzahnungsschleifmaschine ZE 800 der Fa. NILES WERKZEUGMASCHINEN GMBH, Berlin, Deutschland, durchgeführt. Ein entsprechender Aufbau für die Ritzprobe sowie eine Schleifscheibe zur Aufnahme des Ritzwerkzeuges wurden dafür hergestellt und entsprechend in die Schleifmaschine appliziert. Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen wurden zwei Prozessführungen für das Einkornritzen angewendet, um den Einfluss einer zusätzlichen Modulationsbewegung auf die Ritzspurentstehung systematisch zu analysieren. Zum einen wurde das Längsritzen durchgeführt, bei dem der Längsvorschub  $f$  innerhalb einer Werkzeugumdrehung deutlich kleiner als die Kontaktlänge  $l_g$  des Ritzwerkzeuges ist. Hierbei entsteht die maximale Spannungsdicke  $h_{cu,max}$  nahe der Austrittsstelle des Ritzwerkzeuges. Zum anderen kam das Tauchritzen zum Einsatz, bei dem der Längsvorschub  $f$  größer als die Kontaktlänge  $l_g$  sein muss. Die maximale Spannungsdicke  $h_{cu,max}$  entspricht bei dieser Prozessführung der maximalen Korneingriffstiefe  $t_R$ . Bei konstanten Prozessparametern stellen sich unterschiedliche Spanbildungsmechanismen und

damit Ritzspuren ein [GIW03]. Eine Prinzipskizze der beiden Prozessführungen beim Einkornritzen ist in Bild 5-5 dargestellt.

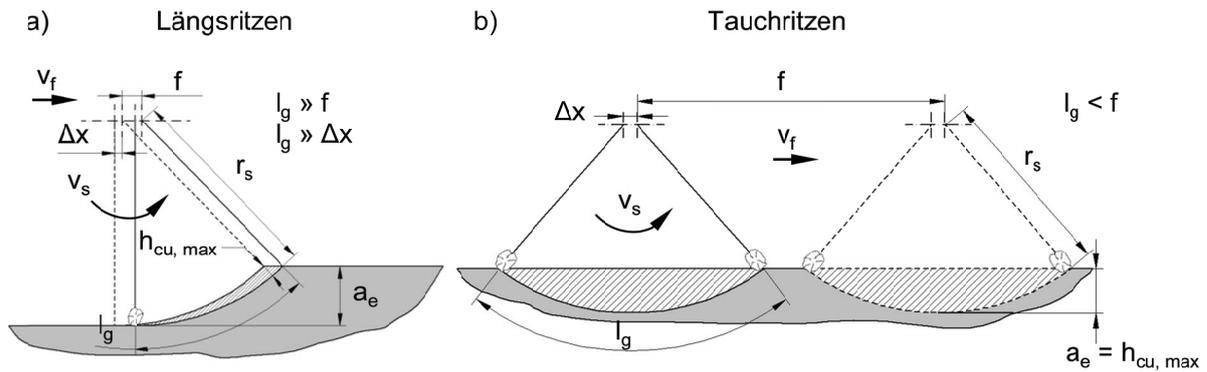


Bild 5-5: Prozessführung beim Einkornritzen nach [GIW03];  
a) Längsritzen; b) Tauchritzen

Für die Durchführung der Ritzversuche wurde zunächst die polierte Werkstückoberfläche in der Maschine ausgerichtet und die Ankratzposition für das Werkzeug bestimmt. Als Zustellungen  $a_e$  für beide Prozessführungen wurden  $15\ \mu\text{m}$  und  $30\ \mu\text{m}$  gewählt. Diese liegen deutlich über den Spannungsdicken  $h_{cu}$  der durchgeführten kinematisch modulierten Schleifprozesse, damit sich eine sich deutlich abgrenzende Ritzspur ausbilden konnte. Die Umfangsgeschwindigkeit des Ritzwerkzeugs wird auf  $v_s = 20\ \text{m/s}$  eingestellt, um neben den Längsritzversuchen auch die Tauchritzversuche an der Maschine realisieren zu können. Zur Vereinfachung wird für die Ritzversuche nur eine Querbewegung der kinematischen Modulation betrachtet, wobei als Grundlage für die Modulationsbewegung eine Frequenz  $f_{fa} = 0,5\ \text{Hz}$  und eine Amplitude  $A_{fa} = 0,5\ \text{mm}$  dient. Eine Darstellung des Versuchsaufbaus für die Einkornritzuntersuchungen ist dem Bild 5-6 zu entnehmen.

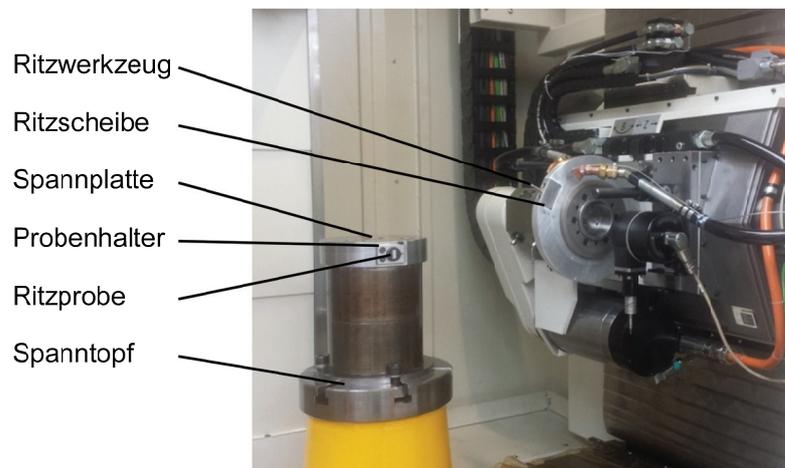
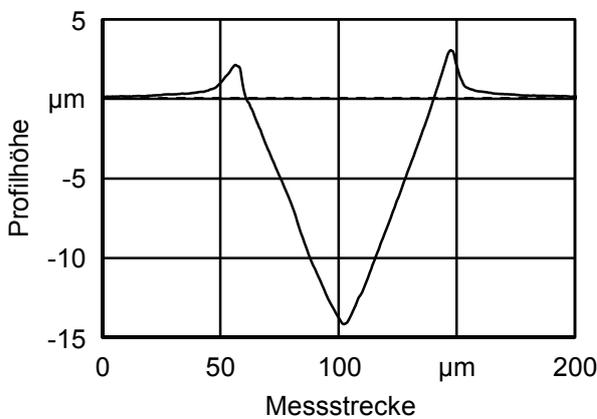


Bild 5-6: Versuchsaufbau für die Einkornritzuntersuchungen

Für die Einkornritzversuche kamen neben der konventionellen Kinematik für eine Planschleifbearbeitung weitere Versuche zum Einkornritzen unter Berücksichtigung einer zusätzlichen Querbewegung zum Einsatz. Ziel war es hierbei in erster Linie eine qualitative Aussage über die Veränderung der Ritzspurgeometrie sowie die Veränderung der Aufwürfe in Ab-

hängigkeit der Prozesskinematik treffen zu können. Die systematische Analyse der Ritzgeometrie sowohl beim Tauch- als auch beim Längsritzen ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen der konventionellen und der kinematisch modulierten Ritzkinematik. Ein Spielergebnis einer Ritzspur beim Einkornritzen mit Tauchritzstrategie ist in Bild 5-7 dargestellt. Im Hinblick auf das Profil der Ritzspurgeometrie lassen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Versuchen mit und ohne kinematische Modulation feststellen. Die Ritzspuren für konventionelle und kinematisch modulierte Ritzkinematik sind jeweils durch seitliche Aufwürfe gekennzeichnet, die stets über dem Niveau der Werkstückoberfläche liegen und sich beide voneinander kaum unterscheiden. Die Ergebnisse lassen somit nur auf einen marginalen Einfluss der geringfügig höheren Spannungsdicken  $h_{cu}$  und Kontaktlänge  $l_g$  auf die Ritzspurgeometrie beim Einsatz einer kinematischen Modulation schließen.

a) Tauchritzen ohne kinematische Modulation



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Prozessführung:**

Tauchritzen

**Werkzeug:**

1 Ritzdiamant

**Werkstück:**

20MnCr5, 60 HRC

**Prozessparameter:**

$v_s = 20$  m/s

$a_e = 15$   $\mu\text{m}$

$v_f = 7000$  mm/min

$v_{f,mod} = 1400$  mm/min

Gleichlauf

**Kühlschmierstoff:**

Öl; Macron 2425 S-14

b) Tauchritzen mit kinematischer Modulation

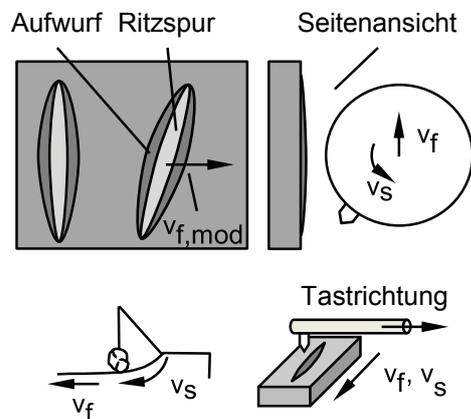
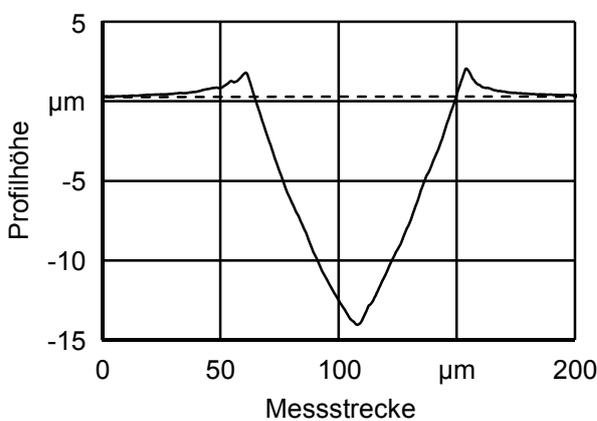


Bild 5-7: Ritzspur beim Tauchritzen;  
a) ohne kinematische Modulation; b) mit kinematischer Modulation

Für die geometrische Analyse der Ritzspuren wird der am weitesten verbreitete Ansatz von ZUM GAHR ET AL. [ZUM83] gewählt. Das relative Spanvolumen  $f_{ab}$  setzt das abgetrennte Werkstoffvolumen ins Verhältnis zum Volumen der Ritzspur und des als Aufwurf verdrängten Materials, womit sich die Effektivität eines Zerspanungsvorgangs charakterisieren lässt. Um die volumetrische Verteilung der Aufwürfe entlang der Ritzspur beurteilen zu können, wird für eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Prozessführungen beim Einkornritzen

ein relativer Kennwert eingeführt. Zu diesem Zweck wird im Folgenden der prozentuale Anteil des linken Aufwurfs  $A_{AL\Delta}$  an der insgesamt aufgeworfenen Fläche  $A_A$  betrachtet. Damit lassen sich mögliche Einflüsse der kinematischen Modulation auf die Verteilung der Aufwürfe analysieren und bewerten.

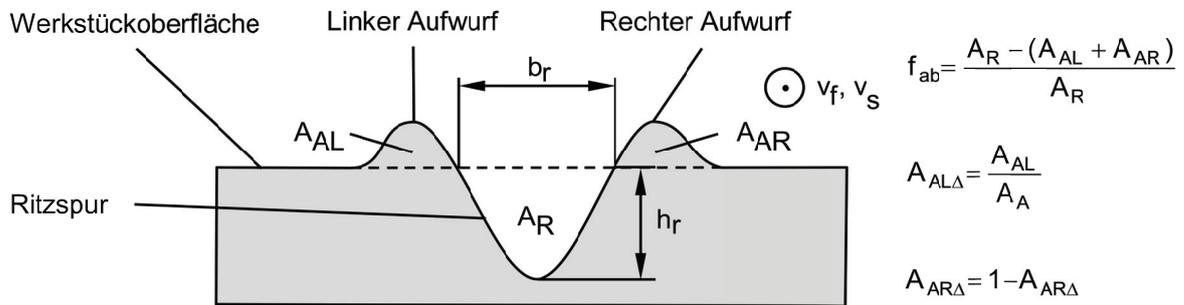
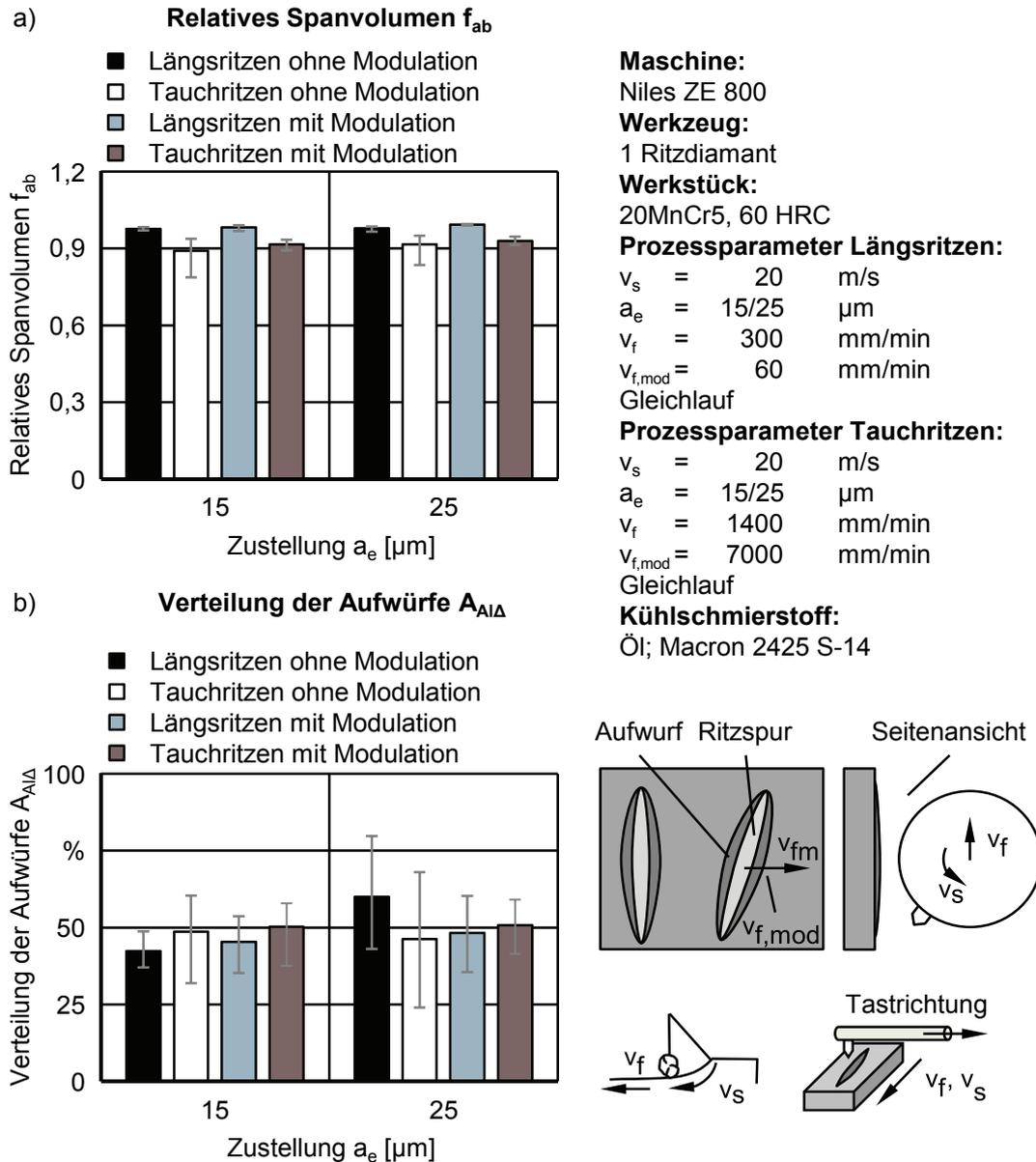


Bild 5-8: Definition des  $f_{ab}$ -Wertes nach ZUM GAHR [ZUM83]

Die Ergebnisse von den geometrischen Analysen der Ritzspuren beim konventionellen und kinematisch modulierten Einkornritzen sind anhand des relativen Spanvolumens  $f_{ab}$  und der Verteilung der Aufwürfe  $A_{A\Delta}$  in Bild 5-9 dargestellt. Es lassen sich keine signifikanten Unterschiede für diese Kennwerte zwischen dem konventionellen und kinematisch modulierten Einkornritzversuch erkennen. In Bezug auf die unterschiedliche Prozessführung wird ein höheres relatives Spanvolumen  $f_{ab}$  für die Längsritzversuche im Vergleich zu den Tauchritzversuchen erreicht. Ein ähnlicher Zusammenhang zwischen Längs- und Tauchritzversuchen konnte auch bei den Versuchen von GIWERZEW [GIW03] beobachtet werden. Darüber hinaus wird der Einfluss der Zustellung  $a_e$  auf das relative Spanvolumen  $f_{ab}$  für beide Prozessführungen als nicht signifikant eingestuft. Bei Betrachtung der Aufwurfverteilung  $A_{A\Delta}$  für die unterschiedlichen Ritzspuren lassen sich für beide Zustellung  $a_e$  keine signifikanten Änderungen beim Einsatz einer kinematischen Modulation feststellen.



**Bild 5-9:** Ergebnisse von geometrischen Analysen der Ritzspuren;  
 a) Relatives Spanvolumen  $f_{ab}$ ; b) Verteilung der Aufwürfe  $A_{A\Delta}$

Zur weiteren Analyse des Einflusses der kinematischen Modulation auf die Ritzspurentstehung wurden zusätzlich die Längsritzversuche mit kinematischer Modulation genauer analysiert. Beim Einsatz einer kinematischen Modulation können weniger exponierte Körner der Schleifscheibe, die bei der konventionellen Schleifbearbeitung im kinematischen Schatten der aktiven Schleifkörner liegen, an der Spanbildung teilnehmen und somit die Ritzspurgeometrie der vorangegangene Abrasivkörner maßgeblich beeinflussen. [Bild 5-10](#) stellt beispielhaft einen Ausschnitt von Ritzspurgeometrien unter Einsatz einer kinematischen Modulation beim Längsritzen dar, wobei der räumliche Abstand zwischen zwei Korneingriffen genau dem Umfang der Ritzscheibe entspricht. In der zurückgelegten Zeit erfolgt eine Tangentialverschiebung durch die Querbewegung, so dass sich eine neue Korneingriffsbahn versetzt auf der Werkstückoberfläche abbildet. Durch die überlagerte Modulationsbewegung entstehen Ritzspuren, die in der Gesamtheit einen unter einem definierten Winkel liegenden Ritz-

spurbereich entstehen lassen, siehe Bild 5-10. Deutlich wird die Veränderung der Ritzspur-geometrie im Vergleich zum konventionellen Einkornritzen, was auf die zusätzliche Querbewegung des Ritzwerkzeugs zurückzuführen ist. Durch die Querbewegung des Ritzwerkzeugs werden die durch das vorangegangene Abrasivkorn entstandenen Aufwürfe in Richtung der Modulationsbewegung abgetrennt, so dass im beispielhaften Ausschnitt die typischen Aufwurfgeometrien des Ritzspurprofils nicht mehr zu erkennen sind. Die Ergebnisse deuten auf eine Teilnahme der im kinematischen Schatten liegenden Abrasivkörner an der Spanbildung beim Einsatz einer kinematischen Modulation. Dies führt einerseits zum Abtrennen der Aufwürfe des vorangegangenen Korns und andererseits zu einer neuen Ritzspur mit verringerter Korneingriffstiefe  $t_R$ , was einen Einfluss auf die Volumenparametern  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  der Oberfläche hat. Eine Überlagerungen der Schnittspuren der Schneidkörner durch zusätzliche Oszillationsbewegung führt auch beim Hochfrequenz-Honen zu einer Glättung des Oberflächenprofils, wodurch sich die Oberflächenkennwerte verbessern lassen [FLO92a].

Das Spitzenvolumen  $V_{mp}$  der Oberflächen wird beim Einsatz einer kinematischen Modulation im höheren Maße als das Riefenvolumen  $V_{vv}$  beeinflusst, da die Korneingriffstiefe  $t_R$  der im kinematischen Schatten liegenden Körner geringer sein werden. Das Abtrennen bzw. die Glättung der Aufwürfe kann somit von allen an der Spanbildung teilnehmenden Schleifkörnern unterstützt werden. Die Summe der Eingriffsbedingungen der beim kinematisch modulierten Schleifprozess an der Spanbildung teilnehmenden Abrasivkörner kann somit zu einer Verbesserung der Rauheitskennwerte sowie zu einer deutlichen Verringerung des Spitzenvolumens führen. Die identifizierten Eingriffsbedingungen beim kinematisch modulierten Schleifprozess müssen anhand von technologischen Schleifuntersuchungen evaluiert werden.

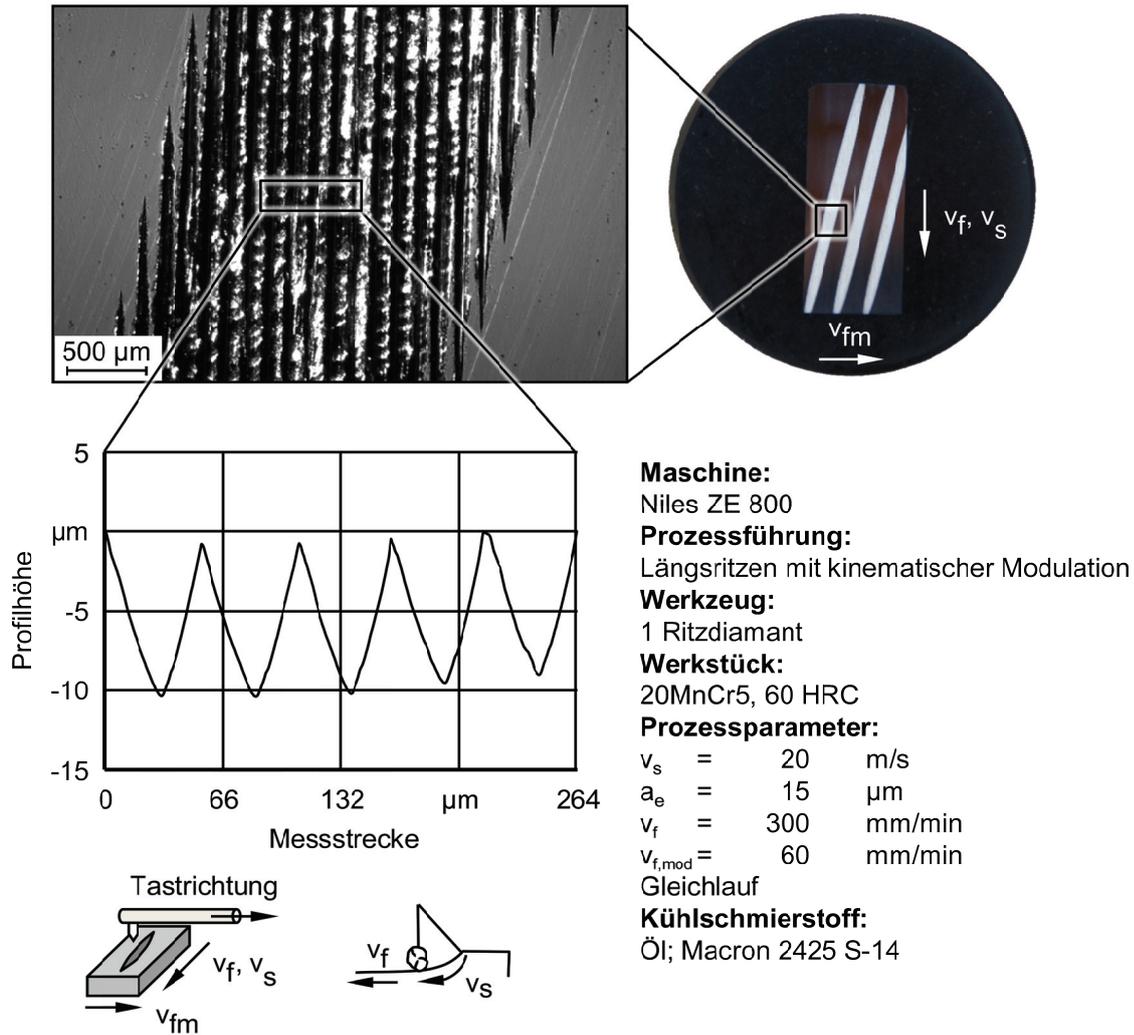


Bild 5-10: Ritzspuren beim Längsritzen beim Einsatz einer kinematischen Modulation

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass mithilfe von Einkornritzversuchen der Einfluss einer kinematischen Modulation auf die geometrischen Kennwerte und die Geometrie der Ritzspuren analysiert werden konnte. In Bezug auf die geometrischen Kennwerte konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen dem konventionellen und kinematisch modulierten Einkornritzen festgestellt werden. Aufgrund der Modulationsbewegung können jedoch im kinematischen Schatten liegende Abrasivkörner an der Spanbildung mitwirken, wodurch die Aufwurfgeometrie von den auf der Umfangsfläche vorangegangenen Abrasivkörnern abgetrennt und maßgeblich beeinflusst werden können. Die Ergebnisse aus den Ritzversuchen lassen sich in Tabelle 5-3 zusammenfassen.

Tabelle 5-3: Zusammenfassung der Erkenntnisse aus den Ritzversuchen

	Ritzversuch ohne kinematische Modulation	Ritzversuch mit kinematische Modulation
Ritzspurgeometrie	Keine signifikanten Unterschiede	
Relatives Spanvolumen $f_{ab}$		
Verteilung der Aufwürfe $A_{Al\Delta}$		
Im kinematischen Schatten liegende Abrasivkörner	Keine Teilnahme an der Span- bildung	Teilnahme an der Spanbildung
	Keine Veränderung der Ritz- spurgeometrie	Veränderung der Ritzspurgeo- metrie

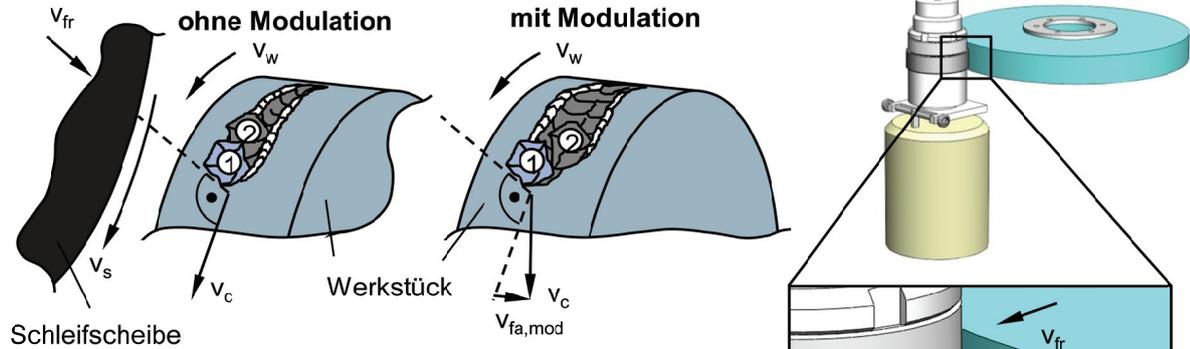
### 5.3 Modellvorstellung für die Eingriffsverhältnisse

Anhand der Ergebnisse aus der Simulation und den Einkornitzversuchen kann eine Modellvorstellung für die Eingriffsbedingung beim kinematisch modulierten Schleifprozess erarbeitet werden. Neben einer marginalen Erhöhung der resultierenden Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  führt eine kinematische Modulation bei der Schleifbearbeitung zu einer geringfügigen Erhöhung der maximalen Spanungsdicke  $h_{cu,max}$  sowie der Länge der Korneingriffsbahn  $l_g$ . Die Änderungen der Schnittgeschwindigkeit  $v_c$ , der maximalen Spanungsdicke  $h_{cu,max}$  und der Länge der Korneingriffsbahn  $l_g$  sind vernachlässigbar gering und haben dementsprechend keinen signifikanten Einfluss auf die Ritzspurgeometrie. Darüber hinaus führt die Modulationsbewegung jedoch auch zu einer Veränderung der Korneingriffsbahnen, was in einer Reduzierung der Materialaufwürfe bei den jeweiligen Ritzspuren und somit in einer Veränderung der Oberflächenstruktur resultiert. Im kinematischen Schatten liegende Abrasivkörner können durch die Modulationsbewegung auch an der Spanbildung mitwirken, wodurch die Aufwurfgeometrien zusätzlich verändert werden.

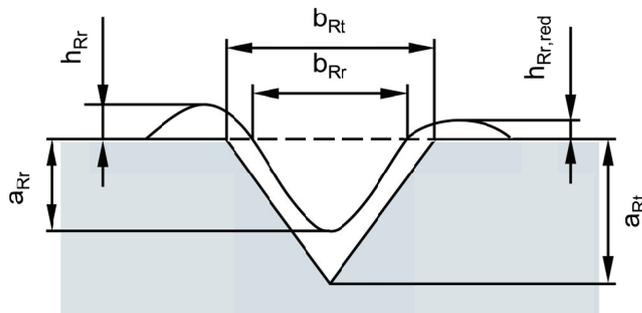
Eine Prinzipskizze für die Modellvorstellung der Eingriffsbedingungen sowie für die theoretischen und realen Ritzquerschnitte beim kinematisch modulierten Rundschleifprozess ist exemplarisch für eine Hubbewegung in Bild 5-11 dargestellt. Die tatsächliche Geometrie der Ritzspur weicht von der theoretischen Geometrie ab und hängt dabei von der Zustellung sowie von den Werkstoffeigenschaften des Bauteils ab. Aus der Modellvorstellung geht hervor, dass ein durch die kinematische Modulation bedingtes quer gerichtetes Überschleifen der Riefenaufwürfe stattfindet. Dadurch werden die charakteristischen Profile der Ritzspuren verändert, wodurch die Rauheit senkrecht zur Umfangsrichtung der Werkstücke reduziert wird und sich die Oberflächenkennwerte verringern lassen. FLORES [FLO92a] konnte ähnliche Tendenzen für das Hochfrequenz-Honen feststellen. Bei einer niedrigen Drehzahl des Werkzeugs und einer großen Anzahl an Schwingungen kann es während der Bearbeitung zu Kornüberdeckungen kommen, wodurch sich die Schnittspuren der Schneidkörner überlagern können und somit das Oberflächenprofil geglättet werden kann.

a) **Eingriffsbedingungen**

- ① erste Schneide einer Schleifscheibenumfangslinie
- ② zweite Schneide einer Schleifscheibenumfangslinie



b) **Theoretische und reale Ritzquerschnitte**



- Reale Ritztiefe:  $a_{Rr}$
- Theoretische Ritztiefe:  $a_{Rt}$
- Reale Ritzbreite:  $b_{Rr}$
- Theoretische Ritzbreite:  $b_{Rt}$
- Reale Aufwurfhöhe:  $h_{Rr}$
- Reale reduzierte Aufwurfhöhe:  $h_{Rr,red}$

**Bild 5-11:** Modellvorstellung für den kinematisch modulierten Rundschleifprozess;  
a) Eingriffsbedingungen; b) theoretische und reale Ritzquerschnitte

---

## 6 Numerische Simulation von erzeugbaren Oberflächenstrukturen

Die numerische Simulation erzeugbarer Oberflächenstrukturen stellt eine Voraussetzung für EHD-Simulationen dar, um den technologischen Nutzen gezielter Oberflächenstrukturen vorhersagen zu können. Im Rahmen dieses Kapitels werden zunächst die Motivation und Randbedingung für die numerische Simulation beschrieben, bevor im Anschluss die einzelnen Berechnungsmodelle ausführlich vorgestellt werden. Abschließend wird im Rahmen von Plausibilitätsprüfungen das Simulationsmodell zur Erzeugung von Oberflächenstrukturen evaluiert.

### 6.1 Motivation und Randbedingung

Die Wälzflächen der Verzahnung stellen wesentliche Formelemente dar und sind hohen Belastungen während des Einsatzes ausgesetzt. Die Oberflächenqualität der Zahnflanken hat einen großen Einfluss auf die Lebensdauer im Betrieb. Nach der konventionellen Schleifbearbeitung weisen die Funktionsflächen der Zahnräder unidirektionale Schleifspuren auf. Eine entscheidende Voraussetzung zur Erzeugung multidirektionaler Schleifspuren auf der Oberfläche ist die Überlagerung einer Bewegung zur Hauptschnitttrichtung beim Schleifen [DIN8589-13]. Insbesondere tribologisch hochbeanspruchte Flächen, wie beispielsweise die Funktionsflächen von Kurbel- und Nockenwellen werden bereits durch kinematisch modulierte Schleifprozesse bearbeitet [SUP13, GOE15].

Für die Bewertung der Einflüsse multidirektionaler Schleifspuren und Oberflächenstrukturen auf die Schmierbedingungen im Wälzkontakt können geeignete EHD-Simulationsmodelle verwendet werden. Mithilfe der numerischen Simulationen lassen sich die Kontakt- und Schmierbedingungen für Oberflächenstrukturen auf mikroskopischer Ebene analysieren und bewerten. Voraussetzung für die EHD-Simulation ist die numerische Simulation von erzeugbaren Oberflächenstrukturen. Mithilfe der simulierten Oberfläche lassen sich die Einflüsse der longitudinalen und transversalen Anteile der Feinstrukturen auf die Schmierbedingungen im Wälzkontakt identifizieren.

Die numerische Nachbildung der Schleifbearbeitung ist aufgrund unterschiedlicher Prozesskinematiken, zahlreicher Varianten von Schleifkörnern, Bindungen sowie weiterer Einflussgrößen sehr komplex. Die Simulation von Schleifprozessen kann dabei in zwei Hauptgebiete unterteilt werden, der kinematischen Durchdringungsrechnung und der physikalischen Zerspansimulation [VUC08a]. Eine Modellierung von 3D-Oberflächen wird in den dokumentierten Ansätzen vorrangig mithilfe von kinematischen Durchdringungsrechnungen realisiert [ZIT99, HEG00, KEM00]. Dafür wurden in Abhängigkeit der eingesetzten Werkzeugspezifikation unterschiedliche Modellbeschreibungen der mikro- und makroskopischen Schleifscheibengeometrie entwickelt und verwendet. Das Grundprinzip der kinematischen Durchdringungsrechnungen basiert auf der Berechnung der momentanen Durchdringung zwischen den einzelnen Schleifkörnern und dem Werkstück, wobei die Generierung und Positionierung der Schleifkörner durch eine sinnvolle Diskretisierung ermöglicht wird. Mithilfe einer geeigneten Modellierung der Schleifkorngometrie und -verteilung sowie der Bin-

dungseigenschaften der Schleifscheibe lassen sich Oberflächenstrukturen in Abhängigkeit der Prozesskinematik abbilden.

KEMPA [KEM00] entwickelte ein Schleifmodell zur Berechnung der Zerspanvorgänge beim Zahnflanken-Profileschleifen mit galvanisch-gebunden CBN-Schleifscheiben. Dafür wurde eine statistische Verteilung unterschiedlicher Korngeometrien bei der Schleifscheibenbelegung angenommen, um unterschiedliche und sich ständig ändernde Korngeometrien abbilden zu können. Das elastische Verhalten der Schleifscheiben wurde hierbei nicht berücksichtigt. ZITT [ZIT99] wählte für das Kornmodell einen ähnlich Ansatz unter zusätzlicher Berücksichtigung der Ausprägung des Bindungsrücken, wobei die Schleifscheibengeometrie für das Umfangsschleifen von rechteckigen Profilen ausgelegt wurde. Aus der statistischen Verteilung der Schleifkörner und den kinematischen Eingriffsverhältnissen ergibt sich die simulierte Werkstückoberfläche. Für die Reduzierung des Rechenaufwandes wurden die maximale Kontur und die Position des Kornes auf der Hüllfläche senkrecht zur Schleifrichtung ermittelt. Die Schleifsimulation nach HEGEMANN [HEG00] approximiert ebenfalls mithilfe einer in Schleifrichtung liegenden Projektion die dreidimensionalen Schleifkörner, welche in Form einer Ellipse nachgebildet sind. Dabei wird die 3D-Oberflächenstruktur des Werkstücks durch die Planschleifkinematik der jeweiligen Kornebenen erzeugt. ZHOU ET AL. [ZHO02] konnten ebenfalls erfolgreich eine dreidimensionale Werkstückoberflächentopographie simulieren, um die Oberflächenrauheit zu bestimmen. Ein Modell zur Erzeugung einer plan geschliffenen Oberfläche wurde auch von SALISBURY ET AL. [SAL01a] auf Basis eines Schleifscheibenmodells entwickelt. Anhand der simulierten Oberfläche konnten Oberflächenkennwerte bestimmt werden, die eine gute Übereinstimmung mit den geschliffenen Werkstückoberflächen gezeigt haben.

Die Schleifbearbeitung unter Berücksichtigung einer überlagerten Bewegung wurde bisher noch nicht modelliert. Voraussetzung für die Analyse des Einflusses von kinematisch modulierten Schleifprozessen auf die Oberflächenstruktur ist daher zunächst die Bereitstellung eines numerischen Modells zur Realisierung von 3D-Oberflächenstrukturen durch Bewegungsüberlagerungen. Die simulierte Oberflächenstruktur dient darüber hinaus als Eingangsgröße für EHD-Simulationen, um die Kontakt- und Schmierbedingungen für die multidirektionalen Schleifspuren analysieren und bewerten zu können.

## 6.2 Berechnungsmodell

Im Folgenden werden das im Rahmen dieser Arbeit genutzte Schleifscheiben- und Werkstückmodell sowie das kinematisch geometrische Modell für die numerische Simulation von erzeugbaren Oberflächenstrukturen vorgestellt. Der Aufbau und Ablauf zur Realisierung des kinematisch-geometrischen Modells für die Erzeugung von Oberflächenstrukturen ist in [Bild 6-1](#) dargestellt. Die programmtechnische Umsetzung des Simulationsmodells erfolgte in der Programmierumgebung Matlab der Fa. MATHWORKS GMBH, Aachen, Deutschland.

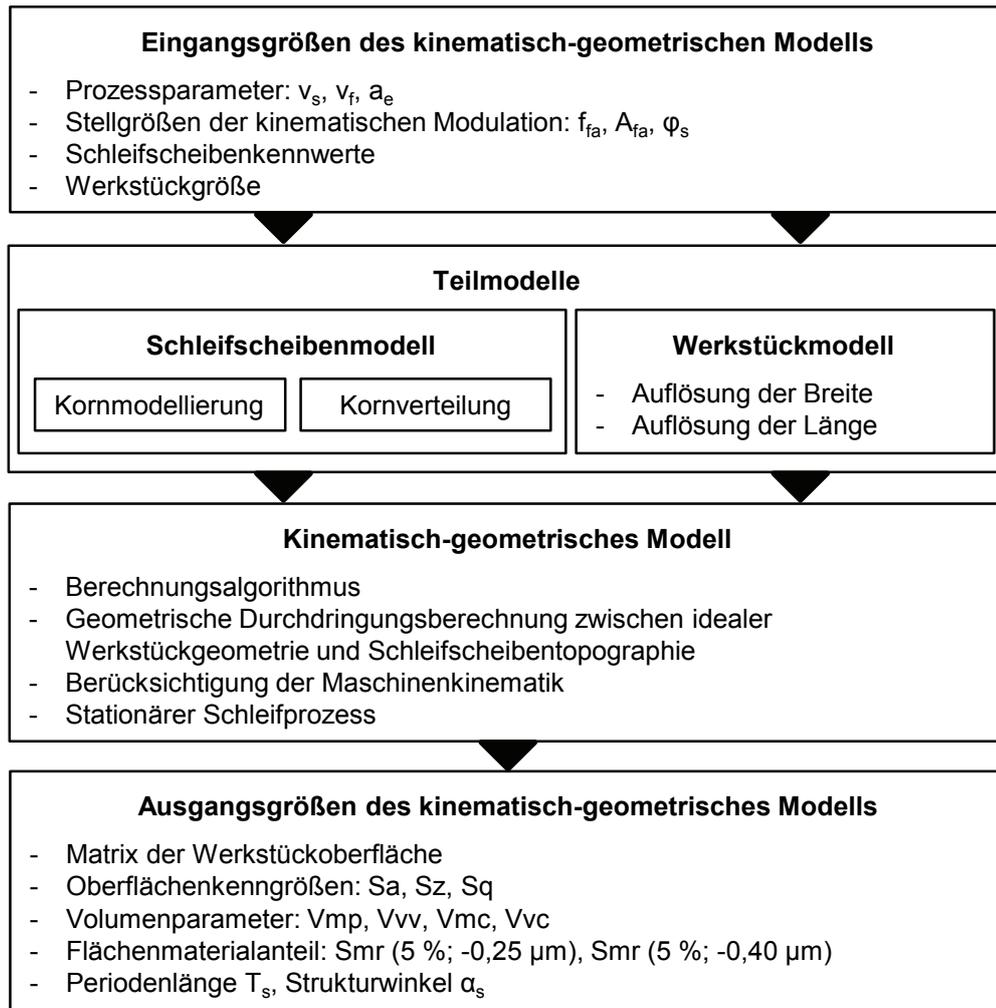


Bild 6-1: Aufbau des kinematisch-geometrischen Simulationsmodells

### Schleifscheibenmodell

Für die Modellierung der Schleifscheibentopographie bei kinematischen Durchdringungsrechnungen werden in der Literatur verschiedene Ansätze verfolgt, die sich im Wesentlichen bezüglich der Korngeometrie und Kornverteilung unterscheiden. Es werden häufig statistische Verteilungsfunktionen für die Korngröße, den Kornabstand und den Kornüberstand oder Ergebnisse aus Messungen der Schleifscheibenoberfläche verwendet [TÖN92, CHE96b, CHE96b, KOS97, WAR98, ZIT99, HEG00, KEM00, SAL01b, SAL01a, ZHO02, NGU05, DOM06, HER09, HOL12, JIA13, SIT14, HOL15, LI15b, LI15a]. Darüber hinaus wird häufig der Einfluss des Abrichtens in Form einer Änderung des Kornöffnungswinkels sowie des Kornüberstandes berücksichtigt [LAW73, CHE96a, CHE96c, CHE98, HEG00, DOM06, HER09].

Das verwendete Schleifscheibenmodell ist in [Bild 6-2](#) schematisch dargestellt. Die Schleifscheibe wird für die Simulation mit Radialsegmenten mit einem spezifischen Radius  $r_{s,i}$  approximiert, die über den Umfang entsprechend des Kornabstandes  $L_{g,i}$  verteilt sind. Die Mittelpunkte der Schleifscheibensegmente  $P_{M,i}$  sind auf der gemeinsamen Rotationsachse der Schleifscheibe angeordnet. Die Breite  $b_{s,i}$  der Schleifsegmente ergibt sich aus der Werkstückbreite  $b_w$  und der eingestellten Amplitude  $A_{fa}$  für die kinematische Modulation. Die Win-

kellage der Schleifscheibenrotationsachse zur Richtung der Vorschubgeschwindigkeit ist für die Simulation fest definiert.

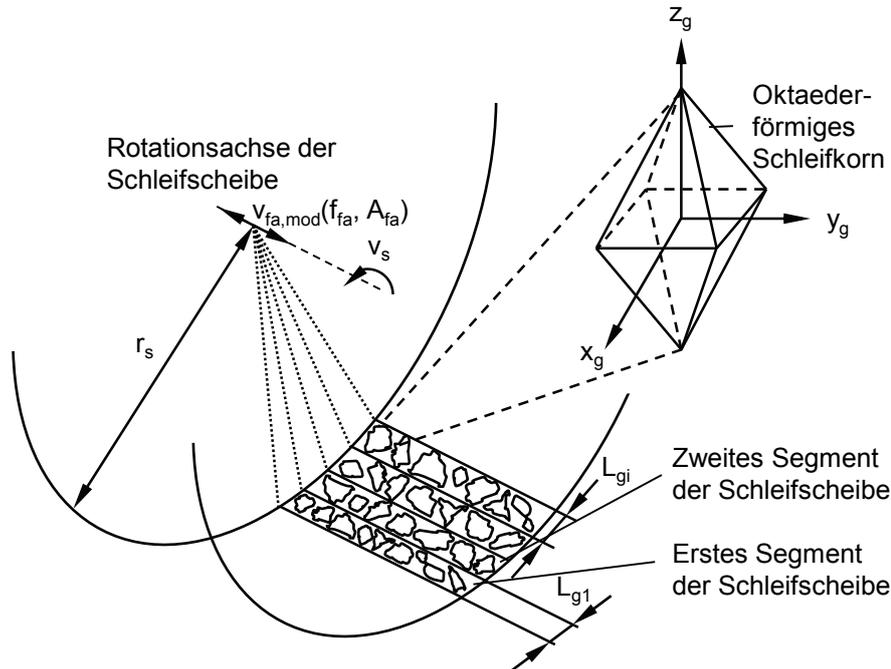


Bild 6-2: Schematische Darstellung des Schleifscheibenmodells

Die oktaederförmigen Schleifkörner mit der Korngröße  $d_g$  werden in jedem Schleifscheiben-segment mittels statistischer Verteilungsfunktion angeordnet, wobei Schneidenraumtiefe  $z$ , Schneidenabstand  $L_g$  und Ausrichtung der Schleifkörner variieren. In Anlehnung an YEGENOGLU [YEG86] und WERNER [WER94] wurde als Basisgeometrie der Körnung eine oktaederförmige Kornform in das Schleifscheibenmodell implementiert, bei dem als Seitenlänge der Grundfläche die mittlere Korngröße  $d_g$  gewählt wurde. Die Höhe des Oktaeders wird hierbei auf die Länge  $l_m$  reduziert, um den Einfluss der sehr spitzen Korngeometrie für die Simulation zu reduzieren.

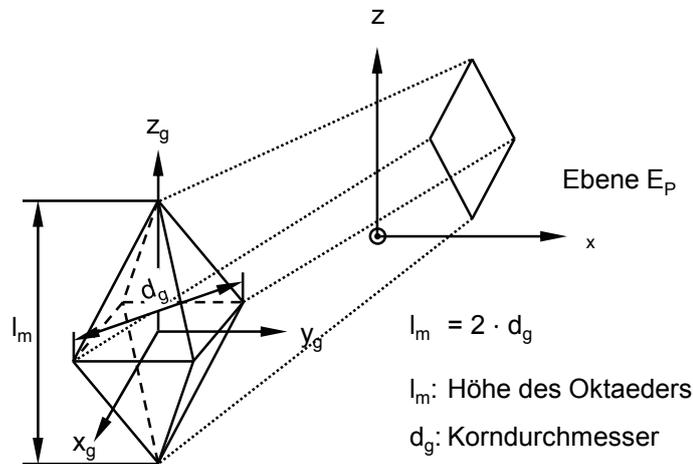
Zusätzlich wird die theoretische Korndichte  $c_k$  der Schleifscheibe in dem entwickelten Kornmodell berücksichtigt. Dafür erfolgt die Bestimmung des mittleren Kornabstandes  $L_g$  nach SCHLEICH [SLH82], die eine kubisch-flächenzentrierte Kornverteilung im Inneren der Schleifscheibe zugrunde legt:

$$L_g = \left( \frac{\sqrt{2}}{c_k} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

$$c_k = \frac{3 \cdot K}{q_m \cdot w_m^3} \quad (2)$$

Die Berechnung der theoretischen Korndichte  $c_k$  nach WARNECKE [WAR98] und ZITT [ZIT99] kann unter Berücksichtigung der Kornvolumenkonzentration  $K$  im Schleifbelag sowie des Volumens eines Abrasivkorns erfolgen. Das Kornvolumen ist dabei abhängig von der mittleren Maschenweite  $w_m$  und somit von der mittleren Korngröße  $d_g$ . Die Kornvolumenkonzentration  $K$  entspricht dabei der Konzentration  $C$  nach der FEPA-Norm [FEPA42-1, FEPA61-

2009]. Der Längsstreckungskoeffizient beträgt für dieses Kornmodell 1, da Höhen und Breiten diagonale des Oktaeders gleich lang sind. Aufgrund der Ausrichtungsvariation bei den Schleifkörnern ergeben sich verschiedene Eingriffsflächen der Abrasivkörner in Vorschubrichtung, die sich in der Projektionsebene  $E_P$  abbilden. Eine schematische Darstellung des Kornmodells kann dem [Bild 6-3](#) entnommen werden.



[Bild 6-3](#): Schematische Darstellung des Kornmodells

Für die Erzeugung von konventionell und kinematisch moduliert geschliffenen Oberflächenstrukturen besteht die Möglichkeit eine komplette Schleifscheibe vor Beginn der Simulation zu modellieren oder ein entsprechendes Schleifscheibenmodell aus einer Datenbank zu importieren. Mithilfe der gespeicherten Schleifscheibe lassen sich Simulationen zum kinematisch modulierten Schleifprozess unter Verwendung einer konstanten Schleifscheibentopographie realisieren, womit der Einfluss einer zusätzlichen Modulationsbewegung genau identifiziert werden kann.

### *Werkstückmodell*

Die Beschreibung des Werkstückes erfolgt mithilfe eines Dixelmodells. Dabei wird die Oberfläche als zweidimensionale Matrix der Größe  $m \times n$  mit äquidistanten, diskreten  $x$ - und  $y$ -Positionen modelliert, deren Einträge die Höhe der Oberfläche an den entsprechenden Stellen  $(x, y)$  repräsentieren. Die Vorteile des Dixelmodells gegenüber einem Voxelmodell liegen in dem Speicherbedarf [DEN11]. Zudem ist die Genauigkeit aufgrund des Einsatzes von Fließkommazahlen in Richtung der Dixel (depth elements) deutlich höher, was für eine zufriedenstellende Charakterisierung der Oberflächenstruktur Voraussetzung ist [DEN11]. Der Diskretisierungsgrad der Werkstückoberfläche kann mithilfe der Auflösung in  $x$ - und  $y$ -Richtung bestimmt werden [DEN11]. Eine geeignete Auflösung in Breiten- und Längsrichtung des Werkstücks ist unter Berücksichtigung der kinematischen Modulation auszuwählen. Eine schematische Darstellung des Werkstückmodells wird in [Bild 6-4](#) gezeigt.

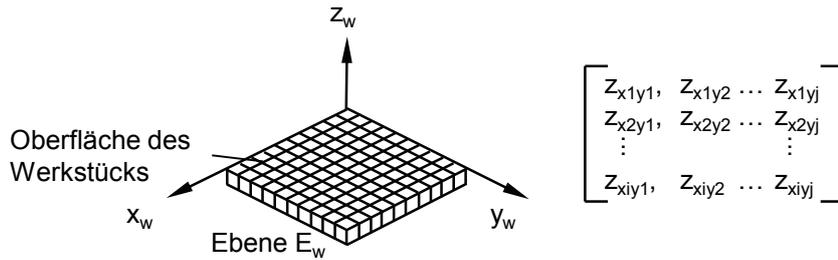


Bild 6-4: Schematische Darstellung des Werkstückmodells

### *Kinematisch-geometrisches Modell*

Im Folgenden soll die im Rahmen dieser Arbeit genutzte kinematisch-geometrische Modellierung diskutiert und beschrieben werden. Hierbei wurde aus Gründen der weniger komplexen Eingriffsbedingungen sowie der geringeren Rechenleistungen im Vergleich zum Rundschleifprozess ein kinematisch-geometrisches Modell für einen Planschleifprozess entwickelt. Mithilfe des äquivalenten Schleifscheibendurchmessers  $d_{eq}$  lassen sich die Kontaktbedingungen zwischen dem Rund- und Planschleifprozess angleichen. Dabei stellt die simulierte Oberflächenstruktur die abgewinkelte Umfangsfläche eines Lagerringes dar. Grundlage für die numerische Simulation ist die Diskretisierung der Schleifscheibe und des Werkstücks in Segmente und Punkte sowie die Abbildung der für die kinematische Modulation erforderlichen Geschwindigkeit. Die Durchdringungsbewegung wird dabei durch ein mathematisches Modell der Prozesskinematik abgebildet, welches die Relativbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück beschreibt.

In dem kinematisch-geometrischen Modell wird neben der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  die Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  als weitere Geschwindigkeit abgebildet. Die oktaederförmigen Schleifkörner der jeweiligen Segmente bewegen sich durch die Überlagerung der drei abgebildeten Geschwindigkeiten auf verschiedenen Korneingriffsbahnen. Dabei werden die modellierten 3D-Formen der Schleifkörner auf die Ebene  $E_{yz}$  projiziert und entsprechend der resultierenden Bewegung für das „i-te“ Schleifscheibensegment entlang ihrer Korneingriffsbahn bewegt, so dass die charakteristischen Ritzspuren entstehen. Die entstehende Oberflächenstruktur setzt sich aus der Superposition der Durchdringung aller betrachteten Schleifscheibensegmente mit dem Werkstück zusammen. Das Simulationsergebnis des kinematisch modulierten Schleifprozesses nähert sich hierbei mit einer Güte an, die von der Feinheit der Schleifscheibensegmente sowie des Diskretisierungsgrades des Werkstücks abhängt. Elastische und plastische Verformungen bei der Spanbildung sowie der Schleifscheibenverschleiß und die Maschinensteifigkeit wurden bei der Simulation nicht berücksichtigt. Eine schematische Darstellung des kinematisch-geometrischen Modells kann dem Bild 6-5 entnommen werden.

### Geschwindigkeitsvektor aus 3 Komponenten

- $v_f$ : Vorschubgeschwindigkeit
- $v_s$ : Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit
- $v_{fa,mod}(f_{fa}, A_{fa})$ : Modulationsgeschwindigkeit

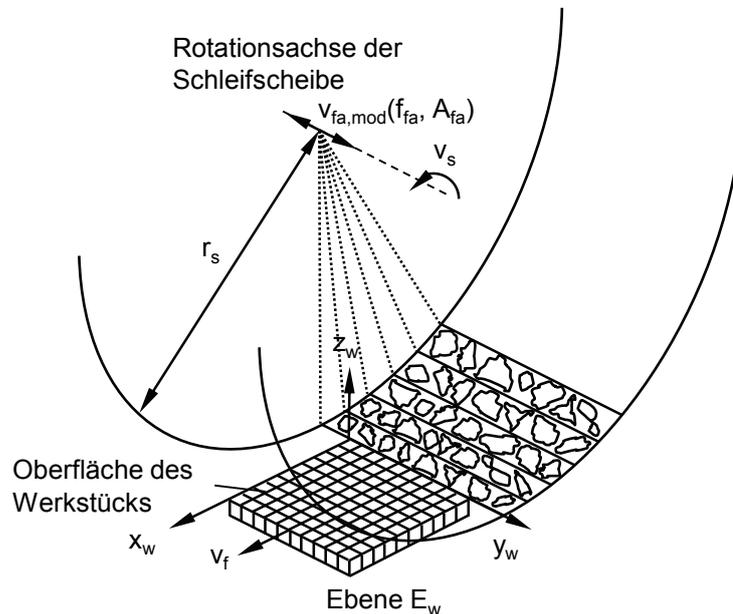


Bild 6-5: Schematische Darstellung des kinematisch-geometrischen Modells

Unter Verwendung des entwickelten Simulationsprogrammes kann systematisch der Variationseinfluss der kinematischen Modulation beim Schleifen auf die Oberflächenstruktur und Oberflächenkennwerte untersucht und bewertet werden. Insbesondere die Veränderung der Oberflächenkennwerte und des Strukturwinkels  $\alpha_s$  lassen sich anhand der numerischen Simulation untersuchen. Dabei werden für die Charakterisierung der Oberflächentopographie die 3D-Kenngrößen  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  sowie die Kenngrößen des flächenhaften Materialanteils  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$  und  $V_{vv}$  bestimmt. So kann ein möglichst geringes Spitzenvolumen  $V_{mp}$  bei einem gleichzeitig hohen Anteil an Riefenvolumen  $V_{vv}$  vorteilhaft für den Schmierstoffvorrat sowie für die Kontaktbedingungen zwischen Wälzpartnern sein. Darüber hinaus wurde der Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) für alle erzeugten Oberflächenstrukturen bestimmt, wobei dieser Kennwert jeweils unterhalb einer Referenz von 5 % Flächenmaterialanteil und in einer Tiefe von  $c = -0,250 \mu\text{m}$  bestimmt wird.

### 6.3 Plausibilitätsprüfung

Im folgenden Abschnitt wird zunächst das entwickelte Simulationsmodell für den kinematisch modulierten Schleifprozess mithilfe einer Plausibilitätsüberprüfung auf Korrektheit überprüft. Dafür werden die Stellgrößen für einen konventionellen Schleifprozess variiert, um deren Einfluss auf die Oberflächenparameter zu identifizieren. Die Verifikation des numerischen Simulationsmodells erfolgt im Kapitel 7.3 anhand experimenteller Untersuchungen. Darüber hinaus erfolgt eine Variation der Kenngrößen des Schleifscheibenmodells, mit denen der Einfluss des modellierten Werkzeugs auf die Oberflächenkennwerte überprüft wird. Im An-

schluss werden beispielhaft jeweils eine Versuchsreihe für die drei Stellgrößen der kinematischen Modulation simuliert, um den Einfluss der Modulationsbewegung auf die Oberflächenstruktur qualitativ und quantitativ zu bewerten. Dafür wird zunächst eine entsprechende Schleifscheibe modelliert und gespeichert, mit der die drei Versuchsreihen durchgeführt werden. Somit lassen sich die Einflüsse aus der stochastischen Anordnung der Schleifkörner reduzieren und ein Einsatz der kinematischen Modulation bei der Schleifbearbeitung hinsichtlich der sich einstellenden Oberflächenstruktur und -kennwerte auf Plausibilität zu bewerten.

*Variation der Prozesskenngrößen*

Zunächst erfolgte eine Plausibilitätsprüfung für das kinematisch-geometrische Modell anhand einer Variation der Stellgrößen Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$ , Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  und Zustellung  $a_e$ . Die Tendenzen in Abhängigkeit der Stellgrößenvariation sind in Tabelle 6-1 aufgelistet, welche mit der verbundenen Änderung der Eingriffsbedingungen erklärt werden können und somit erwartungsgemäß die Zusammenhänge aus der Literatur widerspiegeln [KLO05, DEN11, SPU14].

Tabelle 6-1: Plausibilitätsüberprüfung für die Kenngrößen des Prozesses

Versuch	Stellgrößen	Variation	Oberflächenauheit Ra / Sa
1	Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit $v_s$	35 m/s → 70 m/s	↓
2	Vorschubgeschwindigkeit $v_f$	100,8 mm/min → 201,6 mm/min	↑
3	Zustellung $a_e$	20 $\mu$ m → 40 $\mu$ m	↑

*Variation der Schleifscheibenkenngößen*

Darüber hinaus stellt das Schleifscheibenmodell eine wichtige Einflussgröße auf das kinematisch-geometrische Modell dar, sodass eine gezielte Variation der Schleifscheibenkenngößen für die Plausibilitätsprüfung erforderlich ist. Bei konstanten Prozessparametern wurde der Einfluss von vier Stellgrößen des Schleifscheibenmodells auf den arithmetischen Mittelwert der Profilordinaten Ra bzw. arithmetischen Mittelwert der Flächenordinaten Sa untersucht. Dabei wurde eine Erhöhung der Korndurchmesser  $d_g$  und der Konzentration C sowie der Einbettungstiefe der Schleifkörner und der Standartabweichung der stochastischen Verteilung  $\sigma_g$  realisiert. Tabelle 6-2 stellt eine Übersicht der Plausibilitätsüberprüfung für die Kenngrößen des Schleifscheibenmodells dar. Die Tendenzen in der Oberflächenrauheit in Abhängigkeit der Schleifscheibenspezifikationen spiegeln weitestgehend die dokumentierten Zusammenhänge aus der Literatur wider [KLO05, DEN11, SPU14, SAM16].

Tabelle 6-2: Plausibilitätsüberprüfung für die Kenngrößen des Schleifscheibenmodells

Versuch	Stellgrößen	Variation	Rauheit Ra / Sa
1	Korndurchmesser $d_g$	126 $\mu\text{m}$ $\rightarrow$ 252 $\mu\text{m}$	$\uparrow$
2	Konzentration C	75 $\rightarrow$ 100	$\downarrow$
3	Einbettungstiefe der Schleifkörner	50 % $\rightarrow$ 70 %	$\downarrow$
4	Standardabweichung $\sigma_g$	4 % $\rightarrow$ 8 %	$\uparrow$

Mit einem ausgewählten Schleifscheibenmodell lässt sich eine Simulation zum kinematisch modulierten Schleifen durchführen. Anhand der numerisch modulierten Oberflächenstruktur können im Anschluss 2D- und 3D-Oberflächenkennwerte sowie die Strukturkennwerte der Oberfläche bestimmt werden. Ein Beispiel für eine simulierte Oberflächenstruktur für einen kinematisch modulierten Schleifprozess ist in Bild 6-6 abgebildet. Deutlich lässt sich der Einfluss der kinematischen Modulation in der Oberflächenstruktur erkennen, die zu veränderten Korneingriffsbahnen und somit zu einer Veränderung der Schleifriefen führt. Diese hat eine Mikrostrukturierung der Oberfläche zur Folge, die mithilfe des Strukturwinkels  $\alpha_s$  und der Periodenlänge  $T_s$  charakterisiert werden kann.

**Arbeitsergebnis**

**Oberflächenkennwerte**

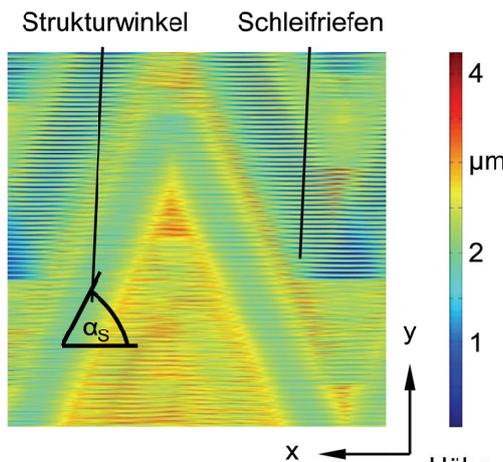
Sa = 0,45  $\mu\text{m}$   
 Sz = 4,82  $\mu\text{m}$   
 Sq = 0,60  $\mu\text{m}$

**Abbott-Kurven-Kennwerte**

Sk = 1,22  $\mu\text{m}$   
 Spk = 0,42  $\mu\text{m}$   
 Svk = 1,07  $\mu\text{m}$

**Strukturkennwerte**

$T_s$  = 3,36  $\mu\text{m}$   
 $\alpha_s$  = 49,99  $^\circ$



**Simulationsmodell**

**Schleifscheibe**

$r_s$  = 71 mm  
 $d_g$  = 200  $\mu\text{m}$   
 C = 100

**Prozessparameter**

$v_f$  = 100,8 mm/min  
 $v_s$  = 35 m/s  
 $a_e$  = 20  $\mu\text{m}$   
 $f_{fa}$  = 0,5 Hz  
 $A_{fa}$  = 1 mm  
 $\phi_s$  = 0  $^\circ$

**Auflösung**

x-Achse: 300 Punkte/mm  
 y-Achse: 1000 Punkte/mm

Bild 6-6: Beispiel für eine simulierte Oberflächenstruktur durch einen kinematisch modulierten Schleifprozess

Beim Vergleich der Ergebnisse aus den Simulationen der Schleifbearbeitung mit und ohne kinematischer Modulation in Bild 6-7 wird ein Unterschied in der Oberflächenstruktur deutlich. Während die Simulation mit konventioneller Bearbeitung unidirektionale Schleifspuren aufweist, lassen sich multidirektionale Schleifspuren durch einen kinematisch modulierten Prozess realisieren. Darüber hinaus können mithilfe der kinematischen Modulation die maximalen Rautiefen  $R_{max}$  deutlich reduziert werden, was sich in der Auswertung der maximalen Höhe der Oberfläche Sz widerspiegelt.

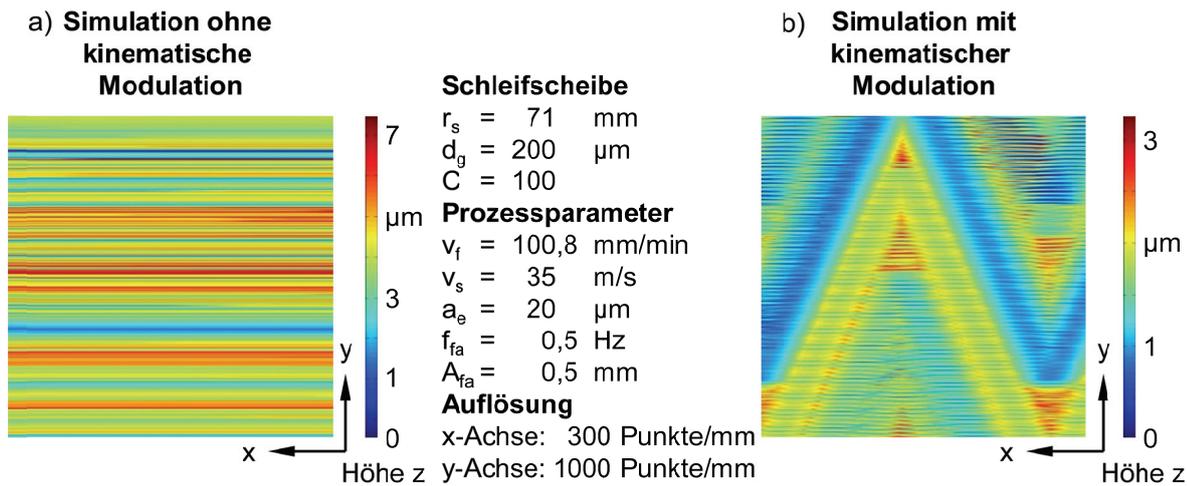


Bild 6-7: Simulationsmodell; a) ohne kinematische Modulation; b) mit kinematischer Modulation

### Variation der Frequenz $f_{fa}$

Eine Variation der Frequenz  $f_{fa}$  wird beispielhaft für die Amplitude  $A_{fa} = 1 \text{ mm}$  modelliert, wobei Prozessstellgrößen konstant gehalten und die Prozesse jeweils nur für eine Werkstückgeschwindigkeit  $v_w$  simuliert werden. Eine Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  führt zu einer Erhöhung der Modulationsgeschwindigkeit  $v_{f,mod}$  und des Strukturwinkels  $\alpha_s$  bei gleichzeitiger Verringerung der Periodenlänge  $T_s$ . Die simulierten Oberflächenstrukturen unter Variation der Frequenz  $f_{fa}$  bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung können dem Bild 6-8 entnommen werden. Deutlich ist ein Einfluss der kinematischen Modulation auf die Oberflächenstruktur erkennbar. Aufgrund der Modulationsbewegung der Schleifscheibe entstehen multidirektionale Schleifspuren auf der Werkstückoberfläche, die vorrangig durch die exponierten Abrasivkörner der Schleifscheibe erzeugt werden. Auffällig ist die Strukturänderung der Oberflächen ab einer Frequenz  $f_{fa} = 2,0 \text{ Hz}$ , was auf die geringere Überlappung der Korneingriffsbahnen der exponierten Abrasivkörner aufgrund einer höheren Modulationsgeschwindigkeit  $v_{f,mod}$  bei gleichzeitig größerem Strukturwinkel  $\alpha_s$  zurückgeführt werden kann. Ab dieser Frequenz  $f_{fa}$  ist der Strukturwinkel  $\alpha_s$  auf der Werkstückoberfläche auch nicht mehr eindeutig erkennbar.

Neben der visuellen Darstellung lassen sich darüber hinaus die simulierten Oberflächen mithilfe der 3D-Oberflächenkennwerte charakterisieren und vergleichen, siehe Bild 6-9. Der signifikante Einfluss der kinematischen Modulation im Vergleich zur herkömmlich geschliffenen Oberfläche wird anhand der Kennwerte deutlich. Eine Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  ist bis zu einer Frequenz  $f_{fa} = 1,5 \text{ Hz}$  erkennbar, wohingegen eine weitere Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  zu keiner weiteren signifikanten Änderungen führt. Weiterhin lässt sich ein Erhöhung des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5%;  $-0,250 \text{ }\mu\text{m}$ ) um ca. 100 % beim Einsatz einer kinematischen Modulation beobachten. Im Hinblick auf die Schmiereigenschaften im tribologischen Kontakt kann ein geeignetes Verhältnis für die Volumenparameter  $V_{mp}$  und  $V_{vv}$  bei der Frequenz  $f_{fa} = 2,34 \text{ Hz}$  feststellen werden, was mithilfe von EHD-Simulationen bestätigt werden könnte. Die verbesserte Oberflächenqualität beim Einsatz einer kinematischen Modulation scheint aufgrund der veränderten Korneingriffsbahnen plausibel, wodurch sich die unidirektionalen Schleifspuren verändern und die Oberflächenkenn-

werte verringern. Die geringen Unterschiede zwischen den untersuchten Frequenzen  $f_{fa}$  lassen sich auf die nicht Berücksichtigung elastischer und plastischer Verformungen bei der Spanbildung sowie der Maschinenbeschleunigungen zurückführen.

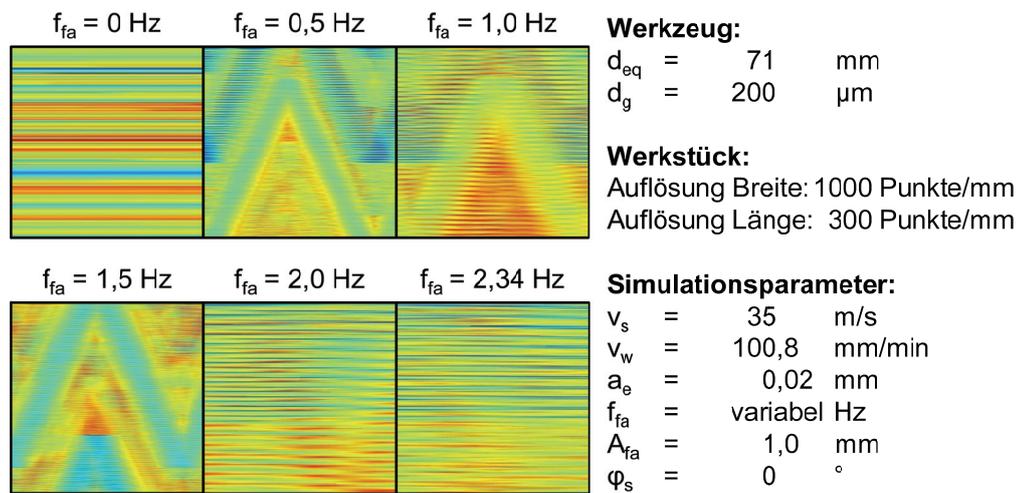


Bild 6-8: Simulierte Oberflächenstrukturen bei Variation der Frequenz  $f_{fa}$  bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung

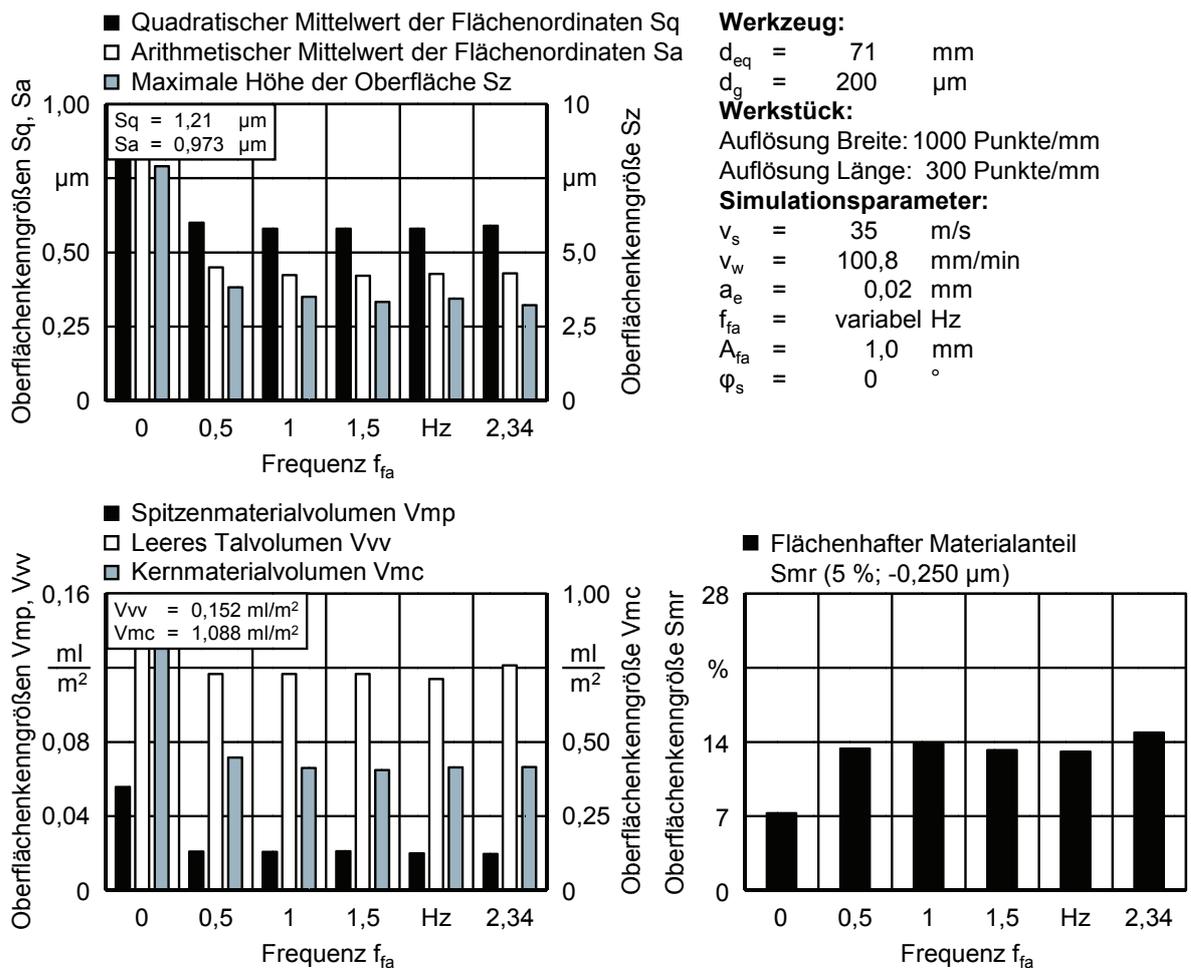


Bild 6-9: Simulationsergebnisse zum Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung

Variation der Amplitude  $A_{fa}$

Neben dem Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  lässt sich mithilfe der Simulation ebenfalls der Einfluss einer Variation der Amplitude  $A_{fa}$  bestimmen. Als Beispiel wird hierfür eine Frequenz  $f_{fa} = 1,5$  Hz gewählt, wobei die Prozessparameter und die Auflösung des Werkstücks konstant bleiben. Eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  führt zu einem Anstieg der Modulationsgeschwindigkeit  $v_{f,mod}$  und des Strukturwinkels  $\alpha_s$ , wobei die Periodenlänge  $T_s$  über alle Simulationsversuche konstant bleibt Bild 6-10 zeigt die simulierten Oberflächenstrukturen in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung. Deutlich wird anhand der Bilder zunächst, dass die Oberflächenstruktur in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  qualitativ sehr ähnlich bleibt, was aufgrund gleicher Periodenlängen  $T_s$  bei den Versuchen plausible erscheint.

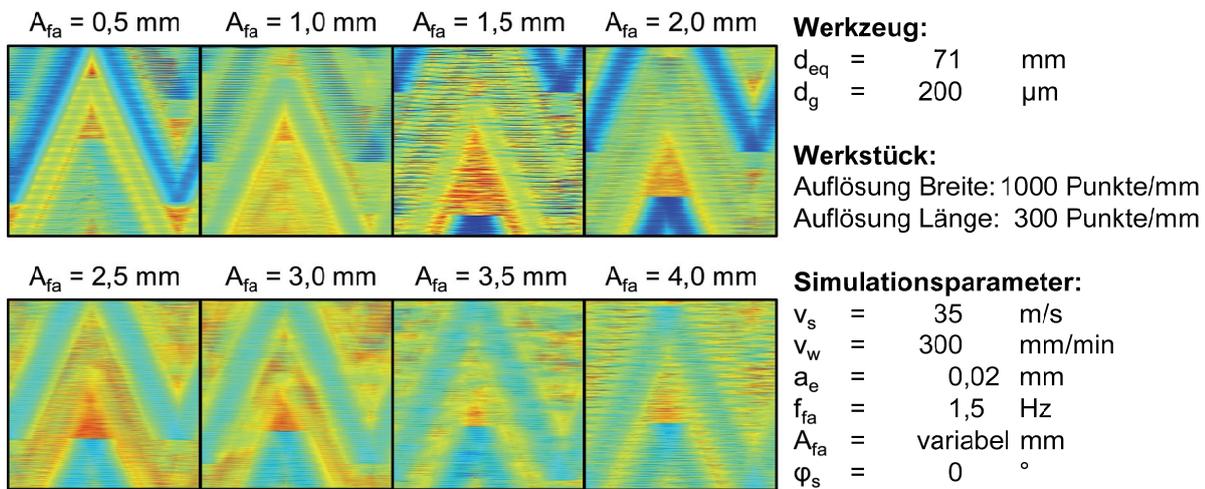


Bild 6-10: Simulierte Oberflächenstrukturen bei Variation der Amplitude  $A_{fa}$  bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung

Bei Betrachtung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  werden hingegen signifikante Unterschiede sichtbar (Bild 6-11). So lässt sich die Oberfläche des Werkstücks mithilfe einer kinematischen Modulation mit  $A_{fa} = 0,5$  mm deutlich verbessern. Eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  von 0,5 mm bis 1,5 mm führt zu einer Erhöhung der Oberflächenkennwerte, wobei diese immer noch deutlich unter den Kennwerten des Referenzversuches liegen. Eine weitere Erhöhung der Amplitude bringt keine weitere Veränderung der Oberflächenkennwerte. Ein Anstieg des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5%;  $-0,250$   $\mu$ m) um ca. 100 % kann auch für diese Simulationsversuche beobachtet werden. Im Hinblick auf die Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  lassen sich wie bei den Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  die niedrigsten Werte ebenfalls bei einer Amplitude  $A_{fa} = 0,5$  mm erkennen. Beim kinematisch modulierten Schleifen mit der Amplitude  $A_{fa} = 1$  mm ist jedoch im Vergleich zu den anderen Versuchen ein hohes leeres Talvolumen  $V_{vv}$  bei gleichem Spitzenmaterialvolumen  $V_{mp}$  festzustellen, was sich positiv auf die Schmierbedingungen im EHD-Kontakt äußern könnte. Das vergrößerte Talvolumen  $V_{vv}$  könnte sich vorteilhaft für eine Ölspeicherung eignen. Eine genaue Charakterisierung der Oberflächenstruktur hinsichtlich des tribologischen Verhaltens kann jedoch nur mithilfe einer EHD-Simulation durchgeführt werden.

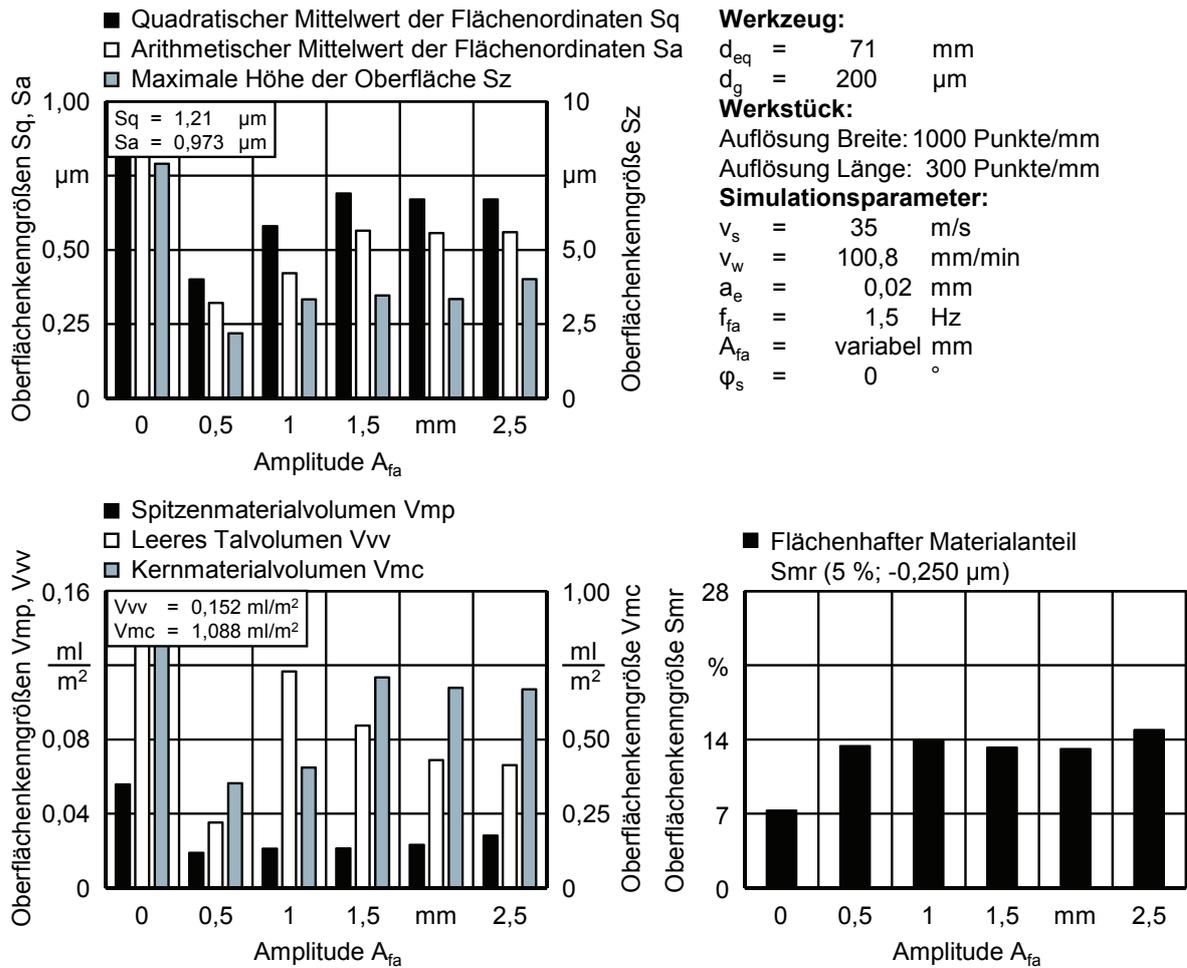
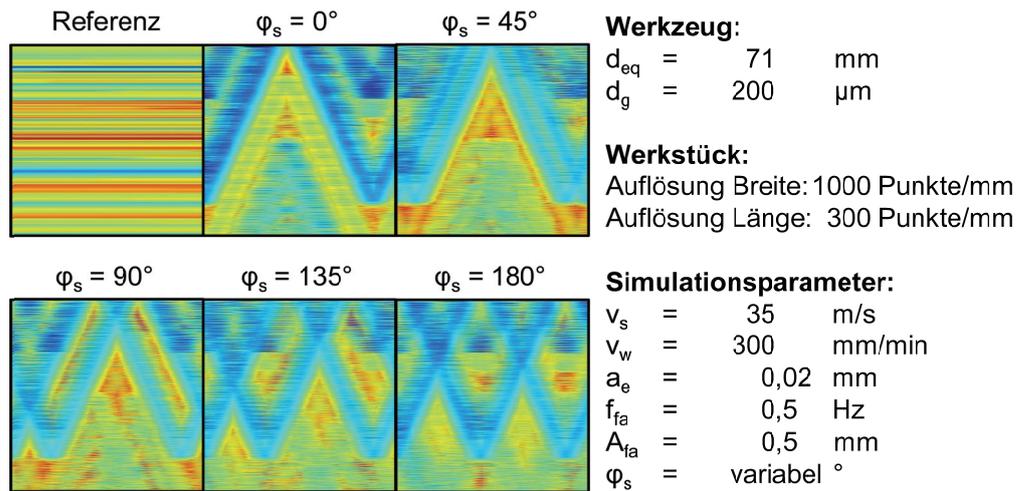


Bild 6-11: Simulationsergebnisse zum Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung

*Variation der Phasenverschiebung  $\phi_s$*

Eine Erzeugung von gekreuzten Schleifriefen auf der Oberfläche kann mithilfe eines mehrfachen Überlaufs beim kinematisch modulierten Schleifprozess bei gleicher Zustellung  $a_e$  und einer gezielten Phasenverschiebung  $\phi_s$  erzielt werden, was in einer plateauartigen Oberfläche mit Mikrodruckkammern resultieren kann. Aus diesem Grund ist die Simulation des Einflusses einer Variation der Phasenverschiebung  $\phi_s$  von großer Bedeutung. Insbesondere eine bildliche Darstellung der simulierten Oberflächenstrukturen hinsichtlich der gekreuzten Schleifriefen ist von Interesse, siehe Bild 6-12.

Eine zusätzliche Phasenverschiebung  $\phi_s$  führt zu einer deutlichen Veränderung der Oberflächenstruktur. Durch die phasenverschobene Kombination der Strukturierung kommt es in Abhängigkeit des Winkels  $\phi_s$  zu einer plausiblen Durchkreuzung von Teilbereichen der Einzelstrukturen, was eine Verringerung der Rauheitskennwerte zur Folge haben kann. Die Realisierung einer plateauartigen Oberfläche mithilfe einer geeigneten Phasenverschiebung  $\phi_s$  könnte positive Auswirkungen auf die tribologischen Eigenschaften sowie das Einlaufverhalten der funktionalen Oberfläche haben.



**Bild 6-12:** Simulierte Oberflächenstrukturen bei Variation der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung

Weiterführend lässt sich neben dem visuellen Vergleich der unterschiedlichen Oberflächenstrukturen der Einfluss der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung auf die Oberflächen anhand von Kennwerten charakterisieren, siehe [Bild 6-13](#). Eine leichte Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_q$  um ca. 15 % lässt sich mit steigender Phasenverschiebung  $\varphi_s$  bis  $90^\circ$  erkennen. Dieser Zusammenhang spiegelt sich zum Teil auch in dem Verlauf der Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  wider. Als Grund kann die Durchkreuzung der Teilbereiche beider Einzelstrukturen genannt werden, die zu einer plausiblen Reduzierung der Rauheitsspitzen führt. Im Hinblick auf den flächenhaften Materialanteil  $S_{mr}$  (5%;  $-0,250 \text{ }\mu\text{m}$ ) lassen sich keine signifikanten Änderungen in Abhängigkeit der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  des kinematisch modulierten Schleifprozesses erkennen. Die geringen Unterschiede zwischen den Phasenverschiebung  $\varphi_s = 45 - 180^\circ$  lassen sich wiederum auf die nicht Berücksichtigung elastischer und plastischer Verformungen bei der Spanbildung zurückführen.

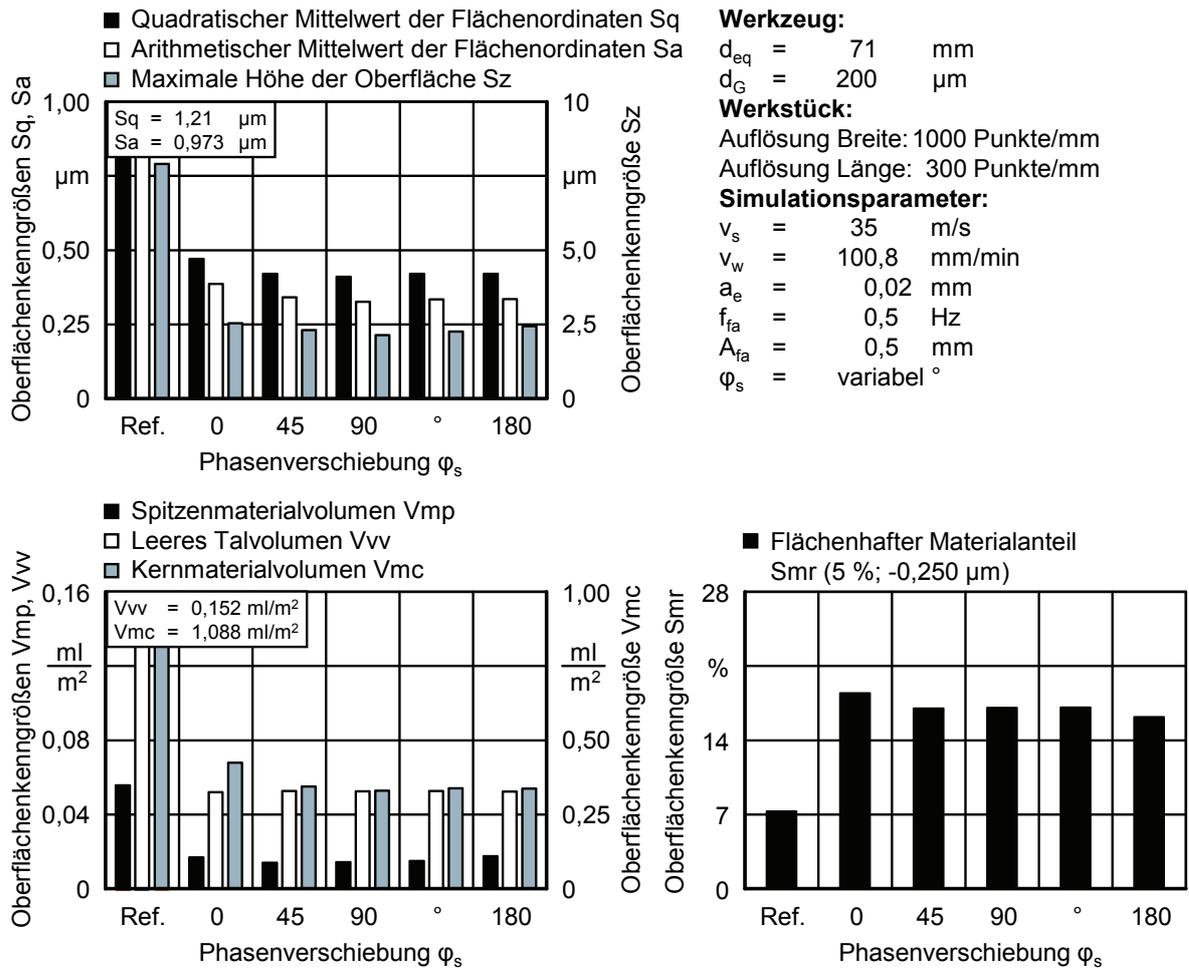


Bild 6-13: Simulationsergebnisse zum Einfluss der Variation der Phasenverschiebung  $\phi_s$  auf die Oberflächenkennwerte bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung

---

## 7 Analogieprozess für das kinematisch modulierte Verzahnungsschleifen

In diesem Hauptkapitel werden die Randbedingungen für den Analogieprozess zum kinematisch modulierten Verzahnungsschleifen beschrieben und die Ergebnisse aus den technologischen Untersuchungen vorgestellt. Für den Analogieprozess wird ein kinematisch modulierter Quer-Umfangs-Außen-Rundschleifprozess gewählt, für den zunächst das NC-Maschinenprogramm entwickelt werden musste. Im Folgenden wird dieser Prozess vereinfachend als kinematisch modulierte Rundschleifen bezeichnet. Im Rahmen der technologischen Untersuchungen wird neben der Variation der Stellgrößen für die kinematisch modulierte Schleifbearbeitung der Einfluss des Konditionierprozesses sowie der Schleifscheibenspezifikation auf die Oberflächenstruktur und Oberflächenkennwerte analysiert. Abschließend wird auf Basis der Versuchsergebnisse ein empirisches Prozessmodell zur Bestimmung der Oberflächenkennwerte für den Einsatz einer konventionellen Schleifscheibe beim kinematisch modulierten Rundschleifen erstellt.

### 7.1 Randbedingungen

Für die technologischen Untersuchungen zum Analogieprozess für das kinematisch modulierte Verzahnungsschleifen wurde zunächst ein Maschinenprogramm für die Bearbeitung von Lagerringen auf der Zahnrad-Profileschleifmaschine ZE 800 der Fa. NILES WERKZEUGMASCHINEN GMBH, Berlin, Deutschland, entwickelt. Zudem wurde auch ein Maschinenprogramm für eine kinematisch modulierte Rundschleifbearbeitung auf der Universal-Rundschleifmaschine PF 51 der Fa. SCHAUDT MIKROSA BWF GMBH, Stuttgart, Deutschland, erarbeitet. Die entwickelten NC-Programme ermöglichen neben der Eingabe von gängigen Stellgrößen für das Rundschleifen die variable Eingabe von Frequenz  $f_{fa}$ , Amplitude  $A_{fa}$ , Periodenlänge  $T_s$  sowie Phasenverschiebung  $\varphi_s$ . Dabei wird die gewünschte Periodenlänge  $T_s$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  über die Anpassung der Werkstückdrehzahl  $n_w$  realisiert, wobei die Periodenlänge  $T_s$  auf ganzzahlige Vielfache des Werkstückumfangs begrenzt wird (siehe Formel 3).

$$n_w = \frac{f_{fa} \cdot 60 \cdot T_s}{\{Z\}(2 \cdot \pi \cdot (r_w - a_e))} \quad (3)$$

Die Erzeugung der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  kann einerseits durch Anpassung der Startposition der Werkstückachse und andererseits durch eine entsprechende Aufteilung der Periodenlänge  $T_s$  realisiert werden. Voraussetzung für die kinematisch modulierte Schleifbearbeitung ist hierbei, dass die Schleifscheibenbreite  $b_s$  mindestens um den zweifachen Betrag der eingestellten Amplitude  $A_{fa}$  größer sein muss als die Eingriffsbreite der Schleifscheibe  $a_p$ . Eine Prinzipskizze des kinematisch modulierten Rundschleifprozesses kann dem [Bild 7-1](#) entnommen werden.

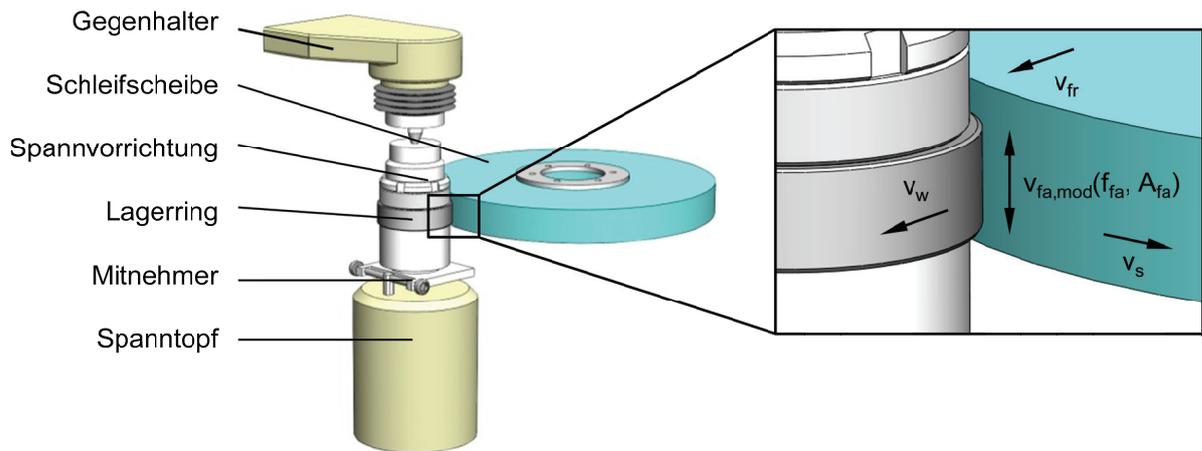


Bild 7-1: Prinzipskizze des kinematisch modulierten Rundschleifprozesses

Aus der entwickelten Prozesskinematik lassen sich die charakteristischen Kenngrößen der kinematischen Modulation ableiten, die beispielhaft für eine Periode im Bild 7-2 dargestellt sind. Dabei kann unter der Annahme keiner Beschleunigungs- und Bremsverluste der Maschinenachsen von einer Dreiecksschwingung ausgegangen werden, die sich mithilfe der Amplitude  $A_{fa}$  und der Periodenlänge  $T_s$  beschreiben lässt. Die Periodenlänge  $T_s$  ist dabei anhängig von der Frequenz  $f_{fa}$  und der eingestellten Werkstückgeschwindigkeit  $v_w$ . Darüber hinaus ergibt sich ein Strukturwinkel  $\alpha_s$  für die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen, der sich in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  und der Periodenlänge  $T_s$  bestimmen lässt, siehe Bild 7-2.

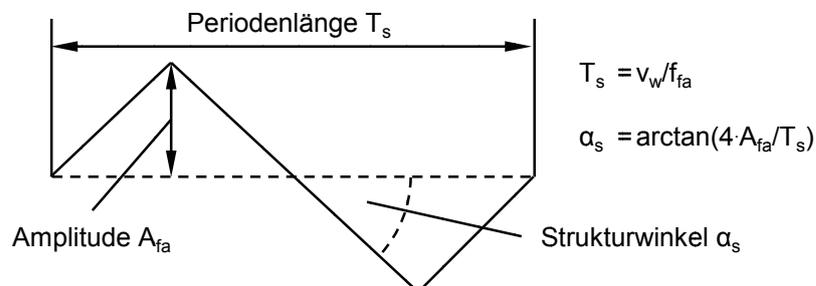


Bild 7-2: Charakteristische Kenngrößen der kinematischen Modulation

Für den entwickelten kinematisch modulierten Rundschleifprozess lassen sich neben den konventionellen Prozessstellgrößen die Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  verändern, die Einfluss auf die Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  und somit auf die Eingriffsverhältnisse der Schleifkörner haben (Formel 4). Dabei ist die Kombination aus Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  beim Rundschleifen mit kinematischer Modulation durch das Beschleunigungsverhalten der jeweiligen Maschinenachsen limitiert. Dafür stehen in der Steuerung Sinumerik 840D der Fa. SIEMENS AG, München, Deutschland, verschiedene Beschleunigungsmodi zur Verfügung, mit denen das Beschleunigungsverhalten der Einzelachsen bzw. Bahnachsen verändert werden kann [SIE03, SIE06, SIE08, SIE12].

$$v_{fa,mod} = 4 \cdot A_{fa} \cdot f_{fa} \cdot 60 \cdot K_s \quad (4)$$

Die Ruckbegrenzung beim Beschleunigungsverhalten lässt sich mithilfe der BRISK- und SOFT-Modi anpassen. Im BRISK-Modus verfahren die Maschinenachsen mit maximaler Beschleunigung bis zum Erreichen der programmierten Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  (Beschleunigung ohne Ruckbegrenzung), wohingegen im SOFT-Modus die Maschinenachsen mit stetiger Beschleunigung bis zum Erreichen der programmierten Vorschubgeschwindigkeit (Beschleunigung mit Ruckbegrenzung) verfahren. Der BRISK-Modus ermöglicht hierbei ein zeitoptimales Arbeiten mit Sprüngen im Beschleunigungsverlauf. Bei dieser Einstellung werden weder die maximal auftretenden Abweichungen noch der maximale Überschleifweg kontrolliert. Die sich ergebenden Abweichungen bestimmen sich aus den dynamischen Grenzwerten der jeweiligen Maschinenachse und der aktuellen Bahngeschwindigkeit. Mit dem SOFT-Modus lassen sich dagegen höhere Bahngenaugigkeiten realisieren und darüber hinaus ist die Maschinenbelastung während der Bearbeitung deutlich geringer [SIE03, SIE06, SIE08, SIE12]. Eine Prinzipskizze für einen beispielhaften Verlauf der Bahngeschwindigkeit im BRISK- und SOFT-Modus ist in Bild 7-3 dargestellt.

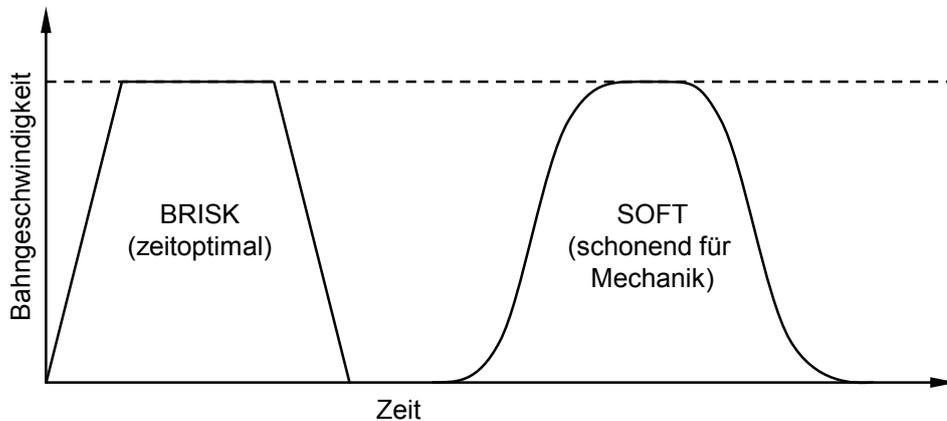


Bild 7-3: Verlauf der Bahngeschwindigkeit im BRISK und SOFT-Modus der Maschinensteuerung [SIE08]

In Abhängigkeit des eingestellten Beschleunigungsmodus sowie der eingestellten Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  lassen sich unterschiedliche Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  realisieren. Für beide Maschinensysteme wurden dementsprechend die Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  für beide Beschleunigungsmodi bestimmt, um die maschinenbedingten Prozessgrenzen für die kinematisch modulierten Schleifbearbeitungen zu identifizieren. Dafür wurde im NC-Programm eine mechanisch nicht realisierbare Frequenz eingegeben, so dass die Modulationsbewegung mit einer amplitudenabhängigen Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  durchgeführt wird. Mithilfe der maschinenintegrierten Software Servo Trace der Fa. SIEMENS AG, München, Deutschland, wird dann der zeitliche Verlauf der Maschinenachseposition aufgezeichnet und die Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  bestimmt. Im Anschluss werden für die entsprechenden Stellgrößenkombinationen die jeweiligen Korrekturfaktoren  $K_s$  bestimmt, um die eingestellte theoretische Frequenz  $f_{fa}$  an die tatsächlich realisierbare Frequenz  $f_{fa}$  anzupassen.

*Zahnrad-Profilschleifmaschine ZE 800*

Die maschinenbedingten Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  für die Zahnrad-Profilschleifmaschine ZE 800 der Fa. NILES WERKZEUGMASCHINEN GMBH, Berlin, Deutschland, wurden für den Amplitudenbereich von  $A_{fa} = 0,5$  mm bis  $A_{fa} = 4$  mm jeweils im SOFT- und BRISK-Modus wie beschrieben ermittelt. Bild 7-4 stellt die Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für die Zahnrad-Profilschleifmaschine dar. Eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  führt zu einem regressiven Verlauf der Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$ . In Bezug auf die Beschleunigungsmodi lässt sich kein signifikanter Einfluss feststellen. Es werden leicht höhere Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  im BRISK Modus für kleine Amplituden  $A_{fa}$  erreicht, da bei kurzen Verfahrbewegungen die Beschleunigungsstrecken gegenüber den Strecken mit der Endgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  dominieren. Aufgrund der höheren Bahngenauigkeiten wird für die technologischen Untersuchungen der SOFT-Modus verwendet, so dass sich die maschinenbedingte Prozessgrenze entsprechend der identifizierten Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  nach Bild 7-4 ergeben.

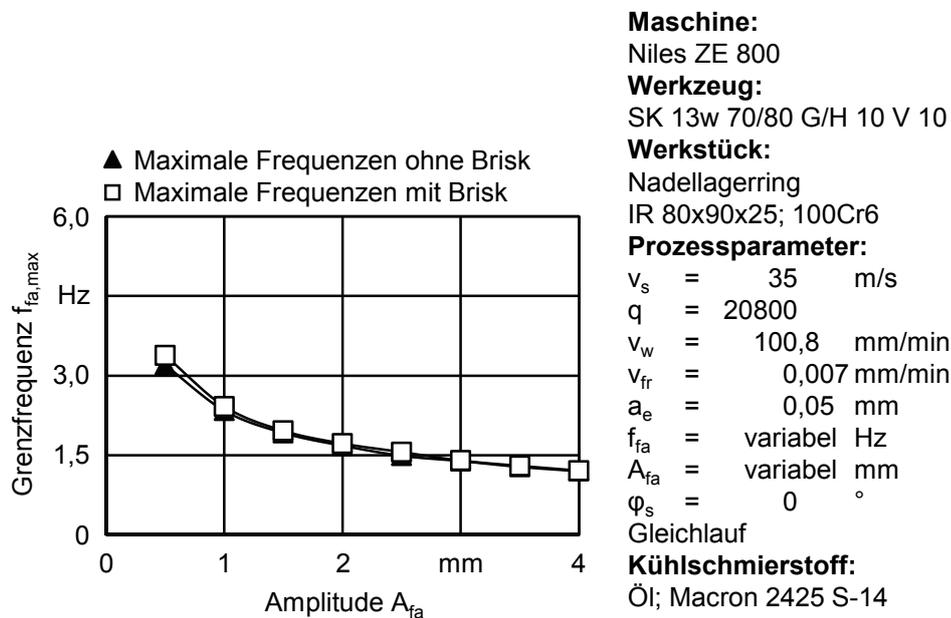
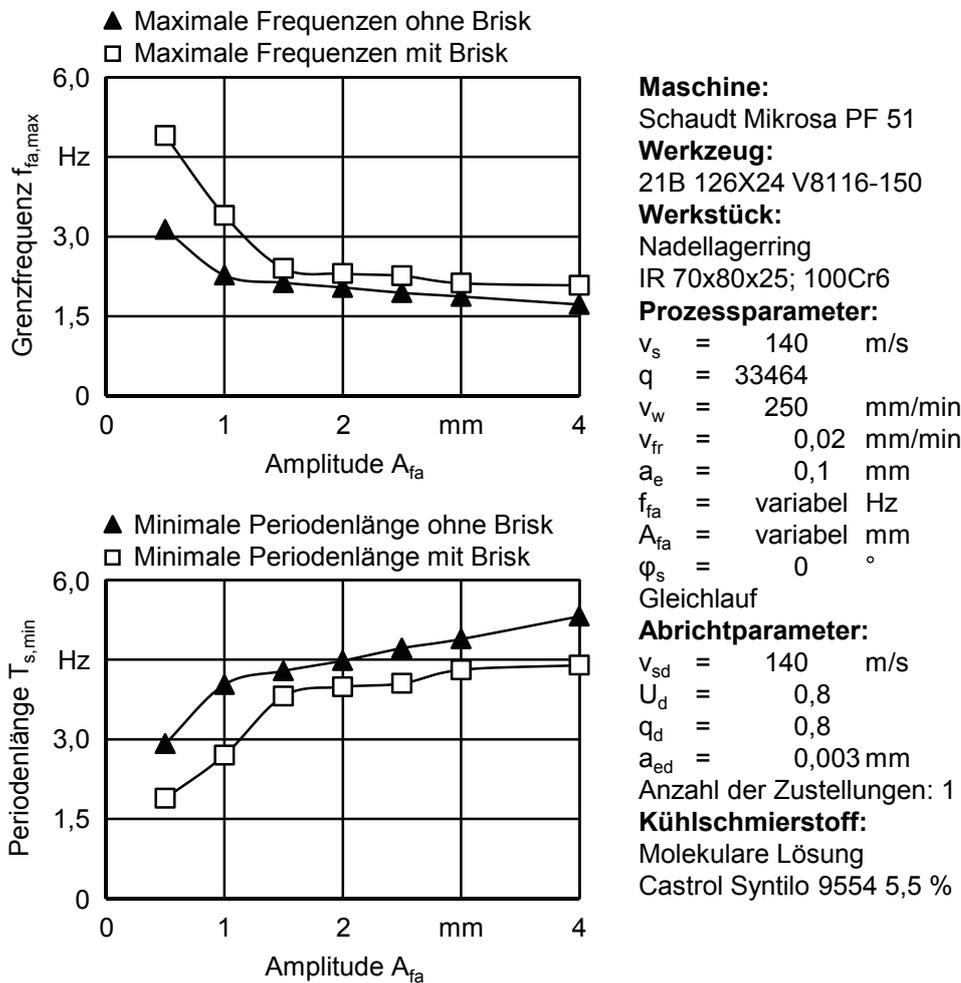


Bild 7-4: Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für den Analogieprozess auf der Zahnrad-Profilschleifmaschine ZE 800

*Universal-Rundschleifmaschine PF 51*

Die Bestimmung der Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  für die Universal-Rundschleifmaschine PF 51 erfolgt in gleicher Vorgehensweise wie für die Zahnrad-Profilschleifmaschine, wobei zusätzlich zu jeder Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  eine minimale Periodenlänge  $T_{s,min}$  für den entsprechenden Werkstückdurchmesser angegeben wird. Eine Übersicht der realisierbaren Frequenzen  $f_{fa}$  sowie der minimalen Periodenlänge  $T_s$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  kann für die Universal-Rundschleifmaschine PF 51 dem Bild 7-5 entnommen werden. Diese ist bedingt durch die minimale Spindeldrehzahl der Werkstückdrehachse  $n_{Spindel}$  von 1 U/min an der Schleifmaschine. Im Bereich von niedrigen Amplituden kann im BRISK Modus eine um 60 % höhere Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  im Vergleich zum SOFT-Modus erreicht werden. Grund sind wiederum die dominierenden Beschleunigungsstrecken gegenüber den Strecken mit der Endge-

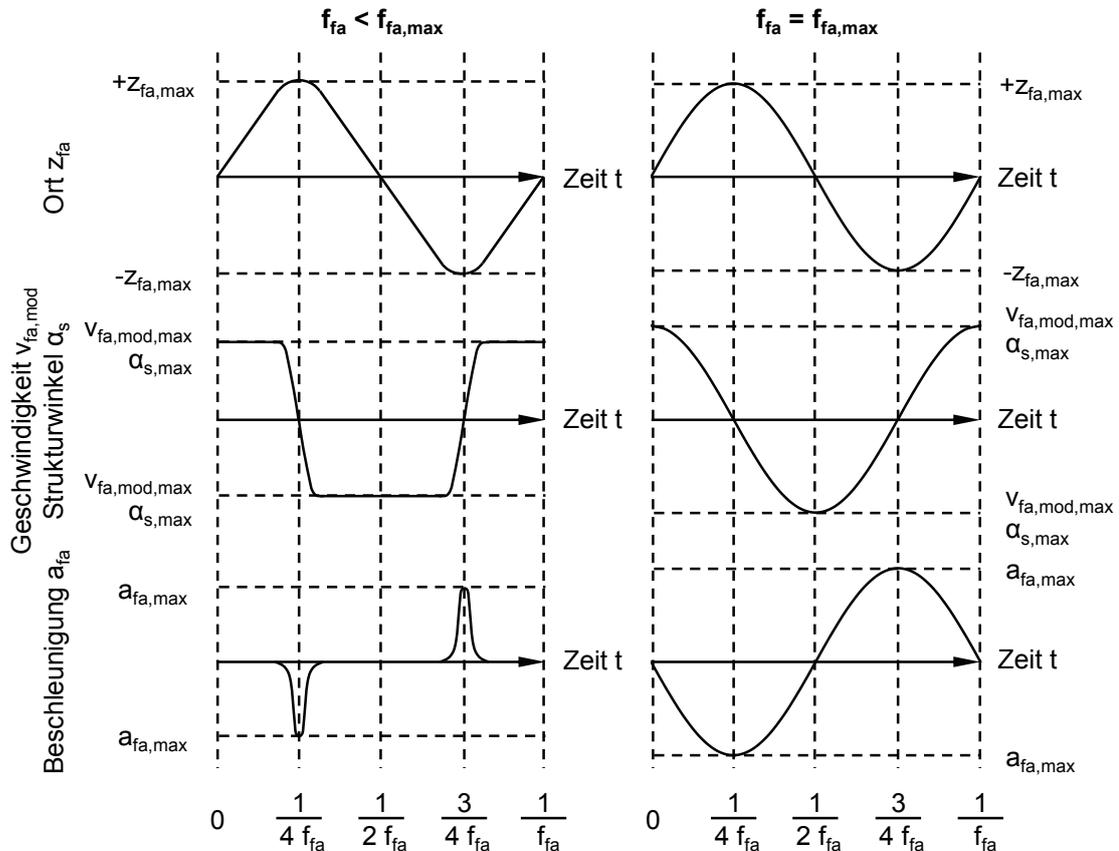
schwindigkeit  $v_{fa,mod}$ . Für die technologischen Untersuchungen auf der Universal-Rundschleifmaschine PF 51 wird ebenfalls der SOFT-Modus verwendet, da sich deutlich höhere Genauigkeiten in diesem Beschleunigungsmodus einstellen.



**Bild 7-5:** Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  sowie minimale Periodenlänge  $T_{s,min}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für die Universal-Rundschleifmaschine PF 51

Das dynamische Verhalten der Maschinenachsen bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung hängt stark von der eingestellten Frequenz  $f_{fa}$  ab. Qualitative Verläufe für die Ortsposition, die Geschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  und den Strukturwinkel  $\alpha_s$  sowie für die dazugehörige Beschleunigung  $a_{fa}$  mit Ruckbegrenzung sind in **Bild 7-6** jeweils für eine Frequenz  $f_{fa}$  unterhalb der Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  sowie für die Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  dargestellt. Bei der Bearbeitung mit der Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  ergeben sich sinusförmige Verläufe für die einzelnen kinematischen Größen, so dass sich eine maximale Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,max}$  immer nur zu einem Zeitpunkt einstellt. Wird dagegen eine Frequenz  $f_{fa}$  unterhalb der Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  gewählt, so ändert sich der sinusförmige Verlauf des Ortes zu einem dreiecksförmigen Verlauf, wobei es geringe Abweichung zu der idealisierten Kurve im Bereich der Amplitudenauslenkungen  $z_{fa,max}$  der kinematischen Modulation gibt. Diese sind auf die Beschleunigungs- und Bremsverluste bei den Bewegungen der Maschinenachsen zurückzuführen. Die Verläufe der Geschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  bzw. des Strukturwinkels  $\alpha_s$  sowie der dazugehörigen Beschleunigung  $a_{fa}$  ändern sich entsprechend des qualitativen Verlaufs für die

Ortsposition. Die Ortsfunktion und deren Ableitungen sind dabei immer stetig und eine Funktion der Zeit.



**Bild 7-6:** Prinzipskizze des dynamischen Verhaltens der Maschinenachse bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$

## 7.2 Kinematisch modulierter Rundschleifprozess

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse aus den technologischen Untersuchungen zum kinematisch modulierten Rundschleifprozess vorgestellt. Dabei erfolgten insbesondere Variationen der Amplitude  $A_{fa}$  und Frequenz  $f_{fa}$  unter Berücksichtigung der identifizierten Randbedingungen für den kinematisch modulierten Schleifprozess, um den Einfluss auf die Oberflächenstruktur und Oberflächenkennwerte zu bestimmen. Darüber hinaus wird die Ausbildung der Oberflächenstruktur hinsichtlich einer eingestellten Phasenverschiebung  $\varphi_s$  bei der kinematischen Modulation analysiert und bewertet. In Bezug auf eine thermische Schädigung sowie die Formgenauigkeiten konnten bei der kinematisch modulierten Rundschleifbearbeitung keine Auffälligkeiten festgestellt werden, weshalb im folgenden Kapitel auf diese Eigenschaften und Kenngrößen des Werkstücks nicht weiter eingegangen wird.

Im Anschluss an die kinematisch modulierte Schleifbearbeitung erfolgt jeweils die Vermessung der 3D-Oberflächentopographie mit dem taktilen Rauheits- und Konturenmessgeräts Hommel-Etamic nanoscan855 der Fa. HOMMEL-ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland. Für die 3D-Oberflächenmessung kam ein Taster mit einer Diamantspitze zum Einsatz, die einen Tastspitzenradius  $r_{tip}$  von  $2\ \mu\text{m}$  und einen Kegelwinkel von  $60^\circ$  aufweist [DINENISO3274]. Der Messpunktabstand wurde für jede Messbahn auf  $0,5\ \mu\text{m}$  festge-

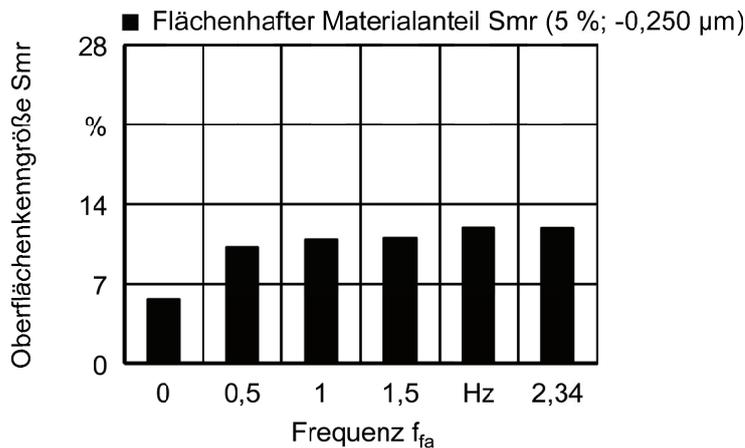
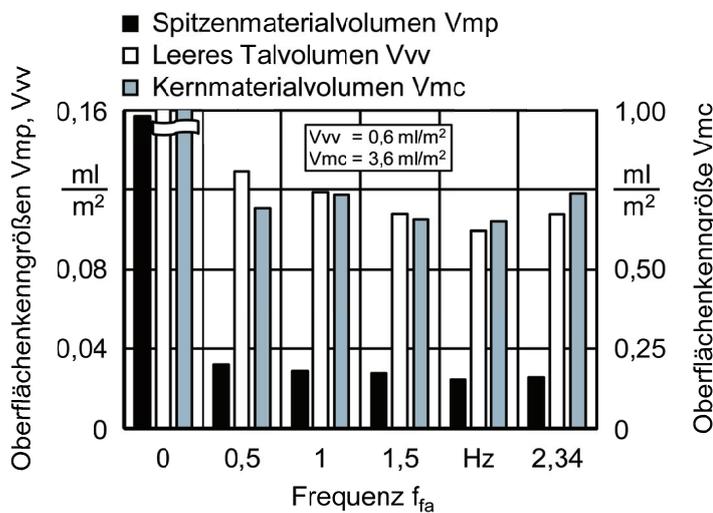
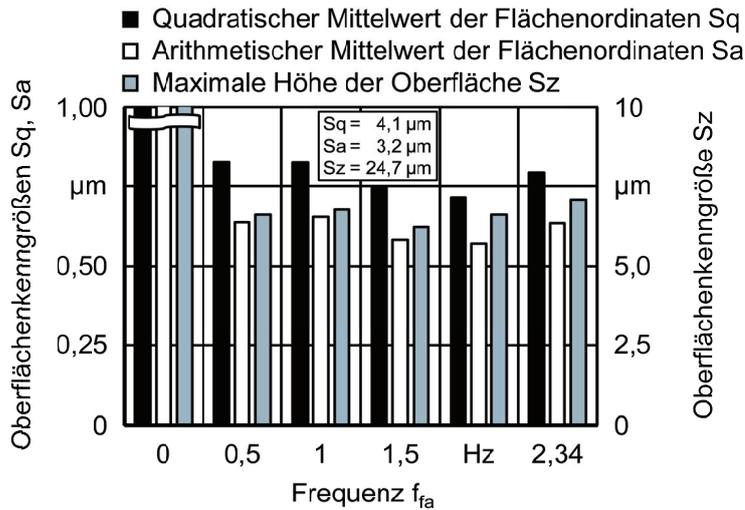
legt und der Messlinienabstand beträgt  $5\ \mu\text{m}$  für jede 3D-Oberflächenmessung. Im Rahmen der Untersuchungen wurden jeweils zwei Lagerringe für jede Stellgrößenkombination geschliffen und im Anschluss vermessen, wobei sich die Breite des Messfeldes in Abhängigkeit der Periodenlänge  $T_s$  der kinematischen Modulation ergibt. Die Länge der Messstrecken  $l$  beträgt jeweils  $4\ \text{mm}$  nach DIN EN ISO 4288 [DINENISO4288]. Eine Darstellung der taktilen 3D-Oberflächenmessung der Lagerringe aus 100Cr6 kann dem Bild 7-7 entnommen werden.



Bild 7-7: Messbedingungen für die taktile 3D-Oberflächenvermessung der Lagerringe aus 100Cr6

#### *Variation der Frequenz $f_{fa}$*

Zunächst werden Auszüge aus den Ergebnissen der technologischen Untersuchungen zum Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess auf die Oberflächenkennwerte vorgestellt. Dafür werden beispielhaft die Oberflächenkennwerte unter Variation der Frequenz  $f_{fa}$  bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 1\ \text{mm}$  in Bild 7-8 dargestellt. Eine signifikante Verbesserung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  kann für eine Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  bis  $2\ \text{Hz}$  identifiziert werden. Beim Einsatz der kinematisch modulierten Rundschleifbearbeitung liegen alle Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  deutlich unterhalb der Kennwerte für den Versuch ohne kinematische Modulation. Diese Tendenzen spiegeln sich auch bei den Volumenparametern  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  wider, wobei sich für die Frequenz  $f_{fa}$  von  $2\ \text{Hz}$  ein günstiges Verhältnis aus Spitzenmaterialvolumen  $V_{mp}$  und leeres Talvolumen  $V_{vv}$  ergibt. Der geringfügige Anstieg der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_q$  sowie  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  bei  $f_{fa} = 2,34\ \text{Hz}$ , welche nah an der Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  liegt, ist evtl. auf die höhere dynamische Maschinenbelastung bei den verwendeten Modulationsparametern zurückzuführen. Für die Amplitude  $A_{fa} = 1\ \text{mm}$  unterscheiden sich zudem die Strukturwinkel  $\alpha_s$  bei den Frequenzen  $f_{fa} = 2\ \text{Hz}$  und  $f_{fa} = 2,34\ \text{Hz}$  nur marginal. Mithilfe der kinematischen Modulation bei einer Frequenz  $f_{fa} = 2\ \text{Hz}$  lässt sich für die entsprechenden Prozessstellgrößen der flächenhafte Materialanteil  $S_{mr}$  ( $5\%$ ;  $-0,250\ \mu\text{m}$ ) zusätzlich um ca.  $114\ \%$  steigern.



**Maschine:**  
 Niles ZE 800  
**Werkzeug:**  
 SK 13w 70/80 G/H 10 V10  
**Werkstück:**  
 Nadellagerring  
 IR 80x90x25; 100Cr6  
**Prozessparameter:**  
 $v_s = 35 \text{ m/s}$   
 $q = 20800$   
 $v_w = 100,8 \text{ mm/min}$   
 $v_{fr} = 0,007 \text{ mm/min}$   
 $V_w^i = 14,13 \text{ mm}^3/\text{mm}$   
 $f_{fa} = \text{variabel Hz}$   
 $A_{fa} = 1 \text{ mm}$   
 $\phi_s = 0^\circ$   
 Gleichlauf  
**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 35 \text{ m/s}$   
 $U_d = 1,1$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 0,03 \text{ mm}$   
 Anzahl der Zustellungen: 1  
**Kühlschmierstoff:**  
 Öl; Macron 2425 S-14

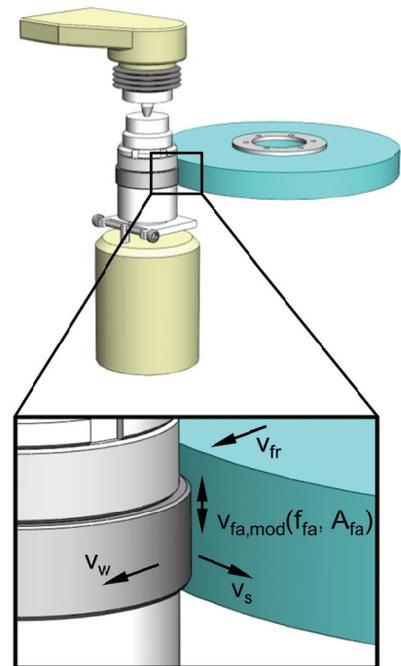


Bild 7-8: Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 1 \text{ mm}$

Weiterhin ist in Bild 7-9 der Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beispielhaft für eine Amplitude  $A_{fa} = 4 \text{ mm}$  dargestellt. Deutlich lässt sich anhand der Verläufe auch hier der Einfluss einer kinematischen Modulation erkennen, wobei sich der Oberflächenkennwert  $S_a$  bei einer Frequenz  $f_{fa} = 1 \text{ Hz}$  um ca. 85 % reduzieren lässt. Eine Steigerung der Frequenz bis  $f_{fa} = 1 \text{ Hz}$  führt zu einer Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$ .

Eine weitere Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  auf 1,2 Hz hat nur noch eine geringe Erhöhung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  zur Folge. Diese Tendenzen lassen sich auch für die Verläufe der Volumenoberflächenkenngrößen  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$  und  $V_{mc}$  bestätigen. Darüber hinaus korreliert der Verlauf des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) mit den gemessenen Oberflächenrauheiten. Ein Anstieg des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) um ca. 50 % kann beim kinematisch modulierten im Vergleich zum konventionellen Rundschleifprozess erreicht werden. Die Unterschiede der Oberflächenkennwerte in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  fallen im Vergleich zur Versuchsreihe bei einer Amplitude  $A_{fa} = 1 \text{ mm}$  deutlich geringer aus, was auf eine nur geringfügige Änderung des Strukturwinkels  $\alpha_s$  bei Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  bei einer Amplitude  $A_{fa} = 4 \text{ mm}$  zurückgeführt werden könnte.

Anhand des Einflusses der Frequenz  $f_{fa}$  auf die ermittelten Oberflächenkennwerte kann geschlossen werden, dass die Aufwurfgeometrie von den auf der Umfangsfläche vorangegangenen Abrasivkörnern abgetrennt und somit die Oberflächenstruktur maßgeblich beeinflusst wird. Ähnliche Tendenzen einer Oberflächenglättung konnten auch für einen Honprozess festgestellt werden. Beim Hochfrequenz-Honen kann es in Abhängigkeit der Amplitude und Frequenz zu Kornüberdeckungen während der Bearbeitung kommen. Die Überlagerungen der Schnittspuren der Schneidkörner durch die zusätzliche Oszillationsbewegung führen zu einer Glättung des Oberflächenprofils, wodurch sich die Oberflächenkennwerte verbessern lassen [FLO92a].

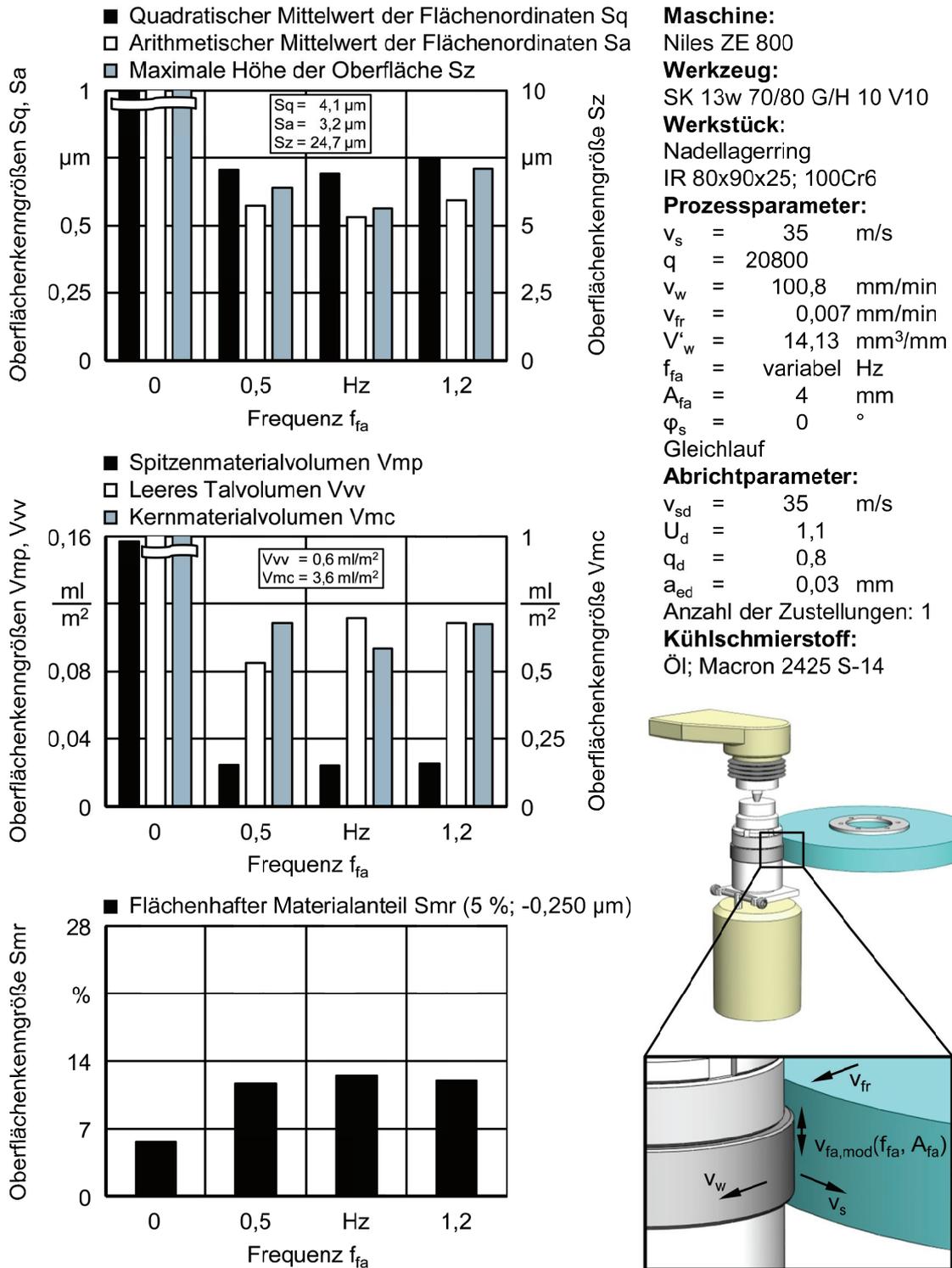


Bild 7-9: Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 4 \text{ mm}$

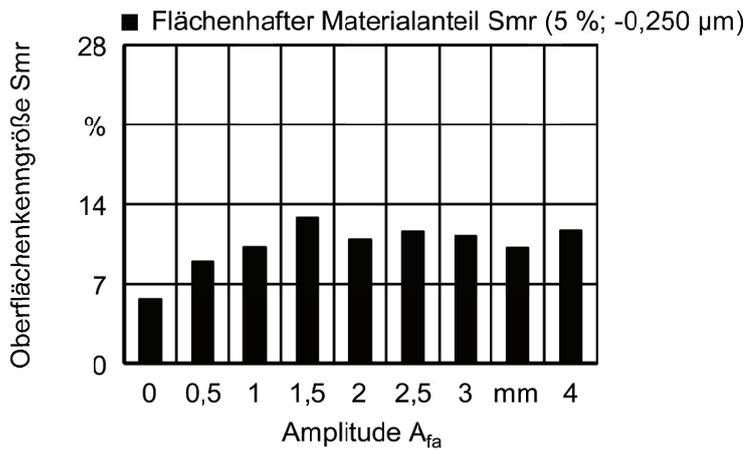
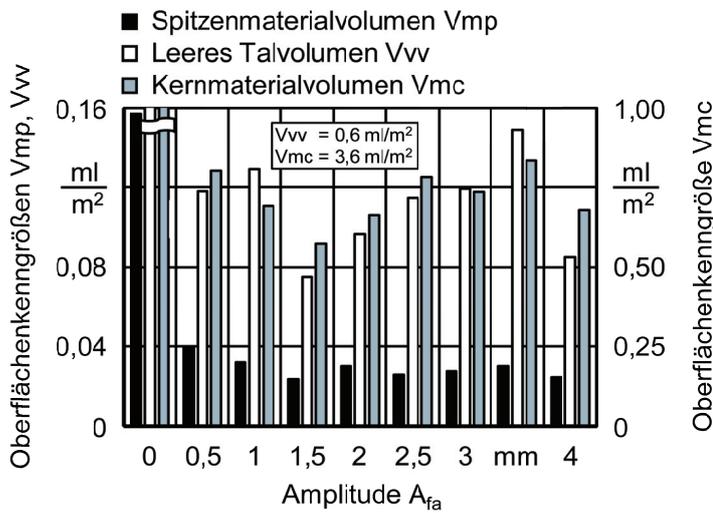
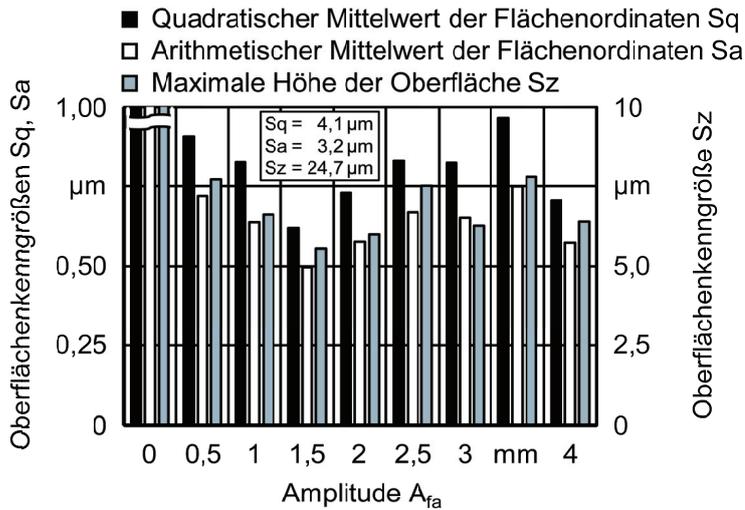
*Variation der Amplitude  $A_{fa}$*

Fortführend wurde der Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  bei einer konstanten Frequenz  $f_{fa}$  auf die sich einstellenden Oberflächenkennwerte untersucht. Eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  führt zu einer Erhöhung der axialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$ , was jedoch nur eine geringfügig höhere Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  während des Prozesses zur Folge hat. Dieser Effekt

ist gemäß Kapitel 5 nicht maßgeblich für die sich verändernde Oberflächenstruktur. Vielmehr wird bei einer Änderung der Amplitude  $A_{fa}$  die Korneingriffsbahn verändert, wodurch sich die Ritzspurgeometrien ändern und somit die Oberflächenstruktur des Werkstücks beeinflusst wird. In Bild 7-10 wird der Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5$  Hz sichtbar. Grundsätzlich lässt sich auch hier ein positiver Einfluss der kinematischen Modulation auf die Oberflächenkennwerte feststellen. Anhand der Diagramme ist erkennbar, dass eine Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  sowie der Volumenoberflächenkenngrößen  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$  und  $V_{mc}$  bzw. eine Erhöhung des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) bis zu einer Amplitude von  $A_{fa} = 1,5$  mm realisierbar ist. Eine weitere Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  führt dagegen wieder zu einer Erhöhung der Rauheitskennwerte. Dies spiegelt sich auch beim flächenhaften Materialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) wider.

Auffällig sind die lokalen Minima bei den Oberflächenkennwerten  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  sowie bei den Volumenoberflächenkenngrößen  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$  und  $V_{mc}$  für die Amplituden  $A_{fa} = 1,5$  mm und  $A_{fa} = 4,0$  mm. Der Anstieg der Oberflächenkennwerte ab  $A_{fa} = 1,5$  mm könnte evtl. auf die Erhöhung der Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  der Schleifscheibe zurückgeführt werden, wodurch es während der Bearbeitung zu einer geringeren Eingriffsbahnüberdeckungen der exponierter Abrasivkörner kommt. Dadurch kann es zu einer größeren Ausbildung von Ritzspuren kommen, was eine Erhöhung der Oberflächenkennwerte zur Folge hat. Bei der Amplitude  $A_{fa} = 4,0$  mm scheinen wieder größere Kornüberdeckungen vorzuliegen. Eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  bei einer Frequenz  $f_{fa} = 0,5$  Hz führt darüber hinaus zu einer großen Änderung des Strukturwinkels  $\alpha_s$ , was ein Grund für die unterschiedlichen Rauheitsgrößen darstellen könnte. Die geringen Oberflächenkennwerte ergeben sich zudem beim gleichen Strukturwinkel  $\alpha_s$  wie bei den Versuchsreihen zur Variation der Frequenz  $f_{fa}$  bei verschiedenen Amplitude  $A_{fa}$ . Im Hinblick auf die Maschinenbelastung sowie die für die Bearbeitung notwendige Schleifscheibenbreite  $b_s$  wird jedoch eine kinematisch modulierte Schleifbearbeitung mit Amplituden bis  $A_{fa} = 1,5$  mm empfohlen.

Darüber hinaus wurden technologischen Untersuchungen für eine Modulationsfrequenz von  $f_{fa} = 2$  Hz durchgeführt. Der Einsatz einer kinematischen Modulation führt wiederum zu einer deutlichen Verbesserung der Oberfläche im Vergleich zum konventionellen Schleifprozess. Im Hinblick auf die Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_q$  lassen sich jedoch keine signifikanten Unterschiede für die Variation der Amplitude  $A_{fa}$  feststellen, was auf die nur geringe Änderung des Strukturwinkels  $\alpha_s$  zurückgeführt werden könnte. Diese Tendenzen spiegeln sich auch in den Verläufen der Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  wider, wobei ein bestes Verhältnis aus Spitzenmaterialvolumen  $V_{mp}$  und leerem Talvolumen  $V_{vv}$  für die Amplitude  $A_{fa} = 1,5$  mm identifiziert werden kann. Weiterhin lässt sich ein geringer Anstieg des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) bei Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  feststellen.



**Maschine:**  
 Niles ZE 800  
**Werkzeug:**  
 SK 13w 70/80 G/H 10 V10  
**Werkstück:**  
 Nadellagerring  
 IR 80x90x25; 100Cr6  
**Prozessparameter:**  
 $v_s = 35 \text{ m/s}$   
 $q = 20800$   
 $v_w = 100,8 \text{ mm/min}$   
 $v_{fr} = 0,007 \text{ mm/min}$   
 $V_w^i = 14,13 \text{ mm}^3/\text{mm}$   
 $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$   
 $A_{fa} = \text{variabel mm}$   
 $\phi_s = 0^\circ$   
 Gleichlauf  
**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 35 \text{ m/s}$   
 $U_d = 1,1$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 0,03 \text{ mm}$   
 Anzahl der Zustellungen: 1  
**Kühlschmierstoff:**  
 Öl; Macron 2425 S-14

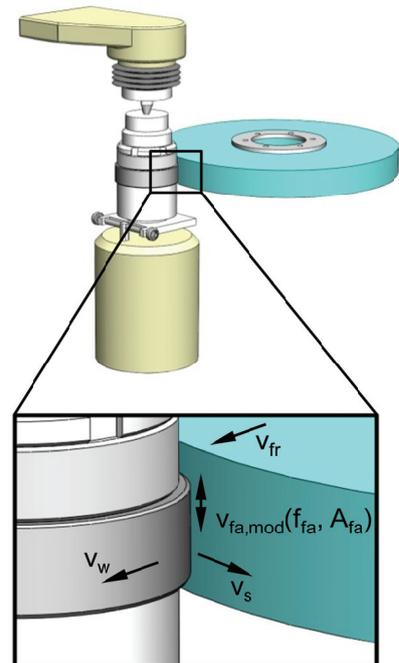
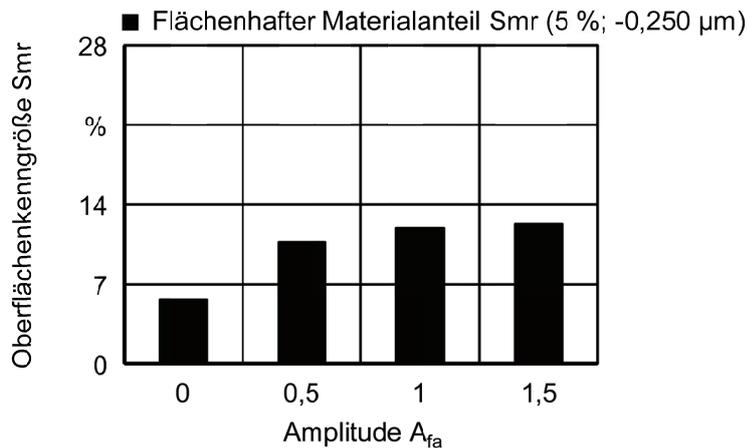
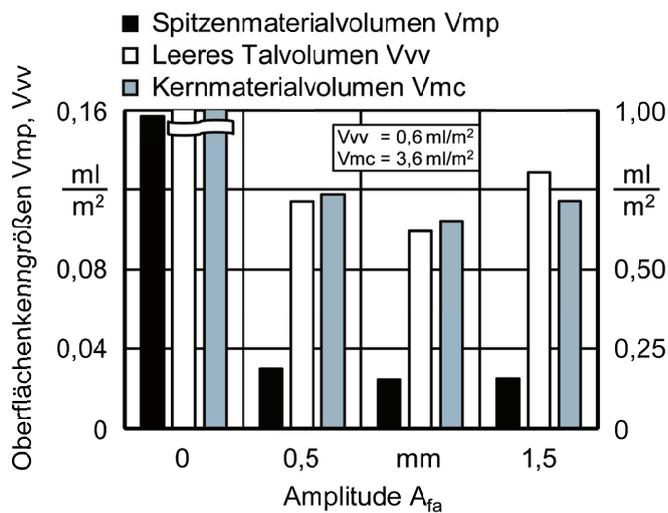
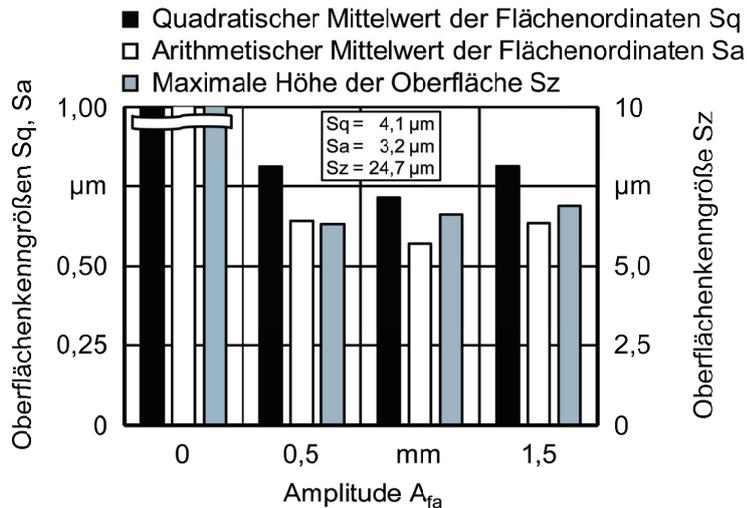


Bild 7-10: Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$



**Maschine:**  
Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Werkstück:**  
Nadellagering  
IR 80x90x25; 100Cr6

**Prozessparameter:**  
 $v_s = 35$  m/s  
 $q = 20800$   
 $v_w = 100,8$  mm/min  
 $v_{fr} = 0,007$  mm/min  
 $V'_w = 14,13$  mm<sup>3</sup>/mm  
 $f_{fa} = 2$  Hz  
 $A_{fa} =$  variabel mm  
 $\varphi_s = 0$  °

Gleichlauf

**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 1,1$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 0,03$  mm  
 Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14

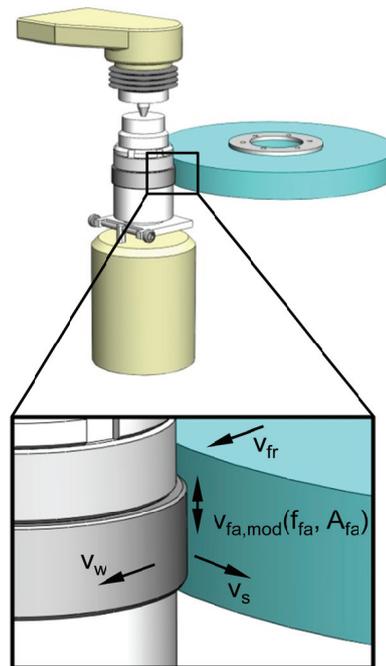
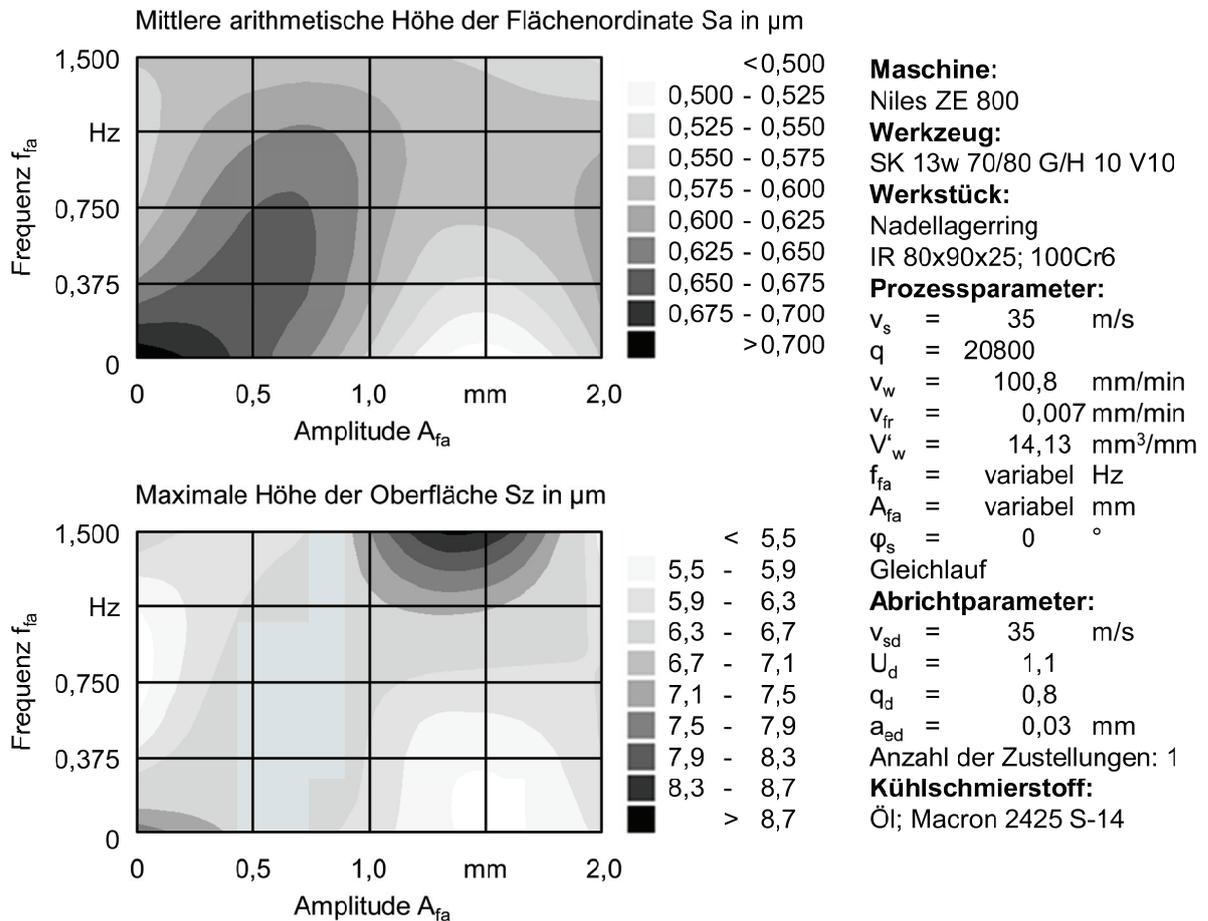


Bild 7-11: Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 2$  Hz

*Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  sowie der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenstruktur*

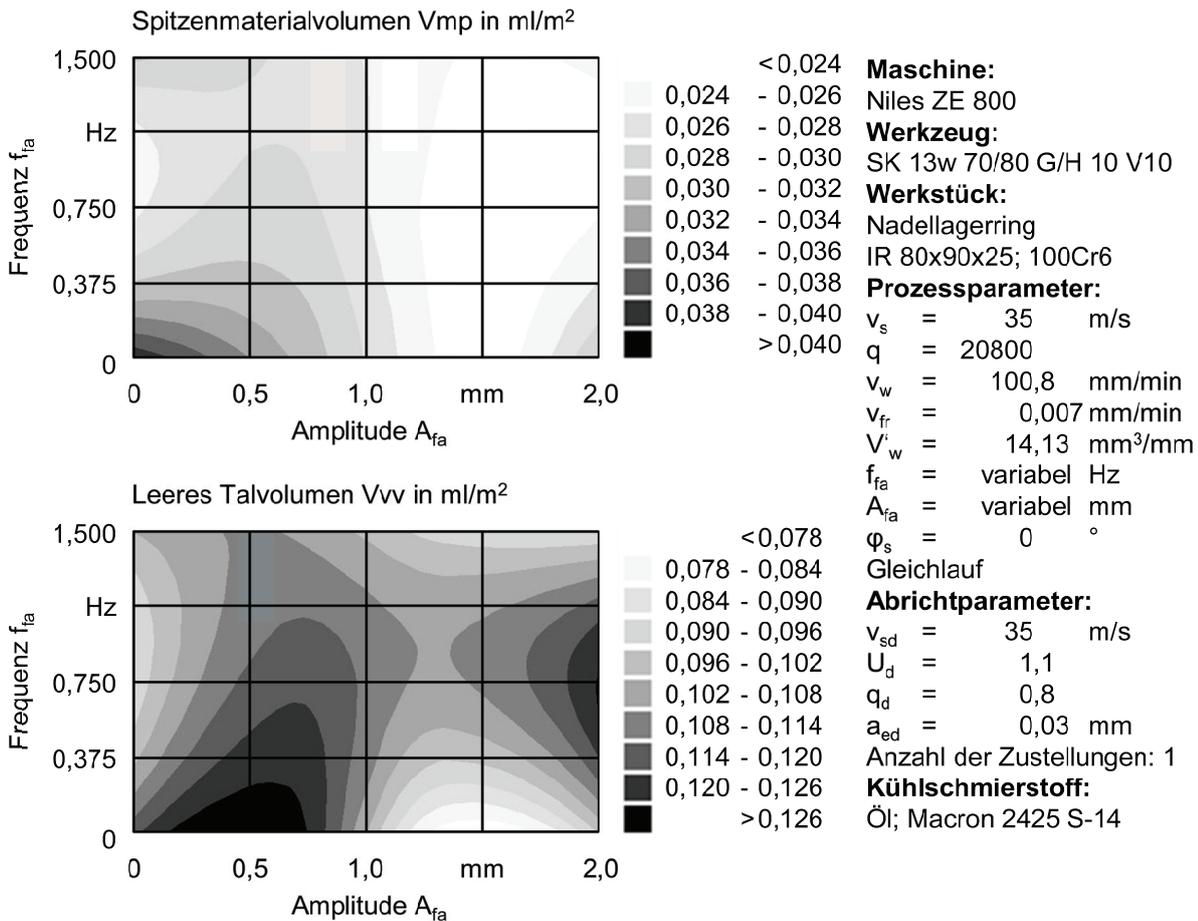
Aufgrund der großen Anzahl von technologischen Untersuchungen zum Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  sowie der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenstruktur und Oberflächenkennwerte werden die Ergebnisse bis zu einer Frequenz  $f_{fa} = 1,5$  Hz und einer Amplitude  $A_{fa} = 2$  mm in Bild 7-12 zusammenfassend dargestellt. Hierbei werden die Oberflächenkennwerte  $S_a$  und

Sz unter Variation der Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  betrachtet. Es wird deutlich, dass sich geringe Sa- und Sz-Oberflächenkennwerte im Bereich niedriger Frequenzen  $f_{fa}$  und Amplituden um  $A_{fa} = 1,5$  mm einstellen lassen. Darüber hinaus können weitere Bereiche zur Erzeugung von Oberflächenstrukturen mit geringeren Oberflächenkennwerten Sa und Sz identifiziert werden. Diese liegen im Bereich von Frequenzen um  $f_{fa} = 1$  Hz bei gleichzeitig sehr geringen Amplituden  $A_{fa}$  sowie im Bereich von hohen Frequenzen  $f_{fa}$  und Amplituden  $A_{fa}$ .



**Bild 7-12:** Oberflächenkennwerte Sa und Sz in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  im Analogieprozess

Die Oberflächenkennwerte  $V_{mp}$  und  $V_{vv}$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  sind in **Bild 7-13** abgebildet, womit Aussagen hinsichtlich des Volumens von Spitzen und Tälern auf der Oberflächenstruktur getroffen werden können. Das Spitzenvolumen  $V_{mp}$  zeigt hinsichtlich geringer Kennwerte ähnliche Tendenzen wie die maximale Höhe der Oberfläche Sz. Mithilfe des leeren Talvolumens  $V_{vv}$  lassen sich Aussagen bezüglich möglicher Mikrodruckkammern für den Schmierstoff auf der Funktionsfläche treffen. Ein hohes Talvolumen kann für den Bereich um Amplituden von  $A_{fa} = 0,5$  mm bei gleichzeitig geringen Frequenzen  $f_{fa}$  erkannt werden. Eine Kombination von hohen Amplituden  $A_{fa}$  mit einer Frequenz um  $f_{fa} = 0,75$  Hz stellt eine weitere Möglichkeit zur Erhöhung des leeren Talvolumens  $V_{vv}$  dar.



**Bild 7-13:** Oberflächenkennwerte  $V_{mp}$  und  $V_{vv}$  in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  im Analogieprozess

Neben der messtechnischen Erfassung von Kennwerten für die verschiedenen Oberflächenstrukturen dient darüber hinaus ein visueller Gesamtüberblick der kinematisch moduliert geschliffenen Oberflächenstrukturen zur weiteren Charakterisierung des entwickelten Prozesses. Hierfür werden in **Bild 7-14** zunächst die fotografierten Oberflächen der Lagerringe für die gesamte  $f_{fa}$ - $A_{fa}$ -Versuchsmatrix gegenübergestellt. Während sich die Oberflächenstruktur für die geringste Frequenz von  $f_{fa} = 0,5$  Hz im gesamten Amplitudenbereich der kinematischen Modulation optisch gut erkennen lässt, wird die sichtbare Oberflächenstruktur bei den variierten Amplituden  $A_{fa}$  mit steigender Frequenz  $f_{fa}$  undeutlicher. Vor allem kinematische Modulationen mit höheren Frequenzen  $f_{fa}$  sind optisch im Schlifffbild nur noch schwer zu erkennen.

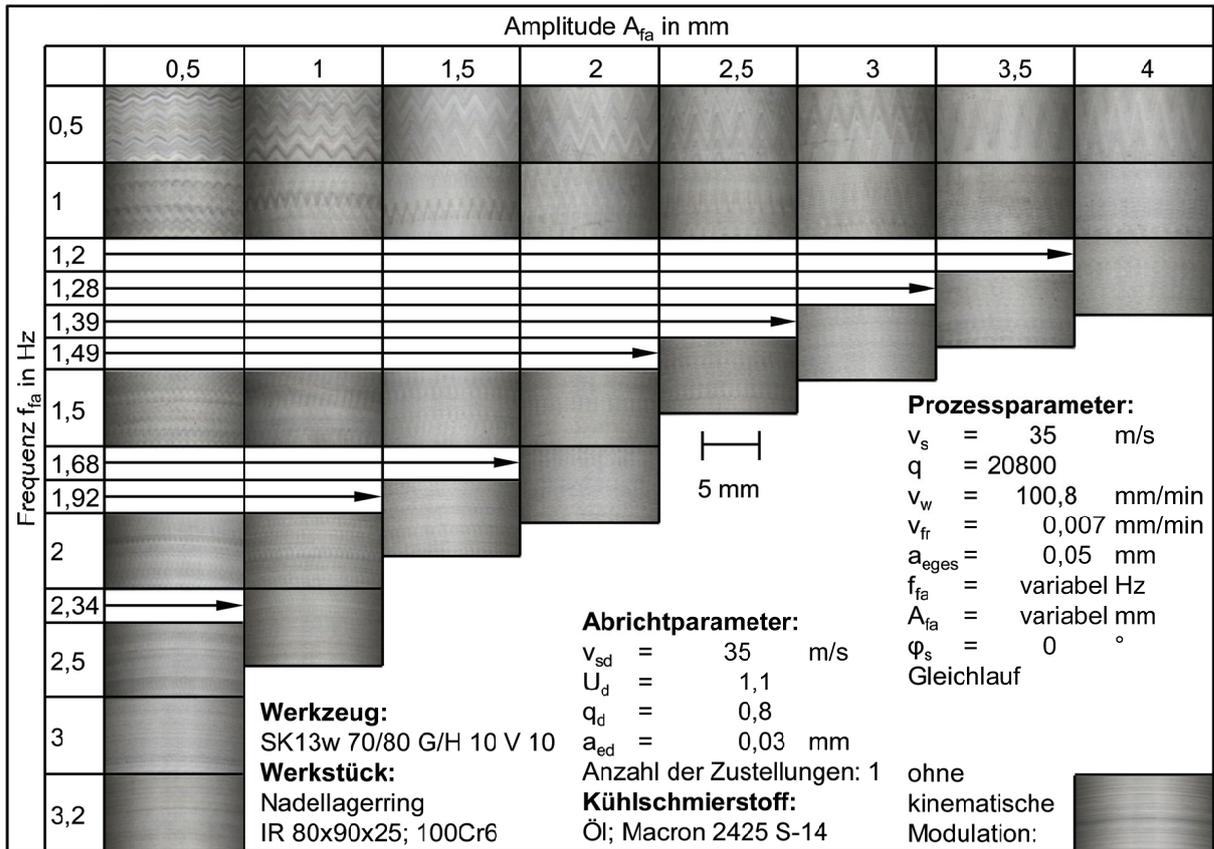


Bild 7-14: Optisches Erscheinungsbild zum Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  im Analogieprozess

Zusätzlich zu den Fotos lassen sich die verschiedenen Oberflächenstrukturen mit den gemessenen 3D-Topographiebildern vergleichen, siehe Bild 7-15. Die Topographiebilder ergeben sich hierbei aus den Oberflächendaten der taktilen Vermessung. Anhand der Darstellung wird deutlich, dass die Oberflächenstrukturen sich als dreidimensionale Erhebungen auf der Oberfläche äußern. Im Unterschied zu den höheren Frequenzen  $f_{fa}$  lassen sich im Vergleich zu den fotografierten Oberflächen noch deutlich Spitzen und Täler erkennen. Für eine bessere Einschätzung der Tiefendimensionen der 3D-Oberflächenbilder ist zusätzlich die maximale Höhe der Oberfläche  $S_z$  für jede Topographie angegeben. Die Größe des Messfeldes ergibt sich in Abhängigkeit der Periodenlänge, wie am Anfang des Kapitels beschrieben.

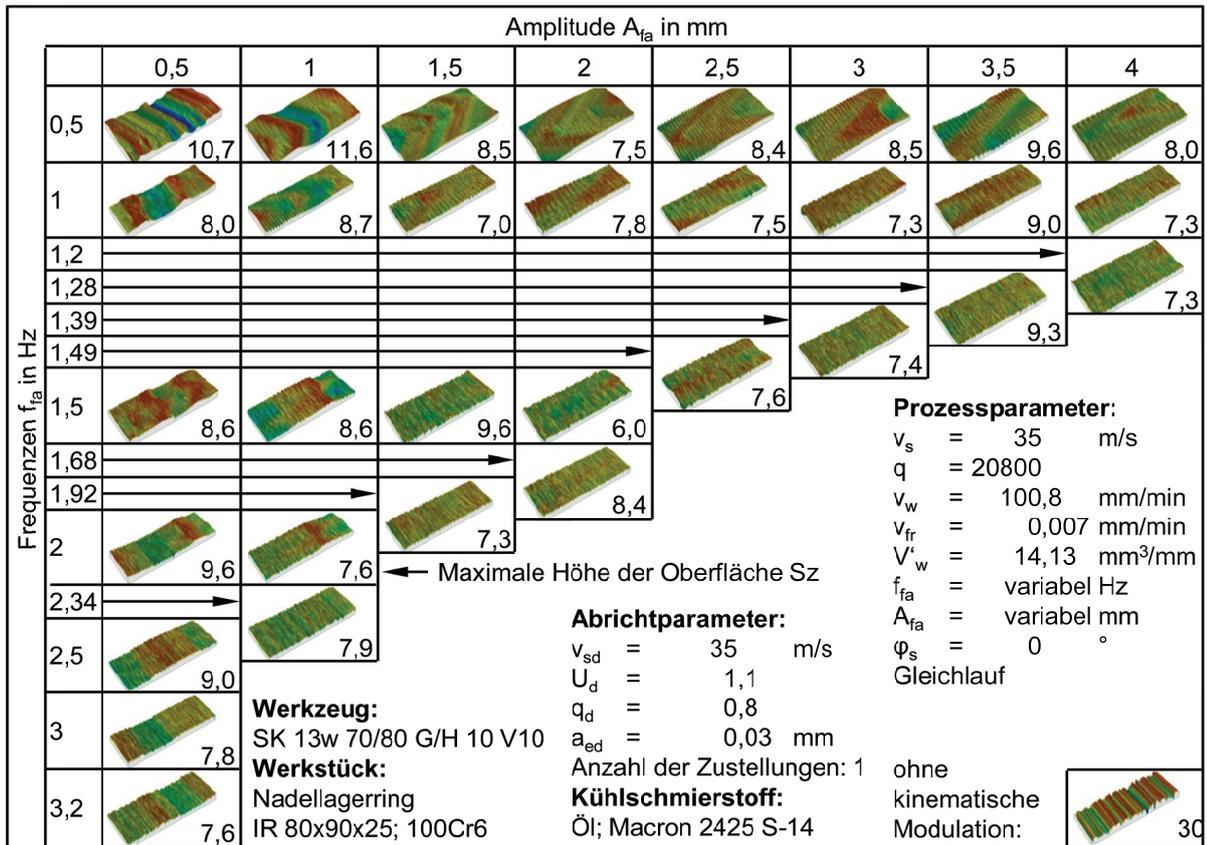
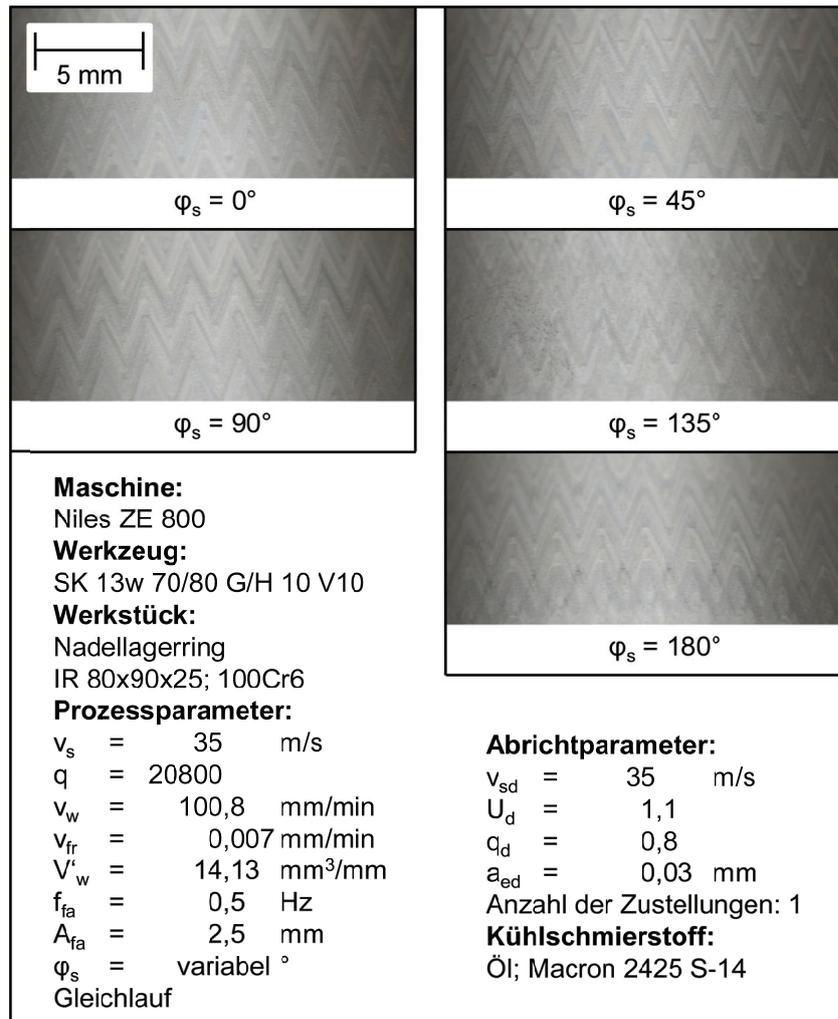


Bild 7-15: 3D-Bilder der Oberflächentopographien zum Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  im Analogieprozess

### Variation der Phasenverschiebung $\varphi_s$

Für die Variation der Frequenz  $f_{fa}$  sowie der Amplitude  $A_{fa}$  beim kinematisch modulierten Rundschleifen konnte bereits ein deutlicher Einfluss auf die Oberflächenkennwerte sowie auf die Oberflächenstruktur festgestellt werden. Darüber hinaus lassen sich durch die gezielte Einstellung einer Phasenverschiebung  $\varphi_s$  mithilfe eines mehrfachen Überlaufs beim kinematisch modulierten Rundschleifen gekreuzte Schleifspuren auf den Oberflächen realisieren, was zu einer Erzeugung von plateauförmigen Oberflächen mit Mikrodruckkammern führen kann. In Vorversuchen wurde eine geeignete Prozessstrategie für die Erzeugung einer Oberflächenstruktur mit Phasenverschiebung  $\varphi_s$  identifiziert. Die phasenverschobene kinematische Modulation wird mittels eines Ausfunktubs in einem zusätzlichen Bearbeitungsschritt realisiert, wodurch sich geeignete Schmierstoffreservoirs auf der Funktionsoberfläche durch die überlagerten Schleifspuren herstellen lassen können. Ein visueller Vergleich der Oberflächenstrukturen nach dem kinematisch modulierten Rundschleifen mit verschiedener Phasenverschiebung  $\varphi_s$  ist in [Bild 7-16](#) dargestellt. Gekreuzte Schleifspuren lassen sich optisch gut bei der eingestellten Phasenverschiebung  $\varphi_s = 180^\circ$  erkennen, wo ein gegensätzlicher Verlauf der Strukturen auf der Oberfläche deutlich wird.



**Bild 7-16:** Optisches Erscheinungsbild zum Einfluss der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  auf die Oberflächenstruktur bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5$  Hz und einer Amplitude von  $A_{fa} = 2,5$  mm

Der Einfluss der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  beim kinematisch modulierten Rundschleifen auf die 3D-Oberflächenkennwerte wurde für die Frequenz  $f_{fa} = 0,5$  Hz und für die Amplitude  $A_{fa} = 2,5$  mm analysiert. **Bild 7-17** stellt den Verlauf der Oberflächenkennwerte in Abhängigkeit der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  dar. Es wird deutlich, dass sich die Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  bei einer kinematischen Modulation mit Phasenverschiebung  $\varphi_s$  im Vergleich zum Referenzversuch (Ref.) ohne Phasenverschiebung  $\varphi_s$  reduzieren lassen. Beim Referenzversuch (Ref.) wurde ebenfalls ein zusätzlicher Ausfunktub realisiert, der jedoch keine Phasenverschiebung  $\varphi_s$  aufwies.

Die Verläufe für den arithmetischen Mittelwert der Flächenordinaten  $S_a$  sowie den quadratische Mittelwert der Flächenordinaten  $S_q$  zeigen tendenziell eine Reduzierung der Oberflächenkennwerte mit steigender Phasenverschiebung  $\varphi_s$ . So reduziert sich beispielsweise der Oberflächenkennwert  $S_q$  von  $0,753$   $\mu\text{m}$  bei der Phasenverschiebung  $\varphi_s = 45^\circ$  auf  $0,5305$   $\mu\text{m}$  bei der Phasenverschiebung  $\varphi_s = 180^\circ$ , was einer Reduktion des quadratischen Mittelwerts der Flächenordinaten  $S_q$  um ca. 30 % entspricht. Die maximale Höhe der Oberfläche  $S_z$  weist hingegen keine signifikante Änderung in Abhängigkeit der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  auf. Dies könnte auf die Superposition zweier Oberflächenstrukturen mit gleichen Oberflächen-

kennwerten zurückgeführt werden, die sich nur in den entsprechenden lokalen Teilbereichen überlappen. Dadurch bleiben lokale Rauheitsspitzen und -täler der einzelnen Oberflächenstrukturen weitestgehend erhalten, wodurch sich die maximale Höhe der Oberfläche  $S_z$  nur marginal verändert.

Bei Betrachtung der Kenngrößen für das Materialvolumen  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  wird deutlich, dass sich auch tendenziell geringere flächenhafte Materialvolumen mit steigender Phasenverschiebung  $\varphi_s$  ergeben. In Bezug auf ein geeignetes Verhältnis von Spitzen und Riefen auf der Oberfläche, lässt sich für die Phasenverschiebung  $\varphi_s = 90^\circ$  ein reduziertes Spitzenvolumen  $V_{mp}$  bei gleichzeitig hohem Riefenvolumen  $V_{vv}$  feststellen. Darüber hinaus zeigt die Darstellung des Verlaufs der Oberflächenkenngröße  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) in Abhängigkeit der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  eine Steigerung des Materialanteils um ca. 22 % verglichen mit dem Referenzversuch, wobei eine Erhöhung der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  tendenziell zu einem Anstieg des Oberflächenkennwerts führt.

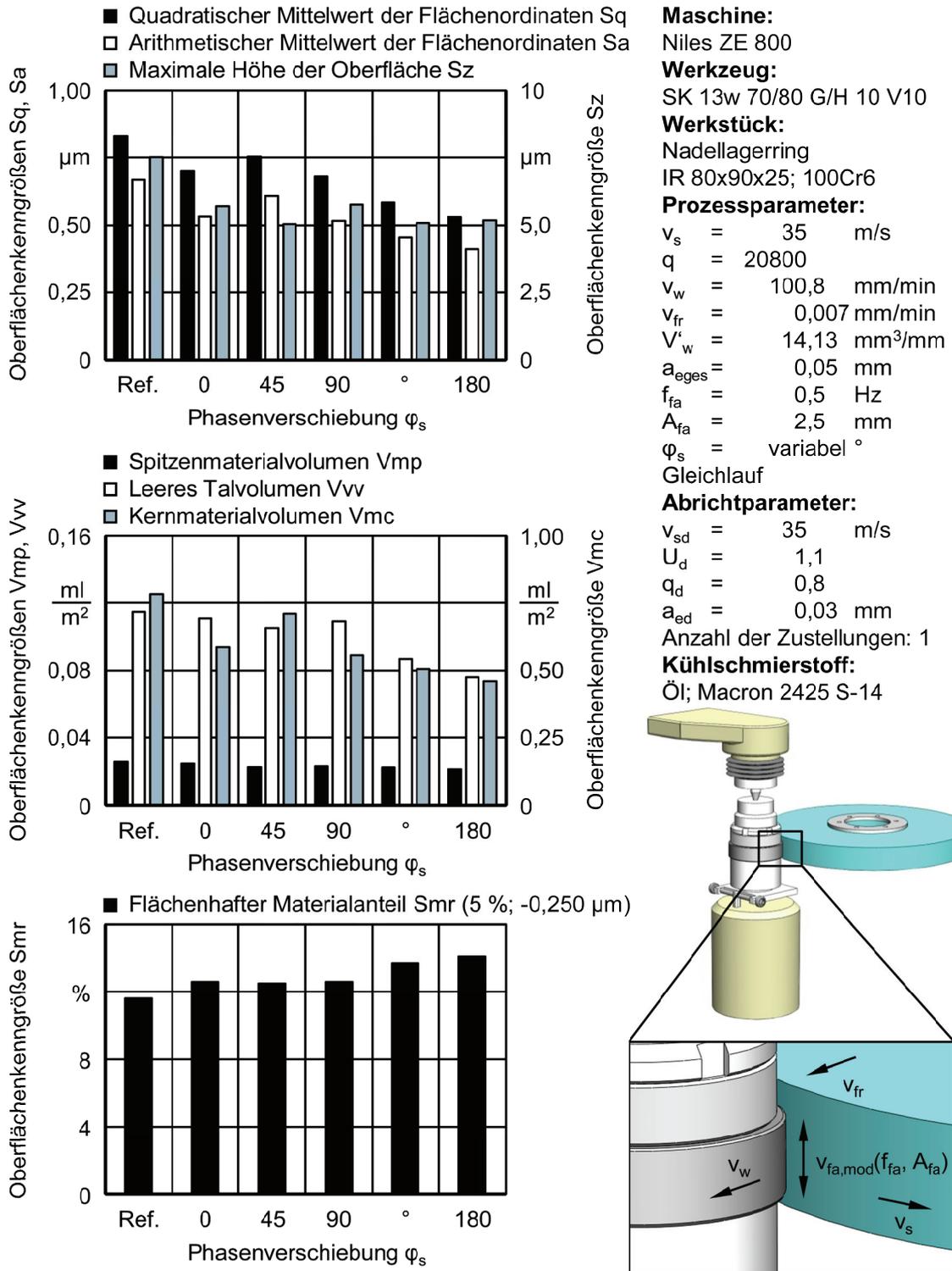


Bild 7-17: Einfluss der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  auf die Oberflächenstruktur bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$  und einer Amplitude von  $A_{fa} = 2,5 \text{ mm}$

### 7.3 Verifikation der numerischen Simulation

Die Verifikation der numerischen Modellierung von Oberflächenstrukturen (siehe Kapitel 6) erfolgt anhand der experimentellen Ergebnisse des kinematisch modulierten Rundschleifprozesses. Für die Verläufe der Oberflächenkenngrößen Sa, Sz und Sq konnte eine gute Über-

einstimmung bezüglich der Tendenz und der Absolutwerte festgestellt werden. Darüber hinaus zeigen die Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  sowie der flächenhafte Materialanteil  $Smr$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) aus Simulation und Schleifversuch eine gute Übereinstimmung. Die geringfügigen Unterschiede sind hierbei vermutlich auf die elasto-plastischen Anteile bei der Spanbildung zurückzuführen, die bei der Simulation der Oberflächenstrukturen nicht berücksichtigt werden. Die Oberflächenstruktur nach der Simulation und nach dem kinematisch modulierten Rundschleifprozess sind beispielhaft für eine kinematische Modulation in Bild 7-18 dargestellt. Der qualitative Vergleich der Bilder zeigt zusätzlich eine gute Übereinstimmung der Oberflächenstrukturen. Die simulierte Oberflächenstruktur stellt dabei die abgewinkelte Fläche eines Lagerringes dar.

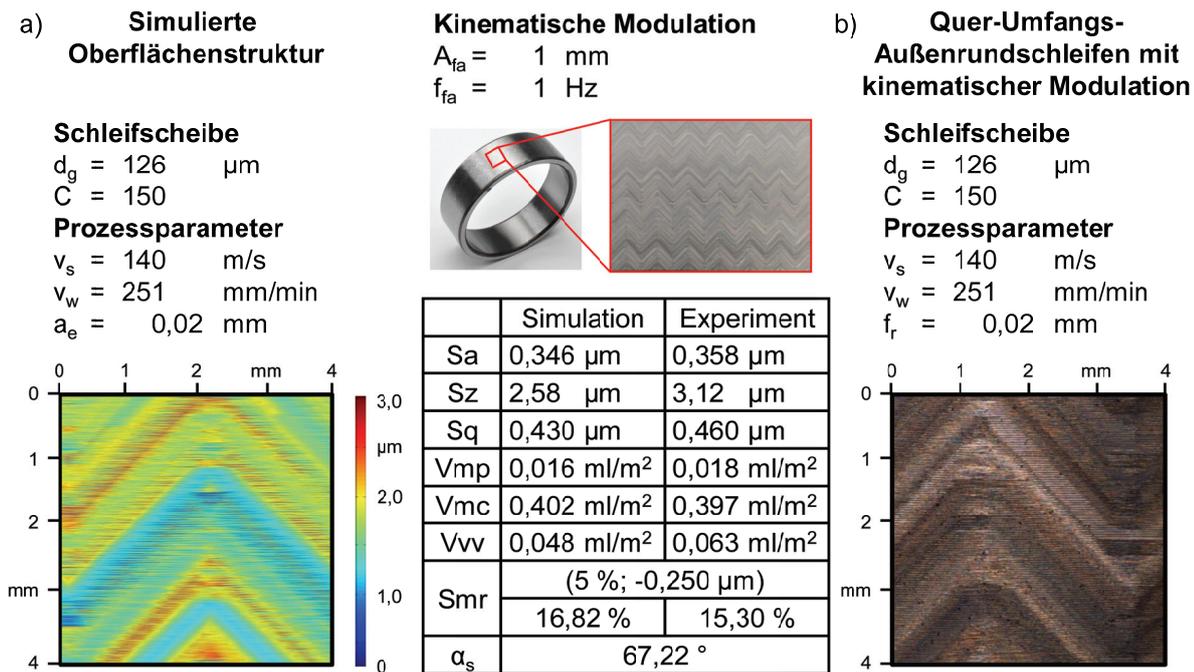


Bild 7-18: Oberflächenstruktur; a) Simulation; b) kinematisch modulierter Rundschleifprozess

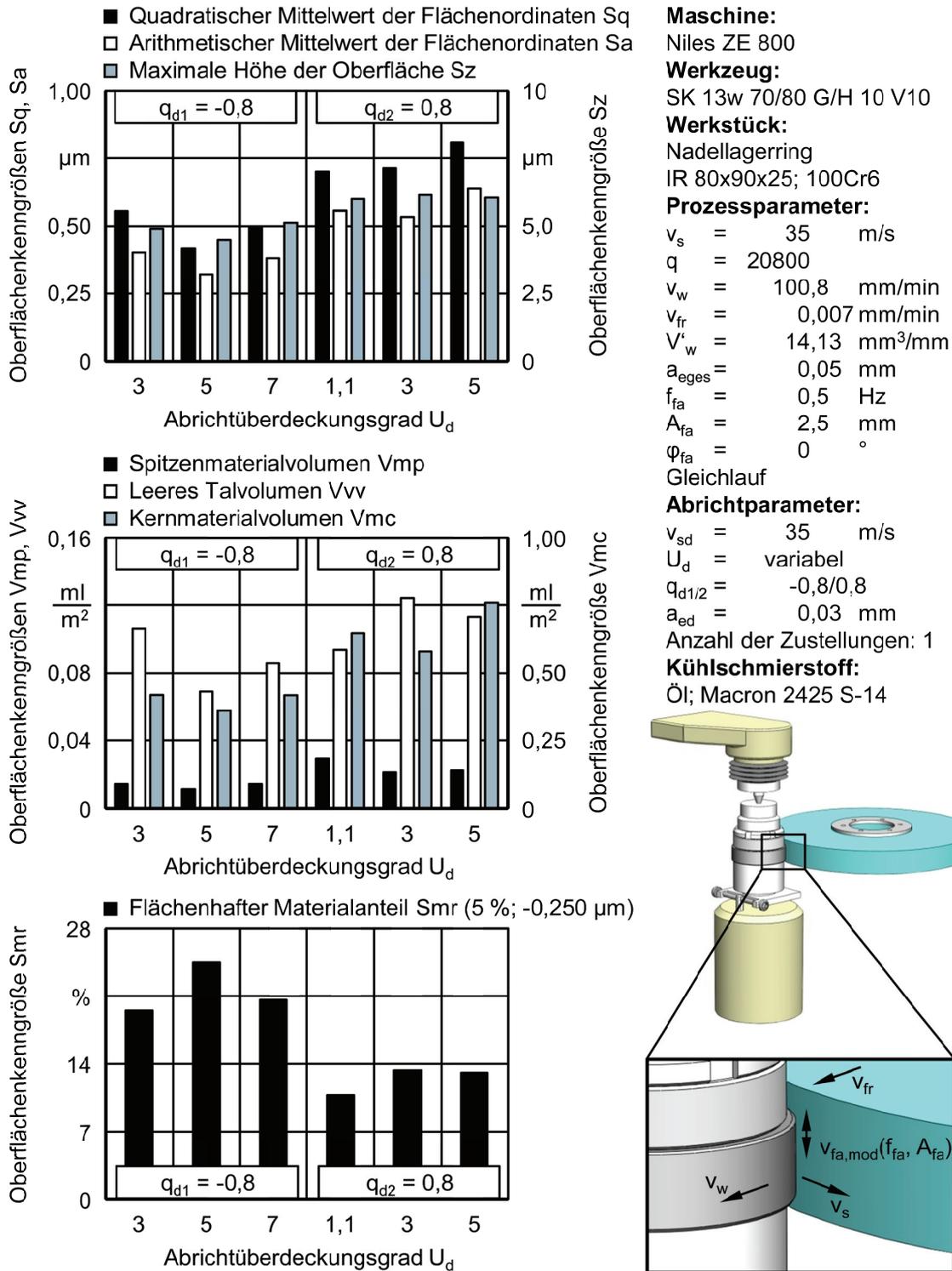
## 7.4 Konditionierprozess

Nachdem in Kapitel 7.2 bereits ein signifikanter Einfluss der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung auf die Oberflächenstruktur und die Oberflächenkennwerte für den Analogieprozess aufgezeigt werden konnte, soll sich in diesem Kapitel mit der Fragestellung befassen werden, inwiefern eine variable Einstellung der Höhe der Riefenstruktur mithilfe des Konditionierprozesses möglich ist. Dafür erfolgt eine systematische Untersuchung des Konditionierprozesses für eine festgelegte kinematisch modulierte Rundschleifbearbeitung mit einer Frequenz  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$  und einer Amplitude  $A_{fa} = 2,5 \text{ Hz}$ . Der Begriff des Konditionierens umfasst alle Prozesse zur Einsatzvorbereitung und Regeneration von Schleifscheiben [SAL91]. Eine Variation des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  sowie des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  erfolgte für diese technologischen Untersuchungen. Auf eine Variation des Abrichtzustellung  $a_{ed}$  wurde verzichtet, da sich ein geringerer Einfluss auf die Schleifscheibentopographie verglichen mit den anderen beiden Stellgrößen erwarten lässt.

#### *Variation des Abrichtüberdeckungsgrades $U_d$*

Die Ergebnisse zum Einfluss des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  beim Abrichten mit zwei Abrichtgeschwindigkeitsverhältnissen  $q_{d1}$  und  $q_{d2}$  stellt [Bild 7-19](#) dar. Entsprechend dem Stand der Erkenntnis erzeugt ein positives Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis  $q_{d2}$  eine höhere Wirkrautiefe  $R_{t,s}$  der Schleifscheibe, was sich in den Ergebnissen der Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  widerspiegelt. Der quadratische und der arithmetische Mittelwert der Flächenordinaten  $S_q$  und  $S_a$  sind beim Abrichten im Gleichlauf durchschnittlich 53 % höher als beim Abrichten im Gegenlauf, wohingegen sich die maximale Höhe der Fläche  $S_z$  nur um 25 % erhöht. Grund dafür sind die unterschiedlichen Eingriffsbedingungen beim Gleich- und Gegenlaufabrichten. Die steilen Eingriffskurven der Diamantkörner beim Gleichlaufabrichten führen zu größeren Wirkrautiefen  $R_{t,s}$  der Schleifscheibe und damit größeren Oberflächenkennwerten auf der Werkstückoberfläche [SCH68, KLO05, DEN11, SPU14]. Darüber hinaus kann beim Abrichten im Gleichlauf eine Erhöhung des Spitzenmaterialvolumens  $V_{mp}$  um 82 %, des leeren Talvolumens  $V_{vv}$  um 27 % und des Kernmaterialvolumens  $V_{mc}$  um 66 % erreicht werden. Der flächenhafte Materialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) sinkt hingegen im Gleichlauf um 42 % gegenüber den Versuchen mit Gegenlaufabrichten.

In Bezug auf die Erhöhung des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  im Gleich- und Gegenlauf lässt sich tendenzielle eine Erhöhung des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) bei der Oberflächenstruktur feststellen. Einen klaren Einfluss des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  auf die Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  sowie auf die Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  können im Gleichlauf nicht eindeutig identifiziert werden, was auf die deutlich größere Streuung der Kornausrichtung der Schleifscheibentopographie im Gleichlauf zurückgeführt werden kann.



**Maschine:**  
Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Werkstück:**  
Nadellagerring  
IR 80x90x25; 100Cr6

**Prozessparameter:**

$v_s$	=	35	m/s
$q$	=	20800	
$v_w$	=	100,8	mm/min
$v_{fr}$	=	0,007	mm/min
$V'_w$	=	14,13	mm <sup>3</sup> /mm
$a_{eges}$	=	0,05	mm
$f_{fa}$	=	0,5	Hz
$A_{fa}$	=	2,5	mm
$\phi_{fa}$	=	0	°

Gleichlauf

**Abrichtparameter:**

$v_{sd}$	=	35	m/s
$U_d$	=	variabel	
$q_{d1/2}$	=	-0,8/0,8	
$a_{ed}$	=	0,03	mm

Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14

Bild 7-19: Einfluss des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  auf die Oberflächenstruktur bei einem Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis von  $q_{d1} = -0,8$  und  $q_{d2} = 0,8$

*Variation des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$*

Darüber hinaus wurden technologische Untersuchungen zum Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  beim Konditionieren mit zwei unterschiedlichen Abrichtüberdeckungsgraden  $U_{d1}$  und  $U_{d2}$  durchgeführt. Die Ergebnisse für die Oberflächenkennwerte in

Abhängigkeit der Abrichtstellgrößen können dem Bild 7-20 entnommen werden. Eine geringere Wirkrautiefe  $R_{t,s}$  der Schleifscheibe bei höheren Abrichtüberdeckungsgraden  $U_d$  spiegelt sich in den niedrigen Oberflächenkennwerten  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  sowie in den niedrigen Volumenparametern  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ , und  $V_{mc}$  wider. Darüber hinaus steigert sich der flächenhafte Materialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) um bis zu 97 % gegenüber den Versuchen mit einem Abrichtüberdeckungsgrad von  $U_{d1} = 1,1$ .

In Bezug auf die Erhöhung des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  im Gleichlauf lässt sich ein Anstieg des quadratischen und des arithmetischen Mittelwerts der Flächenordinaten  $S_q$  und  $S_a$  sowie der maximalen Höhe der Fläche  $S_z$  erkennen. Die gleiche Tendenz lässt sich auch für das Spitzenmaterialvolumen  $V_{mp}$  feststellen, wogegen das leere Talvolumen  $V_{vv}$  und das Kernmaterialvolumen  $V_{mc}$  nahezu konstant bleiben. Insbesondere die Reduktion des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $0,250 \mu\text{m}$ ) bei steigendem Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  im Gleichlauf lässt sich auf eine zunehmende Wirkrautiefe  $R_{t,s}$  der Schleifscheibe zurückführen, die durch die steilen Eingriffsbahnen der Diamantkörner der Abrichtrolle entsteht [SCH68, KLO05, DEN11, SPU14]. Bei einem Abrichtüberdeckungsgrad von  $U_{d2} = 7$  kann tendenziell eine Verbesserung der Oberflächenkennwerte erkannt werden, die sich in reduzierten Oberflächenkenngrößen  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  sowie in niedrigen Volumenparametern  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ , und  $V_{mc}$  widerspiegelt. Der Versuch mit einem Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis von  $q_d = 0,8$  weist entgegen der Erwartung eine geringfügig schlechtere Oberflächenqualität als der Versuch mit  $q_d = -0,8$  auf. Die Verbesserung der Oberflächenstruktur mit betragsmäßig größerem Geschwindigkeitsverhältnis  $q_d$  im Gegenlauf ist wiederum auf die Eingriffsbahnen der Diamantkörner des Abrichtwerkzeugs zurückzuführen, die sehr flach verlaufen und somit eine geringe Wirkrautiefen  $R_{t,s}$  der Schleifscheibe zur Folge haben [SCH68, KLO05, DEN11, SPU14].

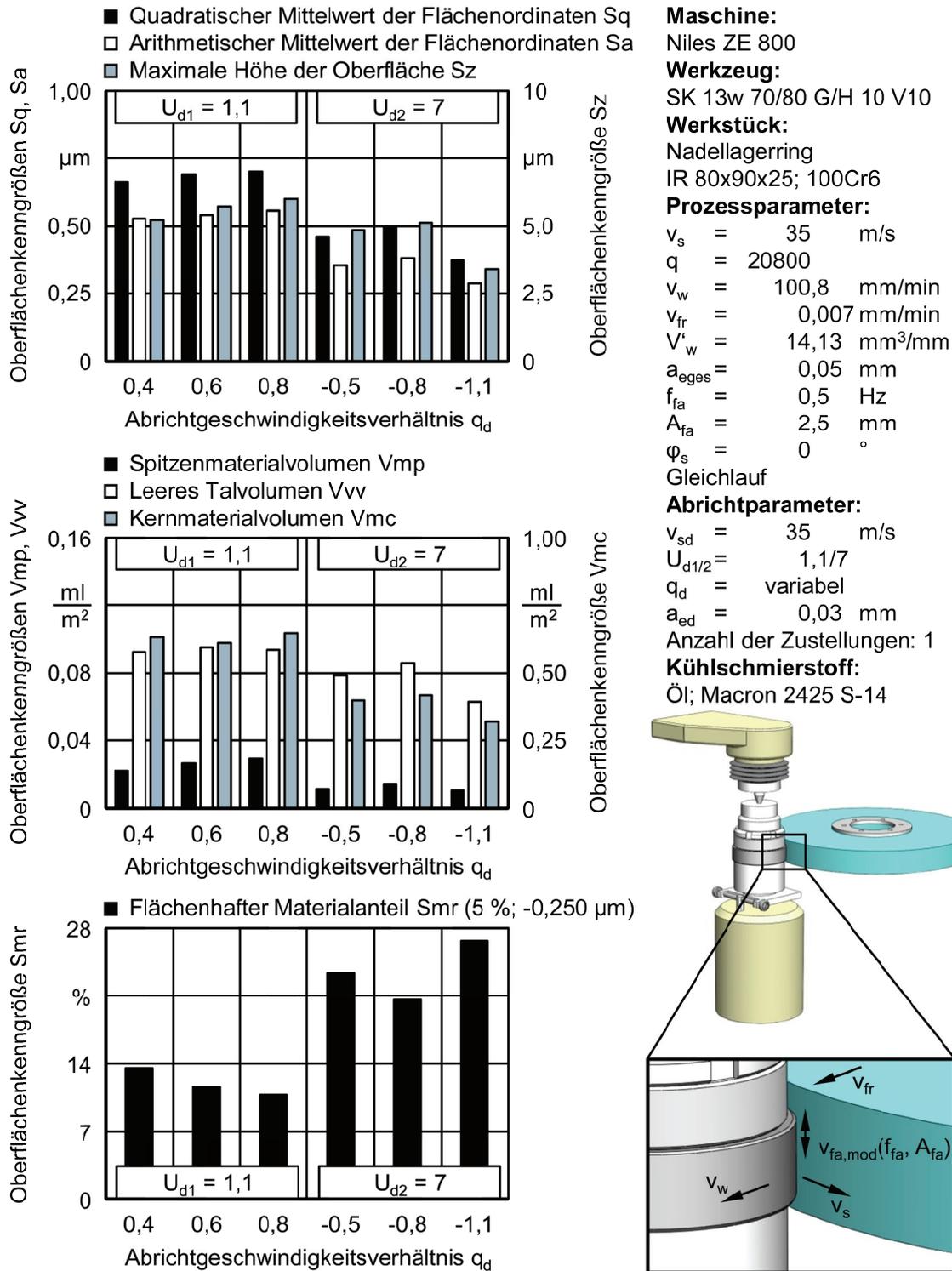


Bild 7-20: Einfluss des Abriechgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  auf die Oberflächenstruktur bei einem Abriechüberdeckungsgrad von  $U_{d1} = 1,1$  und  $U_{d2} = 7$

Zusammenfassend kann anhand der Ergebnisse auch ein deutlicher Einfluss des Konditionierprozesses für strukturierte Oberflächen identifiziert werden. Mithilfe angepasster Stellgrößen beim Konditionierprozess ist eine variable Einstellung der Höhe der Riefenstruktur möglich. Unter Einsatz des Abriechgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d = -1,1$  und des Abriech-

überdeckungsgrades  $U_{d1} = 7$  lässt sich beispielsweise der flächenhaften Materialanteil Smr (5 %; 0,250  $\mu\text{m}$ ) auf ca. 27 % erhöhen, was Vorteile hinsichtlich des Einsatzverhaltens der Oberfläche liefern könnte.

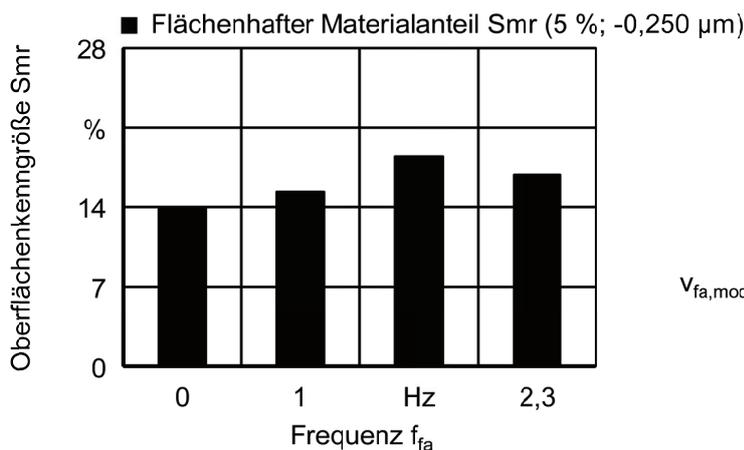
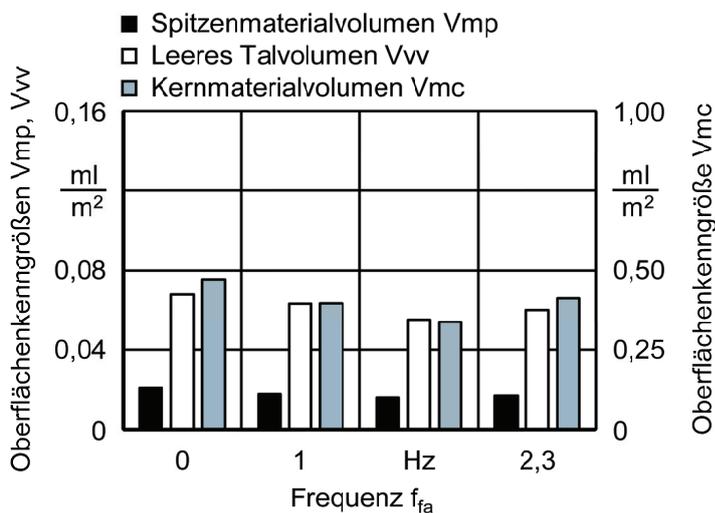
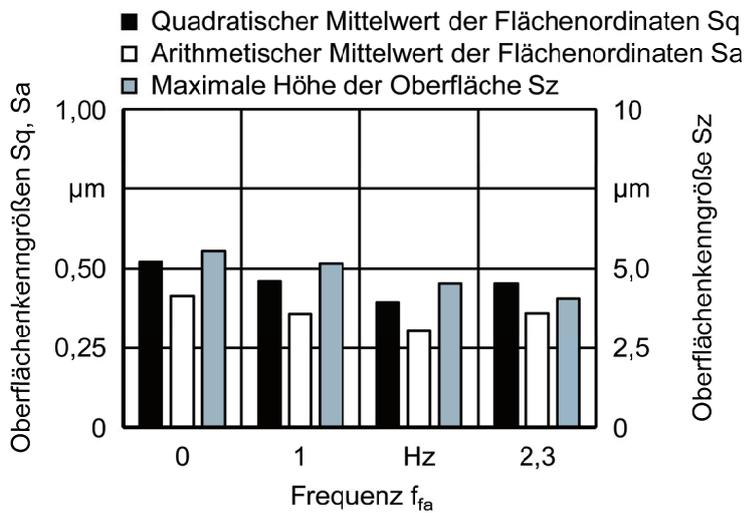
## 7.5 Variation der Schleifscheibenspezifikation

Im Hinblick auf steigende Anforderungen an Produktivität und Qualität beim Verzahnungsschleifen werden für die Schleifbearbeitungen immer häufiger keramisch gebundene CBN-Schleifscheiben eingesetzt. Diese zeichnen sich aufgrund der harten Abrasivkörner durch deutlich höher Grenzspannungs- und Grenzzeitspannungsvolumina im Vergleich zu den konventionellen Schleifscheiben aus [DEN05a, DEN05b, DEN06b, DEN12, DEN13, KLO13b, SCT13, SCT13, REJ13, DEN14c, SCT14]. Aus diesem Grund soll die Fragestellung bezüglich des Einsatzes von keramisch gebundenen CBN-Schleifscheiben für den kinematisch modulierten Rundschleifprozess zur Erzeugung von Oberflächenstrukturen geklärt werden. Dafür wurden auf der CNC-Universal-Rundschleifmaschine PF 51 der Fa. SCHAUDT MIKROSA BWF GMBH Versuche zum kinematisch modulierten Rundschleifen durchgeführt. Dabei kam eine keramisch gebundene CBN-Schleifscheibe der Spezifikation 21B 126X24 V8116-150 zum Einsatz, die für Hochleistungsrundschleifprozesse und somit für eine hohe Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  ausgelegt ist. Die Schleifscheibe wurde vor jedem Versuch mit einem Mehrkorn-Ultrapräzisionsabrichter konditioniert, siehe Kapitel 4.2. Im Vergleich zu den kinematisch modulierten Rundschleifprozessen mit konventioneller Schleifscheibe liegen die Unterschiede insbesondere in den verwendeten Umfangsgeschwindigkeiten der Schleifscheibe  $v_s$  und der Korngröße sowie im Geschwindigkeitsverhältnis  $q$  und beim eingesetzten Kühlschmierstoff. Die technologischen Untersuchungen zum kinematisch modulierten Rundschleifen mit hochharter Schleifscheibe wurden mit einer Umfangsgeschwindigkeit von  $v_s = 140 \text{ m/s}$  durchgeführt. Für die Versuche kam Emulsion als Kühlschmierstoff zum Einsatz.

Die deutlich höhere Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  sowie die geringere Korngröße  $d_g$  von 126  $\mu\text{m}$  gegenüber der Sinterkorund-Schleifscheibe mit Korngrößen  $d_g$  von etwa 180 - 210  $\mu\text{m}$  führen zu kleineren Spannungsdicken  $h_{cu}$ , was Oberflächenstrukturen mit geringeren Rauheitskennwerten zur Folge hat. Grundsätzlich lassen sich jedoch die gleichen Tendenzen für die kinematische Modulation beim Rundschleifen erkennen. Eine Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  bis 2 Hz führt zu einer Verbesserung der Oberflächenkennwerte. So lassen sich die Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$  und  $S_z$  unter Einsatz einer kinematischen Modulation im Vergleich zur konventionellen Rundschleifbearbeitung um bis zu 25 % verringern.

Die Ergebnisse zum Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenstruktur unter Einsatz einer hochharten Schleifscheibe beim kinematisch modulierten Rundschleifen mit einer Amplitude von  $A_{fa} = 1 \text{ mm}$  können dem [Bild 7-21](#) entnommen werden. Die Verläufe der flächenhaften Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  mit steigender Frequenz  $f_{fa}$  zeigen gleiche Tendenzen wie die Verläufe der Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$  und  $S_z$ . In Bezug auf ein geeignetes Verhältnis von Spitzen und Riefen auf der Oberfläche lässt sich für die Frequenz  $f_{fa} = 1 \text{ Hz}$  ein reduziertes Spitzenvolumen  $V_{mp}$  bei gleichzeitig hohem Riefenvolumen  $V_{vv}$  erkennen, was sich eventuell durch verbesserte Schmierbedingungen vorteilhaft auf die Beanspruchung der Wälzoberfläche äußern kann. Durch eine kinematische Modulation mit der Frequenz  $f_{fa} = 2 \text{ Hz}$  und der Amplitude  $A_{fa} = 1 \text{ mm}$  lässt sich hingegen ein hoher flächenhafter

Materialanteil Smr (5 %; -0,250  $\mu\text{m}$ ) realisieren. Im Vergleich zum Referenzversuch kann bei dieser Stellgrößenkombination der flächenhafte Materialanteil Smr (5 %; -0,250  $\mu\text{m}$ ) um ca. 30 % gesteigert werden.



**Maschine:**  
 Schaudt Mikrosa PF 51

**Werkzeug:**  
 21B 126X24 V8116-150

**Werkstück:**  
 Nadellagerring  
 IR 70x80x25; 100Cr6

**Prozessparameter:**  
 $v_s = 140$  m/s  
 $q = 33464$   
 $v_w = 250$  mm/min  
 $v_{fr} = 0,02$  mm/min  
 $V'_w = 12,54$  mm<sup>3</sup>/mm  
 $f_{fa} =$  variabel Hz  
 $A_{fa} = 1$  mm  
 $\phi_s = 0$  °  
 Gleichlauf

**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 140$  m/s  
 $U_d = 0,8$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 0,003$  mm  
 Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**  
 Molekulare Lösung  
 Castrol Syntilo 9554 5,5 %

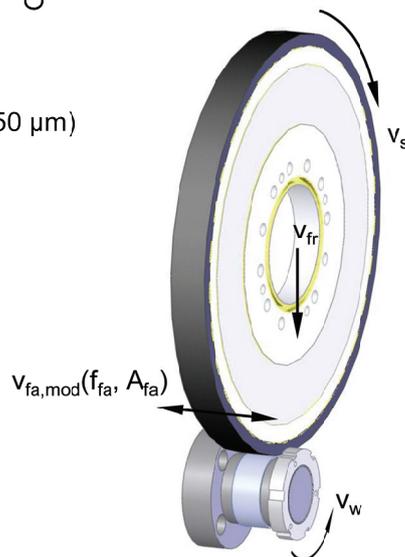


Bild 7-21: Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenstruktur unter Einsatz einer hochharten Schleifscheibe beim kinematisch modulierten Rundschleifen mit einer Amplitude von  $A_{fa} = 1$  mm

## 7.6 Empirisches Prozessmodell

Das Schleifen mit kinematischer Modulation ermöglicht die gezielte Oberflächenstrukturierung in Abhängigkeit der eingestellten Frequenz  $f_{fa}$  und Amplitude  $A_{fa}$  sowie der Phasenverschiebung  $\varphi_s$ . Die unterschiedlichen Oberflächenstrukturen lassen sich dabei mithilfe der Oberflächenkennwerte charakterisieren und vergleichen. Auf Basis der Ergebnisse aus den technologischen Untersuchungen zum kinematisch modulierten Rundschleifprozess mit konventioneller Schleifscheibe lässt sich ein empirisches Prozessmodell für den Analogieprozess unter Einbeziehung des Einflusses der Frequenz  $f_{fa}$  und der Amplitude  $A_{fa}$  erstellen. Dafür wird eine mathematische Modelfunktion entwickelt, welche als Instrument zur praxisorientierten Auslegung von Oberflächenstrukturen beim Rundschleifen dienen soll. Es wurde ein quadratischer Ansatz für die Funktion gewählt, siehe Formel 5.

$$f(A_{fa}, f_{fa}) = A_F + B_F \cdot A_{fa} + C_F \cdot f_{fa} + D_F \cdot A_{fa} \cdot f_{fa} + E_F \cdot A_{fa}^2 + F_F \cdot f_{fa}^2 \quad (5)$$

Die Formel 5 stellt den Zusammenhang zwischen Modulationsparametern und Oberflächenkennwerten dar. Die zusammengestellten Funktionsparameter für die ausgewählten Oberflächenkennwerten  $S_a$ ,  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$  können der Tabelle 7-1 entnommen werden. Anhand der Kenngrößen  $V_{mp}$  und  $V_{vv}$  lassen sich geeignete Verhältnisse aus Spitzenvolumen und Riefenvolumen der Oberflächenstruktur in Abhängigkeit der Modulationsparameter bestimmen, womit ein verbessertes tribologisches Verhalten der Funktionsflächen erreicht werden könnte. Der 3D-Oberflächenkennwert  $S_a$  dient zusätzlich als Referenz zu dem in der Industrie und Wissenschaft häufig verwendeten arithmetischen Mittelwert der Profildordinaten  $R_a$ .

Tabelle 7-1: Funktionsparameter und Bestimmtheitsmaß für die regressierte Modellfunktion

Kenngrößen	Funktionsparameter						Bestimmtheitsmaß
	$A_F$	$B_F$	$C_F$	$D_F$	$E_F$	$F_F$	
$S_a$	0,4467	-0,3234	-0,1676	0,0832	0,0660	0,0184	0,7163
$V_{mp}$							0,7745
$V_{vv}$							0,6801

Beispielhaft wird der arithmetische Mittelwert der Flächenordinaten  $S_a$  mit Hilfe des empirischen Prozessmodells für die untersuchten Frequenzen von  $f_{fa} = 0$  Hz bis  $f_{fa} = 3,2$  Hz und für die Amplituden von  $A_{fa} = 0$  mm bis  $A_{fa} = 4$  mm dargestellt, siehe Bild 7-22. Es wird ein Anstieg des arithmetischen Mittelwerts der Flächenordinaten  $S_a$  hin zu niedrigen Frequenzen  $f_{fa}$  und niedrigen Amplituden  $A_{fa}$  deutlich. Für die ermittelten Funktionsparameter des quadratischen Ansatzes liegt das Bestimmtheitsmaß für den arithmetischen Mittelwert der Flächenordinaten  $S_a$  bei  $R^2 = 0,7163$ . Das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  lässt sich durch weitere Schleifversuche und damit zusätzlichen Messdaten erhöhen.

Beispielhaft wird für eine Frequenz von  $f_{fa} = 1$  Hz und eine Amplitude von  $A_{fa} = 1,5$  mm der arithmetische Mittelwert der Flächenordinaten  $S_a$  mit Hilfe des Prozessmodells berechnet. In diesem Fall ergibt sich für den arithmetischen Mittelwert der Flächenordinaten  $S_a$  ein Wert von  $S_a = 0,5705$   $\mu\text{m}$ . Darüber hinaus kann für diese Stellgrößenkombination der kinemati-

schen Modulation ein Spitzenmaterialvolumen von  $V_{mp} = 0,0251 \text{ ml/m}^2$  sowie ein leeres Talvolumen von  $V_{vv} = 0,1039 \text{ ml/m}^2$  bestimmen werden. Die ermittelten Kennwerte aus dem empirischen Prozessmodell stimmen gut mit den Oberflächenkennwerten der mit den Modulationsparametern geschliffenen Lagerringen überein:  $S_a = 0,581 \text{ } \mu\text{m}$ ,  $V_{mp} = 0,0235 \text{ ml/m}^2$  und  $V_{vv} = 0,1069 \text{ ml/m}^2$ .

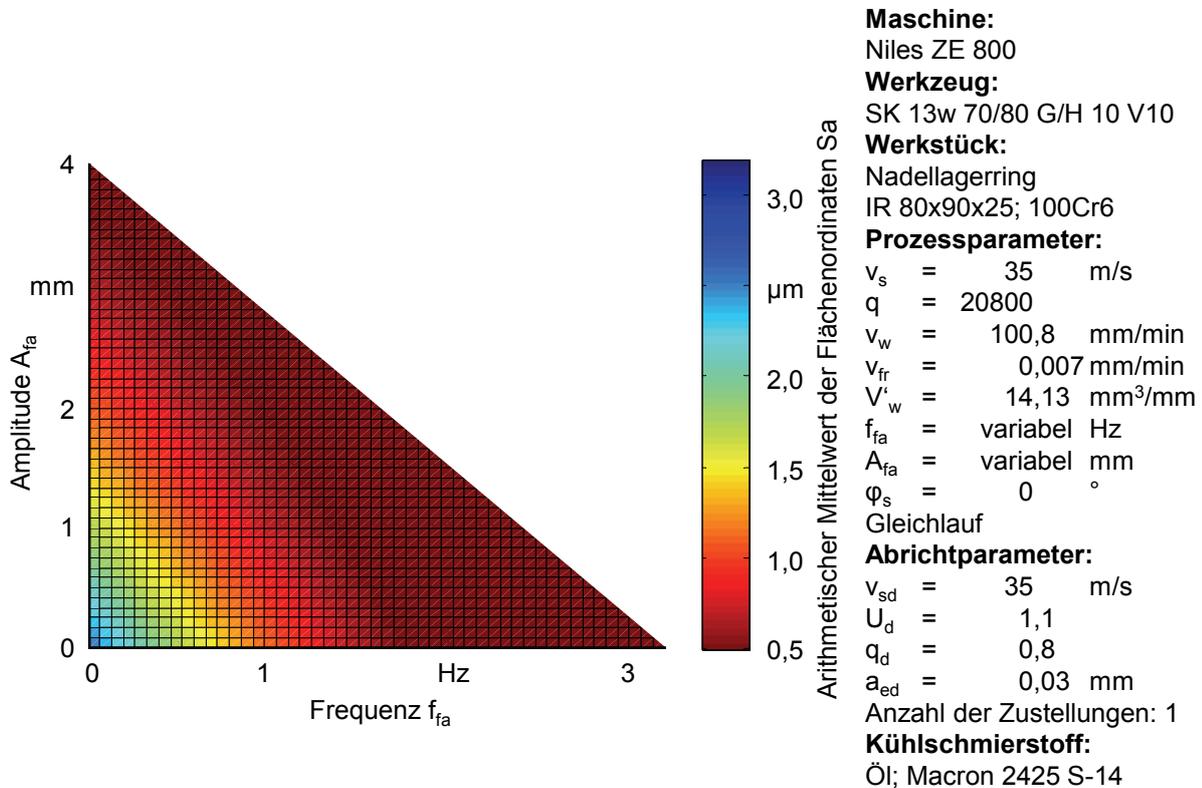


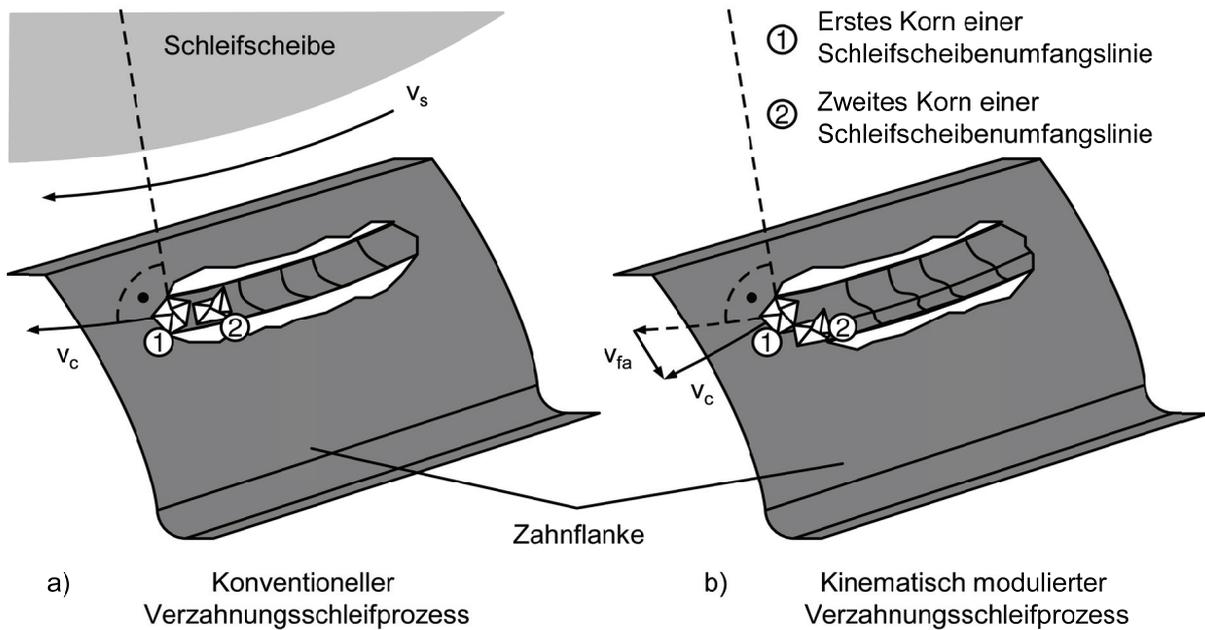
Bild 7-22: Prozessmodell: Arithmetischer Mittelwert der Flächenordinaten  $S_a$

---

## 8 Kinematische Modulation beim Verzahnungsschleifen

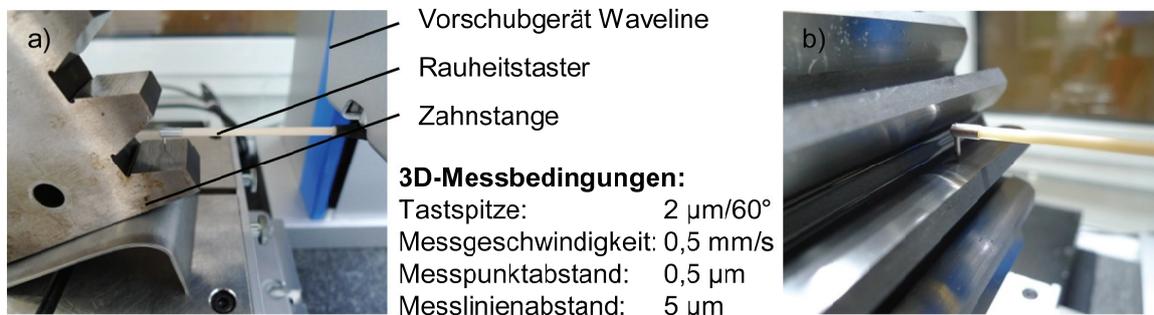
Die in der Literatur dokumentierten Ansätze zur Oberflächenstrukturierung von Zahnflanken durch spanende Verfahren sind überwiegend für den Einsatz kleinmoduliger Zahnräder vorgesehen. So führen beispielsweise das Wälzschleifen mit Shiftkinematik sowie das Verzahnungshonen im Vergleich zu konventionellen Verzahnungsschleifprozessen zu veränderten Strukturen auf der Zahnflankenoberfläche [KÖL00, RÜT00, MAR01, SCP03, STW08, VUC08a, KAP10, TÜR15b, TÜR15a]. Derzeit werden Zahnräder für Getriebe von Windkraftanlagen überwiegend durch Profilschleifen hergestellt. Die Bearbeitung der Zähne erfolgt hierbei diskontinuierlich mit einer profilierten Schleifscheibe und kann sowohl im Einflankenals auch im Zweiflankenschliff durchgeführt werden. Eine gezielte Oberflächenstrukturierung der großmoduligen Zahnräder bietet im Hinblick auf die Verbesserung der Schmierbedingungen ein großes Potenzial, um höheren Belastungen standzuhalten und die Lebensdauer der Zahnräder durch einen verringerten Flankenverschleiß zu verbessern. Im Folgenden werden mit dem kinematisch modulierten Profil-, Teilwälz- und topologischen Generierungsschleifprozess drei mögliche Prozessstrategien zur gezielten Oberflächenstrukturierung von Verzahnungen vorgestellt sowie die Analyse des Einflusses der Stellgrößen auf die Kenngrößen des Arbeitsergebnisses für die jeweiligen Verfahren beschrieben. Die Ergebnisse der technologischen Untersuchungen können dabei als Grundlage für industrielle Weiterentwicklungen beim Zahnflanken-Profilschleifen von großmoduligen Zahnrädern dienen. In Bezug auf thermische Schädigungen konnten bei den Versuchen zu den kinematisch modulierten Verzahnungsschleifbearbeitungen keine Auffälligkeiten festgestellt werden, so dass im folgenden Kapitel auf diese Werkstoffeigenschaften des Werkstücks nicht weiter eingegangen wird.

Beim Einsatz einer kinematischen Modulation beim Verzahnungsschleifprozess kommt es aufgrund der zusätzlichen Bewegung zu veränderten Korneingriffsbahnen während der Bearbeitung. Diese Veränderung der Korneingriffsbahnen kann zu einer Reduzierung der Materialaufwürfe der Schleifriefen und damit zu verringerten Rauheitskennwerten auf der Zahnflanke führen, was in einer Veränderung der Oberflächenstruktur resultiert. Im Kapitel 5 wurde dafür bereits eine Modellvorstellung erarbeitet, aus der ein durch die kinematische Modulation bedingtes quer gerichtetes Überschleifen der Riefenaufwürfe hervorgeht. Bild 8-1 stellt eine Prinzipskizze für die Modellvorstellung der Eingriffsbedingungen beim kinematisch modulierten Verzahnungsschleifprozess dar.



**Bild 8-1:** Modellvorstellung der Eingriffsbedingungen; a) Konventioneller Verzahnungsschleifprozess; b) Kinematisch modulierter Verzahnungsschleifprozess

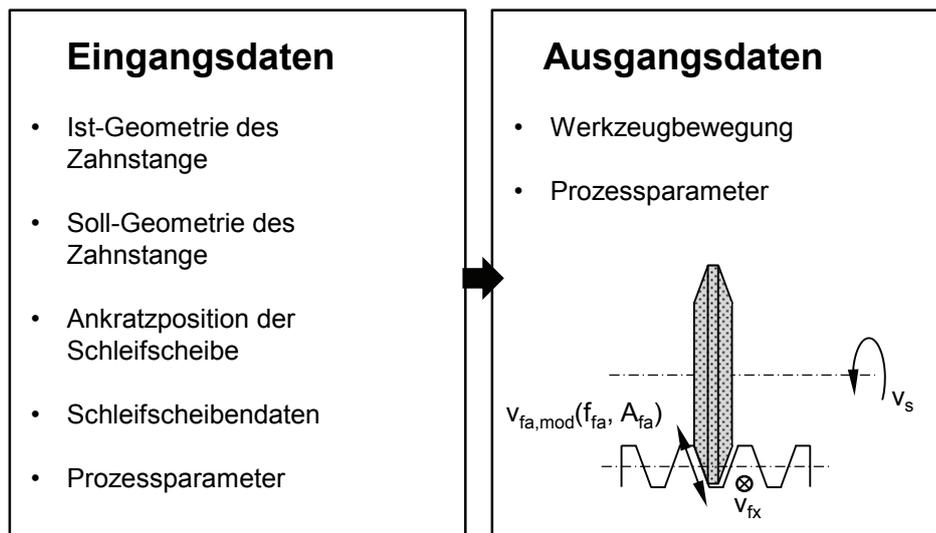
Die Bewertung des Einflusses der unterschiedlichen Stellgrößen der kinematischen Modulation auf die Oberflächenkenngrößen der Zahnflanken erfolgt mit dem taktilen Rauheits- und Konturenmessgerät Hommel-Etamic nanoscan855 der Firma HOMMEL-ETAMIC GMBH, Villingen-Schwenningen, Deutschland [VDI/VDE2615]. Der Taster hat eine Diamantspitze mit Tastspitzenradius  $r_{tip}$  von  $2\ \mu\text{m}$  und Kegelwinkel von  $60^\circ$  [DINENISO3274]. Die jeweilige Breite der Messfläche wird dabei in Abhängigkeit der kinematischen Modulation bestimmt und beträgt mindestens ein Viertel der Periodenlänge  $T_s$ , wobei der Messpunktastand für jede Messbahn  $0,5\ \mu\text{m}$  und der Messlinienabstand bei jeder 3D-Oberflächenmessung  $5\ \mu\text{m}$  beträgt. Die Länge der Messstrecken  $l_n$  beträgt jeweils  $4\ \text{mm}$  nach DIN EN ISO 4288 [DINENISO4288]. Die Bestimmung der jeweiligen Oberflächenkennwerte erfolgt dabei immer an zwei bearbeiteten Zahnflanken. Eine Darstellung der taktilen 3D-Oberflächenmessung der Zahnstange sowie des Zahnrads aus 16MnCr5 kann dem **Bild 8-2** entnommen werden.



**Bild 8-2:** Taktile 3D-Oberflächenmessung an den Zahnflanken; a) 16MnCr5-Zahnstange; b) 16MnCr5-Zahnrad

## 8.1 Kinematisch modulierter Profilschleifprozess

Für die technologischen Untersuchungen wurde zunächst ein kinematisch modulierter Zahnflanken-Profilschleifprozess für Zahnstangen mit einem entsprechenden Bezugsprofil für Evolventenverzahnungen von Stirnrädern (Zylinderrädern) entwickelt [DIN867]. Die kinematische Modulation beim Zahnflanken-Profilschleifen von Zahnstangen ergibt sich dabei aus einer Überlagerung der zwei Vorschubgeschwindigkeiten  $v_{fy}$  und  $v_{fz}$ , so dass die kinematische Modulation entsprechend des gewünschten Profilwinkels  $\alpha_p = 20^\circ$  realisiert werden kann. Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  im Schleifprozess setzt sich dabei aus der modulierten Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  und der axialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fx}$  sowie der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  zusammen. Abhängig von der Tiefe der Protuberanz lässt sich ein entsprechender Bereich von Amplituden  $A_{fa}$  bei der kinematischen Modulation realisieren, wobei das Schleifscheibenprofil entsprechend verlängert werden muss, um alle Bereiche der Zahnflanke vollständig zu bearbeiten. Ein schematischer Aufbau der Schritte zur Erstellung des Schleifprogrammes sowie eine Prinzipskizze der Prozesskinematik beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profilschleifen von Zahnstangen sind in [Bild 8-3](#) dargestellt. Die kinematisch modulierte Schleifbearbeitung der Zahnflanken erfolgt hierbei einflankig.

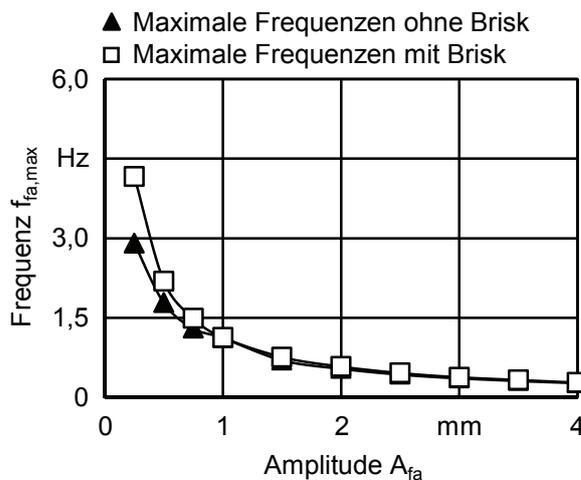


**Bild 8-3:** Schematischer Aufbau des Programmes sowie die Prozesskinematik beim kinematisch modulierten Profilschleifprozess

Bei der kinematisch modulierten Profilschleifbearbeitung erfolgt die Modulationsbewegung auf der Zahnrad-Profilschleifmaschine mithilfe von zwei Maschinenachsen. Die dafür realisierbaren und identifizierten Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  sind in [Bild 8-4](#) dargestellt. Deutlich wird hierbei das verbesserte Beschleunigungsverhalten der Maschinenachsen bei kleinen Amplitude  $A_{fa}$  im BRISK-Modus. Aufgrund der höheren Bahn Genauigkeiten wird für die technologischen Untersuchungen jedoch der SOFT-Modus verwendet, siehe Kapitel 7.

Für die technologischen Versuche wurde zunächst eine Schleifbearbeitung aller Zahnflanken der Zahnstange durchgeführt, um vergleichbare Ausgangsbedingungen für die Zahnflanken zu generieren. Im Rahmen der Untersuchungen wurden dann sowohl die Frequenz  $f_{fa}$  und

die Amplitude  $A_{fa}$  als auch die Phasenverschiebung  $\varphi_s$  beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profil schleifprozess variiert. Die Versuchsparameter wie Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und die axiale Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fx}$  sowie die Abrichtparameter für die keramisch gebundene Sinterkorund-Schleifscheibe wurden innerhalb der Untersuchungen nicht variiert. Für die Form- und Lagegenauigkeiten der Verzahnung konnten keine signifikanten Abhängigkeiten von der kinematisch modulierten Profilschleifbearbeitung festgestellt werden, weshalb im folgenden Kapitel auf diese Bewertungsgrößen nicht weiter eingegangen wird.



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SK13w 46/2 - H 10 V

**Werkstück:**

Zahnstange:  $z = 5$ ;  $m_n = 9$  mm  
 $b = 22$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;  
 16MnCr5; 60 HRC

**Prozessparameter:**

$v_s = 35$  m/s  
 $v_{fa} = 300$  mm/min  
 $a_e = 7$   $\mu$ m  
 $f_{fa} =$  variabel Hz  
 $A_{fa} =$  variabel mm  
 $\varphi_s = 0$   $^\circ$

Gleichlauf

**Kühlschmierstoff:**

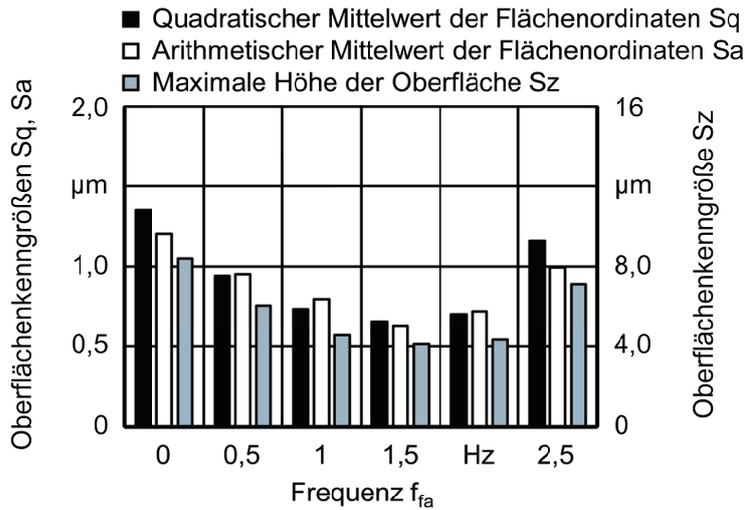
Öl; Macron 2425 S-14

**Bild 8-4:** Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für den kinematisch modulierten Profilschleifprozess

*Variation der Frequenz  $f_{fa}$*

Der Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profil schleifen von 16MnCr5-Zahnstangen auf die 3D-Oberflächenkennwerte ist in Bild 8-5 dargestellt. Es wird deutlich, dass sich die Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  mit einer kinematischen Modulation bei einem Profilschleifprozess reduzieren lassen. Eine Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  bis 1,5 Hz bei gleichbleibender axialer Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fx}$  führt zu einer signifikanten Reduzierung der Oberflächenkennwerte um ca. 50 %. Als Grund für die verbesserte Oberflächenqualität können die veränderten Korneingriffsbahnen während der Schleifbearbeitung genannt werden, was in einer Reduzierung der Materialaufwürfe bei den Schleifriefen und damit in verringerten Rauheitskennwerten resultiert.

Bei Betrachtung der Kenngrößen der flächenhaften Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  wird erkennbar, dass sich die geringsten Werte für die Frequenz  $f_{fa} = 1,5$  Hz ergeben. Das Spitzenvolumen  $V_{mp}$  reduziert sich um ca. 55 %, wobei das Riefenvolumen  $V_{vv}$  nur um ca. 50 % sinkt. Zusätzlich wird anhand des Verlaufs des Flächenmaterialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250$   $\mu$ m) in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  sichtbar, dass sich der Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250$   $\mu$ m) bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 1,5$  Hz verglichen mit dem herkömmlichen Profilschleifprozess um ca. 40 % steigern lässt.



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SK13w 46/2 - H 10 V

**Werkstück:**

Zahnstange:  $z = 5$ ;  $m_n = 9$  mm  
 $b = 22$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;  
 16MnCr5; 50 HRC

**Prozessparameter:**

$v_s = 35$  m/s  
 $v_{fa} = 300$  mm/min  
 $a_e = 0,007$  mm  
 $V'_w = 0,30$  mm<sup>3</sup>/mm  
 $f_{fa} =$  variabel Hz  
 $A_{fa} = 0,25$  mm  
 $\varphi_s = 0^\circ$

Gegenlauf

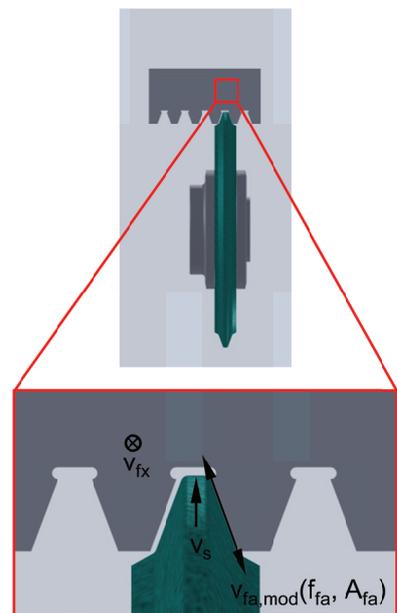
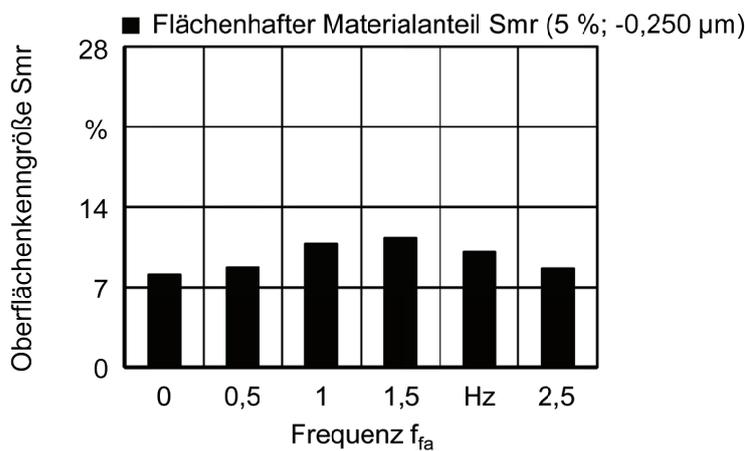
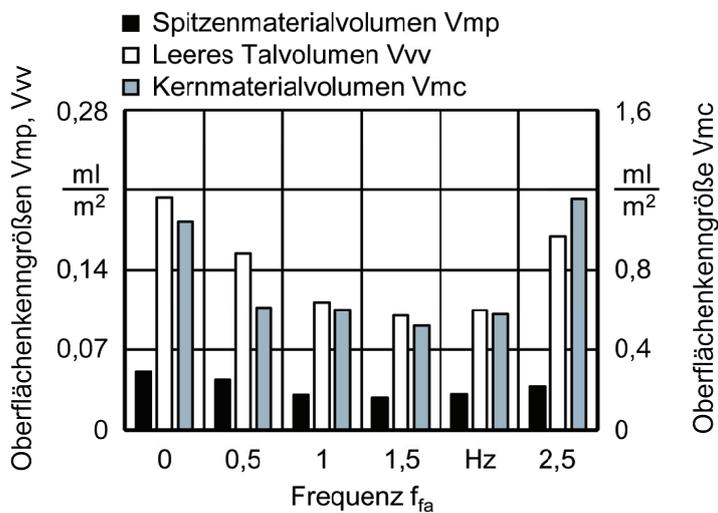
**Abriechparameter:**

$v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 1,6$   
 $q_d = -0,8$   
 $a_{ed} = 0,06$  mm

Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**

Öl; Macron 2425 S-14

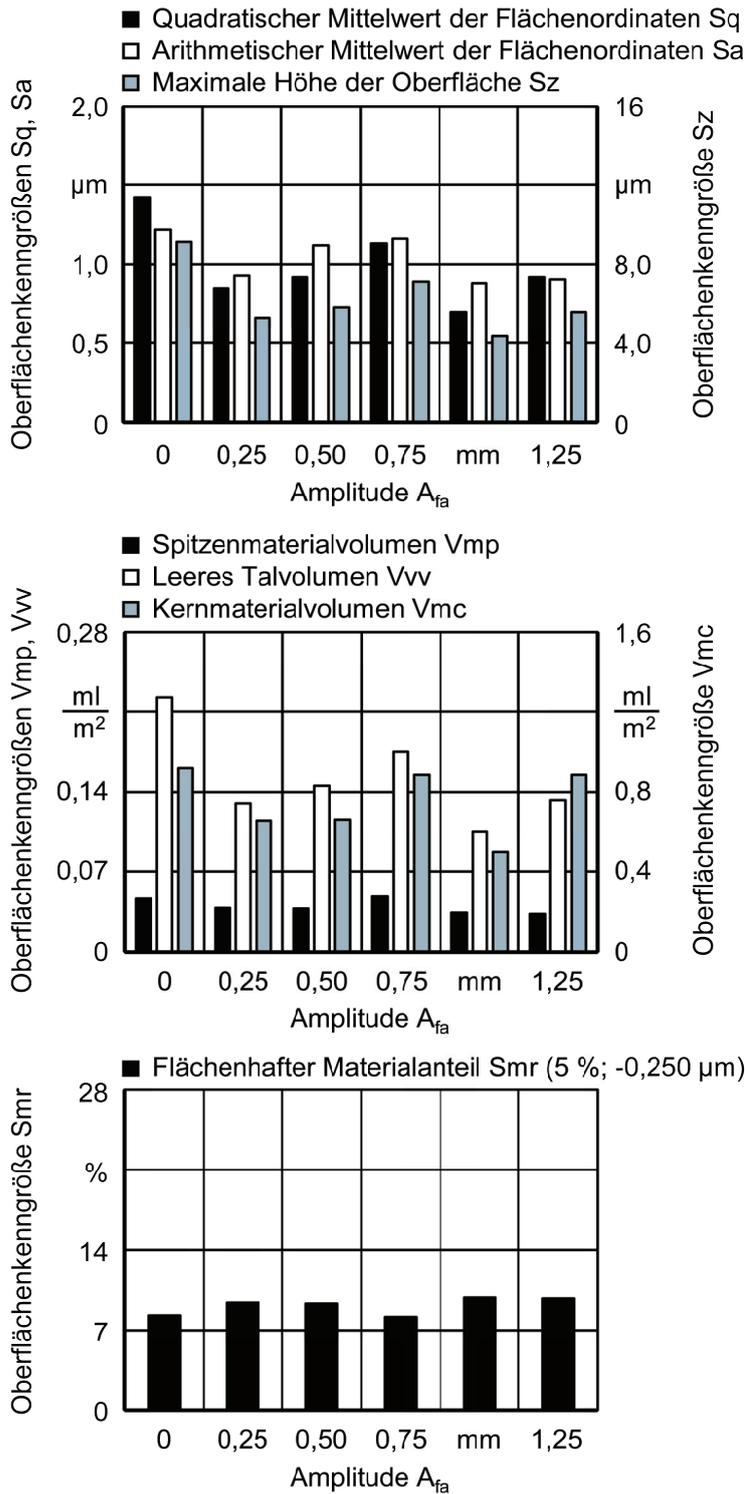


**Bild 8-5:** Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profileschleifen bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,25$  mm

*Variation der Amplitude  $A_{fa}$*

Zusätzlich wurde im Rahmen von technologischen Untersuchungen der Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  bei der Frequenz  $f_{fa} = 1,5$  Hz beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profileschleifen auf die 3D-Oberflächenkennwerte der Zahnflanke analysiert, siehe [Bild 8-6](#).

Auch hier lässt sich ein Einfluss der kinematischen Modulation beim Profilschleifen erkennen. Die geringsten Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_q$  und  $S_z$  können beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profilschleifprozess mit einer Amplitude  $A_{fa} = 1$  mm identifiziert werden. Die Volumenkenngößen  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  zeigen darüber hinaus auch geringe Werte bei einer Amplitude  $A_{fa} = 1$  mm. Bei einer Amplitude  $A_{fa} = 1,25$  mm kann im Vergleich zu den anderen Versuchen neben einem geringen Spitzenvolumen  $V_{mp}$  auch ein hohes Riefenvolumen  $V_{vv}$  festgestellt werden, was verbesserte tribologische Eigenschaften der Oberfläche für einen EHD-Kontakt vermuten lässt. In Bezug auf den Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) lässt sich dagegen ein geringerer Einfluss bei einer Veränderung der Amplituden  $A_{fa}$  im Vergleich zur Variation der Frequenz  $f_{fa}$  für den kinematisch modulierten Profilschleifprozess im untersuchten Parameterfeld erkennen.



**Maschine:**  
Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
SK13w 46/2 - H 10 V

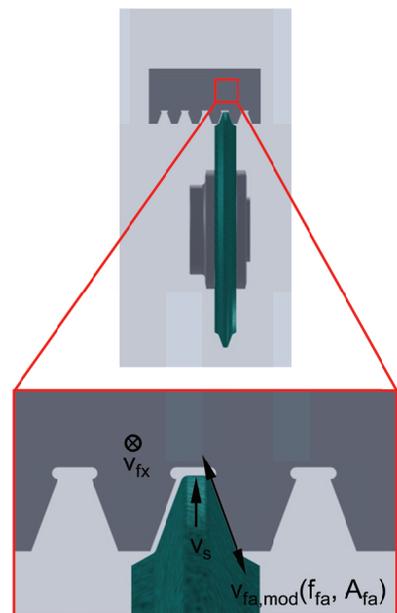
**Werkstück:**  
Zahnstange:  $z = 5$ ;  $m_n = 9$  mm  
 $b = 22$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;  
16MnCr5; 50 HRC

**Prozessparameter:**  
 $v_s = 35$  m/s  
 $v_{fa} = 300$  mm/min  
 $a_e = 0,007$  mm  
 $V'_w = 0,30$  mm<sup>3</sup>/mm  
 $f_{fa} = 1,5$  Hz  
 $A_{fa} =$  variabel mm  
 $\varphi_s = 0$  °

Gegenlauf

**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 1,6$   
 $q_d = -0,8$   
 $a_{ed} = 0,06$  mm  
Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14



**Bild 8-6:** Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profilschleifen bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 1,5$  Hz

### Variation der Phasenverschiebung $\varphi_s$

Die Variation der Frequenz  $f_{fa}$  sowie der Amplitude  $A_{fa}$  beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profilschleifen hat einen deutlichen Einfluss auf die Oberflächenkennwerte sowie auf die Oberflächenstruktur. Darüber hinaus lassen sich durch eine Phasenverschiebung  $\varphi_s$

beim kinematisch modulierten Verzahnungsschleifen mit einem mehrfachen Überlauf der Schleifscheibe gekreuzte Schleifspuren auf den Zahnflankenoberflächen realisieren, was zu einer Erzeugung von plateauförmigen Oberflächen mit Mikrodruckkammern führen kann. Die phasenverschobene kinematische Modulation wird dabei durch einen zusätzlichen Ausfunkturbereich realisiert, wodurch sich eine Überlagerung der multidirektionalen Schleifspuren auf der Zahnflankenoberfläche einstellen lässt. Ein Vergleich der Oberflächenstruktur nach dem konventionellen und kinematisch modulierten Zahnflanken-Profilschleifen ist in Bild 8-7 dargestellt. Gekreuzte Schleifspuren lassen sich bei einer hier eingestellten Phasenverschiebung von  $\varphi_s = 180^\circ$  im optisches Erscheinungsbild erkennen.

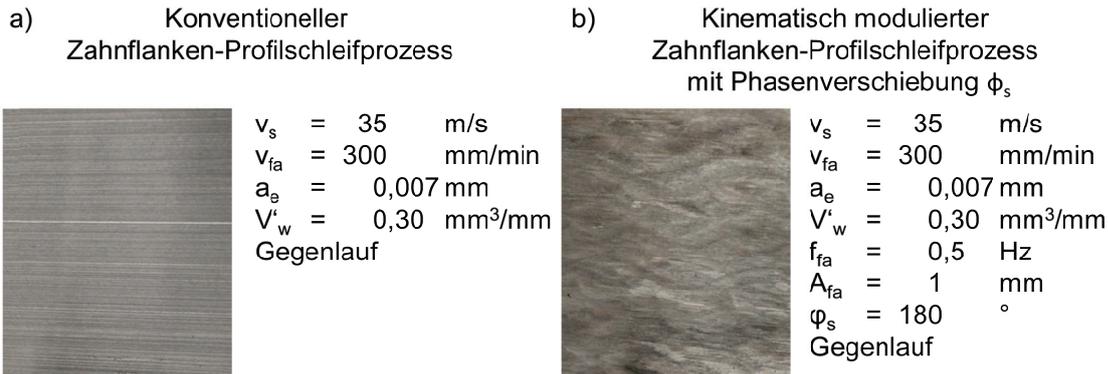
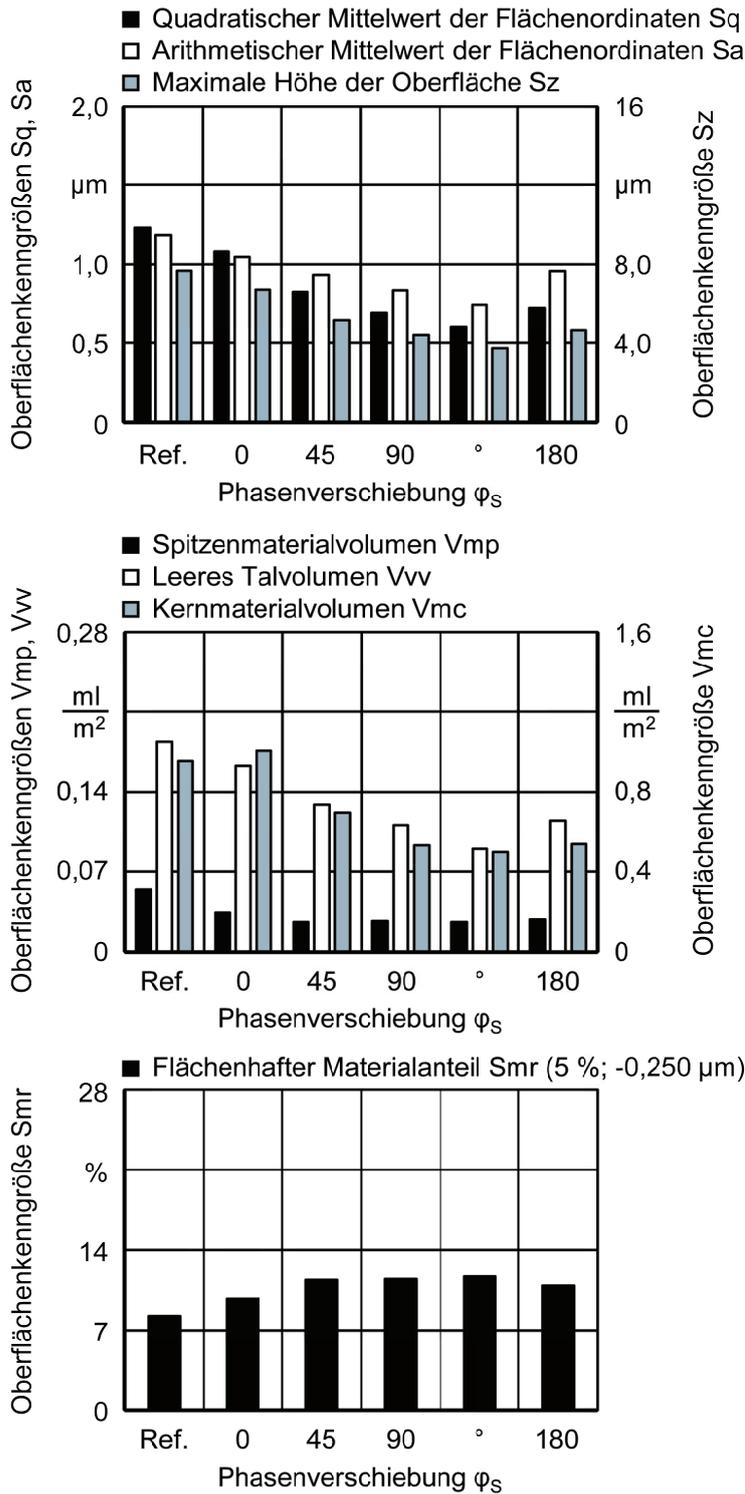


Bild 8-7: Optisches Erscheinungsbild der Oberflächenstruktur; a) Konventioneller Zahnflanken-Profilschleifprozess; b) Kinematisch modulierter Zahnflanken-Profilschleifprozess mit Phasenverschiebung  $\varphi_s$

Der Einfluss der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profilschleifen von 16MnCr5-Zahnstangen auf die 3D-Oberflächenkennwerte wurde für die Frequenz  $f_{fa} = 1,5 \text{ Hz}$  und für die Amplitude  $A_{fa} = 1,5 \text{ mm}$  analysiert. Bild 8-8 stellt den Verlauf der Oberflächenkennwerte in Abhängigkeit der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  dar. Die Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$  und  $S_q$  lassen sich mit einer kinematischen Modulation und in Abhängigkeit der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  im Vergleich zum Referenzversuch (Ref.) reduzieren. Bei Betrachtung der Kenngrößen des flächenhaften Materialanteils  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  wird deutlich, dass sich geringste flächenhafte Oberflächenkennwerte bei der Phasenverschiebung  $\varphi_s = 135^\circ$  ergeben. In Bezug auf ein geeignetes Verhältnis von Spitzen und Riefen auf der Oberfläche lässt sich für die Phasenverschiebung  $\varphi_s = 180^\circ$  ein reduziertes Spitzenvolumen  $V_{mp}$  bei gleichzeitig hohem Riefenvolumen  $V_{vv}$  erkennen. Zusätzlich wird anhand des Verlaufs für den Flächenmaterialanteil  $Sm_r$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) deutlich, dass der Flächenmaterialanteil  $Sm_r$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) für die Phasenverschiebung  $\varphi_s = 135^\circ$  verglichen mit dem Referenzversuch um ca. 42 % gesteigert werden kann. Eine zusätzliche Phasenverschiebung  $\varphi_s$  zum Versuch mit  $\varphi_s = 0^\circ$  führt hinsichtlich des Flächenmaterialanteils  $Sm_r$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) nur zu geringfügigen Änderungen, jedoch können die gekreuzten Schleifspuren auf der Oberfläche vorteilhaft für die Schmierfilmbedingung im Wälzkontakt sein. Eine Evaluierung des Einflusses der Oberflächenstruktur auf das Einsatzverhalten müsste jedoch im Rahmen von tribologischen Untersuchungen erfolgen.



**Maschine:**  
 Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
 SK13w 46/2 - H 10 V

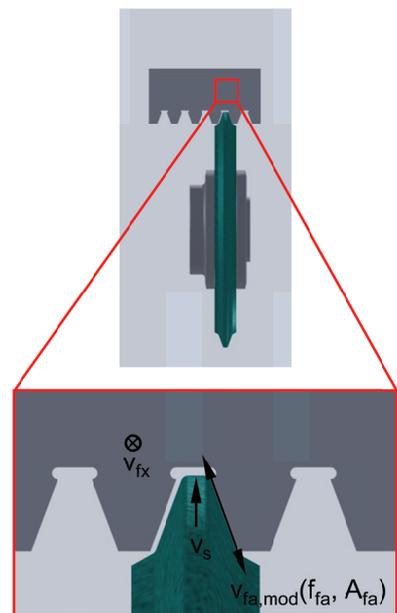
**Werkstück:**  
 Zahnstange:  $z = 5$ ;  $m_n = 9$  mm  
 $b = 22$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;  
 16MnCr5; 50 HRC

**Prozessparameter:**  
 $v_s = 35$  m/s  
 $v_{fa} = 300$  mm/min  
 $a_e = 0,007$  mm  
 $V'_w = 0,30$  mm<sup>3</sup>/mm  
 $f_{fa} = 1,5$  Hz  
 $A_{fa} = 0,25$  mm  
 $\varphi_s = \text{variabel } ^\circ$

Gegenlauf

**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 1,6$   
 $q_d = -0,8$   
 $a_{ed} = 0,06$  mm  
 Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**  
 Öl; Macron 2425 S-14



**Bild 8-8:** Einfluss der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  auf die Oberflächenstruktur beim kinematisch modulierten Zahnflanken-Profileschleifen bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,25$  mm und einer Frequenz von  $f_{fa} = 1,5$  Hz

## 8.2 Kinematisch modulierter Teilwälzschleifprozess

Aufbauend auf den Ergebnissen des Analogieprozesses sowie des kinematisch modulierten Profilschleifprozesses sollen die Erkenntnisse auf evolventenförmige Zahnprofile übertragen

werden. Dafür wurde zunächst ein kinematisch modulierter Teilwälzschleifprozess für geradzahnte Stirnräder entwickelt, bei dem die Erzeugung einer Evolvente auf der Zahnflanke wie beim konventionellen Teilwälzschleifprozess durch eine kontinuierliche Abwälzbewegung zwischen dem Werkzeug und dem Werkstücke erfolgt [MEI79a, MEI79b, KLO05, BAU11]. Das Teilwälzschleifen kommt zurzeit aufgrund der langen Bearbeitungszeit vorwiegend noch bei Profilen mit sehr komplexen Modifikationen zum Einsatz [NIL15]. Im Vergleich zum herkömmlichen Teilwälzschleifprozess führt die Schleifscheibe zusätzlich noch eine Modulationsbewegung entlang der Profilwinkelebene der Schleifscheibe aus. Dies führt zu einer Veränderung der Korneingriffsbahnen und somit der Oberflächenstruktur der Zahnflanke. Die Schnittgeschwindigkeit  $v_c$  setzt sich bei dem kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess aus der Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$ , der axialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fx}$ , der Wälzgeschwindigkeit  $v_{w\ddot{a}lz,rot}$  und der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  zusammen. Ein schematischer Aufbau der Schritte zur Erstellung des Schleifprogramms sowie die Prozesskinematik beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess sind als Prinzipskizze in Bild 8-9 dargestellt, wobei auch hier die Bearbeitung der Zahnflanken einflankig erfolgt. Die Parameter für die kinematische Modulation können hierbei als Prozessparameter in das NC-Programm eingegeben werden, wofür jedoch der entsprechende Korrekturfaktor  $K_s$  bekannt sein muss.

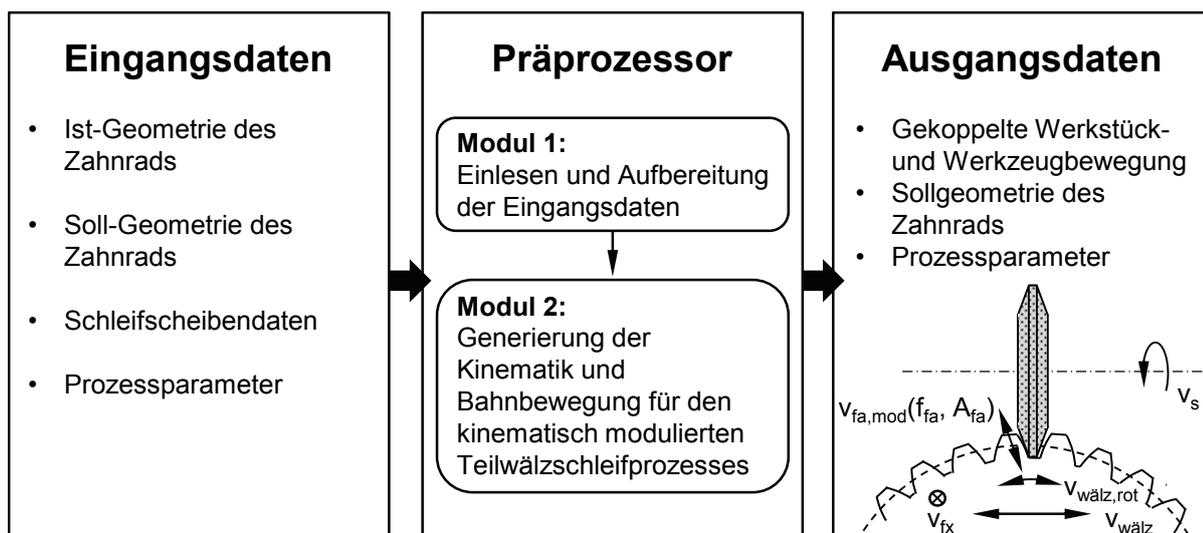


Bild 8-9: Schritte zur Erstellung des Schleifprogramms sowie die Prozesskinematik beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess

Der kinematische Zusammenhang beim Teilwälzschleifen entspricht einer Stirnrad-Zahnstangen-Paarung, wobei die durch den Wälzvorgang entstehende Bogenlänge  $G$  am Zahnrad durch eine translatorische Bewegung der Schleifscheibe kompensiert werden muss [BAU11]. Für die Umsetzung einer kinematischen Modulation beim Teilwälzschleifen wird die Werkzeugbahn in Teilstrecken zerlegt, um die entsprechenden Koordinaten zu berechnen und die Zusammenhänge aller Teilstrecken vektoriell ermitteln zu können (siehe Bild 8-10). Die entsprechende Bahnbewegung besteht aus einer Komponente in Richtung der Wälzgeschwindigkeit  $v_{w\ddot{a}lz,rot}$ , einem Anteil in radialer Richtung (Y-Richtung) sowie einer Ausgleichsbewegung in tangentialer Richtung (Z-Richtung).

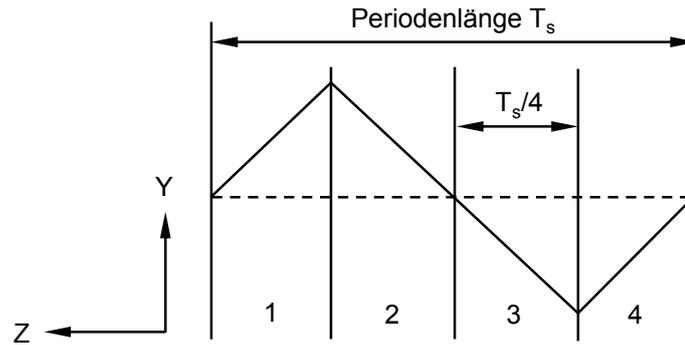


Bild 8-10: Zerlegung der Bahnbewegung beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess

Aufgrund der zusätzlichen Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  sowie einer notwendigen Kopplung zwischen der rotatorischen Werkstückbewegung und der Tangentialbewegung der Schleifscheibe ergeben sich für die entsprechenden Maschinenachsen unterschiedlichen Geschwindigkeitsverläufe für eine Wälzung, siehe Bild 8-11. Die höchste Geschwindigkeit muss hierbei von der Y-Achse der Schleifmaschine realisiert werden, was auf die Geometrie des entsprechenden Bezugsprofils für Evolventenverzahnungen von Stirnrädern mit einem Eingriffswinkel von  $\alpha_n = 20$  Grad zurückzuführen ist [DIN867].

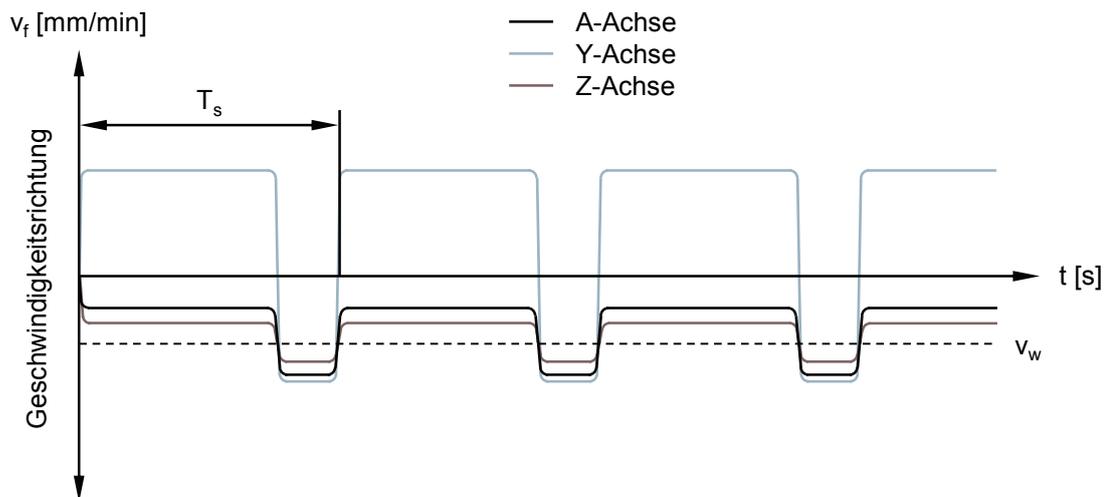


Bild 8-11: Qualitative Geschwindigkeitsverläufe der verwendeten Maschinenachsen beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen

Aufgrund der Kopplung von vier Maschinenachsen beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess ist eine Ermittlung der realisierbaren Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  für die Zahnrad-Profilschleifmaschine für den Amplitudenbereich von  $A_{fa} = 0,5$  mm bis  $A_{fa} = 4$  mm erforderlich. Die technologischen Untersuchungen werden aufgrund der höheren Bahngenaugkeiten im SOFT-Modus durchgeführt, um den hohen Anforderungen der Form-, Lage- und Maßgenauigkeit der Zahnflanken gerecht zu werden. Die identifizierten Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für den kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess sind in Bild 8-12 dargestellt.

Für die Erzeugung vergleichbarer Ausgangszustände auf den einsatzgehärteten Zahnflanken, wurde zunächst eine Komplettbearbeitung der Versuchsräder mit dem diskontinuierlichen Zahnflanken-Profilschleifen durchgeführt. Dabei konnte für Profil- und Flankenlinien sowie für Teilung und Rundheit des Zahnrads eine Verzahnungsqualität  $Q_{KL} \leq 2$  erreicht werden [DIN3961, DIN3962-1, DIN3962-2, DIN3962-3, DIN21772]. Die Fertigungszahlweite  $W_k$  [DIN21773] dient hierbei als Rohteilmaß für die Versuche zum kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess.

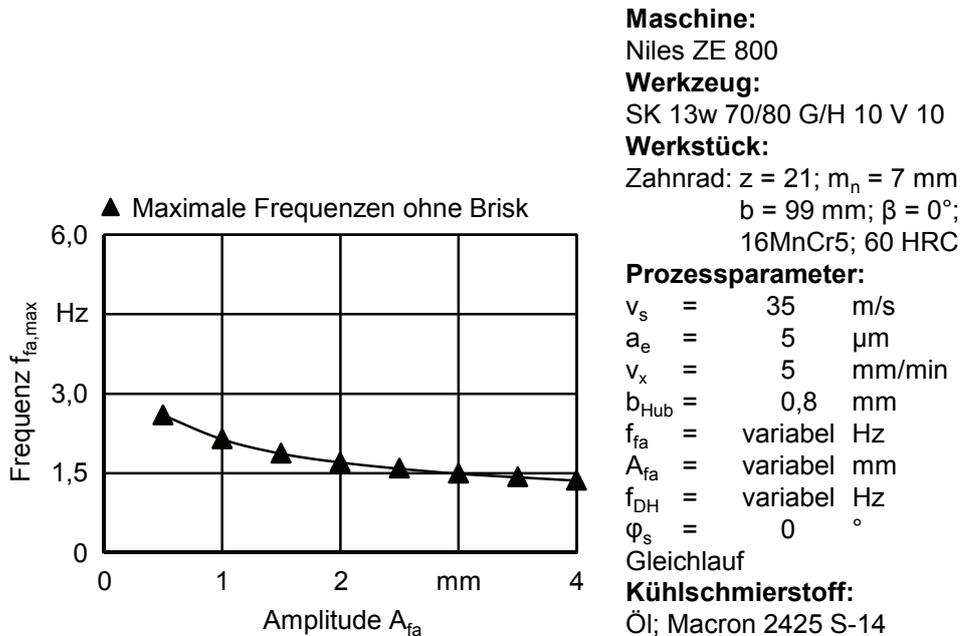


Bild 8-12: Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für den kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess

Im Rahmen der technologischen Untersuchungen werden zunächst nur für einen konstanten Vorschubweg pro Wälzung  $b_{Hub}$  unter Berücksichtigung der identifizierten Randbedingungen die Frequenz  $f_{fa}$  und die Amplitude  $A_{fa}$  variiert. Dabei blieben Versuchsparameter wie Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und axiale Vorschubgeschwindigkeit  $v_x$  sowie die Abrichtparameter für die keramisch gebundene Sinterkorundschleifscheibe konstant. Anschließend wurden für den kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess der Einfluss des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  und des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  auf das Arbeitsergebnis untersucht.

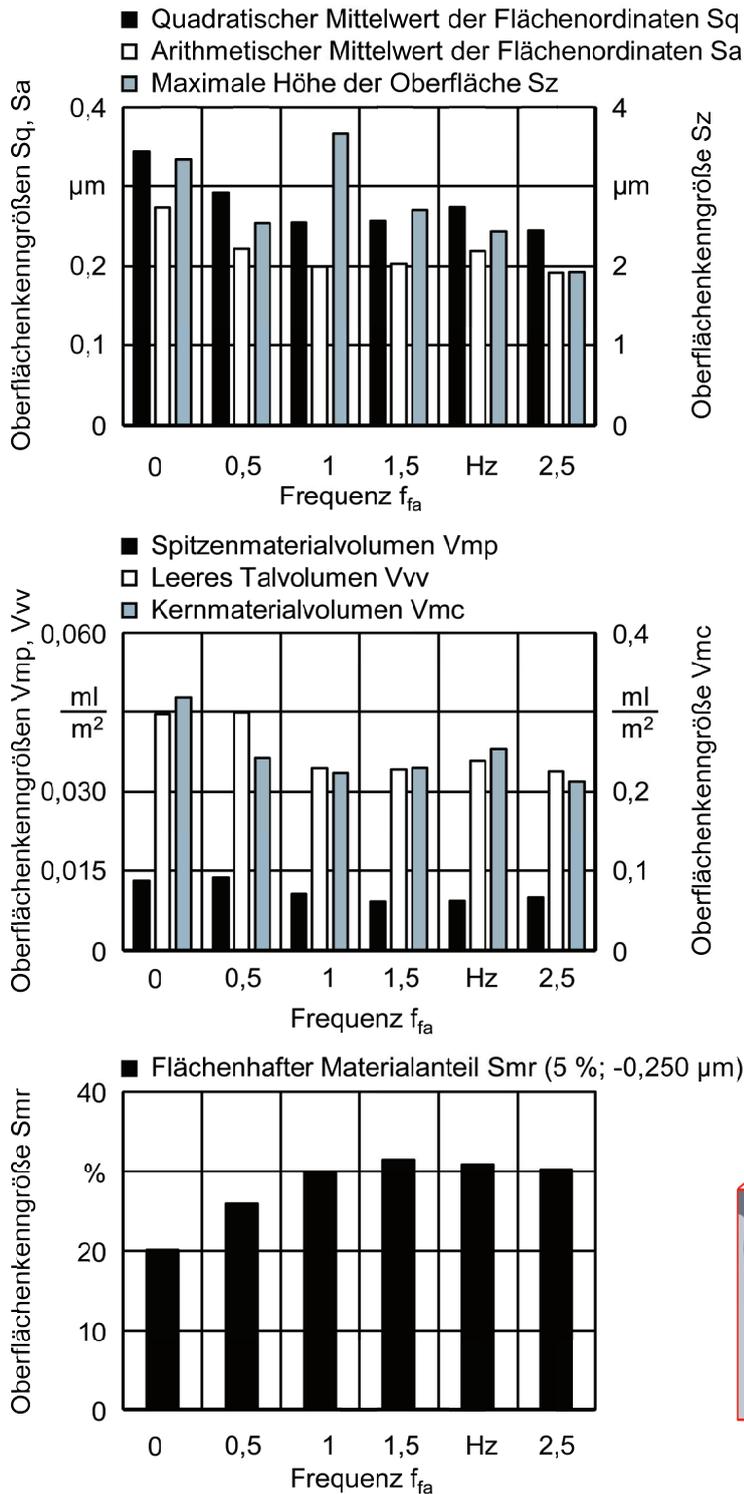
#### Variation der Frequenz $f_{fa}$

Eine Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  bei konstanter Amplitude  $A_{fa} = 0,5$  mm führt zu einer Veränderung der Korneingriffsbahnen und somit zu einer Veränderung der Oberflächenstruktur auf der Zahnflanke. Im Vergleich zum Analogieprozess liegt jedoch idealisiert gesehen nur ein Punktkontakt zwischen Werkzeug und Werkstück beim Wälzschleifen vor [BAU11], weshalb ein geringerer Einfluss der kinematischen Modulation auf die Korneingriffsbahnen im Vergleich zur Rund- und Profilschleifbearbeitung erwartet wird. Gründe dafür können die deut-

lich geringeren Überdeckungen der Korneingriffsbahnen im Vergleich zu den Eingriffsbedingungen bei großen Kontaktflächen zwischen Werkzeug und Werkstück sein.

Ein Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen von 16MnCr5-Zahnradern wird dennoch in Bild 8-13 deutlich. Eine Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  von bis zu 25 % lässt sich beim Einsatz einer kinematischen Modulation beim Teilwälzschleifen erreichen, wobei eine Frequenz  $f_{fa}$  größer 1 Hz zu keinen signifikanten Änderungen mehr führt. Der  $S_z$ -Wert bei der Frequenz  $f_{fa} = 1$  Hz scheint hierbei ein Ausreißer zu sein. Bei Betrachtung der Kenngrößen des Materialvolumens  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  lässt sich ebenfalls eine Reduzierung bis  $f_{fa} = 1,5$  Hz erkennen. Geeignete Verhältnisse aus Spitzenvolumen  $V_{mp}$  und Riefenvolumen  $V_{vv}$  bei gleichzeitig geringer Rauheit, die für tribologisch beanspruchte Wälzkontakte vorteilhaft sein kann, werden bei Frequenzen  $f_{fa} \geq 1$  Hz erreicht. In Bezug auf den Verlauf des Flächenmaterialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) wird ein klarer Anstieg bis zu einer Frequenz von  $f_{fa} = 1,5$  Hz sichtbar. So lässt sich der Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) um ca. 50 % steigern, wobei eine weitere Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  zu keiner signifikanten Änderung des Flächenmaterialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) mehr führt.

Eine Beurteilung des Arbeitsergebnisses für den Verzahnungsschleifprozess erfolgt anhand geometrischer Kennwerte wie die Form- und Lagegenauigkeit der geschliffenen Zahnflanken. Diese werden mithilfe des integrierten Messsystems in der Zahnflanken-Profilschleifmaschine bestimmt. Der Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  ist in Bild 8-14 dargestellt. Es lässt sich hierbei kein eindeutiger Zusammenhang zwischen der Frequenz  $f_{fa}$  der kinematischen Modulation und der Form- und Lagegenauigkeit der Evolvente erkennen. Die Qualitätsklassen der strukturierten Zahnflanken liegen für alle untersuchten Frequenzen  $f_{fa}$  innerhalb der Verzahnungsqualität  $Q_{KL} = 2$  nach DIN 9362-1 [DIN3962-1]. Die Ergebnisse der Flankenlinienmessungen nach DIN 9362-2 [DIN3962-2] zeigen ebenfalls keinen Zusammenhang zur kinematischen Modulation und weisen für alle Versuche eine Verzahnungsqualität  $Q_{KL} \leq 2$  auf. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass beim Einsatz einer kinematischen Modulation gleich hohe Verzahnungsqualitäten der Zahnflanken wie beim Referenzprozess ohne Modulationsbewegungen erreicht werden können.



**Maschine:**  
Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Werkstück:**  
Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7 \text{ mm}$   
 $b = 99 \text{ mm}$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  
16MnCr5; 60 HRC

**Prozessparameter:**

- $v_s = 35 \text{ m/s}$
- $a_e = 5 \mu\text{m}$
- $v_x = 5 \text{ mm/min}$
- $v_w = 435,22 \text{ mm/min}$
- $b_{\text{Hub}} = 0,8 \text{ mm}$
- $f_{fa} = \text{variabel Hz}$
- $A_{fa} = 0,5 \text{ mm}$
- $f_{DH} = \text{variabel Hz}$
- $\phi_s = 0^\circ$
- $V_w = 1,2 \text{ mm}^3$

Gleichlauf

**Abriechparameter:**

- $v_{sd} = 35 \text{ m/s}$
- $U_d = 2$
- $q_d = 0,8$
- $a_{ed} = 30 \mu\text{m}$

Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14

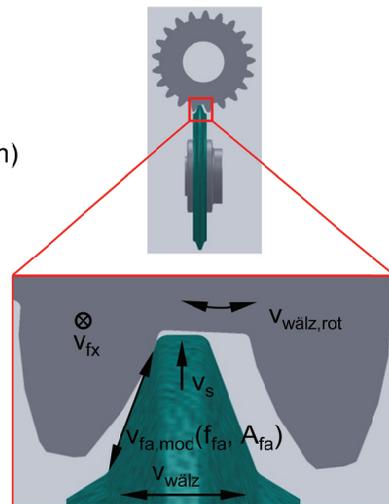
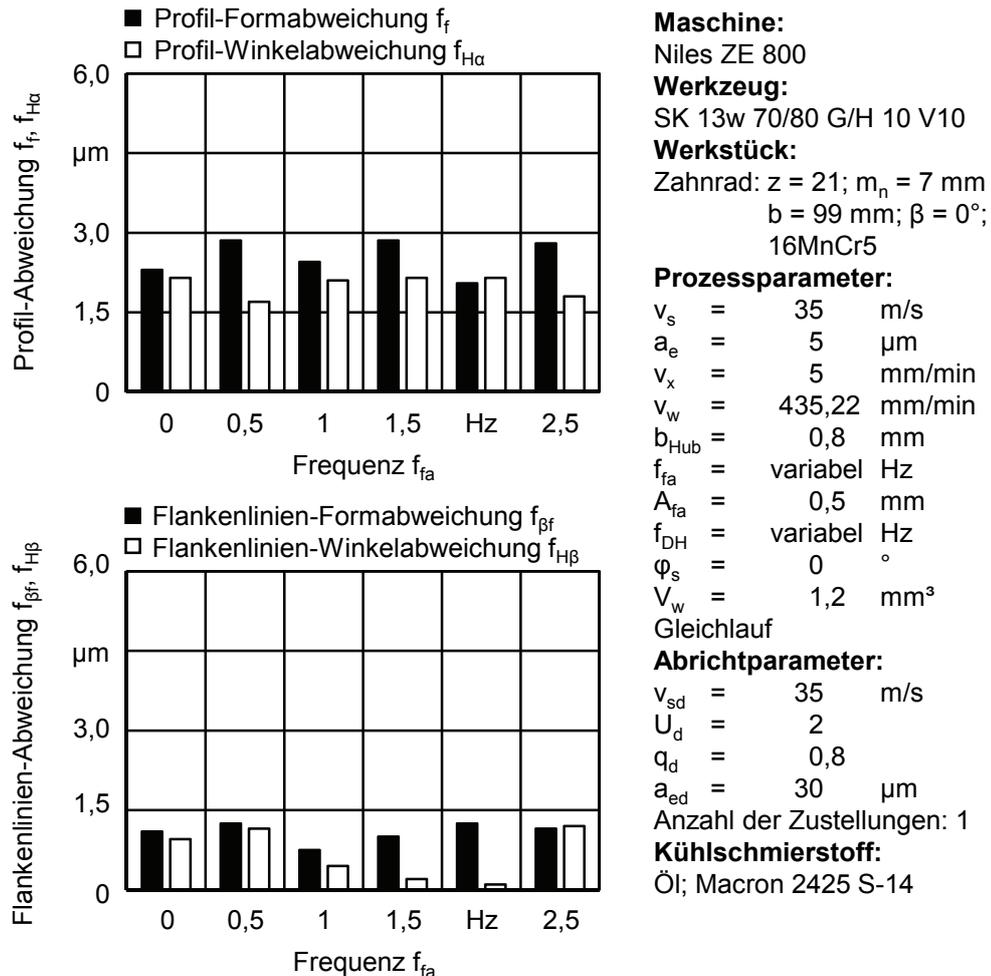


Bild 8-13: Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,5 \text{ mm}$

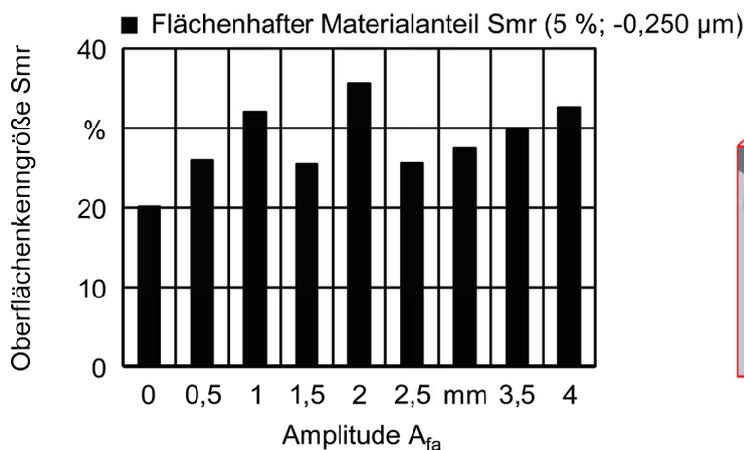
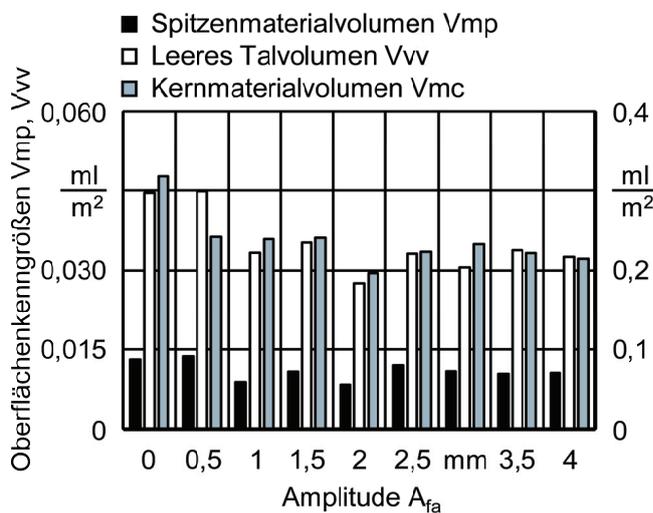
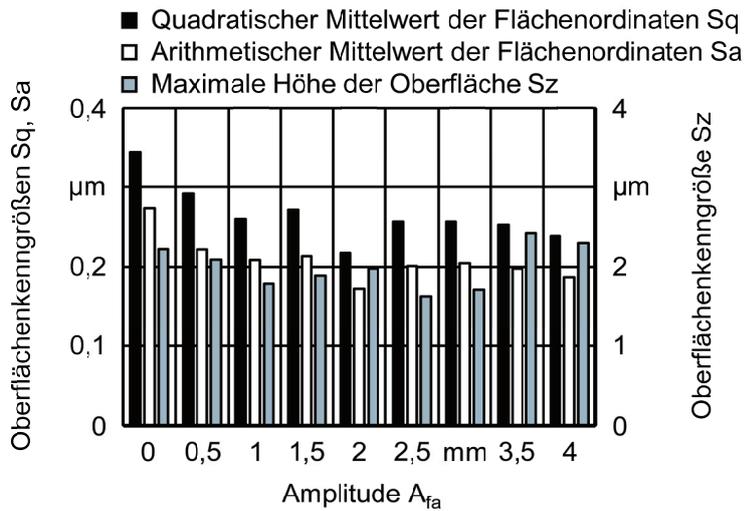


**Bild 8-14:** Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,5$  mm

#### Variation der Amplitude $A_{fa}$

In **Bild 8-15** ist im Hinblick auf die mögliche Veränderung der Oberflächenstruktur bei konstanter Frequenz  $A_{fa}$  sowie auf eine vorhandene Protuberanz für die Zugänglichkeit der Schleifscheibe der Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen darstellt. Dabei ergibt sich die maximal realisierbare Amplitude  $A_{fa}$  in Abhängigkeit der vorhandenen Protuberanz am Werkstück. Die Frequenz  $f_{fa}$  blieb dabei innerhalb der Versuchsreihe konstant bei 0,5 Hz. Bei Betrachtung der Ergebnisse wird ebenfalls ein deutlicher Einfluss der kinematischen Modulation beim Verzahnungsschleifen sichtbar. So lassen sich die geringsten Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen mit einer Amplitude  $A_{fa} = 2$  mm erreichen. Die Tendenz einer Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  spiegelt sich auch annähernd im Verlauf der Kenngrößen des Materialvolumens  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  wider. Eine weitere Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  gegenüber  $A_{fa} = 2$  mm führt bei den Oberflächenkenngrößen  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  zu keinen signifikanten Unterschieden. Hinsichtlich der Bewertung des Flächenmaterialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250$   $\mu\text{m}$ ) kann ein Maximum von ca. 35 % für die kinematisch modulierte Schleifbearbeitung mit einer Amplitude  $A_{fa} = 2$  mm festgestellt werden, was einer Steigerung von ca. 75 % zur Referenzoberfläche entspricht. Diese Oberflächenstruktur kann bezüglich

des Einlaufverhaltens Vorteile im Vergleich zu den anderen kinematisch moduliert geschliffenen Oberflächen aufweisen.



**Maschine:**  
 Niles ZE 800  
**Werkzeug:**  
 SK 13w 70/80 G/H 10 V10  
**Werkstück:**  
 Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7 \text{ mm}$   
 $b = 99 \text{ mm}$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  
 16MnCr5; 60 HRC  
**Prozessparameter:**  
 $v_s = 35 \text{ m/s}$   
 $a_e = 5 \mu\text{m}$   
 $v_x = 5 \text{ mm/min}$   
 $v_w = 435,22 \text{ mm/min}$   
 $b_{\text{Hub}} = 0,8 \text{ mm}$   
 $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$   
 $A_{fa} = \text{variabel mm}$   
 $f_{DH} = \text{variabel Hz}$   
 $\phi_s = 0^\circ$   
 $V_w = 1,2 \text{ mm}^3$   
 Gleichlauf  
**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 35 \text{ m/s}$   
 $U_d = 2$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 30 \mu\text{m}$   
 Anzahl der Zustellungen: 1  
**Kühlschmierstoff:**  
 Öl; Macron 2425 S-14

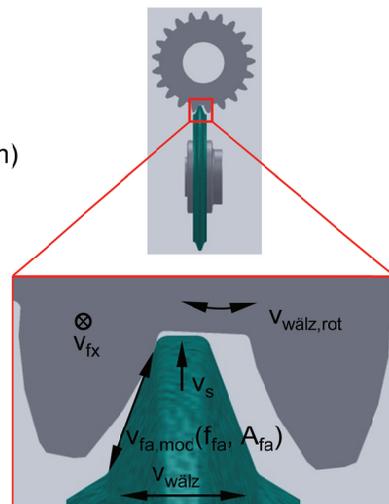
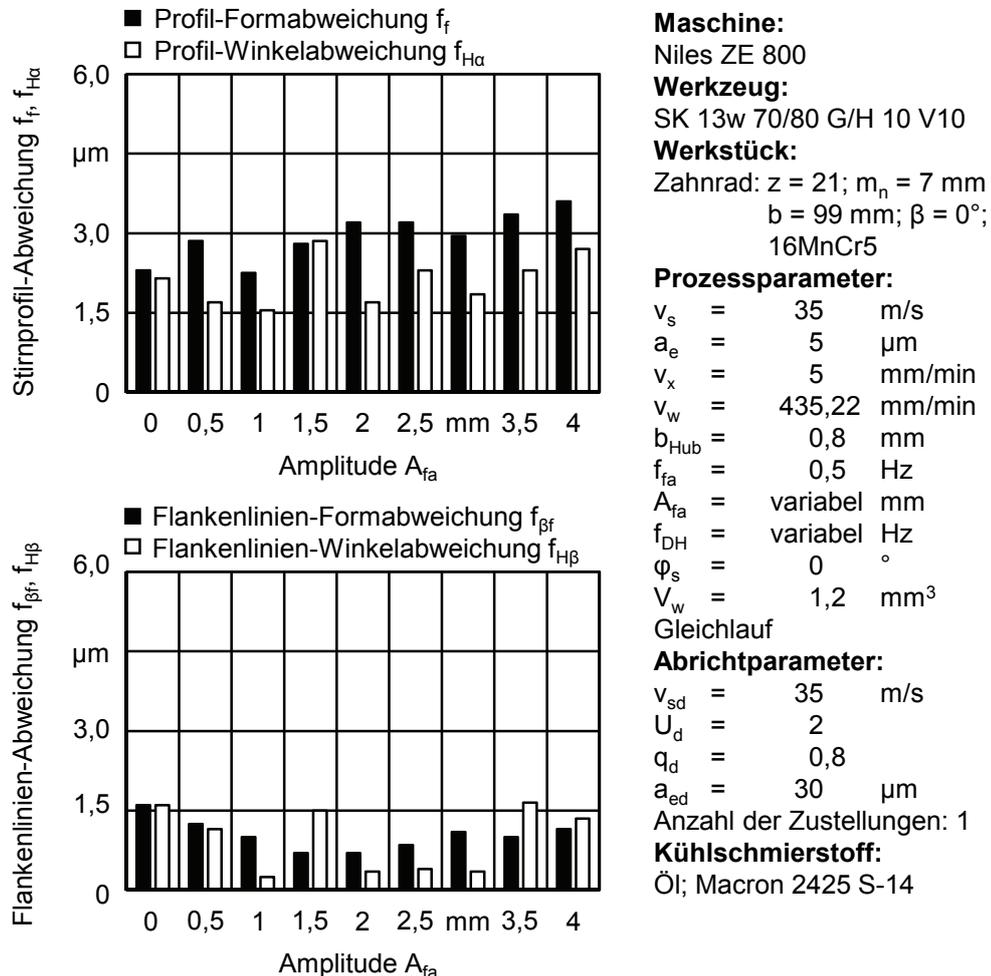


Bild 8-15: Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$

Für diese Versuche wurden ebenfalls die Profil- und Flankenlinie der Zahnflanke mithilfe des maschinenintegrierten Tasters vermessen, siehe Bild 8-16. Anhand der Ergebnisse wird ein

Anstieg der Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  mit steigender Amplitude  $A_{fa}$  sichtbar. Für alle strukturierten Versuchslücken beträgt die Verzahnungsqualität  $QKL \leq 3$  nach DIN 9362-1 [DIN3962-1]. Die Ergebnisse der Flankenlinienmessung nach DIN 9362-2 [DIN3962-2] zeigen wiederum eine hohe Verzahnungsqualität ( $QKL \leq 2$ ).

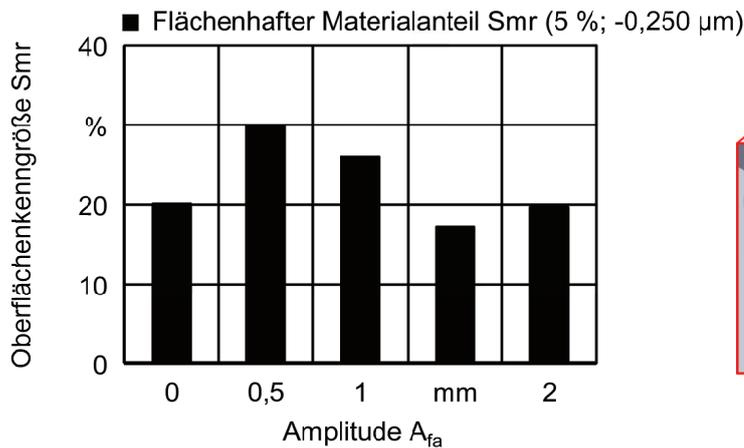
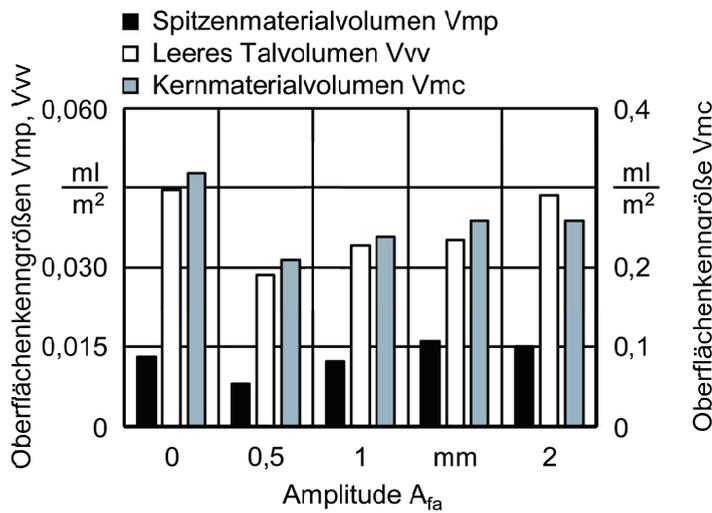
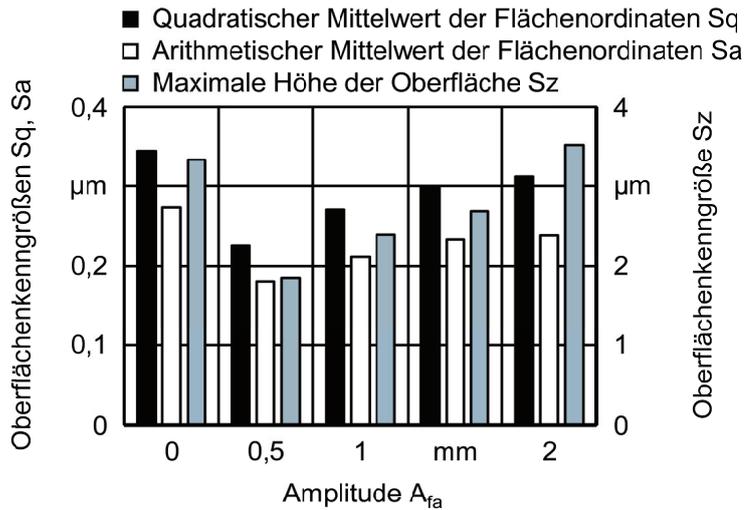


**Bild 8-16:** Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5$  Hz

Eine weitere Versuchsreihe zur Bestimmung des Einflusses der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkenngrößen beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen wurde bei einer konstanten Frequenz von  $f_{fa} = 1$  Hz durchgeführt, um auch Amplitude  $A_{fa}$  bis 4 mm realisieren zu können (siehe [Bild 8-17](#)). Die Ergebnisse aus den Oberflächenmessungen zeigen erneut einen deutlichen Einfluss der kinematischen Modulation auf die verschiedenen Oberflächenkennwerte. So lassen sich aufgrund veränderter Korneingriffsbahnen und Kornüberdeckungen in der Kontaktfläche die Oberflächenkennwerte  $S_a$  und  $S_q$  um ca. 35 % im Vergleich zum Referenzversuch ohne kinematische Modulation reduzieren. Bei der Bearbeitung mit einer Amplitude  $A_{fa} = 0,5$  mm lässt sich die maximale Höhe der Oberfläche  $S_z$  sogar auf über 40 % verringern, was auf eine Reduzierung der Rauheitsspitzen durch die veränderten Eingriffsbedingungen zurückzuführen ist. Auffällig bei diesen Versuchsergebnissen ist, dass eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  auf über 0,5 mm zu einer Verschlechterung der Oberflä-

chenkennwerte führt. Ein ähnliches Niveau der Kennwerte wie bei der Referenzschleifbearbeitung wird mit der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung bei einer Amplitude  $A_{fa} = 2 \text{ mm}$  erreicht. Die Verläufe der Kenngrößen des Materialvolumens  $V_{mp}$ ,  $V_{mc}$ ,  $V_{vv}$  zeigen eine gleiche Tendenz wie die Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$ . Beim Vergleich der Ergebnisse mit denen der Versuchsreihe zur Variation der Amplitude  $A_{fa}$  bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$  wird ein deutlich höherer Einfluss auf die Kenngrößen der Oberfläche sichtbar. Das starke Einflussverhalten bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 1,0 \text{ Hz}$  lässt sich mit einer deutlich größeren Veränderung der Korneingriffsbahnen erklären, wodurch die Oberflächen und damit die Kennwerte verändert werden. Bei Betrachtung des Verlaufs für den Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) wird eine Korrelation zu den Oberflächenkennwerten  $S_a$ ,  $S_q$ ,  $S_z$  sichtbar. Mit einem Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) von ca. 30 % lässt sich zudem ein Maximum dieser Versuchsreihe für eine Amplitude  $A_{fa} = 0,5 \text{ mm}$  identifizieren, was einer Steigerung von ca. 50 % zur Referenzoberfläche entspricht. Verglichen mit der Versuchsreihe bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$  liegt der erreichbare Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) geringfügig niedriger. Im Hinblick auf verbesserte Schmierbedingungen im Einsatz scheinen die Ergebnisse bei einer Amplitude  $A_{fa} = 0,5 \text{ mm}$  aufgrund eines günstigen Verhältnisses aus Spitzen und Tälern vorteilhaft zu sein.

Die Analyse der Profillinie in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  ist in [Bild 8-18](#) dargestellt. Hierbei kann ein geringer Anstieg der Profil-Formabweichung  $f_f$  mit steigender Amplitude  $A_{fa}$  festgestellt werden, wobei die Verzahnungsqualität noch innerhalb der  $QKL = 2$  nach DIN 9362-1 [DIN3962-1] liegt. Die Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  zeigt dagegen keine signifikante Veränderung und liegt für alle Versuchslücken bei  $QKL \leq 2$ . Die Ergebnisse der Flankenlinienmessung nach DIN 9362-2 [DIN3962-2] zeigen eine hohe Verzahnungsqualität ( $QKL \leq 2$ ) für alle Versuchslücken.



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Werkstück:**

Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7 \text{ mm}$

$b = 99 \text{ mm}$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;

16MnCr5; 60 HRC

**Prozessparameter:**

$v_s = 35 \text{ m/s}$

$a_e = 5 \mu\text{m}$

$v_x = 5 \text{ mm/min}$

$v_w = 435,22 \text{ mm/min}$

$b_{\text{Hub}} = 0,8 \text{ mm}$

$f_{fa} = 1 \text{ Hz}$

$A_{fa} = \text{variabel mm}$

$f_{DH} = \text{variabel Hz}$

$\varphi_s = 0^\circ$

$V_w = 1,2 \text{ mm}^3$

Gleichlauf

**Abriechparameter:**

$v_{sd} = 35 \text{ m/s}$

$U_d = 2$

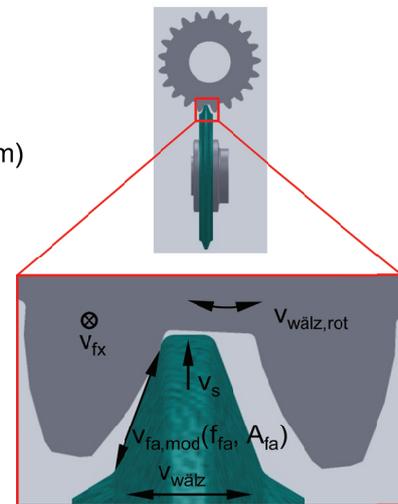
$q_d = 0,8$

$a_{ed} = 30 \mu\text{m}$

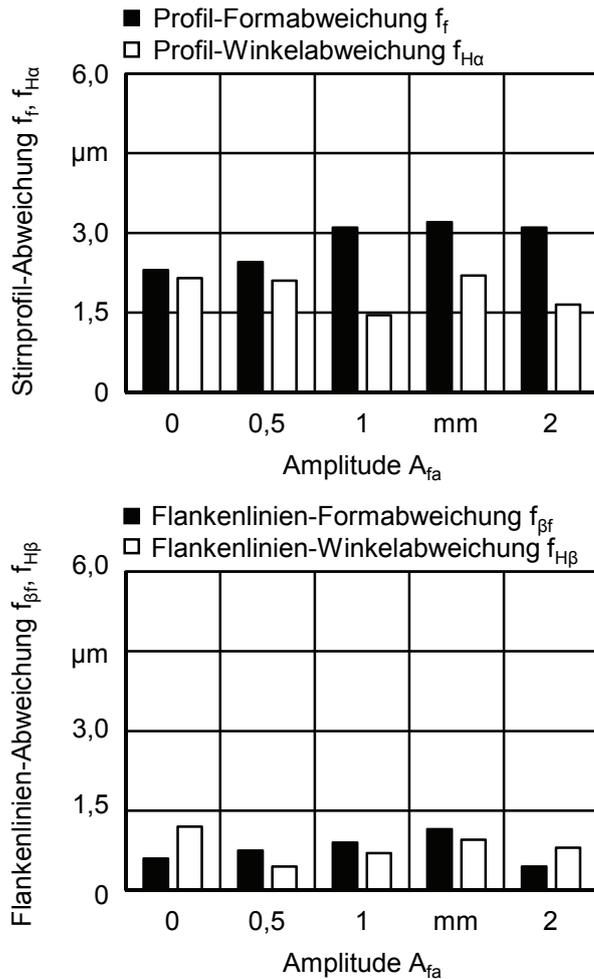
Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**

Öl; Macron 2425 S-14



**Bild 8-17:** Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 1,0 \text{ Hz}$



**Maschine:**  
Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Werkstück:**  
Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7$  mm  
 $b = 99$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;  
16MnCr5

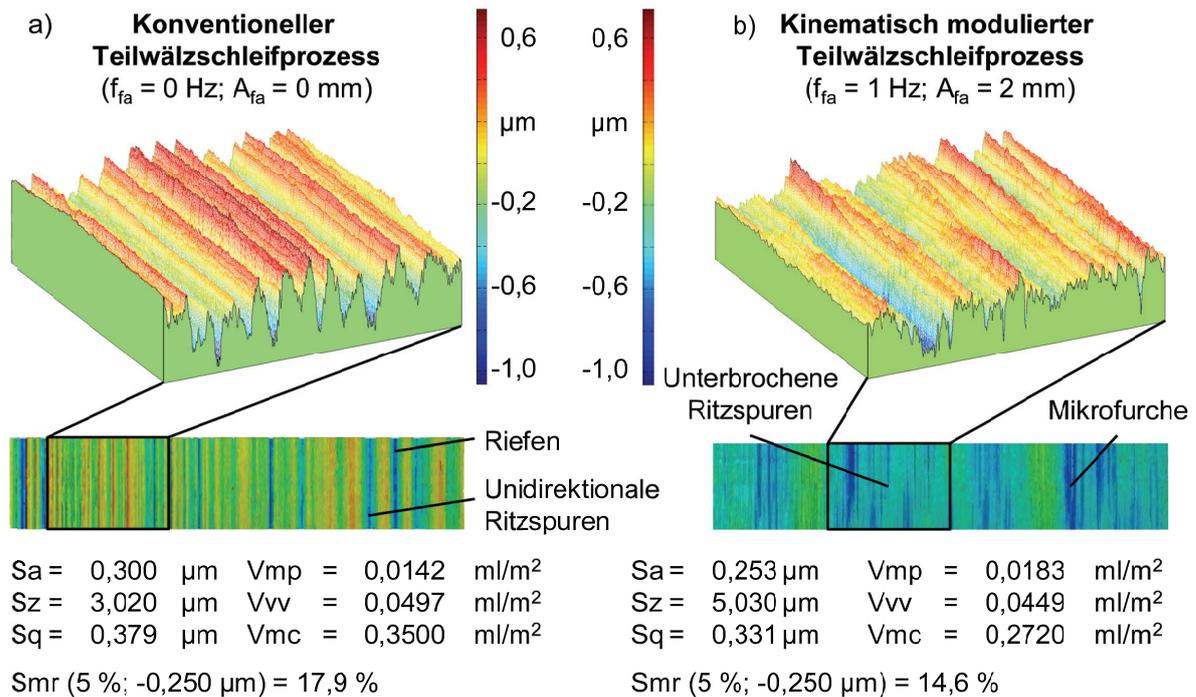
**Prozessparameter:**  
 $v_s = 35$  m/s  
 $a_e = 5$   $\mu\text{m}$   
 $v_x = 5$  mm/min  
 $v_w = 435,22$  mm/min  
 $b_{Hub} = 0,8$  mm  
 $f_{fa} = 1$  Hz  
 $A_{fa} =$  variabel mm  
 $f_{DH} =$  variabel Hz  
 $\phi_s = 0$   $^\circ$   
 $V_w = 1,2$  mm<sup>3</sup>  
Gleichlauf

**Abriechparameter:**  
 $v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 2$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 30$   $\mu\text{m}$   
Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14

**Bild 8-18:** Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{Ha}$  beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 1,0$  Hz

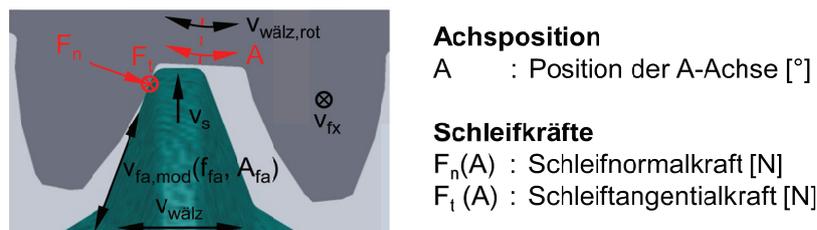
**Bild 8-19** stellt beispielhaft einen Vergleich der Oberflächenstrukturen beim Teilwälzschleifen mit und ohne kinematische Modulation dar. Deutlich wird hierbei die Veränderung der unidirektionalen Schleifspuren hin zu einer Oberflächenstruktur mit unterbrochenen Ritzspuren und lokalen Mikrofurchen, die Vorteile bei der Aufnahme von Schmierstoff aufweisen und somit zu einer Verbesserung der Schmierbedingungen im Wälzkontakt führen können. Darüber hinaus scheinen die einzelnen Aufwürfe nicht mehr unidirektional in axialer Richtung des Zahnrades zu verlaufen, was auf die veränderten Korneingriffsbahnen zurückzuführen ist. Die gefertigten Oberflächenstrukturen weisen teilweise Ähnlichkeiten mit den in der Literatur vorgestellten Oberflächenstrukturen, beispielsweise die erzeugbaren Oberflächen beim Wälzschleifen mit Struktur-Shiften oder mit Low-Noise-Shifting (LNS), auf [SCP03, STW08, KAP10, TÜR15a, TÜR15b].



**Bild 8-19:** Vergleich der Oberflächenstrukturen beim Teilwälzschleifen;  
 a) ohne kinematische Modulation; b) mit kinematischer Modulation

### Schleifkräfte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen

Neben dem Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  und der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte und -struktur sowie die Form- und Lagegenauigkeit der Zahnflanken werden in diesem Kapitel zusätzlich die auftretenden Schleifkräfte  $F_t$  und  $F_n$  beim Einsatz einer kinematischen Modulation untersucht. Anhand der gemessenen Schleifkräfte soll weiterführend der Einfluss der veränderten Korneingriffsbedingungen beim Einsatz einer Modulationsbewegung auf die Kontaktbedingungen zwischen dem Werkzeug und dem Werkstück analysiert werden. Dafür werden zwei Versuchsreihen unter Variation der Frequenz  $f_{fa}$  und der Amplitude  $A_{fa}$  durchgeführt, wofür die im Kapitel 4.5.1 beschriebene Messkette zur Bestimmung der Prozesskräfte beim Verzahnungsschleifen zum Einsatz kommt. Während des kinematisch modulierten Schleifprozesses werden die Schleifkräfte sowie die entsprechende A-Achsenposition der Werkstückachse synchron gespeichert, um im Anschluss mithilfe einer Signalaufbereitung der A-Achsenposition die Schleifkräfte in Abhängigkeit des Berührungspunktes des Werkzeuges auf der Evolvente bestimmen zu können. Eine Prinzipskizze der auftretenden Schleifkräfte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess wird in **Bild 8-20** gezeigt [HNI96].

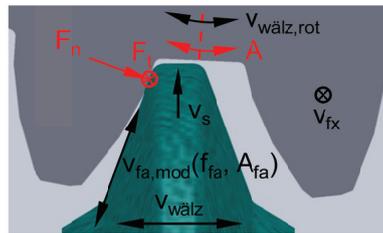
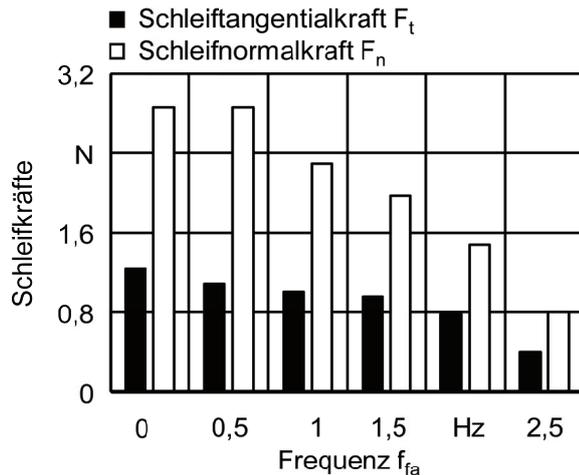


**Bild 8-20:** Prinzipskizze der auftretenden Schleifkräfte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess

Bild 8-21 stellt den Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Schleifkräfte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess für eine Amplitude von  $A_{fa} = 0,5$  mm dar. Die Absolutwerte für die Schleifkräfte ergeben sich hierbei aus einer Mittelung der gemessenen Kraftwerte über eine Hubbewegung des Teilwälzschleifprozesses. Der Versuch mit  $f_{fa} = 0$  Hz stellt hierbei den konventionellen Teilwälzschleifprozess ohne Modulationsbewegungen dar. Mit einer Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  lässt sich eine Reduzierung der Schleifnormalkraft  $F_n$  und Schleiftangentialekraft  $F_t$  feststellen. Für den Verlauf der Schleifkräfte in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  können zwei mögliche Ursachen herausgestellt werden.

Zum einen führt nach Kapitel 5 der Einsatz einer kinematischen Modulation beim Schleifen zu einem geringfügigen Anstieg der maximalen Spannungsdicke  $h_{cu,max}$  sowie der Länge der Korneingriffsbahn  $l_g$ , was bei einem gleichen abzutrennenden Spannungsvolumen  $V_w$  zu einer reduzierten Schneidenanzahl in der Kontaktzone führt. Die verringerte Anzahl an Schneiden im Schleifprozess hat somit eine Verringerung der Gesamtkraft in Anhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen zur Folge, die sich aus der Gesamtsumme aller Einzelkornkräfte zusammensetzt. Zum anderen können durch die zusätzliche Modulationsbewegung verbesserte Bedingungen bei der Spanbildung entstehen und eine Zusetzung des schneidraumspezifischen Spanraums verringert werden. Diese Erkenntnisse konnten bereits in einigen wissenschaftlichen Arbeiten für den Honprozess nachgewiesen werden [MUS86, FLO92a, FLO92b, KAP99]. FLORES [FLO92a, FLO92b] stellte beispielsweise eine verringerte Belastung mit zunehmender Frequenz für einen Dornhonprozess mit überlagerter hochfrequenter Schwingung in axialer Richtung fest. Als Gründe werden die Richtungsänderung bei der Spanbildung und die somit wechselnde Beanspruchungsrichtung an den Schneiden genannt, die darüber hinaus auch zu einem verbesserten Verschleißverhalten des Werkzeugs führen kann. Eine zeitliche Variation des Belastungsrichtung kann nach MUSHARD [MUS86] auch zu einer höheren Schnittigkeit der Schneidkörner und damit des Werkzeuges führen, was sich ebenfalls positiv auf die Werkzeugbelastung auswirkt. Ähnliche Effekte sind auch beim Einsatz des kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozesses anzunehmen, die zu einer Verringerung der Schleifkräfte im Prozess beitragen können.

Zusammenfassend lässt sich anhand der Ergebnisse der technologischen Untersuchungen zur Bestimmung der Prozesskräfte ableiten, dass sich unter der Voraussetzung konstanter Bedingungen der weiteren Prozessstellgrößen sowie der Prozessstrategie eine Reduzierung der Schleifkräfte  $F_n$  und  $F_t$  bis zu 65 % mittels einer Modulationsbewegung realisieren lässt. Mithilfe reduzierter Schleifnormal- und Schleiftangentialekräfte lässt sich die Werkzeugbelastung beim Einsatz einer kinematischen Modulation deutlich reduzieren, was zu einem verbesserten Verschleißverhalten des Werkzeuges führen kann.

**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Prozessparameter:**

$v_s = 35$  m/s  
 $a_e = 5$   $\mu\text{m}$   
 $v_x = 5$  mm/min  
 $v_w = 435,22$  mm/min  
 $b_{\text{Hub}} = 0,8$  mm  
 $f_{fa} =$  variabel Hz  
 $A_{fa} = 0,5$  mm  
 $f_{DH} =$  variabel Hz  
 $\phi_s = 0$   $^\circ$   
 $V_w = 1,2$   $\text{mm}^3$

Gleichlauf

**Abriechparameter:**

$v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 2$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 30$   $\mu\text{m}$

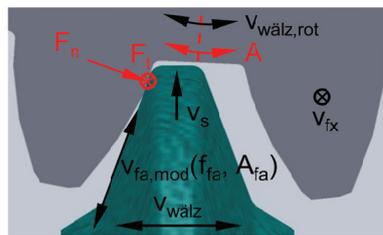
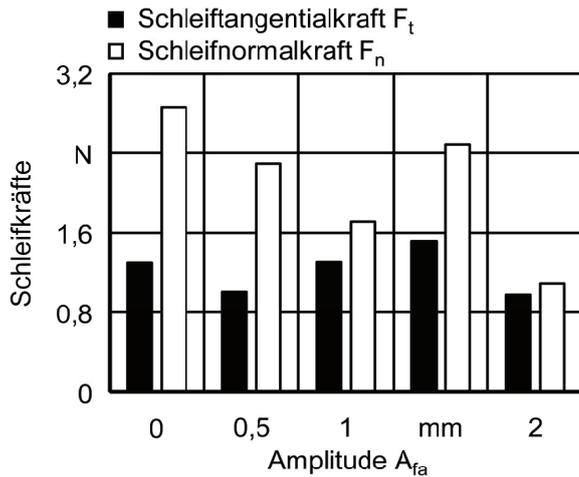
Anzahl der Zustellungen: 1

**Kühlschmierstoff:**

Öl; Macron 2425 S-14

**Bild 8-21:** Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Schleifkräfte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,5$  mm

Ergänzend wurde der Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Schleifkräfte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 1$  Hz untersucht, siehe [Bild 8-22](#). Eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  führt einerseits zu einer Verringerung der Schleifnormalkraft  $F_n$  von bis zu 62 %. Andererseits lassen sich keine signifikanten Änderungen der Schleiftangentialkraft  $F_t$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  feststellen. FLORES [FLO92b] bestätigt eine verringerte Werkzeugbelastung mit zunehmender Amplitude für einen Dornhonprozess mit überlagerter hochfrequenter Schwingung. Eine Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  führt zu einem geringfügigen Anstieg der Kontaktlänge  $l_g$  und der Spanungsdicke  $h_{cu,max}$ , wobei die Richtungsänderungen bei der Spanbildung während des Schleifprozesses jedoch im Vergleich zur Variation der Frequenz  $f_{fa}$  deutlich geringer ausfällt. Anhand der Ergebnisse wird zudem deutlich, dass sich das Schleifkraftverhältnis  $\mu$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  verbessern lässt. Ein hohes Schleifkraftverhältnis  $\mu$  bei der Bearbeitung deutet auf eine effektive Werkstoffabtrennung hin, was auf verbesserte Bedingungen bei der Spanbildung unter Einsatz erhöhter Amplituden  $A_{fa}$  bei der kinematischen Modulation zurückgeführt werden kann. Zusammenfassend kann aufgrund des verbesserten Schleifkraftverhältnis  $\mu$  von einer verbesserten Spanbildung bei Erhöhung der Amplitude  $A_{fa}$  beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess ausgegangen werden. Der Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Schleifnormalkraft  $F_n$  und Schleiftangentialkraft  $F_t$  fällt im Vergleich zur Frequenz  $f_{fa}$  jedoch deutlich geringer aus.



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Prozessparameter:**

$v_s = 35$  m/s  
 $a_e = 5$   $\mu$ m  
 $v_x = 5$  mm/min  
 $v_w = 435,22$  mm/min  
 $b_{Hub} = 0,8$  mm  
 $f_{fa} = 1$  Hz  
 $A_{fa} =$  variabel mm  
 $f_{DH} =$  variabel Hz  
 $\phi_s = 0$  °  
 $V_w = 1,2$  mm<sup>3</sup>

Gleichlauf

**Abrichtparameter:**

$v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 2$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 30$   $\mu$ m  
 Anzahl der Zustellungen: 1  
**Kühlschmierstoff:**  
 Öl; Macron 2425 S-14

**Bild 8-22:** Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Schleifkräfte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 1$  Hz

*Variation der Abrichtstellgrößen*

Nachdem bereits der Einfluss der Abrichtstellgrößen auf die Oberflächenkennwerte für den Analogieprozess aufgezeigt werden konnte, soll in diesem Abschnitt die Möglichkeit einer variablen und flexiblen Einstellung des Höhenprofils realisierbarer Oberflächenstrukturen mithilfe des Konditionierprozesses beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess untersucht werden. Dafür erfolgt eine Analyse für einen kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess mit konstanten Prozessstellgrößen unter Variation des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  sowie des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$ .

Für ein besseres Verständnis des Einflusses der Schleifscheibentopographie auf die Ausbildung der Werkstückoberfläche beim kinematisch modulierten Schleifen erfolgt zunächst die Vermessung von zwei für die Verzahnungsschleifbearbeitung unterschiedlich abgerichteten keramisch gebundenen Schleifscheiben, um diese hinsichtlich geeigneter Kennwerte zu charakterisieren. Dafür wurden eine Schlichttopographie und eine Schrupptopographie der Schleifscheibe mithilfe des taktilen Messsystems vermessen, die sich nur hinsichtlich der eingestellten Stellgrößen beim Abrichtprozess unterscheiden. Der Länge der Messbahnen für die 3D-Oberflächenmessung betragen 4,8 mm, wobei der Messpunktabstand für jede Messbahn auf 0,5  $\mu$ m festgelegt wurde. Die Breite der Messfläche ist für beide Schleifscheibentopographien auf 1,6 mm bei einem Messlinienabstand von 5  $\mu$ m festgelegt. Mithilfe dreidimensionaler Topographiekenngrößen lassen sich Schleifscheiben hinsichtlich des Einsatzverhaltens und des Verschleißzustandes beschreiben [BLU96, HÜB09, YAN11]. Dabei setzt

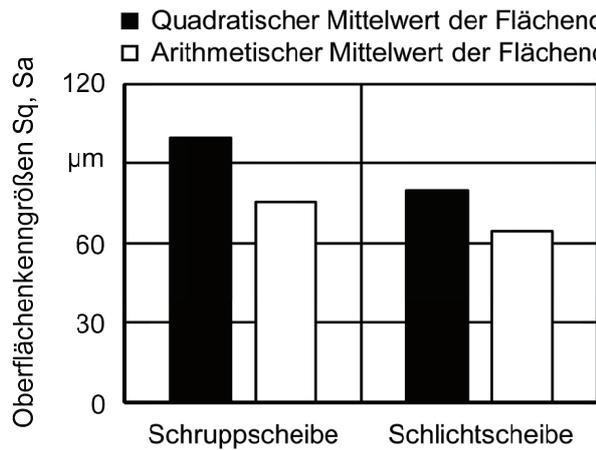
sich die gemessene Topographie der Schleifscheibe aus der Geometrie der Schleifkörner sowie der Bindungsanteile und Poren zusammen.

Bild 8-23 stellt den Vergleich der unterschiedlichen Schleifscheibentopographien dar. Deutlich wird hierbei der Unterschied sowohl bei den Topographiebildern als auch beim Vergleich der Oberflächen- und der Volumenkenngößen. Die Schrupptopographie hat im Vergleich zur Schlichttopographie eine deutliche größere Oberflächenrauheit und ist zusätzlich durch ein hohes leeres Talvolumen  $V_{vv}$  gekennzeichnet. Das hohe leere Talvolumen  $V_{vv}$  bei der Schrupptopographie im Vergleich zur Schlichttopographie kann hierbei als größerer Spanraum für die Schleifbearbeitung interpretiert werden [WER94, SCH68, MIN99, SRO05a]. Darüber hinaus kann ein Unterschied bei der Schleifkornspitzenverteilung in Abhängigkeit der Schnittlinientiefe festgestellt werden. Zur Bestimmung der Spitzenzahl in Abhängigkeit der Schneidenraumtiefe  $z_g$  wird die Oberfläche in mehrere horizontale Scheiben unterteilt [LOR75]. Die Addition aller Spitzen ergibt dann die Gesamtanzahl an Schleifkornspitzen in einer definierten Schnittlinientiefe [HOM15]. Die deutlich offenerporigere Oberfläche der Schleifscheibe beim Einsatz der Schruppabrichtparameter spiegelt sich auch im Verlauf für die Anzahl der Schleifkornspitzen wider. In Abhängigkeit der Tiefe lässt sich eine deutlich größere Anzahl an Schleifkörnern für die Schrupptopographie identifizieren, was auf deutlich größere Kornüberstände und eine größere Streuung der Kornausrichtung bei dieser Schleifscheibenoberfläche schließen lässt. Im Vergleich zeigt die Schleifscheibenoberfläche unter Einsatz von Schlichtabrichtparametern eine geringere Oberflächenrauheit und ein niedrigeres leeres Talvolumen  $V_{vv}$ . Der Verlauf der Schleifkornspitzenverteilung in Abhängigkeit der Schnittlinientiefe deutet bei dieser Schleifscheibentopographie auf einen geringeren Kornüberstand hin.

Darüber hinaus erfolgte eine Analyse des Schneidenraumes mithilfe einer softwaregestützten Bestimmung der Einzelschneiden in Abhängigkeit der Schneidenraumtiefe. Mithilfe der flächenbezogenen Schneidenraumverteilung lässt sich der Gradient der statischen Schneidenzahl  $C_1$  bis zur Mitte des Schneidenraumes in linearisierender Weise bestimmen. Für die Schrupptopographie konnte mithilfe der Analyse eine statische Schneidendichte von  $C_1 = 66,6 \text{ mm}^{-3}$  bestimmt werden, wogegen sich für die Schlichttopographie eine statische Schneidendichte von  $C_1 = 70,1 \text{ mm}^{-3}$  ergab. Weiterhin können mit der Software der Proportionalitätsfaktor  $\tan(\chi)$  für die jeweilige Schleifscheibentopographie bestimmt werden [HÜB12]. Ein Proportionalitätsfaktor von  $\tan(\chi) = 4,37$  ergab sich beim Einsatz der Schruppabrichtparameter. Dagegen konnte ein Proportionalitätsfaktor  $\tan(\chi) = 5,78$  für die mit Schlichtabrichtparametern konditionierte Schleifscheibentopographie festgestellt werden.

Anhand der Ergebnisse zu den Vermessungen der Schleifscheibentopographien in Abhängigkeit der Abrichtparameter wird ein deutlicher Einfluss auf die Kenngrößen und die Oberfläche der Schleifscheibentopographie sichtbar. Daher ist ebenfalls ein Einfluss der Schleifscheibentopographie auf das Bearbeitungsergebnis beim Einsatz einer kinematischen Modulation zu erwarten. Aufgrund des geringeren Kornüberstandes ist beim Einsatz der Schlichtabrichtparameter im Vergleich zum Schruppabrichten mit einem erhöhten Flächenmaterialanteil  $Smr$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifen zu rechnen.

a) **Oberflächenkenngrößen**



**Maschine:**  
Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
SK 13w 70/80 G/H 10 V10

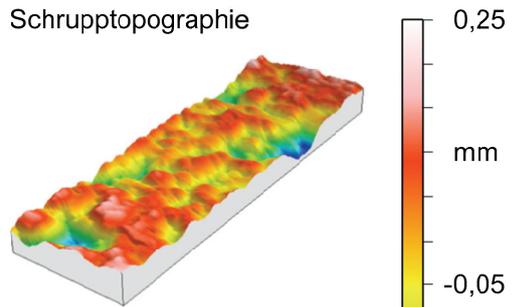
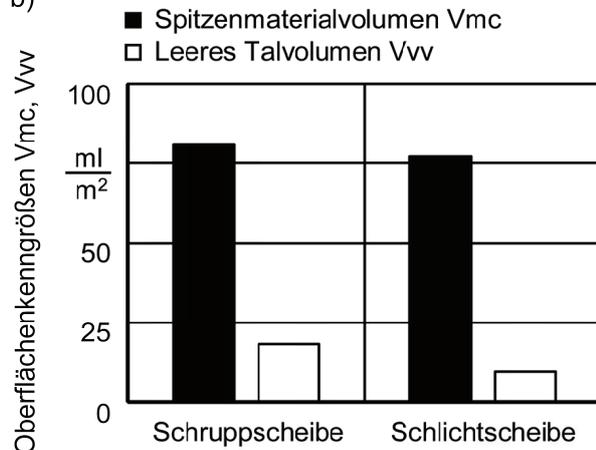
**Abriechtwerkzeug:**  
NC10 G 160 4 3 R2 25 25

**Abriechtparameter Schrupptopographie:**  
 $v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 1,1$   
 $q_d = 0,8$   
 $a_{ed} = 30$  µm  
 Anzahl der Zustellungen: 2

**Abriechtparameter Schlichttopographie:**  
 $v_{sd} = 35$  m/s  
 $U_d = 7$   
 $q_d = -0,8$   
 $a_{ed} = 30$  µm  
 Anzahl der Zustellungen: 2

**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14

b) **Volumenkenngrößen**



c) **Schleifkornverteilung**

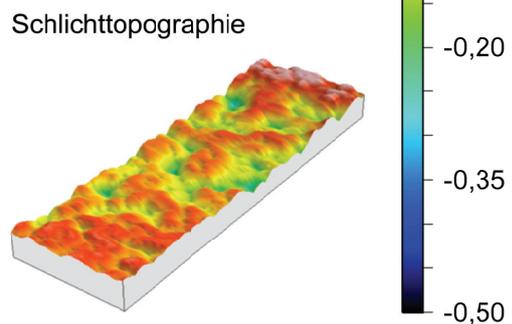
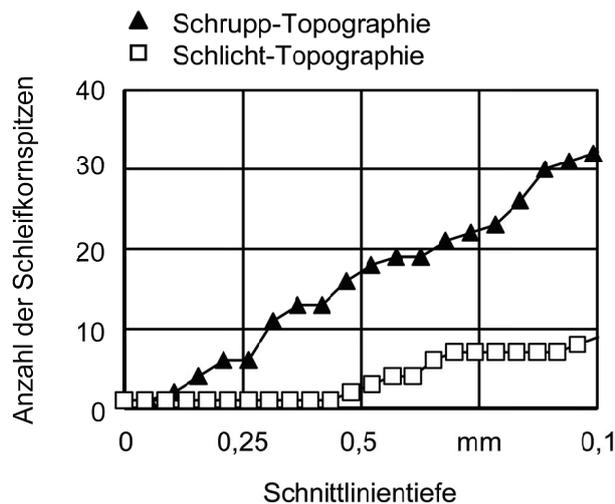


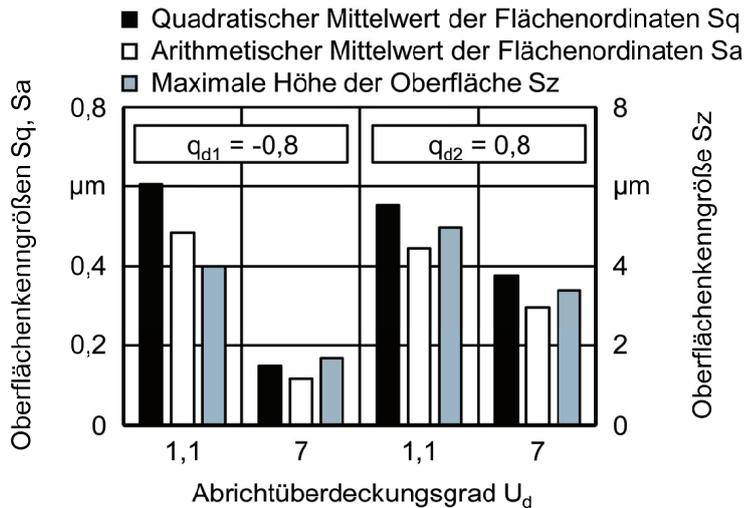
Bild 8-23: Vergleich der Schleifscheibentopographie;  
 a) Oberflächenkenngrößen; b) Volumenkenngrößen; c) Schleifkornverteilung

Der Einfluss des Abriechtüberdeckungsgrades  $U_d$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess für ein Abriechtgeschwindigkeitsverhältnis von

$q_{d1} = -0,8$  und  $q_{d2} = 0,8$  ist in Bild 8-24 dargestellt. Anhand der Diagramme wird zunächst der Einfluss des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  auf die Oberflächenqualität deutlich. Bei einer Erhöhung des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  sowohl im Gleich- als auch im Gegenlauf lässt sich tendenziell eine Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  und der Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  sowie eine Erhöhung des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) bei der Oberflächenstruktur feststellen. Dieser Effekt ist durch das Gegenlaufabrichten besonders ausgeprägt und führt zu einem Anstieg des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) um ca. 600 %, was auf die deutlich geringere Streuung der Kornausrichtung der Schleifscheibentopographie im Gegenlauf zurückgeführt werden kann. Die erreichbaren Absolutwerte des arithmetischen Mittelwerts der Flächenordinaten  $S_a$  und des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) bei diesen Abrichtparametern sind hierbei vergleichbar mit den Oberflächenkennwerten von alternativen Finishingprozessen von Zahnflanken [REM13, WAG13, UHL14a].

Ein positives Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis  $q_d$  führt zu einer höheren Wirkrautiefe  $R_{t,s}$  der Schleifscheibe, was eine geringere Oberflächenqualität des Bauteils zur Folge hat. Dieses Einflussverhalten spiegelt sich beim Vergleich der Abrichtgeschwindigkeitsverhältnis  $q_{d1/2}$  bei einem Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d = 1,1$  nicht wider. Ein Grund dafür scheint zum einen der geringere Einfluss des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  im Vergleich zum Abrichtüberdeckungsgrad  $U_d$  zu sein, da beide Schleifscheibentopographien ähnliche Wirkrautiefen  $R_{t,s}$  aufweisen. Zum anderen scheinen die Änderungen der Ritzspurentstehung bei der kinematischen Modulation den Einfluss der unterschiedlichen Wirkrautiefen  $R_{t,s}$  der Schleifscheiben deutlich zu verringern, so dass keine signifikanten Unterschiede zwischen den beiden Abrichtgeschwindigkeitsverhältnissen  $q_{d1/2}$  bei einem Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d = 1,1$  zu identifizieren sind.

Bei Betrachtung der Ergebnisse bei einem Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d = 7$  werden die Unterschiede zwischen dem Gegenlauf- und Gleichlaufabrichten deutlicher. Eine höhere Wirkrautiefe  $R_{t,s}$  der Schleifscheibe im Gleichlauf führt hierbei zu einer Erhöhung der Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  und der Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  sowie zu einer Reduzierung des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ). Der flächenhafte Materialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) kann mithilfe des Gegenlaufabrichtens bei einem Abrichtüberdeckungsgrad  $U_d = 7$  um ca. 300 % im Vergleich zum Gleichlaufabrichten gesteigert werden. Die Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  und die Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  lassen sich hingegen durchschnittlich um ca. 50 % bei diesem Abrichtüberdeckungsgrad  $U_d$  gegenüber dem Abrichten im Gleichlauf reduzieren



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SK 13w 70/80 G/H 10 V10

**Werkstück:**

Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7$  mm

$b = 99$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;

16MnCr5; 60 HRC

**Prozessparameter:**

$v_s = 35$  m/s

$a_e = 5$   $\mu\text{m}$

$v_x = 5$  mm/min

$v_w = 435,22$  mm/min

$b_{\text{Hub}} = 0,8$  mm

$f_{fa} = 0,5$  Hz

$A_{fa} = 1$  mm

$\varphi_s = 0$   $^\circ$

$V_w = 1,2$  mm<sup>3</sup>

Gleichlauf

**AbrihtparamAbrihtparameter:**

$v_{sd} = 35$  m/s

$U_d =$  variabel

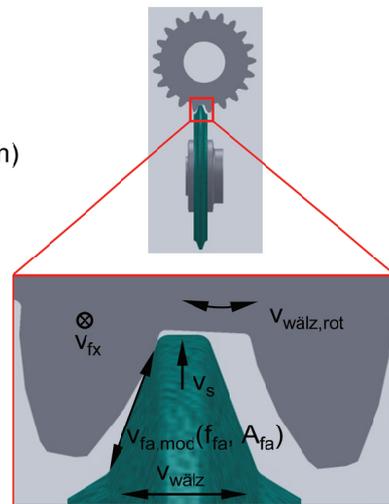
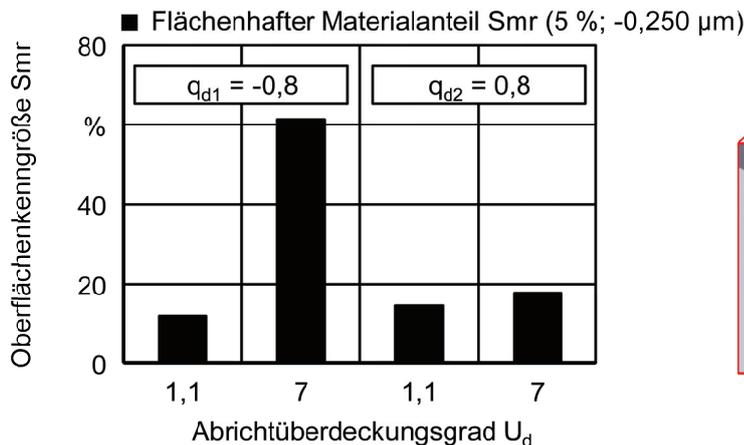
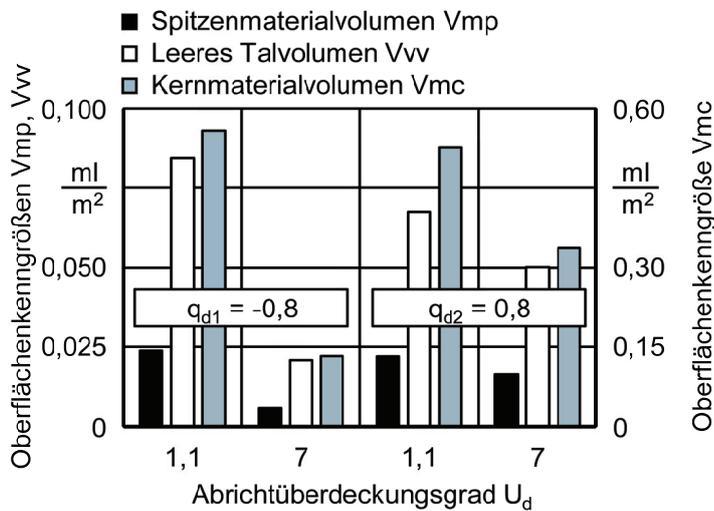
$q_{d1/2} = -0,8/0,8$

$a_{ed} = 30$   $\mu\text{m}$

Anzahl der Zustellungen: 2

**Kühlschmierstoff:**

Öl; Macron 2425 S-14

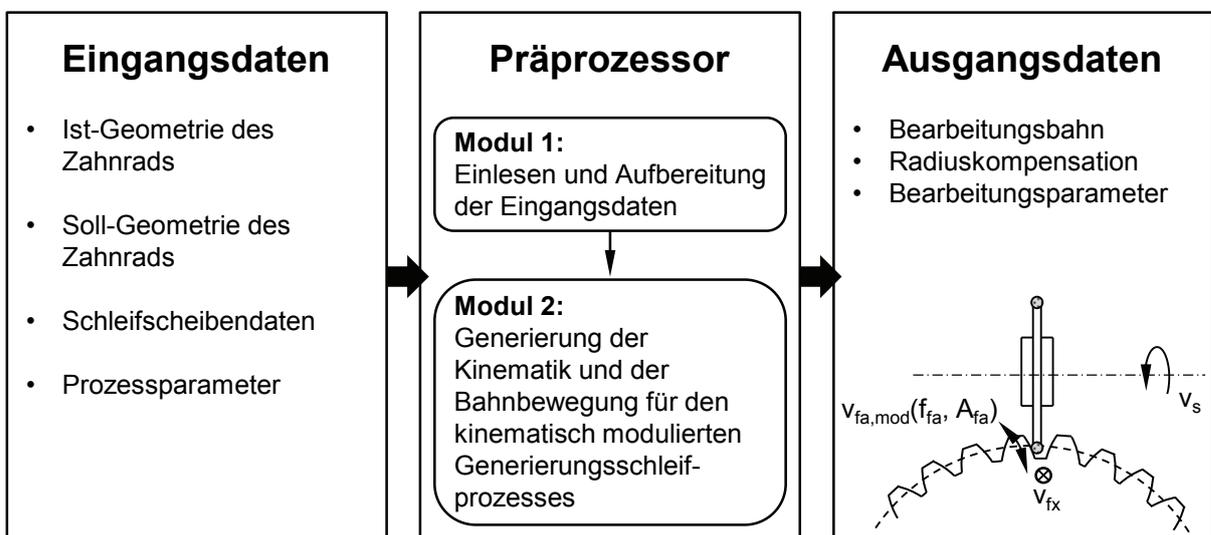


**Bild 8-24:** Einfluss des Abrihtüberdeckungsgrades  $U_d$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten Teilwälschleifprozess bei einem Abrihtgeschwindigkeitsverhältnis von  $q_{d1} = -0,8$  und  $q_{d2} = 0,8$

### 8.3 Kinematisch modulierter topologischer Generierungsschleifprozess

Eine weitere Möglichkeit zur gezielten Oberflächenstrukturierung stellt ein kinematisch modulierter topologischer Generierungsschleifprozess mit galvanisch gebundener CBN-Schleifscheibe dar. Nach DIN 8589-11 [DIN8589-11] wird diese spezielle Bearbeitung der Zahnflanken dem Formschleifen zugeordnet, da der Schleifprozess mit einer gesteuerter Vorschubbewegung erfolgt. Dies kann jedoch unter Umständen zu Missverständnissen mit dem Fachterminus der industriellen Anwender führen [NIL15]. Aus diesem Grund wird diese Schleifbearbeitung im Folgenden nur noch als kinematisch modulierter topologischer Generierungsschleifprozess bezeichnet.

Zunächst wurde ein NC-Programm für einen topologischen Generierungsschleifprozess von geradverzahnten Stirnrädern entwickelt, wobei die verwendete Werkzeugbahn der Evolventenform mit entsprechender Radiuskompensation entspricht. Die Schnittgeschwindigkeit setzt sich hierbei aus der modulierten Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  entlang der Evolvente sowie der axialen Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fx}$  und der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  zusammen. In [Bild 8-25](#) ist ein schematischer Aufbau der Schritte zur Erstellung des Schleifprogrammes sowie eine Prinzipskizze der Prozesskinematik beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifen dargestellt. Die Bearbeitung bei dieser Prozessstrategie erfolgt einflankig. Die Herstellung gezielter Strukturriefen auf den Zahnflanken könnte besonders für den Bereich um den Wälzkreisdurchmesser einer Zahnradpaarung interessant sein, da dort aufgrund der geringen Relativgeschwindigkeiten ein deutlich geringerer hydrodynamischer Effekt und somit eine ungünstigere Schmierbedingung im Zahnkontakt vorliegt [CZI10].

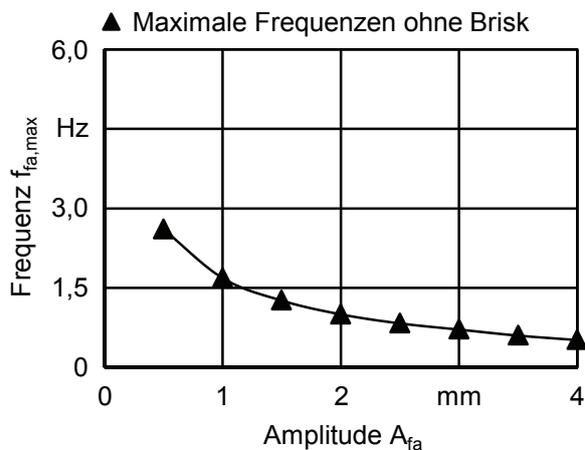


**Bild 8-25:** Schematischer Aufbau des Programmes sowie die Prozesskinematik beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess

Nach dem Fertigschleifprozess mit keramisch gebundenen Sinterkorundschleifscheiben werden gezielte Strukturriefen auf der Zahnflankenoberfläche mithilfe der galvanisch gebundenen CBN-Schleifscheibe erzeugt, welche als Öltaschen dienen und somit die Schmierbedingungen im Wälzkontakt verbessern sollen. Im Rahmen der technologischen Untersu-

chungen wird der Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  und der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Kennwerte des Arbeitsergebnisses beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess untersucht, wobei die Modulationsbewegung auf einem Durchmesser  $d_{mod} = 152$  mm durchgeführt wurde. Die Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und die Vorschubgeschwindigkeit  $v_{fx}$  wurden innerhalb der Untersuchungen nicht variiert.

Bei dieser Bearbeitungsstrategie kommen für die Modulationsbewegung nur zwei Maschinenachsen der Zahnrad-Profilschleifmaschine zum Einsatz, so dass sich ein anderer realisierbarer Frequenzbereich für den Amplitudenbereich von  $A_{fa} = 0,5$  mm bis  $A_{fa} = 4$  mm ergibt. Aufgrund der hohen Anforderungen an die Form-, Lage- und Maßgenauigkeit der Zahnflanken werden die Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  wiederum nur im SOFT-Modus bestimmt. Bild 8-26 stellt die Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für den kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess dar. Die erreichbaren Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  sind ab einer Amplitude  $A_{fa} = 2$  mm im Vergleich zum Teilwälzschleifprozess um ca. 40 - 50 % geringer (vgl. Bild 8-4). Bei den kleineren Amplitude  $A_{fa}$  fällt der Unterschied bei den erreichbaren Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  deutlich geringer aus.



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SG30-B25CH-300-4-3,5-R2-80-55-TK

**Werkstück:**

Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7$  mm

$b = 99$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;

16MnCr5; 60 HRC

**Prozessparameter:**

$v_s = 35$  m/s

$a_e = 5$   $\mu$ m

$v_{fx} = 5$  mm/min

$\lambda = 0,8$  mm

$f_{fa} =$  variabel Hz

$A_{fa} =$  variabel mm

$\phi_s = 0$   $^\circ$

$d_{mod} = 152$  mm

Gleichlauf

**Kühlschmierstoff:**

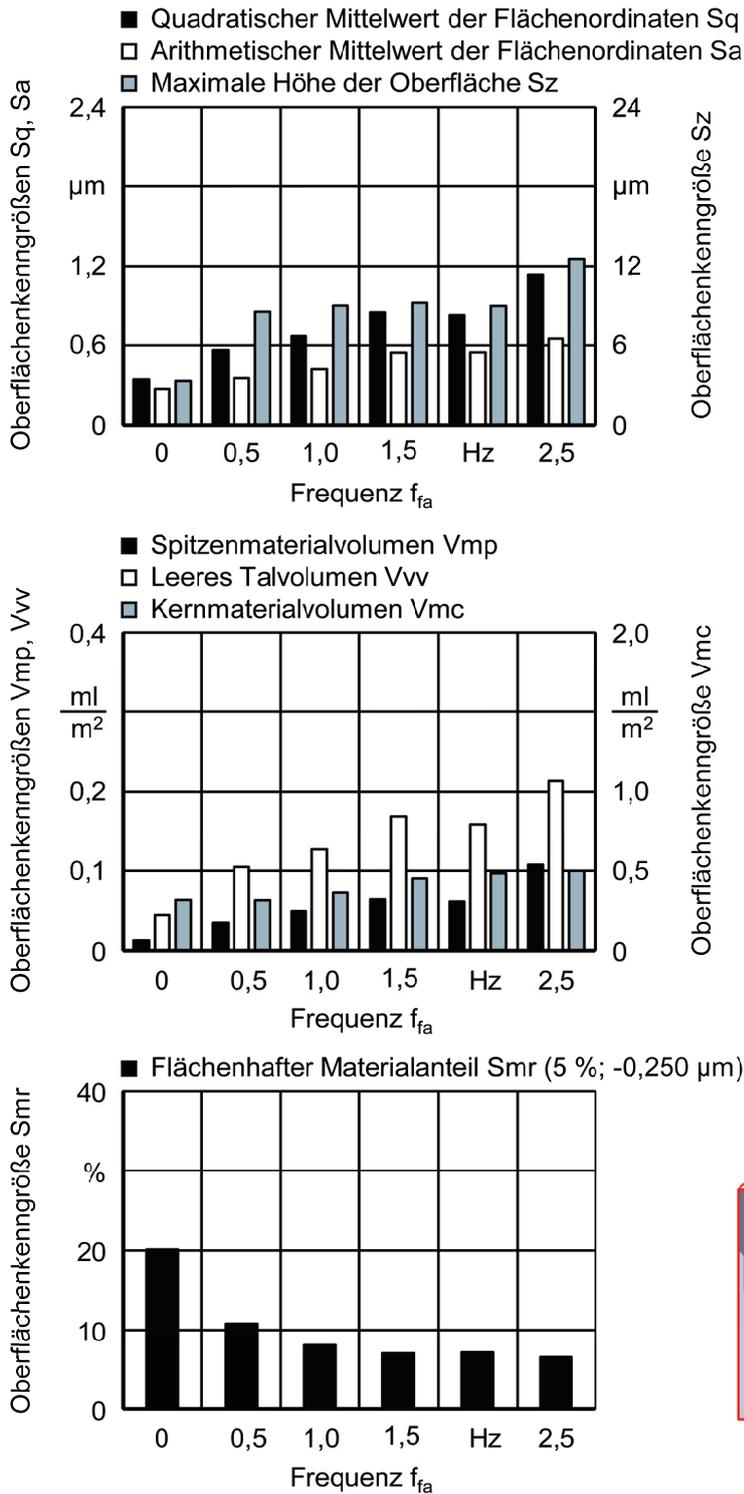
Öl; Macron 2425 S-14

Bild 8-26: Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  für den kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess

Der positive Einfluss von definierten Öl-Rückhaltetaschen in die Oberfläche konnte bereits für Gleitpaarungen nachgewiesen werden, wodurch sich eine deutliche Reduzierung der Reibung realisieren lässt [ABE01b, ABE01a, DUL02, ETS04, SCS05, GEH07, ZUM07]. Dabei wurden Tiefen im Bereich von 5 - 10  $\mu$ m für die Mikrostrukturen verwendet. Nach FERMANDEZ [FER12] beeinflussen die geometrischen Kenngrößen der deterministischen Mikrostruktur, wie Einzelstrukturform und Strukturtiefe, hauptsächlich die Mischreibung und die elastohydrodynamische Reibung im Tribosystem.

*Variation der Frequenz  $f_{fa}$* 

Die Ergebnisse zum Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifen bei einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,5$  mm sind in [Bild 8-27](#) erkennbar. Der Versuch mit einer Frequenz  $f_{fa} = 0$  Hz stellt dabei die Oberflächenqualität nach einem Zahnflanken-Profilenschleifprozess dar. Eine steigende Frequenz  $f_{fa}$  führt dabei zu einer Verschlechterung der Oberflächenqualität. So lässt sich für die Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  ein näherungsweise linearer Anstieg in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$  erkennen, wobei die Oberflächenkennwerte bei einer Frequenz  $f_{fa}$  von 2,5 Hz um das ca. 3-fache größer als die Ausgangsrauheit in der Referenzlücke sind. Die Durchführung eines kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozesses als zusätzlichen Prozessschritt nach der Profilschleifbearbeitung geht demzufolge mit einer Erhöhung der Ausgangsrauheit einher. Die Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  zeigen bei einer Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  eine ähnliche Tendenz. Auffällig ist jedoch, dass das leere Talvolumen  $V_{vv}$  im Verhältnis zu den Oberflächenkennwerten und den anderen Volumenparametern einen höheren Anstieg aufweist. Das vergrößerte leere Talvolumen  $V_{vv}$  kann dabei als Schmierstoffreservoir im Wälzkontakt dienen, womit sich die Schmierbedingungen im EHD-Kontakt verbessern können. Die Erzeugung eines zusätzlichen Schmierstoffvorrats durch das kinematisch modulierte topologische Generierungsschleifen ist daher auf Kosten einer Verschlechterung der Oberflächenqualität möglich. Mit einem Kompromiss aus ausreichendem leeren Talvolumen  $V_{vv}$  und einer geringfügigen Verschlechterung der Oberflächenrauheit könnten, ähnlich wie bei Gleitpaarungen, die tribologischen Schmierbedingungen verbessert werden. Bei Betrachtung des Verlaufs für den flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) lässt sich eine Korrelationen zu den Oberflächenkennwerten und den Volumenparametern feststellen. Eine Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  führt dabei zu einer Reduzierung der flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ). Ein Minimum von ca. 5 % für den Flächenmaterialanteil  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) lässt sich für diese Versuchsreihe bei der Frequenz  $f_{fa} = 2,5$  Hz beobachten, was einer Reduzierung von ca. 75 % zur Referenzoberfläche entspricht.



**Maschine:**  
Niles ZE 800

**Werkzeug:**  
SG30-B25CH-300-4-3,5-  
R2-80-55-TK

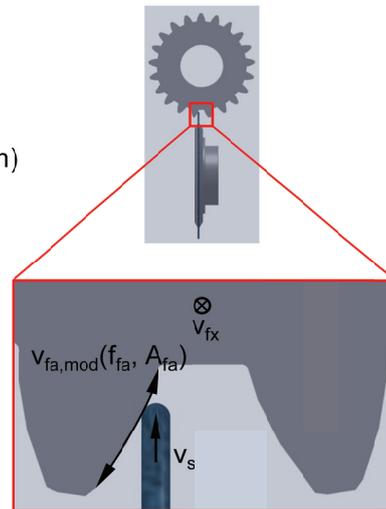
**Werkstück:**  
Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7 \text{ mm}$   
 $b = 99 \text{ mm}$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  
16MnCr5

**Prozessparameter:**

- $v_s = 35 \text{ m/s}$
- $a_e = 5 \mu\text{m}$
- $v_{fx} = 300 \text{ mm/min}$
- $v_w = 435,22 \text{ mm/min}$
- $b_{\text{Hub}} = \text{variabel mm}$
- $f_{fa} = \text{variabel Hz}$
- $A_{fa} = 0,5 \text{ mm}$
- $f_{DH} = \text{variabel Hz}$
- $\varphi_s = 0^\circ$
- $d_{\text{mod}} = 152 \text{ mm}$

Gleichlauf

**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14

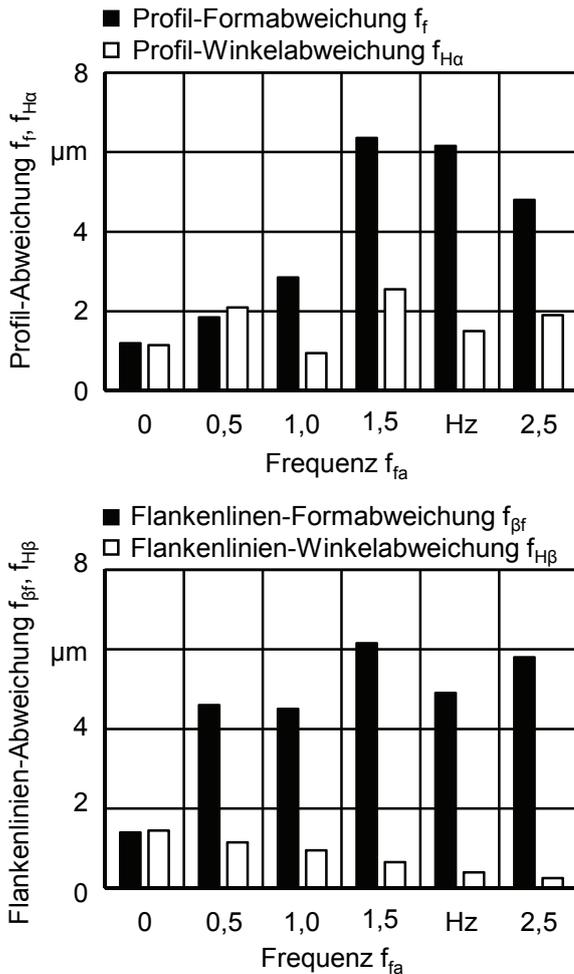


**Bild 8-27:** Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifen mit einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,5 \text{ mm}$

Beim Einsatz eines nicht formgebenden Strukturierungsverfahrens ist insbesondere die Beurteilung des Arbeitsergebnisses für den Prozess anhand geometrischer Kennwerte wie Form- und Lagegenauigkeit der geschliffenen Zahnflanken von großer Bedeutung. Der Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  so-

wie auf die Flankenlinien-Formabweichung  $f_{\beta f}$  und Flankenlinien-Winkelabweichung  $f_{H\beta}$  ist in Bild 8-28 dargestellt. Sowohl für die Formabweichung beim Profil als auch bei der Flankenlinie lässt sich eine signifikante Verschlechterung beim Einsatz des kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifens identifizieren. Dagegen zeigen die Winkelabweichung für die Profil- und Flankenlinie keine systematische Abhängigkeit von der Frequenz  $f_{fa}$ . Bei genauer Betrachtung des Verlaufs für die Profil-Formabweichung  $f_f$  wird ein Anstieg auf ca.  $6 \mu\text{m}$  bis zur Frequenz  $f_{fa} = 1,5 \text{ Hz}$  deutlich, wobei eine weitere Erhöhung der Frequenz  $f_{fa}$  zu einer geringfügigen Verbesserung der Profil-Formabweichung  $f_f$  führt. Dagegen bleibt die Flankenlinien-Formabweichung  $f_{\beta f}$  für alle Frequenzen  $f_{fa}$  zwischen  $4 \mu\text{m}$  und  $6 \mu\text{m}$  auf einem ähnlichen Niveau. Die Qualitätsklassen des Zahnflankenprofils für die untersuchten Frequenzen  $f_{fa}$  liegen unterhalb der Verzahnungsqualität  $\text{QKL} = 5$  nach DIN 9362-1 [DIN3962-1], wobei geringere Frequenzen  $f_{fa}$  zu deutlich besseren Qualitätsklassen führen. Die Verzahnungsqualitäten der Flankenlinienmessungen nach DIN 9362-2 [DIN3962-2] zeigen dagegen für alle Versuche eine Qualitätsklasse  $\text{QKL} \leq 5$  auf.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich mit dem Einsatz eines kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozesses ein zusätzliches Schmierstoffreservoir in Form des leeren Talvolumens  $V_{vv}$  bei gleichzeitiger Verringerung der Oberflächenqualität und Verzahnungsqualität der Zahnflanken realisieren lässt. Insbesondere scheint sich bei der kinematischen Modulation mit geringen Frequenzen  $f_{fa}$  ein guter Kompromiss zwischen Oberflächen- und Verzahnungsqualität auszubilden. Aufgrund der geometrischen Abweichungen von der exakten Sollgeometrie der Evolvente kann es jedoch zu unerwünschten Geräuschanregungen beim Einsatz der Zahnräder kommen [STW08].



**Maschine:**

Niles ZE 800

**Werkzeug:**

SG30-B25CH-300-4-3,5-  
R2-80-55-TK

**Werkstück:**

Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7$  mm  
 $b = 99$  mm;  $\beta = 0^\circ$ ;  
 16MnCr5

**Prozessparameter:**

$v_s = 35$  m/s  
 $a_e = 5$  µm  
 $v_{fx} = 300$  mm/min  
 $v_w = 435,22$  mm/min  
 $b_{Hub} =$  variabel mm  
 $f_{fa} =$  variabel Hz  
 $A_{fa} = 0,5$  mm  
 $f_{DH} =$  variabel Hz  
 $\varphi_s = 0$  °  
 $d_{mod} = 152$  mm

Gleichlauf

**Kühlschmierstoff:**

Öl; Macron 2425 S-14

**Bild 8-28:** Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  auf die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  sowie die Flankenlinien-Formabweichung  $f_{\beta f}$  und Flankenlinien-Winkelabweichung  $f_{H\beta}$  beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess mit einer Amplitude von  $A_{fa} = 0,5$  mm

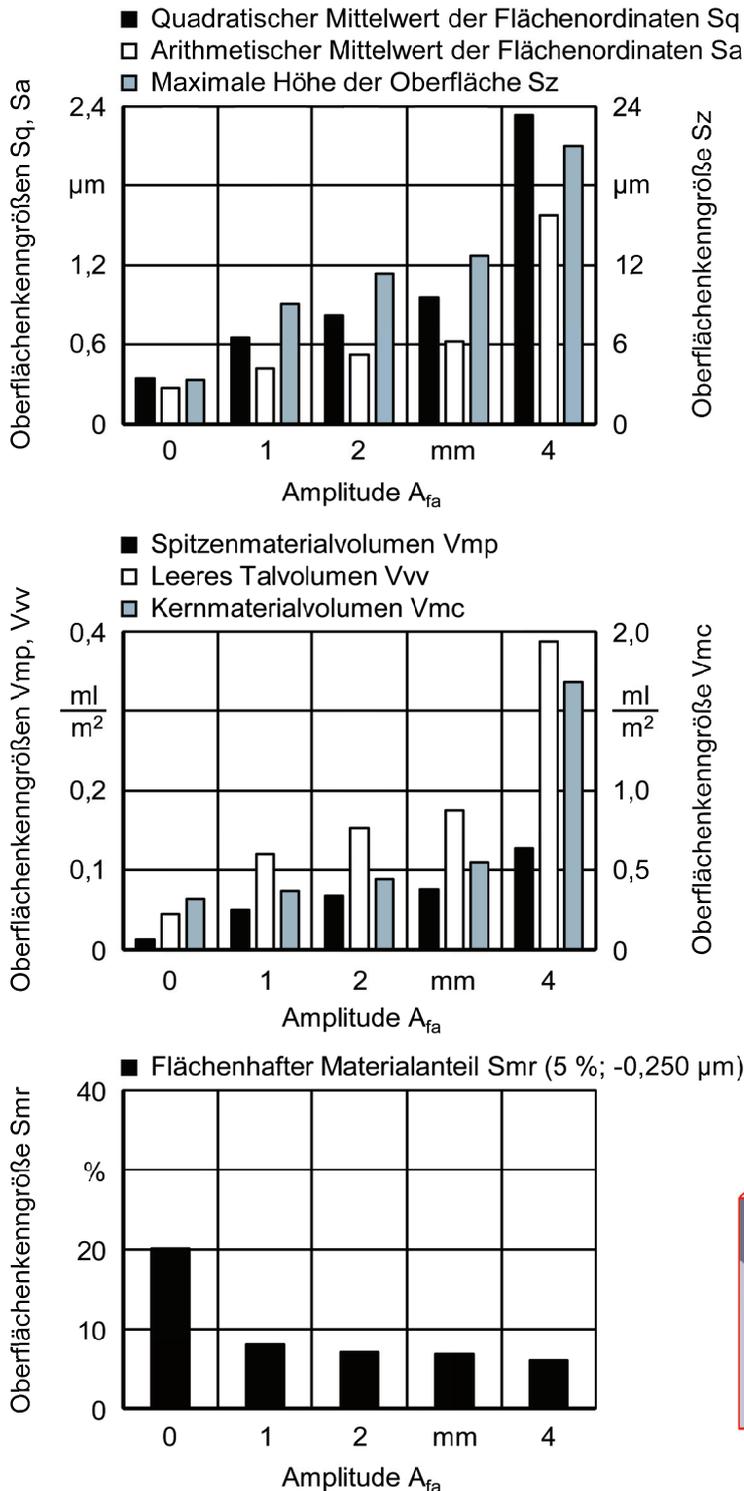
*Variation der Amplitude  $A_{fa}$*

Der Strukturwinkel  $\alpha_s$  der erzeugten Riefe lässt sich neben der Frequenz  $f_{fa}$  auch mithilfe der Amplitude  $A_{fa}$  verändern. Bild 8-29 stellt den Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifen bei einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5$  Hz dar. Der Versuch mit einer Frequenz  $f_{fa} = 0$  Hz stellt auch hier die Oberflächenqualität nach einem Zahnflanken-Profileschleifprozess dar. Die Verläufe für die Oberflächenkennwerte  $S_q$ ,  $S_a$ ,  $S_z$  zeigen zunächst einen linearen Anstieg bis zu einer Amplitude  $A_{fa} = 3$  mm, wobei eine weitere Steigerung auf  $A_{fa} = 4$  mm zu einer deutlichen Erhöhung dieser Kennwerte von bis zu knapp 400 % führt. Dagegen hat eine kinematische Modulation mit geringen Amplituden  $A_{fa}$  nur eine geringfügige Verschlechterung der Oberflächenqualität zur Folge.

In Bezug auf die Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  lassen sich ähnliche Tendenzen in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  erkennen. Auffällig sind auch hierbei die unterschiedlichen Verläufe zwischen dem leeren Talvolumen  $V_{vv}$  und dem Spitzenmaterialvolumen  $V_{mp}$ . So lässt sich mithilfe des kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozesses bei

einer Amplitude  $A_{fa} = 2$  mm ein großes leeres Talvolumen bei gleichzeitig geringen Oberflächenkennwerten verglichen mit dem Referenzversuch erzielen. Eine Erhöhung des leeren Talvolumens  $V_{vv}$  kann somit zu einem größeren Schmierstoffreservoir auf der Zahnflankensoberfläche führen, was zu verbesserten Schmierbedingungen im Bereich von geringen Gleitgeschwindigkeiten im Wälzkontakt führen kann. Dies wurde wie bereits erwähnt für Gleitpaarungen schon in einigen Forschungsarbeiten nachgewiesen [ABE01b, ABE01a, DUL02, ETS04, SCS05, GEH07, ZUM07].

Bei der Analyse des flächenhaften Materialanteils Smr (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  lässt sich eine Reduzierung um ca. 30 % beim Einsatz der kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifbearbeitung als zusätzlichen Prozessschritt identifizieren. Zwischen den Amplituden  $A_{fa} = 1$  mm und  $A_{fa} = 4$  mm kann keine weitere signifikante Änderung des flächenhaften Materialanteils Smr (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ) erkannt werden.



**Maschine:**  
Niles ZE 800

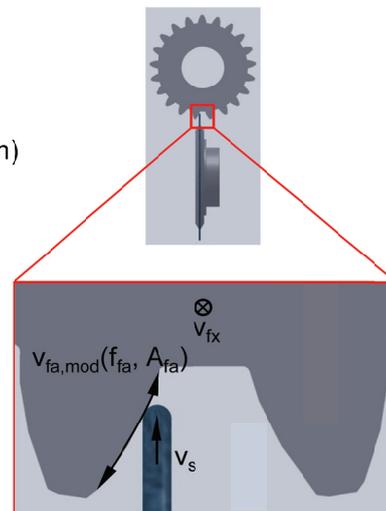
**Werkzeug:**  
SG30-B25CH-300-4-3,5-  
R2-80-55-TK

**Werkstück:**  
Zahnrad:  $z = 21$ ;  $m_n = 7 \text{ mm}$   
 $b = 99 \text{ mm}$ ;  $\beta = 0^\circ$ ;  
16MnCr5

**Prozessparameter:**

$v_s$	=	35	m/s
$a_e$	=	5	$\mu\text{m}$
$v_{fx}$	=	300	mm/min
$v_w$	=	435,22	mm/min
$b_{\text{Hub}}$	=	33,33	mm
$f_{fa}$	=	0,5	Hz
$A_{fa}$	=	variabel	mm
$f_{DH}$	=	variabel	Hz
$\varphi_s$	=	0	$^\circ$
$V_w$	=	1,2	$\text{mm}^3$
$d_{\text{mod}}$	=	152	mm

Gleichlauf  
**Kühlschmierstoff:**  
Öl; Macron 2425 S-14

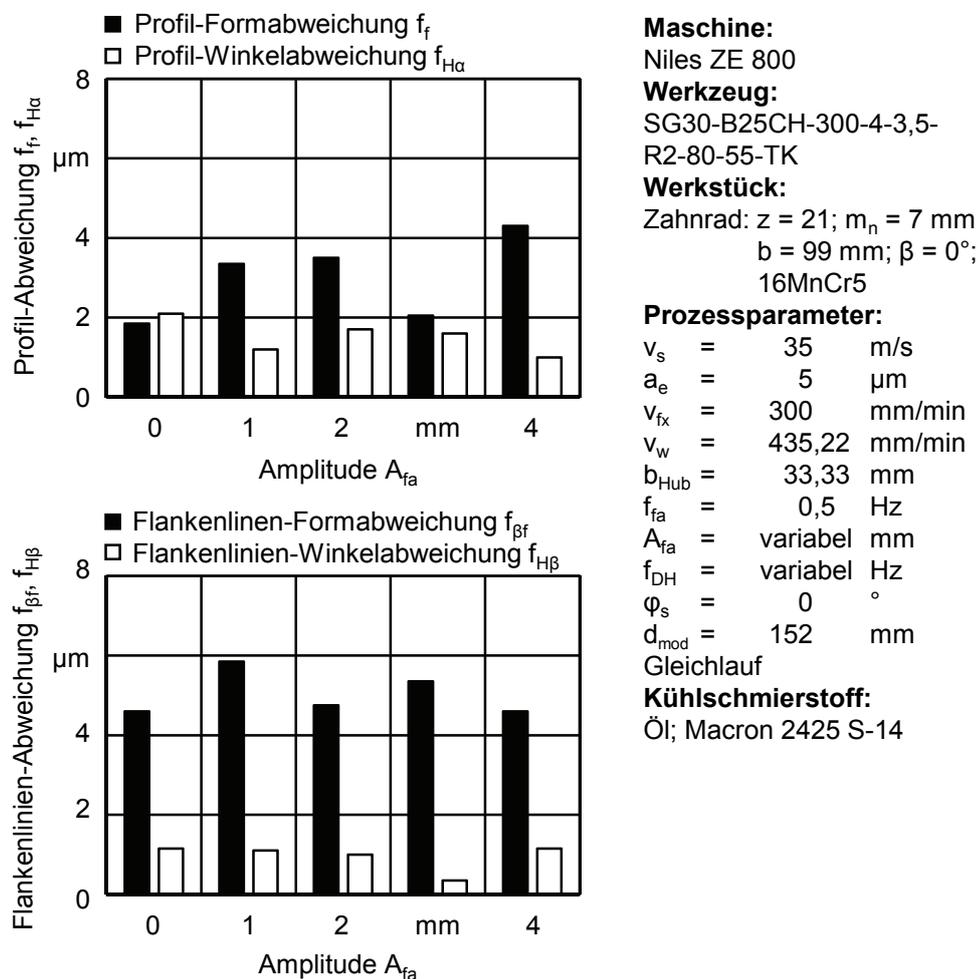


**Bild 8-29:** Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Oberflächenkennwerte beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifen mit einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$

Neben dem Einfluss des nicht formgebenden Strukturierungsverfahrens auf die Oberflächenkennwerte ist die Analyse der Form- und Lagegenauigkeit der geschliffenen Zahnflanken im Hinblick auf die industrielle Anwendung von großer Bedeutung. Mithilfe der taktilen Messung nach DIN 3962 [DIN3962-1, DIN3962-2] lassen sich die Profil-Formabweichung  $f_f$

und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  sowie die Flankenlinien-Formabweichung  $f_{\beta f}$  und Flankenlinien-Winkelabweichung  $f_{H\beta}$  in Abhängigkeit der Amplitude  $A_{fa}$  bestimmen, siehe Bild 8-30. Sowohl die Formabweichung als auch die Winkelabweichung für das Profil und die Flankenlinie zeigen keine klare Anhängigkeit mit der Amplitude  $A_{fa}$ . Die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  bleiben für alle Versuche weitestgehend unter  $4 \mu\text{m}$  Abweichung, was einer Verzahnungsqualität von  $\text{QKL} \leq 3$  nach DIN 9362-1 [DIN3962-1] entspricht. Die Verzahnungsqualitäten der Flankenlinienmessungen liegen für alle Versuchslücken unterhalb von  $6 \mu\text{m}$ , was einer Qualitätsklasse  $\text{QKL} \leq 5$  nach DIN 9362-2 [DIN3962-2] entspricht.

Abschließend kann für diese Versuchsreihe ebenfalls eine Erhöhung des leeren Talvolumens  $V_{vv}$  bei gleichzeitiger Beeinflussung der Oberflächenkennwerte sowie der Form- und Lagegenauigkeit identifiziert werden. Insbesondere scheint sich bei der kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifbearbeitung mit geringen Amplituden  $f_{fa}$  ein guter Kompromiss aus Oberflächen- und Verzahnungsqualität für den Wälzkontakt auszubilden.



**Bild 8-30:** Einfluss der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Profil-Formabweichung  $f_f$  und Profil-Winkelabweichung  $f_{H\alpha}$  sowie die Flankenlinien-Formabweichung  $f_{\beta f}$  und Flankenlinien-Winkelabweichung  $f_{H\beta}$  beim kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess mit einer Frequenz von  $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$

Beim Vergleich der Oberflächenstruktur nach dem kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifen mit der Referenzoberfläche in Bild 8-31 wird eine Veränderung der Oberflächenstruktur durch den zusätzlichen Prozessschritt deutlich. Zusätzlich zu den unidirektionalen Schleifspuren aus der Vorbearbeitung ist eine gezielte Strukturriefe auf der Oberfläche zu erkennen, die einen Einfluss auf die Mikro- und Makrogeometrie der Zahnflanke hat. Ziel der Strukturriefe ist hierbei die Bereitstellung eines ausreichenden leeren Talvolumens  $V_{vv}$  für die Aufnahme von Schmierstoff, was zu einer Verbesserung der Schmierbedingungen im Wälzkontakt führen kann. Anhand der Oberflächendarstellung wird zudem die Entstehung von seitlichen Aufwürfen deutlich, die eine Abgrenzung zur Referenzoberfläche darstellen. Darüber hinaus lässt sich in der Strukturriefe der Einfluss der kinematischen Modulation auf die Ritzspuren erkennen, die zum Teil unterbrochen sind und nicht mehr unidirektional verlaufen.

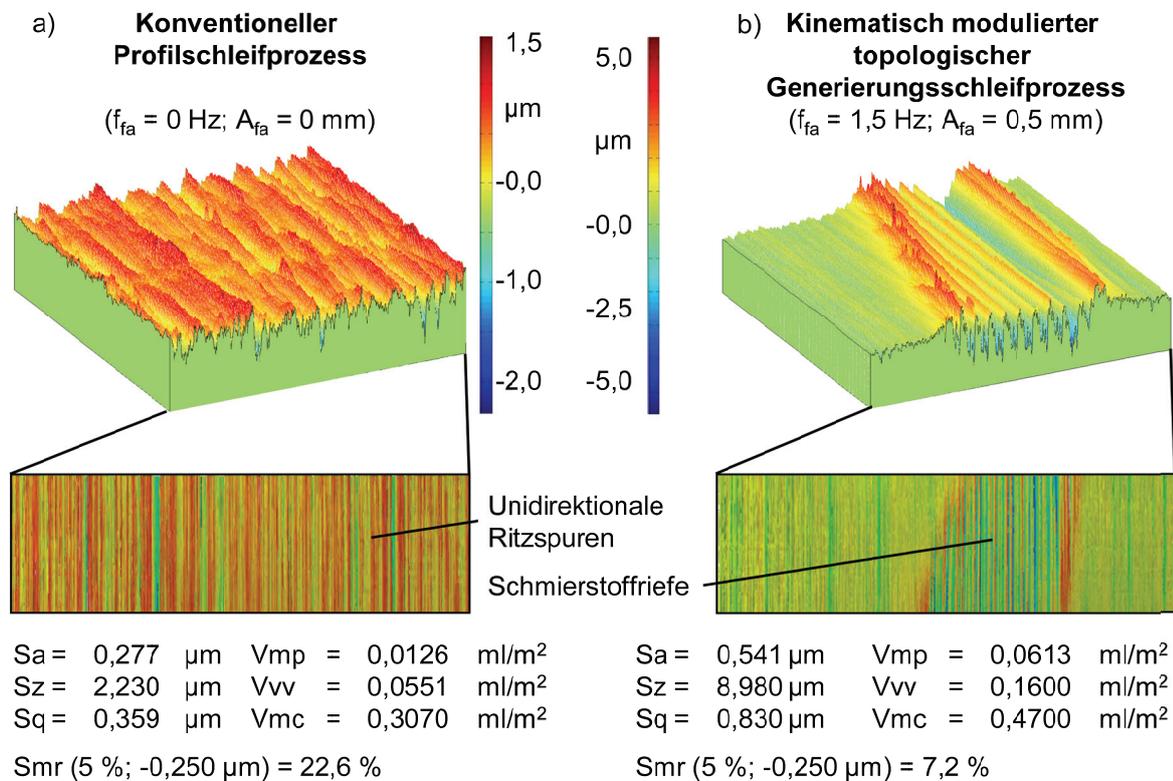


Bild 8-31: Vergleich der Oberflächenstrukturen; a) ohne kinematische Modulation; b) mit kinematischer Modulation beim topologischen Generierungsschleifen

---

## 9 Einsatzverhalten strukturierter Oberflächen

Im folgenden Kapitel werden Untersuchungen zum Einsatzverhalten der strukturierten Oberflächen beschrieben. Dafür werden zunächst die Ergebnisse zur Simulation der Schmierbedingungen beim Einsatz strukturierter Oberflächen präsentiert. Weiterhin werden die Auslegung und Herstellung der Versuchszahnräder für die Einsatztests und anschließend die Ergebnisse zum Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Fresstragfähigkeit vorgestellt, um den technologischen Nutzen kinematische modulierter Schleifprozesse zu evaluieren.

### 9.1 Simulation der Schmierfilmbildung

Um den Einfluss unterschiedlicher Oberflächentopographien im Zahnradkontakt auf die Ausbildung eines tragenden Schmierfilmes zu bewerten und somit Rückschlüsse auf das Einsatzverhalten strukturierter Oberflächen treffen zu können, wurden am INSTITUT FÜR MECHANIK der TU BERLIN elasto-hydrodynamische Analysen mit den simulierten, erzeugbaren Oberflächenstrukturen aus Kapitel 6 durchgeführt. Dabei werden Einflussfaktoren wie Last, Krümmungsradius, Temperatur und Öl bei der EHD-Simulation berücksichtigt. Zunächst wurde anhand der Peklenikzahl  $\gamma$  eine weitere Charakterisierung der simulierten Oberflächen durchgeführt, die zur Beschreibung der Orientierung von Rauheiten eingeführt wurde und das Verhältnis der Autokorrelationslängen in x- und y-Richtung beschreibt [WAH10]. Die Autokorrelationslänge beschreibt die enthaltenen Wellenlängen in der Topografie, wobei ein hoher Wert einem Spektrum mit überwiegend großen Wellenlängen entspricht [NAR14]. Für die modellierten Oberflächenstrukturen ergaben sich sehr kleine Werte für die Peklenikzahlen  $\gamma$ , was als vorteilhaft für die Schmierfilmbildung im Wälzkontakt interpretiert werden kann [POH14].

Als Analogieversuch für den Tribokontakt von Evolventenverzahnungen kommt häufig ein 2-Scheiben-Prüfstand zum Einsatz, um die Schmierbedingungen an zwei abrollenden, geschliffenen Scheiben anhand geeigneter Kennwerte, wie der Schmierfilmdicke, bestimmen zu können [MAN95, KRE08]. Mithilfe einer EHD-Simulation lassen sich die Schmierbedingungen von zwei abrollenden Kontaktpartnern numerisch nachbilden und bestimmen. Numerische Berechnungsmethoden zur Bestimmung der resultierenden Filmdicke in geschmierten Kontakten ist mit Ansätzen von MOHRENSTEIN-ERTEIL [MOH84] sowie DOWSON und HIGGINSON [DOW60] möglich. Für die Berechnung der elasto-hydrodynamische Schmierung müssen die physikalischen Gesetze, wie das Strömungsverhalten des Schmierstoffs (Reynoldsgleichung), die elastische Verformungen der Kontaktkörper sowie die Druckabhängigkeit der Ölviskosität und -dichte berücksichtigt werden. Die Simulation des elasto-hydrodynamischen Kontakts beim Einsatz strukturierter Oberflächen wurde unter Berücksichtigung der Bedingungen für einen 2-Scheiben-Prüfstand durchgeführt. Zudem wurden die Kennwerte für den FVA3-Schmierstoff als Referenz verwendet. Als Lösungsverfahren für die Simulation kam ein iterativer Algorithmus von VENNER und LUBRECHT [VEN00] zum Einsatz. Für eine festgelegte zentrale Schmierfilmdicke von  $0,5 \mu\text{m}$  kann die resultierende Normalkraft  $F_{n\_EHD}$  bezogen auf die Kontaktbreite als Simulationsergebnis ermittelt werden. Die Normalkraft  $F_{n\_EHD}$  ist dabei als Maß für die Fähigkeit einer Verhinderung des Abfließens des Schmierstoffs in Umlaufrichtung aufgrund der Oberflächenstruktur zu verstehen. Eine größe-

re Normalkraft  $F_{n\_EHD}$  deutet somit auf verbesserte Schmierbedingungen im Wälzkontakt hin [POH14].

Anhand der Ergebnisse in Bild 9-1 lassen sich deutliche Einflüsse der Modulationsparameter, Amplitude  $A_{fa}$  und Frequenz  $f_{fa}$ , auf die Normalkraft  $F_{n\_EHD}$  im Schmierpalt erkennen. Im Hinblick auf große Normalkräfte  $F_{n\_EHD}$  im Schmierpalt lassen sich geeignete Bereiche unter Einsatz einer Modulation mit geringen Amplituden  $A_{fa}$  um 1 mm im mittleren Frequenzbereich identifizieren, bei denen ein Abfließen des Schmierstoffs in Umlaufrichtung deutlich mehr verhindert wird. Insbesondere beim Vergleich der Simulationsergebnisse für die verschiedenen Oberflächenstrukturen mit dem Referenzversuch ohne Modulationsbewegung wird der Vorteil hinsichtlich einer verbesserten Schmierbedingung im Wälzkontakt sichtbar [POH14].

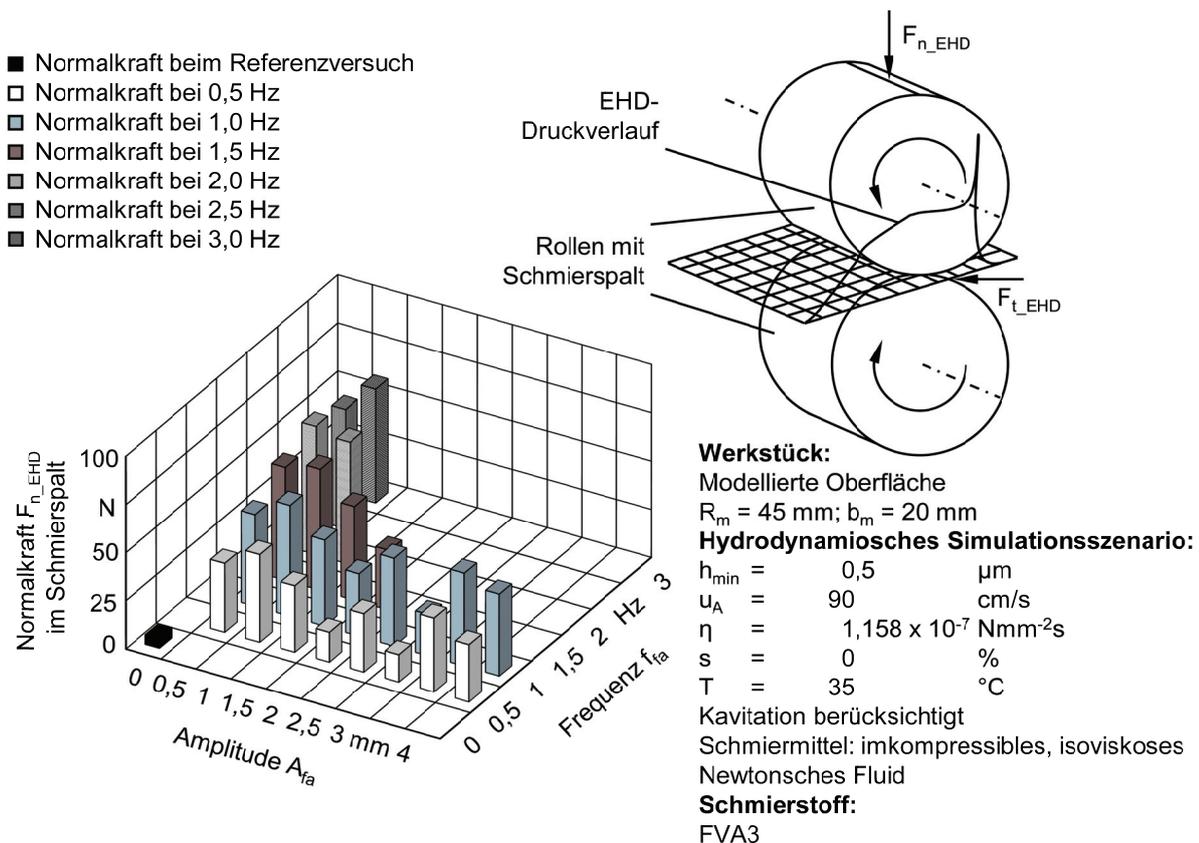


Bild 9-1: Einfluss der kinematischen Modulation auf die Normalkraft  $F_{n\_EHD}$  im Schmierpalt nach [POH14]

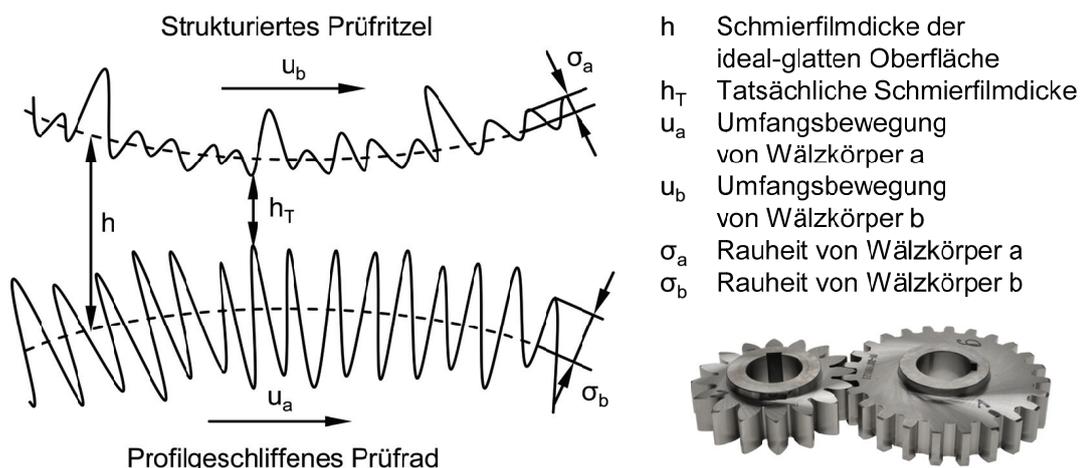
## 9.2 Auslegung und Herstellung der Prüfzahnräder

Die Analyse und Klärung des Einflusses der Oberflächenstruktur, hergestellt durch eine kinematisch modulierte Schleifbearbeitung, auf das Einsatzverhalten der Zahnräder steht im Mittelpunkt der im Folgenden beschriebenen Versuche. Die Analyse der Wechselwirkung zwischen den Zahnflankenoberflächenstrukturen und den mechanischen Kontaktbedingungen durch eine veränderte Schmierfilmausprägung wird unterstützt durch die Bewertung der Form- und Lagegenauigkeit sowie der Oberflächenqualität der geschliffenen Prüfzahnräder.

UHLMANN [UHL11] konnte bereits im Rahmen von Trockenreibtests einen deutlichen Einfluss von schleiftechnisch eingebrachten Oberflächenstrukturen auf den Reibkoeffizienten und den

Verschleiß am Gegenkörper feststellen. Die Oberflächenstrukturierung auf Werkstückproben aus Hartmetall erfolgte mithilfe einer Plan-Hubschleifbearbeitung, wobei als Werkzeuge metallisch gebundene Diamantwerkzeuge zum Einsatz kamen.

Im hochbelasteten Zahnkontakt können verschiedenen Verschleißerscheinungen auf den Zahnflanken entstehen. Zur genauen Bestimmung des Einflusses einer Oberflächenstruktur auf das Einsatzverhalten der Zahnräder kann ein möglicher Verschleiß anhand der Grübchentragfähigkeit, Graufleckentragfähigkeit, Verschleißtragfähigkeit, Fresstragfähigkeit oder Zahnfußtragfähigkeit bestimmt werden [KOL10]. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Fresstragfähigkeitsuntersuchungen in Anlehnung an DIN ISO 14635-1 [DINISO14635-1] durchgeführt. Dieses Prüfverfahren zur Bestimmung der relativen Fresstragfähigkeit von Schmierstoffen ist charakteristisch für die meisten Anwendungen in Industrie- und Schiffsgetriebenen. Das Risiko eines Fressschadens ist neben den Werkstoffeigenschaften des Zahnrades, dem verwendeten Schmierstoff, den Gleitgeschwindigkeiten sowie der Belastung abhängig von der Oberflächenstruktur und -rauheit der Zahnflanken [WIŚ00, GES02b, SRO03, DINISO14635-1, KOL10, SCB10]. Die genauen Werkstoffspezifikationen und Geometrien der Prüzzahnräder sind dem Kapitel 4.3 zu entnehmen. Für die Einsatztests werden zunächst die entsprechenden Prüzzahnräder auf der CNC-Zahnrad-Profilschleifmaschine ZE 800 der Fa. NILES WERKZEUGMASCHINEN GMBH, Berlin, Deutschland, hergestellt. Dabei werden für die Einsatztests Änderungen zur DIN ISO 14635-1 [DINISO14635-1] hinsichtlich der Oberflächenstruktur und -kennwerte vorgenommen, um eine Vergleichbarkeit und somit eine Bewertung des Potenzials strukturierter Zahnräder im Vergleich zu konventionell geschliffenen Zahnradpaarungen vornehmen zu können. Das Prüfrad wird für alle Prüfradpaarungen konventionell profilgeschliffen, wogegen das Prüfritzel sowohl strukturiert als auch konventionell geschliffen wird. Der Zahnfuß wird dabei jeweils für beide Zahnräder mitbearbeitet. Eine Prinzipskizze der Kontaktbedingungen beim Einsatz eines strukturierter Prüfritzels mit einem profilgeschliffenen Prüfrad ist in [Bild 9-2](#) dargestellt.



**Bild 9-2:** Prinzipskizze der Kontaktbedingungen beim Einsatz eines strukturierter Prüfritzels und eines profilgeschliffenen Prüfrades

Die Herstellung der Prüzzahnräder A/8,3/90 erfolgt unter Berücksichtigung der Anforderungen für die Fresstragfähigkeitstests, siehe [Tabelle 9-1](#). Alle Prüfräder werden dafür mithilfe des diskontinuierlichen Zahnflanken-Profilschleifprozesses unter Einsatz einer keramisch

gebundenen Sinterkorundschleifscheibe fertiggeschliffen, um den Anforderungen hinsichtlich der Profilverschiebung, Oberfläche und Verzahnungsqualität gerecht zu werden. Für die Herstellung des Referenz-Prüfritzel kommt ebenfalls das diskontinuierliche Zahnflanken-Profilschleifen zum Einsatz. Darüber hinaus werden ein Prüfritzel mit dem kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozess (formgebend) und ein vorgeschliffenes Prüfritzel mit einem kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess strukturiert, um den Einfluss sowohl einer Oberflächenstrukturierung als auch einer zusätzlichen erzeugten Schmierkammer im Bereich des Wälzkreises auf die Fresstragfähigkeit der Zahnflanken zu bestimmen. Die Auswahl der Parameter für die kinematische Modulation beim Teilwälzschleifen erfolgte dabei unter Berücksichtigung der Zugänglichkeit und einer deutlichen Verbesserung der Oberflächenstruktur. Für das topologische Generierungsschleifen wurden die Modulationsparameter ausgewählt, bei denen die Form- und Lagegenauigkeit nur geringfügig verschlechtert wird. Der arithmetische Mittelwert der Profilordinaten  $R_a$  liegt für alle Prüfritzel auf einem ähnlichen Niveau. Alle geschliffenen Prüfritzel weisen darüber hinaus eine Verzahnungsqualität von  $QKL \leq 5$  auf

Tabelle 9-1: Anforderungen an die Prüfzahnäder für die Fresstragfähigkeitstests

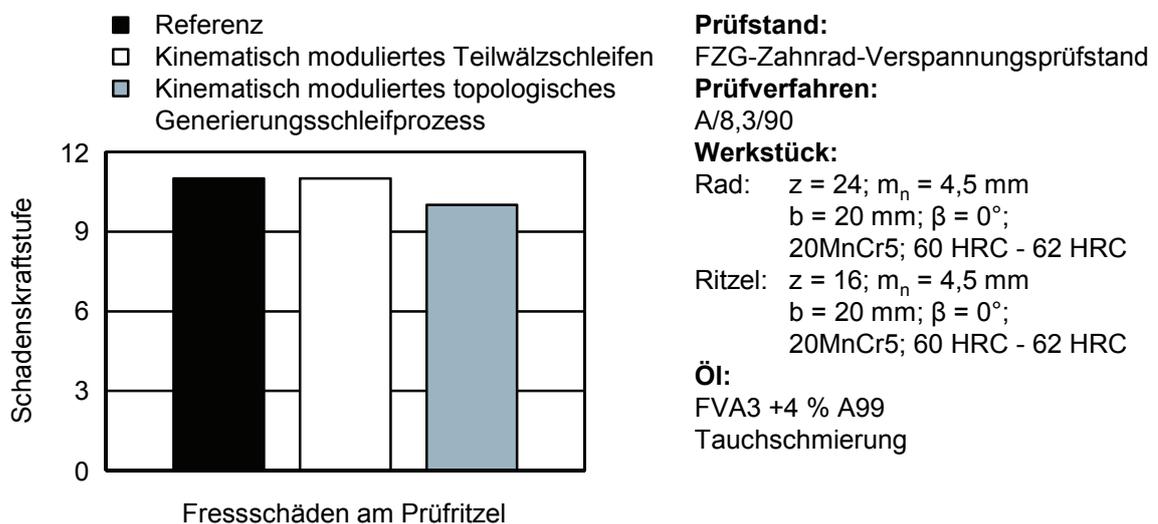
Anzahl	Prüfzahnäder – A/8,3/90	Mittlerer Oberflächenkennwert $R_a$	Verzahnungsqualität QKL
3	Prüfrad	$R_a = 0,4 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$	QKL = 5 nach ISO 1328-1
1	Referenz-Prüfritzel	$R_a = 0,35 \mu\text{m} \pm 0,05 \mu\text{m}$	
1	Strukturiertes Prüfritzel (formgebend) $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}; A_{fa} = 0,5 \text{ Hz}$	$R_a = 0,45 \mu\text{m} \pm 0,10 \mu\text{m}$	
1	Strukturiertes Prüfritzel (strukturiert) $f_{fa} = 0,5 \text{ Hz}; A_{fa} = 1,0 \text{ Hz}$ $d_{mod} = 73,2 \text{ mm}$	$R_a = 0,35 \mu\text{m} \pm 0,10 \mu\text{m}$	

### 9.3 Einfluss der Oberflächenstruktur der Zahnflanken auf die Fresstragfähigkeit

Für die Bestimmung und Bewertung der Oberflächenstrukturen wird im Rahmen von Fresstragfähigkeitsuntersuchungen auf einer FZG Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine nach DIN ISO 14635-1 [DINISO14635-1] eine Prüfpaarung mit einem konventionell geschliffenen Prüfritzel mit Prüfpaarungen unter Einsatz von strukturierten Prüfritzeln verglichen. Die FZG-Prüfbedingungen A/8,3/90 bedeuten hierbei die Verwendung der Prüfzahnradgeometrie A, eine Umfangsgeschwindigkeit am Wälzkreis von 8,3 m/s sowie eine Anfangstemperatur des Ölsumpfes ab Beginn der Kraftstufe 5 von  $90 \text{ °C} \pm 3 \text{ °C}$ . Anhand der Analyse des Verschleißes an den Zahnflanken wird der Einfluss einer kinematisch moduliert geschliffenen Oberfläche bestimmt und der technologische Nutzen unter den gegebenen Randbedingungen bewertet. Der Fresstragfähigkeitstest wird dabei in Anlehnung an die DIN ISO 14635 [DINISO14635-1] mit einer stufenweise gesteigerten Belastung bis zur Laststufe 11 durchgeführt. Die Oberflächen der Prüfäder weisen keinen Maag 15-Kreuzschliff auf, was eine Vergleichbarkeit der Prüfpaarungen nur untereinander ermöglicht. Die Dauer einer Laststufe beträgt bei konstanter Drehzahl 21.700 Umdrehungen des Motors, was einer Dauer von ca. 15 min entspricht. Die Zahnflanken des Ritzels werden am Ende jeder Kraftstufe auf Ober-

flächenschäden untersucht. Für die Zahnradtests kommt das FVA3-Referenzöl zum Einsatz. Die Prüfung wird bei einem Zahnbruch, beim Erreichen einer Schadenskraftstufe oder beim Ausbleiben des Versagenskriteriums nach Kraftstufe 11 beendet.

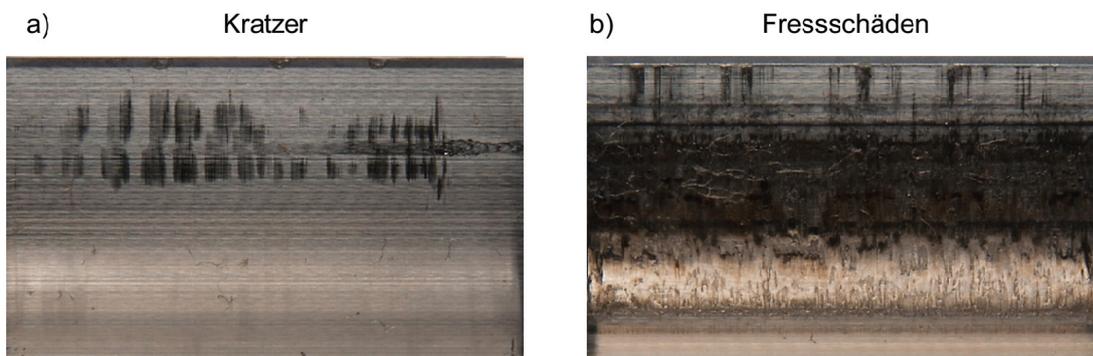
Die Ergebnisse der Fresstragfähigkeitsuntersuchungen werden hinsichtlich der erreichten Schadenskraftstufe für die Prüfpaarungen mit Referenzprüfritzel und strukturierten Prüfritzeln in [Bild 9-3](#) dargestellt. Zunächst ließen sich erste Oberflächenkratzer am Prüfritzel bereits ab der Kraftstufe 4 für die Prüfpaarungen mit dem konventionellen und dem kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess hergestellten Zahnrad feststellen. Die Prüfpaarungen mit dem kinematisch moduliert teilwälggeschliffenen Prüfritzel zeigen dagegen die ersten Kratzer erst ab der Kraftstufe 9. Jedoch entgegen der Erwartung auf Basis der Simulationsergebnisse und der Literatur zeigen die Oberflächen des Referenzprüfritzels und des kinematisch moduliert teilwälggeschliffene Prüfritzels keine signifikanten Unterschiede in Bezug auf Fressschäden. Die Fressschäden treten für beide Prüfritzel in der Schadenskraftstufe 11 auf. Als mögliche Gründe für die geringen Unterschiede können einerseits die durchgeführten Stichversuche genannt werden, weshalb keine statistischen Absicherungen für die Einsatztests vorliegen. Andererseits haben Pressungen und Geschwindigkeiten einen großen Einfluss auf die Schmierfilmbedingungen, so dass eventuell ein größerer Einfluss der Oberflächenstruktur bei anderen Versuchsbedingungen oder bei anderen Prüfverfahren bestimmbar ist. Das Prüfritzel, hergestellt mit dem kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess, zeigt bereits bei der Schadenskraftstufe 10 deutliche Fressschäden. Eine zusätzlich erzeugte Schmierkammer im Bereich des Wälzkreises scheint daher aufgrund des deutlich geringeren flächenhaften Materialanteils Smr (5 %;  $-0,250\ \mu\text{m}$ ) sowie der verringerten Formgenauigkeit der Profil- und Flankenlinie keinen positiven Effekt auf die Fresstragfähigkeit der Zahnflanken zu erzielen.



**Bild 9-3:** Vergleich des Fresstragfähigkeit von den strukturieren Prüfritzel mit dem Referenzprüfritzel

Zusätzlich können dem [Bild 9-4](#) exemplarische Bilder für die Kratzer und die Fressschäden auf den Oberflächen der Prüfritzeln entnommen werden. Bei der entsprechenden Schadenskraftstufe lässt sich auf den Oberflächen der Prüfritzeln eine großflächige Schadensbildung durch Fressen erkennen. Diese ist infolge hoher Belastung und Temperatur auf die örtliche

Durchbrechung des Schmierfilms und des chemischen Schutzfilms zwischen den zwei Wälzpartnern zurückzuführen, wodurch es zum Verschweißen der zwei Wälzpartner an dieser Stelle kommt. Durch die Relativbewegung der Wälzpartner hat dies jedoch eine sofortigen Trennung an diesen Stellen zur Folge [KOL10]. Die Oberflächentopographie der Zahnflanke nach dem kinematisch modulierten Teilwälzschleifen scheinen auf Basis der Simulationsergebnisse und der Literatur Vorteile im Hinblick auf die Fresstragfähigkeit aufzuweisen, die neben der geeigneten Oberflächenstruktur auch auf die verringerten Oberflächenkennwerte zurückgeführt werden können [KOL10, NIE10, POH14]. Die Steigerung der Fresstragfähigkeit durch eine Verringerung der Flankenrauheit wurde bereits in der Literatur beschrieben [NIE10]. Gefinischte Oberflächen mit einer Mikrotextur zeigen dabei ein besseres Einsatzverhalten im Vergleich zu gefinischten Oberflächen ohne jegliche Strukturriefen, was auf günstigere Schmierbedingungen aufgrund einer verbesserten Benetzbarkeit durch die Mikrostruktur zurückzuführen ist [SRO03].



**Bild 9-4:** Beispielhafte Oberflächenbilder am Prüfritzel; a) Kratzer, b) Fressschäden

## 10 Anwendungshinweise für kinematisch modulierte Schleifprozesse

Anhand der Untersuchungsergebnisse aus den vorangegangenen Kapiteln der vorliegenden Arbeit lassen sich Modellvorstellungen für den Zusammenhang zwischen der kinematischen Modulation bei Schleifprozessen und der daraus resultierenden Oberflächenstruktur sowie den Oberflächenkennwerten für die untersuchten Verfahren ableiten. Anhand der Modelle können Anwendungshinweise beim Einsatz kinematisch modulierter Schleifprozesse gegeben werden. Im Folgenden werden Hinweise hinsichtlich der Prozesskinematik und -dynamik vorgestellt sowie Modellvorstellungen für die resultierende Oberflächenstruktur abgeleitet.

### Prozesskinematik

Bei kinematisch modulierten Schleifprozessen wird neben der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$  eine weitere Geschwindigkeit, die sogenannte Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$ , definiert. Diese Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  verläuft hierbei senkrecht zu der Schleifscheibenumfangsgeschwindigkeit  $v_s$  und der Vorschubgeschwindigkeit  $v_f$ . Die Prozesskinematik beim kinematisch modulierten Schleifprozess ist vereinfacht als Prinzipskizze für die Planschleifbearbeitung in Bild 10-1 dargestellt. Die maximal realisierbare Frequenz  $f_{fa}$  ist dabei abhängig von dem Beschleunigungsverhalten für die Modulationsbewegung erforderlichen Maschinenachsen. Die Wertebereiche für die Frequenz  $f_{fa}$ , Amplitude  $A_{fa}$  und Phasenverschiebung  $\varphi_s$  sind für die in dieser Arbeit betrachteten Bereiche angegeben. Die Amplitude  $A_{fa}$  ist hingegen beschränkt im Hinblick auf die Zugänglichkeit bzw. die Breite der Funktionsfläche, wobei die Breite des aktiven Schleifscheibenprofils  $b_{s,eff}$  mindestens um das zweifache Maß der Amplituden  $A_{fa}$  größer sein muss, um eine Bearbeitung der gesamten Funktionsfläche zu gewährleisten.

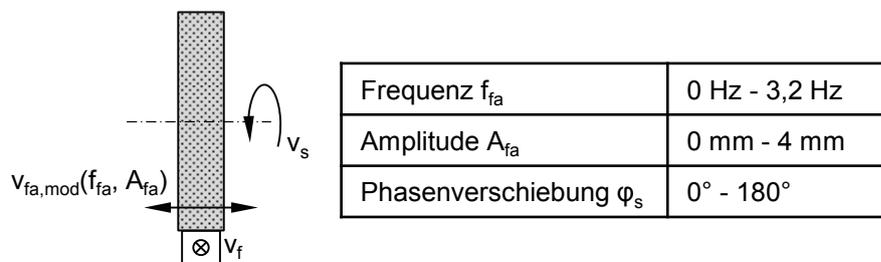


Bild 10-1: Prozesskinematik beim kinematisch modulierten Schleifprozess

Im Hinblick auf ungewollt dynamische Effekte bei der Schleifbearbeitung sollte die Modulationsfrequenz  $f_{fa}$  kein direktes Vielfaches oder sich in der Nähe der Eigenfrequenz von Werkstück und Werkzeug sowie von Schleifmaschine und dem verspannten System dieser Komponenten sein, um eventuell fremderregte Schwingungen aus dem kinematisch modulierten Prozess zu vermeiden.

*Prozessdynamik*

Die Anwendung der kinematisch modulierten Schleifprozesse auf konventionellen Schleifmaschinen erfordert zunächst eine Bestimmung der Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  für die entsprechenden Maschinenachsen, um die maschinenbedingte Prozessgrenzen in Form der maximal realisierbaren Frequenzen  $f_{fa}$  in Abhängigkeit der Amplituden  $A_{fa}$  zu bestimmen. Dabei führt eine Erhöhung der Amplitude zu einer Verringerung der Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$ . Dieses Verhalten lässt sich für die einzelnen mechanischen Antriebe der verschiedenen Maschinenachsen bestätigen, wobei der Verlauf der Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  in guter Annäherung einer Potenzfunktion entspricht. Die qualitative Tendenz des Einflusses der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess kann dem Bild 10-2 entnommen werden. Darüber hinaus bildet sich dieses Verhalten sowohl im BRISK als auch im SOFT-Modus ab, wobei bei sehr niedrigen Amplituden  $A_{fa}$  höhere Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  erreichbar sind, da die Beschleunigungsstrecken bei kurzen Verfahrwegen deutlich gegenüber den mit der Endgeschwindigkeit  $v_{fa,max}$  zurückgelegten Strecken dominieren. Mit dem SOFT-Modus lassen sich jedoch höhere Bahngenaugigkeiten realisieren und zusätzlich die Maschinenbelastung während der Schleifbearbeitung deutlich reduzieren, so dass dieser Beschleunigungsmodus für den kinematisch modulierten Schleifprozess empfohlen wird.

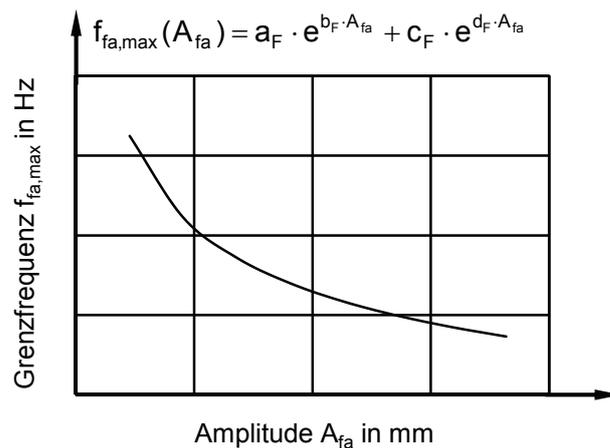


Bild 10-2: Tendenz des Einflusses der Amplitude  $A_{fa}$  auf die Grenzfrequenz  $f_{fa,max}$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess

Neben den an der Maschine realisierbaren Grenzfrequenzen  $f_{fa,max}$  ist die Bestimmung der Korrekturfaktoren für die entsprechenden Stellgrößenkombinationen eine Voraussetzung für die genaue Realisierung und Abbildung der eingestellten Frequenzen  $f_{fa}$ . Die jeweiligen Korrekturfaktoren  $K_s$  dienen hierbei zur Anpassung der theoretisch eingestellten Frequenz  $f_{fa}$  an die tatsächlich realisierbare Frequenz  $f_{fa}$ , da Beschleunigungs- und Bremsverluste der Maschinenachsen im NC-Programm nicht berücksichtigt sind.

*Oberflächenstruktur*

Die zusätzliche Modulationsgeschwindigkeit während der Schleifbearbeitung führt zu veränderten Korneingriffsbahnen und kann zu einer Teilnahme der im kinematischen Schatten liegenden Abrasivkörner an den Spanbildung führen, was eine Reduzierung der Materialauf-

würfe und eine Änderung der Oberflächenstruktur zur Folge hat. Im Hinblick auf eine reduzierte Maschinenbelastung während der Bearbeitung sind Frequenzen bis maximal  $f_{fa} = 1,5$  Hz sinnvoll, da diese bereits zu einer deutlichen Verbesserung der Oberflächenkennwerte führen. Darüber hinaus werden Amplituden bis  $A_{fa} = 1,5$  mm empfohlen, um das notwendige aktive Schleifscheibenprofil  $b_{s,eff}$  bei ausreichenden Verbesserungen der Oberflächenkennwerte zu beschränken.

Mithilfe der technologischen Untersuchungen wurde das Einflussverhalten der Stellgrößen des kinematisch modulierten Schleifprozesses auf die Oberflächenkennwerte ermittelt. Dabei hat sich sowohl für die Amplitude  $A_{fa}$  als auch für die Frequenz  $f_{fa}$  ein signifikanter Einfluss auf die Oberflächenkennwerte gezeigt. Der Einsatz einer kinematischen Modulation führt einerseits zu einer Reduzierung der Oberflächenkennwerte im Vergleich zum konventionellen Schleifprozess und andererseits zu einer Veränderung der unidirektionalen Schleifspuren auf der Werkstückoberfläche. Repräsentative Tendenzen für den Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  und der Amplitude  $A_{fa}$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess auf die Oberflächenkennwerte können dem Bild 10-3 entnommen werden. In Bezug auf die Volumenkenngößen lassen sich im Allgemeinen keine Tendenzen feststellen. Im Speziellen können jedoch in Abhängigkeit der Stellgrößen geeignete Verhältnisse aus Spitzen- und Riefenvolumen für den jeweiligen Prozess identifiziert werden, die das tribologische Verhalten der Funktionsfläche positiv beeinflussen können.

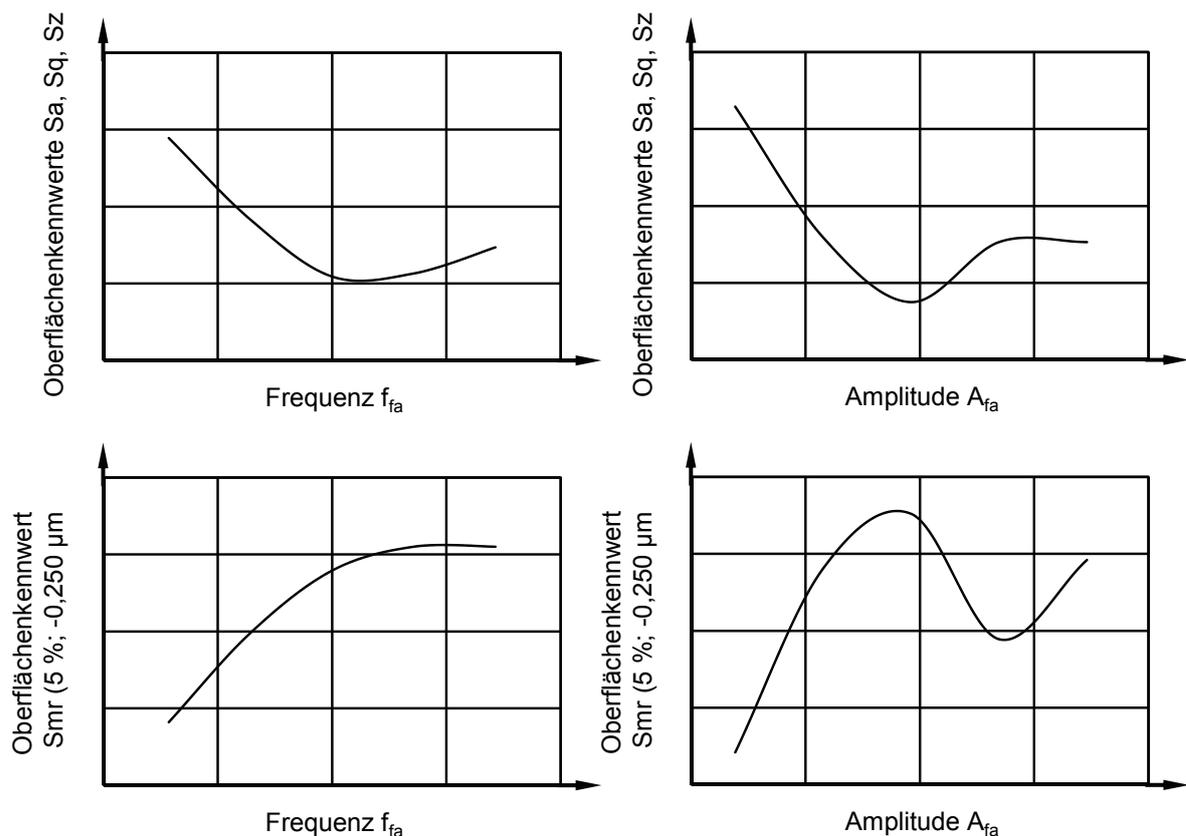


Bild 10-3: Tendenz des Einflusses der Frequenz  $f_{fa}$  und der Amplitude  $A_{fa}$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess auf die Oberflächenkennwerte

Darüber hinaus konnten aus den technologischen Untersuchungen Tendenzen für den Einfluss der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess auf die Oberflächenkennwerte abgeleitet werden, siehe Bild 10-4. Dabei führt eine zusätzlich phasenverschobene und kinematisch modulierte Schleifbearbeitung zu einer Reduzierung der Oberflächenkennwerte  $S_a$ ,  $S_z$ ,  $S_q$  bei gleichzeitiger Erhöhung des Flächenmaterialanteils  $S_{mr}$  (5 %;  $-0,250 \mu\text{m}$ ). Im Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit wird jedoch eine Phasenverschiebung  $\varphi_s$  bei der kinematisch modulierten Profil- und Rundschleifbearbeitung sowie bei der kinematisch modulierten Teilwälzschleifbearbeitung und beim kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess nicht empfohlen, da sich jeweils aufgrund eines zusätzlichen Hubes die Prozesszeit verdoppeln würde.

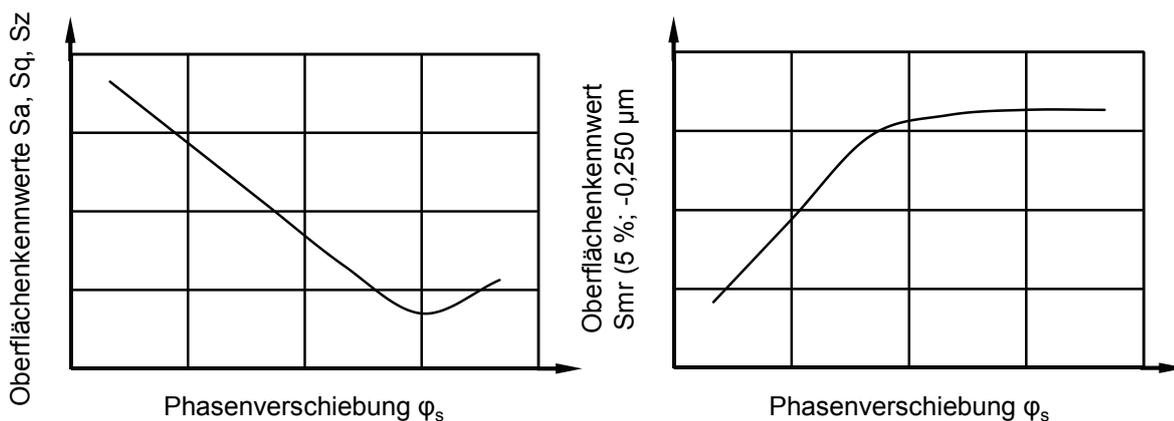


Bild 10-4: Tendenz des Einflusses der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  beim kinematisch modulierten Schleifprozess auf die Oberflächenkennwerte

Neben den Stellgrößen der kinematischen Modulation kann die Feinstruktur der Oberfläche durch eine geeignete Wahl der Abrichtstellgrößen zusätzlich verändert werden. Dabei lassen sich mithilfe des Abrichtüberdeckungsgrades  $U_d$  und des Abrichtgeschwindigkeitsverhältnisses  $q_d$  die Oberfläche und somit die Oberflächenkennwerte deutlich beeinflussen. Die Tendenzen der Abhängigkeit der Oberflächenkenngrößen von den Abrichtstellgrößen bilden weitestgehend die aus der Literatur bekannten Zusammenhänge zwischen den Prozessparametern des Abrichtprozesses und den Rauheitskenngrößen auf dem Werkstück ab. Eine gezielte Oberflächenstruktur auf Funktionsflächen lässt sich darüber hinaus auch unter Einsatz hochharter Schleifscheiben realisieren, die im Vergleich zu den konventionellen Schleifscheiben eine deutlich höhere Standzeit haben.

Die vorgestellten Prozesse zur kinematisch modulierten Schleifbearbeitung unterschiedlicher Funktionsflächen sind in erster Linie Finishingprozesse, mit denen nur ein geringes Spannungsvolumen  $V_w$  abgetrennt wird. Für die im Rahmen dieser Arbeit bearbeiteten Bauteile konnten keine thermischen Randzonenschädigungen beobachtet werden. Um jedoch das Risiko von thermischen Randzonenschädigungen zu vermeiden sollte wie auch im Rahmen dieser Arbeit die kinematisch modulierte Schleifbearbeitung unter Einsatz von Kühlschmierstoff erfolgen.

---

## 11 Zusammenfassung und Ausblick

Im Spannungsfeld aus Erhöhung der Leistungsdichte und Gewährleistung einer hohen Funktionssicherheit und Zuverlässigkeit steht eine nachhaltige Ressourcennutzung immer häufiger auf der Agenda von Industrie und Forschung. Eine gezielte Strukturierung von tribologisch beanspruchten Flächen, wie beispielsweise den Zahnflanken, kann zu einer Verbesserung der Schmierbedingungen im Wälzkontakt und somit zu einer Erhöhung der Lebensdauer führen, was einen signifikanten Beitrag zur Erhöhung der Nachhaltigkeit dieser Bauelemente liefern kann. Voraussetzung für die Herstellung von strukturierten Oberflächen auf Zahnflanken ist jedoch zunächst die Bereitstellung von Wissen über die Zusammenhänge zwischen den Prozessstellgrößen, den Kenngrößen der strukturierten Oberflächen sowie dem Einsatzverhalten der strukturierten Funktionsflächen.

Die Analyse des Stands der Erkenntnisse hat ergeben, dass der Schwerpunkt bisheriger Untersuchungen zur Herstellung von strukturierten Oberflächen vorrangig auf planen oder zylindrischen Funktionsflächen liegt. Für die Oberflächenstrukturierung von Zahnflanken liegen vereinzelt wissenschaftliche Untersuchungen vor, die eine Veränderung der Oberflächenstruktur für kleinmodulige Zahnräder, insbesondere aus dem Automotive-Bereich, vorsehen. Für die Oberflächenstrukturierung von großmoduligen Zahnrädern für Großgetriebe von Windkraftanlagen besteht bisher nur eine sehr beschränkte Wissensbasis bezüglich der Zusammenhänge zwischen den Prozessstellgrößen und den Oberflächenkennwerten. Die Fragestellung für eine geeignete Prozessstrategie zur gezielten Oberflächenstrukturierung von großmoduligen Zahnrädern auf einer CNC-Zahnrad-Profilschleifmaschine ist zurzeit noch unbeantwortet. Ebenso liegen noch keine Erkenntnisse über die Beeinflussung der strukturierten Oberfläche mithilfe des Konditionierprozesses vor. Eine numerische Modellierung von 3D-Oberflächen wurde bereits vermehrt in verschiedenen Veröffentlichungen vorgestellt, jedoch blieb eine zusätzliche Modulationsbewegung zur gezielten Oberflächenstrukturierung unberücksichtigt. Daher bleibt die Fragestellung der Modellierung erzeugbarer Oberflächenstrukturen im Hinblick auf die Bereitstellung einer Oberfläche als Eingangsdaten für EHD-Simulationen ungelöst. Zusätzlich liegen derzeit keine Erkenntnisse einer zusätzlichen Modulationsbewegung auf die Eingriffsbedingungen beim Schleifen vor, insbesondere auch im Hinblick auf die mikrogeometrischen Spannungskenngrößen der Abrasivkörner der Werkzeuge.

Ziel der Arbeit war die Bereitstellung von Wissen über die Zusammenhänge zwischen den Stellgrößen der kinematisch modulierten Schleifprozesse und der Oberflächenstruktur sowie dem Einsatzverhalten der strukturierten Oberflächen. Entsprechend der definierten Teilziele wurden anhand von analytischen und technologischen Untersuchungen systematisch die Wirkmechanismen beim Einsatz einer kinematischen Modulation sowie deren Interaktion mit dem Einsatzverhalten der strukturierten Oberflächen fokussiert.

Die Simulation der Eingriffsbedingungen und Analysen der Ritzspurentstehung unter Verwendung einer zusätzlichen Modulationsbewegung lieferten Erkenntnisse über die Eingriffsverhältnisse bei kinematisch modulierten Schleifprozessen. Unterstützt durch ermittelte Rauheitskennwerte auf der Werkstückoberfläche konnte eine Modellvorstellung für die Eingriffsbedingung bei kinematisch modulierten Schleifprozessen erarbeitet werden. Durch ein quer gerichtetes Überschleifen der Riefenaufwürfe kommt es zu einer Veränderung der charakteristischen Profile der Ritzspuren und damit zu einer Verringerung der Oberflächenrauheit.

Eine Reduzierung der Rauheitskennwerte Ra und Rz sowie der maximale Rautiefe Rmax konnte unter Einsatz einer Modulationsbewegung festgestellt werden, was auf eine Überlagerung der Schnittspuren durch die veränderten Korneingriffsbahnen und somit auf eine Reduzierung der Materialaufwürfe zurückzuführen ist. Mithilfe von Einkornritzsimulationen ließen sich zudem ein geringfügiger Anstieg der Spannungsdicke  $h_{cu,max}$  sowie der geometrischen Kontaktlänge  $l_g$  unter Einsatz einer kinematischen Modulation feststellen, was mit der zusätzlichen Modulationsgeschwindigkeit  $v_{fa,mod}$  begründet werden kann. Zur Validierung der analytischen und experimentellen Ergebnisse dienten Einkornritzuntersuchungen an einatzgehärteten Werkstückproben, die sowohl mit konventioneller als auch mit kinematisch modulierter Schleifbewegung durchgeführt wurden. Die Analyse der Ritzspuren zeigt beim Vergleich der beiden unterschiedlichen Schleifbewegung keine signifikanten Änderungen hinsichtlich der Ritzspurgeometrie, des relativen Spanvolumens  $f_{ab}$  und der Verteilung der Aufwürfe  $A_{A\Delta}$ . Dagegen konnte ein Versetzen der Ritzspuren auf der Werkstückoberfläche im Vergleich zum konventionellen Einkornritzen durch den Einfluss der Modulationsbewegung festgestellt werden, die in der Gesamtheit einen unter einem definierten Winkel liegenden Ritzspurbereich entstehen lassen. Der Einsatz einer kinematischen Modulation bei der Schleifbearbeitung kann dazu führen, dass weniger exponierte Körner der Schleifscheibe an der Spanbildung teilnehmen und somit die Ritzspurgeometrie der vorangegangenen Abrasivkörner maßgeblich beeinflussen.

Ein numerisches Modell wurde im Rahmen der Arbeit entwickelt, mit dem konventionell und kinematisch moduliert geschliffene 3D-Oberflächen dargestellt werden können. Anhand von simulativen Untersuchungen konnte die Plausibilität überprüft und der Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$ , der Amplitude  $A_{fa}$  sowie der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  auf die Oberflächenkennwerte Sa, Sz und Sq quantifiziert werden. Darüber hinaus ließen sich die Verläufe der Volumenparameter  $V_{mp}$ ,  $V_{vv}$ ,  $V_{mc}$  sowie des flächenhaften Materialanteils  $S_{mr}$  (5%;  $-0,250 \mu m$ ) in Abhängigkeit der Frequenz  $f_{fa}$ , Amplitude  $A_{fa}$  und Phasenverschiebung  $\varphi_s$  darstellen. Die Ergebnisse zeigen einen deutlichen Einfluss einer zusätzlichen Modulationsbewegung auf die Oberflächenkennwerte unter Verwendung eines konstanten Schleifscheibenmodells. Die Verifikation des numerischen Modells der 3D-Oberflächenstrukturen erfolgte anhand experimenteller Ergebnisse vom kinematisch modulierten Rundschleifprozess. Die Verläufe der Oberflächenkenngrößen Sa, Sz und Sq zeigen eine gute Übereinstimmung bezüglich der Tendenz und der Absolutwerte. Insbesondere auch der qualitative Vergleich der Topografien stellt eine gute Übereinstimmung der Oberflächenstrukturen dar.

Im Rahmen von technologischen Untersuchungen wurde zunächst der Einfluss einer kinematischen Modulation auf das Arbeitsergebnis in Form eines Analogieprozesses bestimmt. Dafür wurde ein kinematisch modulierter Schleifprozess zur Bearbeitung von Lagerringen aus 100Cr6 entwickelt, um den Einfluss der Frequenz  $f_{fa}$  und der Amplitude  $A_{fa}$  sowie der Phasenverschiebung  $\varphi_s$  zu identifizieren. Die Oberflächenkennwerte sowie die Oberflächenstruktur werden dabei signifikant durch die zusätzliche Modulationsbewegung beeinflusst. Mithilfe der Ergebnisse aus dem Analogieprozess konnte ein empirisches Prozessmodell erstellt werden, welches eine Vorhersage der Oberflächenkennwerte in Abhängigkeit der Stellgrößen des kinematisch modellierten Rundschleifprozesses ermöglicht. Darüber hinaus wurde der Einfluss eines Konditionierprozesses quantifiziert. Durch die Wahl geeigneter Stellgrößen beim Konditionierprozess lässt sich die Feinstruktur der kinematisch moduliert geschliffenen Oberflächen verändern. Abschließend konnte die Fragestellung einer Anwen-

derung des kinematisch modulierten Rundschleifprozesses auch unter Einsatz einer hochharten, keramisch gebundenen CBN-Schleifscheibe beantwortet werden. Aufgrund der deutlich höheren Umfangsgeschwindigkeit der Schleifscheibe  $v_s$  sind die Oberflächenkennwerte im Vergleich zur konventionellen Schleifscheibe geringer.

Technologische Untersuchungen zum kinematisch modulierten Verzahnungsschleifen wurden im Rahmen dieser Arbeit sowohl auf das Profil- und Teilwälzschleifen als auch auf das topologische Generierungsschleifen fokussiert. Dafür erfolgte eine Entwicklung der entsprechenden NC-Programme zur Umsetzung der Prozessstrategien an der Zahnrad-Profilerschleifmaschine ZE 800 der Fa. NILES WERKZEUGMASCHINEN GMBH, Berlin, Deutschland. Die kinematisch modulierte Profilschleifbearbeitung von Zahnstangen mit einer Doppelkegelschleifscheibe erfolgte unter Variation der Frequenz  $f_{fa}$ , der Amplitude  $A_{fa}$  sowie der Phasenverschiebung  $\varphi_s$ . Aufgrund einer großen Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück ließen sich deutliche Oberflächenstrukturen auf den Zahnflanken erzeugen, wobei ähnliche Tendenzen wie beim Analogieprozess hinsichtlich der Verläufe für die Oberflächenkennwerte festgestellt werden konnten. Die Realisierung einer Phasenverschiebung  $\varphi_s$  bei mehrfachem Überlauf führt zu gekreuzten Schleifspuren auf der Oberfläche, welche Vorteile bei den Schmierbedingungen im Wälzkontakt mit sich bringen können. Im Hinblick auf die Oberflächenstruktur von Stirnrädern mit Evolventenverzahnung werden im Rahmen dieser Arbeit zwei Prozessstrategien vorgestellt, einerseits ein erzeugendes Teilwälzschleifverfahren und andererseits ein strukturierendes Generierungsschleifverfahren. Die Ergebnisse des kinematisch modulierten Teilwälzschleifprozesses bestätigen die Tendenzen und die Übertragbarkeit der veränderten Eingriffsbedingungen auch für Verfahren mit kleiner Kontaktfläche zwischen Werkzeug und Werkstück. Die Analysen der strukturierten Zahnflanken zeigten hierbei eine deutliche Veränderung der unidirektionalen Oberflächenstruktur hin zu einer unterbrochenen Struktur mit integrierten Mikrofurchen, wobei kaum ein signifikanter Einfluss auf die Verzahnungsqualität festgestellt werden konnte. Eine kinematische Modulation beim Teilwälzschleifen kann unter konstanten Bedingungen der weiteren Prozessstellgrößen zu einer Reduzierung der Schleifkräfte  $F_n$  und  $F_t$  von bis zu 65 % führen, womit sich der Werkzeugverschleiß reduzieren lässt. Dagegen zeigt eine zusätzliche Strukturierung der Zahnflanken mittels des topologischen Generierungsschleifprozesses einen deutlichen Einfluss sowohl auf die Oberflächenkennwerte als auch auf die Form- und Maßgenauigkeit der Profil- und Flankenlinie. Im Rahmen der Arbeit konnte jedoch eine prozesssichere Herstellung einer Strukturriefe zur Erhöhung des leeren Talvolumens  $V_{vv}$  der Oberfläche realisiert werden, wobei die Verzahnungsqualität größtenteils  $QKL \leq 6$  nach DIN [DIN3961, DIN3962-1, DIN3962-2, DIN3962-3, DIN21772] betrug.

Die Evaluierung des Einsatzverhaltens strukturierter Oberflächen erfolgte zunächst anhand von EHD-Simulationen. Dabei konnte ein deutlicher Einfluss der Oberflächenstruktur auf die Kontaktbedingungen im Wälzkontakt festgestellt werden, was auf Vorteile hinsichtlich verbesserter Schmierbedingungen im Wälzkontakt hin deutet. Geringe Amplituden  $A_{fa}$  im mittleren Frequenzbereich  $f_{fa}$  erwiesen sich als vorteilhaft im Hinblick auf ein verringertes Abfließen des Schmierstoffs in Umlaufrichtung. Darüber hinaus erfolgte die Bestimmung des Einsatzverhaltens von einsatzgehärteten Zahnradern anhand von Fresstragfähigkeitsuntersuchungen auf einer FZG Zahnrad-Verspannungs-Prüfmaschine. Dafür wurde eine Prüfpaarung mit einem konventionell geschliffenen Prüfritzel mit Prüfpaarungen unter Einsatz strukturierter Prüfritzel verglichen. Die Ergebnisse der Fresstragfähigkeitsuntersuchungen zeigen

keine signifikanten Unterschiede zwischen dem Referenz- und dem kinematisch moduliert teilwalzgeschliffenen Prüfritzel, wobei die leicht geringeren Kratzer und Fressschäden auf günstigere Schmierbedingungen durch eine bessere Haftbedingung des Öls auf der Zahnflankenoberflächen beim Einsatz des kinematisch moduliert teilwalzgeschliffenen Prüfritzels deutet. Um diese subjektiven Merkmal zu quantifizieren, müssten weitere, feiner aufgelöste Versuche hinsichtlich der Kraftstufe auf dem Zahnradprüfstand durchgeführt werden. Bei Betrachtung der Ergebnisse für die Prüfpaarungen mit einem Prüfritzel, hergestellt mit dem kinematisch modulierten topologischen Generierungsschleifprozess, wurde unter den gegebenen Randbedingungen eine Verschlechterung der Fresstragfähigkeit festgestellt, was auf den deutlich geringeren flächenhaften Materialanteils Smr (5 %; -0,250  $\mu\text{m}$ ) zurückgeführt werden könnte.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten kinematisch modulierten Schleifprozesse zeigen Potenzial im Hinblick auf die Verbesserung des tribologischen Verhaltens von Funktionsflächen für Wälz- und Gleitkontakte. Eine gezielte Beeinflussung der Oberflächenrauheit, Oberflächenstruktur, und Materialanteile durch kinematisch modulierte Schleifprozesse konnte im Rahmen der Arbeit erzielt werden. Sowohl 2D-, 3D- und Hybridkennwerte der Rauheit, als auch durchgeführt Simulationen zu den Schmierfilmbedingungen weisen auf verbesserte Kontaktbedingungen im Einsatz der Zahnräder hin. Der technologische Nutzen lässt sich mit den durchgeführt Einsatztests jedoch weder eindeutig nachweisen, noch widerlegen, weshalb der Einfluss der Oberflächenstrukturierung durch kinematisch modulierte Schleifprozesse auf das Einsatzverhalten sowohl auf wissenschaftlicher als auch auf industrieller Seite weiterführenden Forschungsbedarf aufzeigt. Der technologische Nutzen muss daher durch weitere Fresstragfahigkeitsuntersuchungen sowie eine Erweiterung der Einsatztests hinsichtlich der Grübchentragfähigkeit genauer bestimmt werden. So ist beispielsweise durch die Verbesserung der Oberflächenkennwerte sowie die Realisierung einer Oberflächenstruktur mit unterbrochenen Ritzspuren und lokalen Mikrofurchen auf den Zahnflanken unter Einsatz des kinematisch modulierten Teilwalzsleifprozesses mit einer Verbesserung der Grübchentragfähigkeit zu rechnen. Durch eine Verbesserung der Oberflächenkennwerte konnte in zahlreichen Veröffentlichungen [TON00b, TON00a, KRA01a, KRA02, NIS03, SRO03, WIN04, KRA05, SRO05b, FIS08, ROS08, VUC08b, WIN09, KOL10, KOL13] bereits eine Verbesserung der Grübchentragfähigkeit festgestellt werden. Darüber hinaus hat neben dem Gehäuse und der Auslegung des Getriebes die Fertigung einen signifikanten Einfluss auf das Getriebegeräusch [BAU11]. Dabei können neben den Abweichungen in Form-, Maß- und Lagegenauigkeit auch die Oberflächenrauheit und -struktur einen großen Einfluss auf die Geräuschentwicklung beim Zahnkontakt haben. So können ungünstige Oberflächenstrukturen zu Abweichungen von der exakten Verzahnungsgeometrie und zu Gerauschanregungen führen. Die Geräuschentwicklung entsteht dabei durch elastische Verformungen sowie Anregung während des Abwälzens durch Formungenauigkeiten und Welligkeiten auf der Zahnflankenoberfläche. Zusätzlich entstehen Stogerausche durch die Kollision von Rauheitsspitzen und Ablagerungen im Wälz- und Gleitkontakt [AMI98]. Mithilfe einer geeigneten Oberflächenstruktur des Gegenrades lassen sich im Zahnradkontakt mit einem konventionell geschliffenen Zahnrad ein Ineingreifen bzw. eine Verhakung der Rauheitsspitzen verhindern und somit hochfrequente Geräusche reduzieren [FRI91, HOH02, OTM05, AIX96b, BAU11]. Für kleinmodulige Zahnräder lassen sich bereits geeignete Oberflächenstrukturen im Hinblick auf die Geräuschemission mit verschiedenen Prozessstrategien real-

isieren [KÖL00, RÜT00, MAR01, SCP03, STW08, VUC08a, KLO09, KAP10, TÜR15a, WEN16]. Darüber hinaus besteht Forschungsbedarf im Hinblick auf eine Erweiterung des Amplituden- und Frequenzbereiches, um gegebenenfalls weitere geeignete Strukturen für den EHD-Kontakt bereitzustellen. Zudem sollte zukünftig noch der Einfluss des Abrichtprozesses bei der kinematisch modulierten Schleifbearbeitung auf das Einsatzverhalten der Funktionsflächen untersucht werden, um einen möglichen technologischen Nutzen des erhöhten Flächenmaterialanteils Smr (5 %; -0,250  $\mu\text{m}$ ) aufzuzeigen und auszuschöpfen.

---

## 12 Literatur und Normen

- ABB33 Abbott, J.; Firestone, F. A.: Specifying Surface Quality - A Method Based on Accurate Measurement and Comparison. *Mechanical Engineering* (1933) 55, S. 569 - 572.
- ABE01a Abeln, T.; Klink, U.: Laserstrukturieren zur Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen. *SLT, Stuttgarter Lasertage*. Weinheim: Wiley-Vch, 2001, S. 61 - 64.
- ABE01b Abeln, T.: Laserstrukturierung - Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen. In: *Optische Technologien in der Kunststofftechnik*; Bd. 1810. Düsseldorf: VDI, 2001, S. 227 - 238.
- AIX96a Ai, X.; Cheng, H. S.: The Effects of Surface Texture on EHL Point Contacts. *Transactions of the ASME, Journal of Tribology* 118 (1996) 1, S. 59 - 66. URL: <http://dx.doi:10.1115/1.2837093> (Zugriff: 2015-07-15).
- AIX96b Kim, S.; Singh, R.: Gear Surface Roughness Induced Noise Prediction Based on a Linear Time-varying Model with Sliding Friction. *Journal of Vibration and Control* 13 (2007) 7, S. 1045 - 1063. URL: <http://dx.doi:10.1177/1077546307078829> (Zugriff: 2013-11-22).
- AMI98 Amini, N.; Rosén, B. G.; Wetsberg, H.: Optimization of gear tooth surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38 (1998) 5-6, S. 425 - 435. URL: [http://dx.doi:10.1016/S0890-6955\(97\)00086-2](http://dx.doi:10.1016/S0890-6955(97)00086-2) (Zugriff: 2013-12-02).
- ANT14 Antsupov, G.; Heinzl, C.; Wagner, A.; Koch, J.: Spiegelnde Oberflächenqualität. Finishbearbeitung mit elastisch gebundenen Schleifscheiben. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 6, S. 341 - 345. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2014-09-17).
- AUR11 Aurich, J. C.; Steffes M.: Single Grain Scratch Tests to Determine Elastic and Plastic Material Behavior in Grinding. *Advanced Materials Research* (2011) 325, S. 48 - 53.
- BAT01 Batalha, G. F.; Stipkovic, M.: Quantitative characterization of the surface topography of cold rolled sheets - new approaches and possibilities. *Journal of Materials Processing Technology* 113 (2001) 1 - 3, S. 732 - 738. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00607-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00607-0) (Zugriff: 2014-10-31).
- BAU11 Bausch, T.; Becker, J.; Faulstich, I.; Felten, K.; Franz, J.; Koellner, T.; u. a.: *Innovative Zahnradfertigung. 4., neu bearbeitete und aktualisierte Auflage*. Renningen: Expert-Verlag, 2011.
- BEE14 Beermann, S.: Micropitting im Windbereich. *Konstruktion* (2014) 9, S. 26 - 28.

- BEL13 Bell, M.; Sroka, G.; Benson, R.: The Effect of the Surface Roughness Profile on Micropitting. *Gear Solutions* (2013) March, S. 46 - 53.
- BIE16 Biermann, D.: Neue Entwicklungen in der Feinstbearbeitung zur Herstellung von Funktionsflächen. In: Tagungsband zum Seminar "Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung", Stuttgart, 3.5.2016
- BLU96 Blunt, L.; Ebdon, S.: The application of three-dimensional surface measurement techniques to characterizing grinding wheel topography. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36 (1996) 11, S. 1207 - 1226. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0890695596000417> (Zugriff: 2014-09-07).
- BÖH92 Böhm, H.-J.: Parameters for evaluating the wearing behaviour of surfaces. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32 (1992) 1/2, S. 109 - 113. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/089069559290067Q> (Zugriff: 2015-06-30).
- BOL04 Bolz, P.: Auftrieb für Windkraftanlagen. *VDI-Z* (2004) 4, S. 62 - 63.
- BOU94 Boucke, T.: Zahnflankenprofilschleifen mit keramisch-gebundenen CBN-Schleifscheiben. *Berichte aus der Produktionstechnik*. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 1994.
- BRE13 Brecher, C.; Brumm, M.; Hübner, F.: Manufacturing simulation for generating gear grinding of large-module gears. In: *International Conference on Gears; Band 2199/1*. Hrsg.: VDI Wissensforum GmbH. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013, S. 151 - 162.
- BRE14a Brecher, C.; Brumm, M.; Greschert, R.: Optimierung fertigungsbedingter Grenzschichten. *Untersuchungen zum Einfluss der Endbearbeitung auf das Einsatzverhalten von Zahnrädern*. *wt Werkstattstechnik online* 104 (2014) 6, S. 346 - 351. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2014-07-28).
- BRE14b Brecher, C.; Brumm, M.; Hübner, F.: Approach for the Calculation of Cutting Forces in Generating Gear Grinding. In: *9th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering - CIRP ICME '14*. Hrsg.: Teti, R., Capri (Naples), 26.7 - 25.7.2014, S. 287 - 292.
- BRE15 Brecher, C.; Löpenhaus, C.; Greschert, R.: Influence of the metalworking fluid on the running behavior of gear analogy test parts. *Production Engineering. Research and Development* 9 (2015) 3, S. 425 - 431. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-015-0612-0> (Zugriff: 2015-07-20).

- BRI02a Brinkmann, S.: Funktionsorientierte Beurteilung von Zylinderlaufflächen durch 3-dimensionale Oberflächenmesstechnik. Hannover, Universität Hannover, Diss, 2002.
- BRI02b Brinksmeier, E.; Klocke, F.; Giwerzew, A.; Vucetic, D.: Spanbildungsmechanismen beim Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten. *Industrie Diamanten Rundschau* 36 (2002) 4, S. 346 - 356.
- BRI09 Brinksmeier, E.; Heinzl, C.; Bleil, N.: Superfinishing and grind-strengthening with elastic bonding system. *Journal of Materials Processing Technology* 209 (2009) 19, S. 6117 - 6123. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2009.08.027> (Zugriff: 2014-05-22).
- BRI10 Brinksmeier, E.; Riemer, O.; Gläbe, R.; Lünemann, B.; Kopylow, C. von; Dankwart, C.; Meier, A.: Submicron functional surfaces generated by diamond machining. *CIRP Annals* 59 (2010) 1, S. 535 - 538. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.037> (Zugriff: 2014-08-05).
- BRI12 Brinksmeier, E.; Gläbe, R.; Schönemann, L.; Meier, A.: Mechanical patterning of optical Microstructures. In: *ASPE 2012 Summer Topical Meeting, Precision Engineering and Mechatronics Supporting the Semiconductor Industry*. Hrsg.: American Society for Precision Engineers. Berkeley, California, USA, 24.06. - 26.06.2012, S. 68 - 72.
- BRN12 Brunetière, N.; Tournier, B.: Numerical analysis of a surface-textured mechanical seal operating in mixed lubrication regime. *Tribology International* 49 (2012), S. 80 - 89. URL: <http://dx.doi:10.1016/j.triboint.2012.01.003> (Zugriff: 2015-06-23).
- BRU08 Bruzzone, A. A. G.; Costa, H. L.; Lonardo, P. M.; Lucca, D. A.: Advances in engineered surfaces for functional performance. *CIRP Annals* 57 (2008) 2, S. 750 - 769. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.003> (Zugriff: 2014-08-05).
- BRU15 Brush Research Manufacturing Inc.: Mehr Entgrat-Speed mit Nylonbürsten. *WB Werkstatt und Betrieb* 148 (2015) 11, S. 72 - 73.
- BUU02 Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: Strategie der Bundesregierung zur Windenergienutzung auf See. Berlin, Firmenschrift. 2002.
- BUW13 Bundesverband für Windenergie: Leistungssteigerung der Windkraftanlagen - Größenwachstum von Windenergieanlagen. Berlin, Firmenschrift. 2013.
- CAM72 Campbell, J. C.: Cylinder bore surface roughness in internal combustion engines: Its appreciation and control. *Wear* 19 (1972) 2, S. 163 - 168. URL: [http://dx.doi:10.1016/0043-1648\(72\)90302-X](http://dx.doi:10.1016/0043-1648(72)90302-X) (Zugriff: 2014-07-01).

- CAO09 Cao, X. D.; Kim, B. H.; Chu, C. N.: Micro-structuring of glass with features less than 100 m by electrochemical discharge machining. *Precision Engineering* 33 (2009) 4, S. 459 - 465. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S014163590900004X>
- CHE16 Chen, X.; Li, H.; Cao, H.; Wharton, J.; Allanson, D.; Hu, Z.: Grinding for Microstructural Functional Surface. *Advanced Materials Research* 1136 (2016), S. 48 - 53.
- CHE96a Chen, X.; Rowe, B. W.: Analysis and Simulation of the Grinding Process. Part I: Generation of the Grinding Wheel Surface. *The International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36 (1996) 8, S. 871 - 882.
- CHE96b Chen, X.; Rowe, B. W.: Analysis and Simulation of the grinding Process. Part II: Mechanics of Grinding. *The International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36 (1996) 8, S. 883 - 896. URL: [http://dx.10.1016/0890-6955\(96\)00117-4](http://dx.10.1016/0890-6955(96)00117-4) (Zugriff: 2012-04-24).
- CHE96c Chen, X.; Rowe, B. W.; Mills, B.; Allanson, D. R.: Analysis and Simulation of the Grinding Process. Part III: Comparison with Experiment. *The International Journal of Machine Tools and Manufacture* 36 (1996) 8, S. 897 - 906.
- CHE98 Chen, X.; Rowe, B. W.; Mills, B.; Allanson, D. R.: Analysis and Simulation of the Grinding Process. Part IV: Effects of Wheel Wear. *The International Journal of Machine Tools and Manufacture* 38 (1998) 1 - 2, S. 41 - 49.
- CHI00 Chiffre, L. D.; Lonardo, P.; Trumpold, H.; Lucca, D. A.; Goch, G.; Brown, C. A.; Raja, J.; Hansen, H. N.: Quantitative Characterisation of Surface Texture. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 49 (2000) 2, S. 635 - 652. URL: [http://dx.doi:10.1016/S0007-8506\(07\)63458-1](http://dx.doi:10.1016/S0007-8506(07)63458-1) (Zugriff: 2015-06-23).
- CLA92 Clark, J. R.; Grant, M. B.: The effect of surface finish on component performance. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 32 (1992) 1/2, S. 57 - 66. URL: [http://dx.doi:10.1016/0890-6955\(92\)90061-K](http://dx.doi:10.1016/0890-6955(92)90061-K) (Zugriff: 2015-07-09).
- CZI10 Czichos, H.; Habig, K.-H.; Celis, J.-P.: *Tribologie-Handbuch*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2010.
- DEN05a Denkena, B.; Reichstein, M.; Catoni, F.: Abrichten von CBN-Werkzeugen zum kontinuierlichen Wälzschleifen von Verzahnungen. *Industrie Diamanten Rundschau* 39 (2005) 2, S. 116 - 122.

- DEN05b Denkena, B.; Reichstein, M.; Catoni, F.: Kontinuierliches Wälzschleifen von Verzahnungen mit abrichtbaren CBN-Werkzeugen. Optimierung der Einsatzvorbereitung keramisch gebundener CBN-Wälzschnecken. *wt Werkstattstechnik online* 95 (2005) 6, S. 453 - 458. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2015-10-19).
- DEN06a Denkena, B.; Reichstein, M.; Wang, B.: Fertigung mikrofunktionaler Riblet-Strukturen durch Schleifen. *wt Werkstattstechnik online* 96 (2006) 6, S. 353 - 358 (Zugriff: 2015-01-18).
- DEN06b Denkena, B.; Reichstein, M.; Catoni, F.: Kontinuierliches Wälzschleifen von Verzahnungen mittels keramisch gebundener Werkzeuge aus CBN. *Industrie Diamanten Rundschau* 40 (2006) 1, S. 54 - 59.
- DEN08a Denkena, B.; Boehnke, D.; Kästner, J.: Microstructuring of functional surfaces by means of cutting processes. *Production Engineering. Research and Development* 2 (2008) 1, S. 21 - 25. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-008-0079-3> (Zugriff: 2014-10-31).
- DEN08b Denkena, B.; Boehnke, D.; Spille, C.; Dragon, R.: In-process information storage on surfaces by turning operations. *CIRP Annals* 57 (2008) 1, S. 85 - 88. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.03.058> (Zugriff: 2014-08-05).
- DEN08c Denkena, B.; Boehnke, D.; Kästner, J.: Investigation of chip formation during microstructuring by means of cutting. In: 10th anniversary International Conference of the European Society for Precision Engineering and Nanotechnology; Band 2. Hrsg.: van Brussel, H., Zürich, 18.05. - 22.05.2008, S. 134 - 137.
- DEN08d Denkena, B.; Kästner, J.; Knoll, G.; Brandt, S.; Bach, F.-W.; Drößler, B.; Reithmeier, E.; Bretschneider, M.: Mikrostrukturierung funktionaler Oberflächen. *wt Werkstattstechnik online* 98 (2008) 6, S. 486 - 494 (Zugriff: 2015-08-10).
- DEN09a Denkena, B.; Bockhorst, J.; Seiffert, F.: Auslegung von Schneidkörpern für das Seilschleifen. *ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb* 104 (2009) 5, S. 242 - 246.
- DEN09b Denkena, B.; Leon, L. de; Wang, B.: Grinding of microstructured functional surfaces: a novel strategy for dressing of microprofiles. *Production Engineering. Research and Development* 3 (2009) 1, S. 41 - 48. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-008-0134-0> (Zugriff: 2014-08-05).
- DEN10a Denkena, B.; Kästner, J.; Wang, B.: Advanced microstructures and its production through cutting and grinding. *CIRP Annals* 59 (2010) 1, S. 67 - 72. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.066> (Zugriff: 2014-08-05).

- DEN10b Denkena, B.; Köcher, J.; Wang, B.: Manufacturing of functional riblet structures by profile grinding. CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology 3 (2010) 1, S. 14 - 26. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581712000399>.
- DEN10c Denkena, B.; Leon, L. de; Hahmann, D.: Großflächiges Schleifen von Mikrostrukturen. wt Werkstattstechnik online 100 (2010) 6, S. 487 - 493. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2014-08-05).
- DEN11 Denkena, B.; Tönshoff, H. K.: Spanen - Grundlagen. 3., bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg: Springer, 2011.
- DEN12 Denkena, B.; Köhler, J.; Woiwode, S.: Leistungsfähige Werkzeugkonzepte für das kontinuierliche Wälzschleifen. Verzahnungsschleifen mit keramisch gebundenen CBN-Wälzschleifwerkzeugen. wt Werkstattstechnik online 102 (2012) 6, S. 377 - 382. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2014-08-05).
- DEN13 Denkena, B.; Schindler, A.; Woiwode, S.: Kontinuierliches Wälzschleifen mit keramisch gebundenen CBN-Werkzeugen: Potenzial von CBN-Werkzeugen für das Wälzschleifen nutzen. WB Werkstatt und Betrieb 146 (2013) 6, S. 58 - 60.
- DEN14a Denkena, B.; Köhler, J.; Preising, D.; Woiwode, S.: Hohe Oberflächengüten dank feiner CBN-Schleifscheiben. WB Werkstatt und Betrieb 147 (2014) 6, S. 60 - 63.
- DEN14b Denkena, B.; Grove, T.; Krawczyk, T.; Harmes, J.: Mit geschliffenen Riblets zur effizienteren Pumpe. Schleifstrategien zur Mikrostrukturierung von Pumpenlaufrädern. wt Werkstattstechnik online 104 (2014) 11/12, S. 716 - 721. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2015-01-05).
- DEN14c Denkena, B.; Köhler, J.; Woiwode, S.: Dressing of vitrified bonded CBN tools for continuous generating grinding. Production Engineering. Research and Development 8 (2014) 5, S. 585 - 591. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-014-0541-3> (Zugriff: 2014-10-27).
- DEN15 Denkena, B.; Preising, D.; Woiwode, S.: Gear profile grinding with metal bonded CBN tools. Production Engineering. Research and Development 9 (2015) 1, S. 73 - 77. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-014-0588-1> (Zugriff: 2015-02-02).
- DEU10 Deutsche Energie-Agentur GmbH: Energiesystem und Energieleistungen. Die Offshore-Windparks in Nord- und Ostsee. Witten, Firmenschrift. 2010.

DGM06	Deutsche Wissenschaftliche Gesellschaft für Erdöl, Erdgas und Kohle: Kurztestverfahren zur Untersuchung des Schmierstoffeinflusses auf die Grübchenbildung bei Zahnrädern. Berlin, DGMK-Information zum Projekt 623. 2006.
DIN21772	DIN 21772, (07.2012) Zahnräder - Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnungen - Definition der Abweichungen. Berlin: Beuth.
DIN21773	DIN 21773, (08.2014) Zahnräder - Zylinderräder und Zylinderradpaare mit Evolventenverzahnung - Prüfmaße für die Zahndicke. Berlin: Beuth.
DIN3961	DIN 3961, (08.1978) Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Grundlagen. Berlin: Beuth.
DIN3962-1	DIN 3962-1 Teil 1, (08.1978) Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Toleranzen für Abweichungen einzelner Bestimmungsgrößen. Berlin: Beuth.
DIN3962-2	DIN 3962-2 Teil 2, (08.1978) Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Toleranzen für Flankenlinienabweichungen. Berlin: Beuth.
DIN3962-3	DIN 3962-3 Teil 3, (08.1978) Toleranzen für Stirnradverzahnungen - Toleranzen für Teilungs-Spannenabweichungen. Berlin: Beuth.
DIN3979	DIN 3979, (07.1979) Zahnschäden an Zahnradgetrieben - Bezeichnung, Merkmale, Ursachen. Berlin: Beuth.
DIN8580	DIN 8580, (09.2003) Fertigungsverfahren - Begriffe, Einteilung. Berlin: Beuth.
DIN8589-0	DIN 8589-0 Teil 0, (09.2003) Fertigungsverfahren Spanen Teil 0: Allgemeines Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth.
DIN8589-11	DIN 8589-11 Teil 11, (09.2003) Fertigungsverfahren Spanen Teil 11: Schleifen mit rotierendem Werkzeug; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth.
DIN8589-13	DIN 8589-13 Teil 13, (09.2003) Fertigungsverfahren Spanen Teil 13: Hubschleifen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth.
DIN8589-14	DIN 8589-14 Teil 14, (09.2003) Fertigungsverfahren Spanen Teil 14: Honen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth.
DIN8589-17	DIN 8589-17 Teil 17, (09.2003) Fertigungsverfahren Spanen Teil 17: Gleitspanen; Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth.
DIN8590	DIN 8590, (09.2003) Fertigungsverfahren Abtragen Einordnung, Unterteilung, Begriffe. Berlin: Beuth.
DIN867	DIN 867, (02.1986) Bezugsprofile für Evolventenverzahnungen an Stirnrädern (Zylinderrädern) für den allgemeinen Maschinenbau und den Schwermaschinenbau. Berlin: Beuth.

- DINEN10084 DINEN 10084, (06.2008) Einsatzstähle - Technische Lieferbedingungen. Berlin: Beuth.
- DINENISO16610-21 DINENISO 16610-21 Teil 21, (12.2014) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 21: Lineare Profilfilter Gauß-Filter. Berlin: Beuth.
- DINENISO16610-71 DINENISO 16610-71 Teil 71, (12.2014) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Filterung - Teil 71: Robuste Flächenfilter Gaußsche Regressionsfilter. Berlin: Beuth.
- DINENISO25178-2 DINENISO 25178-2 Teil 2, (09.2012) Geometrische Produktspezifikation (GPS) - Oberflächenbeschaffenheit Flächenhaft - Teil 2: Begriffe und Oberflächen-Kenngrößen. Berlin: Beuth.
- DINENISO3274 DINENISO 3274, (04.1998) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Nenneigenschaften von Tastschnittgeräten. Berlin: Beuth.
- DINENISO4287 DINENISO 4287, (10.1998) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Benennungen, Definitionen und Kenngrößen der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth.
- DINENISO4288 DINENISO 4288, (04.1998) Oberflächenbeschaffenheit: Tastschnittverfahren - Regeln und Verfahren für die Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth.
- DINISO14635-1 DINISO 14635-1 Teil 1, (05.2006) Zahnräder - FZG-Prüfverfahren - Teil 1: FZG-Prüfverfahren A/8,3/90 zur Bestimmung der Fresstragfähigkeit von Schmierölen (ISO 14635-1:2000). Berlin: Beuth.
- DINISO14635-2 DINISO 14635-2 Teil 2, (01.2010) Zahnräder - FZG-Prüfverfahren - Teil 2: Fzg-Prüfverfahren A10/16, 6R/120 zur Bestimmung der relativen Fresstragfähigkeit von hoch EP-legierten Schmierölen. Berlin: Beuth.
- DINISO14635-3 DINISO 14635-3 Teil 3 Entwurf, (06.2007) Zahnräder - FZG-Prüfverfahren - Teil 3: FZG-Prüfverfahren A/2,8/50 zur Bestimmung von relativer Fresstragfähigkeit und Verschleißarten von Getriebe-fließfetten. Berlin: Beuth.
- DINISO8486-1 DINISO 8486-1 Teil 1, (09.1997) Bestimmung und Bezeichnung der Korngrößenverteilung - Teil 1: Makrokörnungen F4 bis F220. Berlin: Beuth.
- DOM06 Doman, D. A.; Warkentin, A.; Bauer, R.: A survey of recent grinding wheel topography models. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 46 (2006) 3/4, S. 343 - 352. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.013> (Zugriff: 2014-12-14).

- DON95 Dong, W. P.; Davis, E. J.; Butler, D. L.; Stout, K. J.: Topographic features of cylinder liners an application of three-dimensional characterization techniques. *Tribology International* 28 (1995) 7, S. 453 - 463. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/0301-679X\(95\)00010-2](http://dx.doi.org/10.1016/0301-679X(95)00010-2) (Zugriff: 2015-07-09).
- DOR06 Dornfeld, D.; Min, S.; Takeuchi, Y.: Recent advances in mechanical micromachining. *CIRP Annals* 55 (2006) 2, S. 745 - 768. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2006.10.006> (Zugriff: 2014-11-03).
- DOW60 Dowson, D.; Higginson, G. R.: The Effect of Material Properties on the Lubrication of Elastic Rollers. *Journal of Mechanical Engineering Science* 2 (1960) 3, S. 188 - 194.
- DUD81 Dudley, D. W.: Characteristics of regimes of gear lubrication, Eigenschaften der Schmierbereiche von Getrieben. In: *International Symposium on Gearing & Power Transmissions*; Bd. 1. Hrsg.: JSME. Tokyo, 1981, S. 319 - 324.
- DUL02 Dulias, U.; Fang, L.; Zum Gahr, K.-H.: Effect of surface roughness of self-mated alumina on friction and wear in isooctane-lubricated reciprocating sliding contact. *Wear* 252 (2002), S. 351 - 358.
- DUM00 Dumitru, G.; Romano, V.; Weber, H. P.; Haefke, H.; Gerbig, Y.; Pflüger, E.: Laser microstructuring of steel surfaces for tribological applications. *Applied Physics A (Materials Science and Processing)* 70 (2000) 4, S. 485 - 487. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s003390051073> (Zugriff: 2014-10-31).
- DVO16a Dvorak, M.; Gossmann, K.; Krupp, A.: Eine neue Generation hochflexibler / weicher Diamant-Werkzeuge zur Feinstbearbeitung von Oberflächen. In: *Tagungsband zum 1. Schweizer Schleif-Symposium*, Zürich, 19.-20.01.2016
- DVO16b Dvorak, M.: Neuartige flexible Diamant-belegte Poliermittel. In: *Tagungsband zum Seminar "Moderne Schleiftechnologie und Feinstbearbeitung"*, Stuttgart, 3.5.2016
- EDI97 Edinger, M.: Untersuchung zur spanenden Endbearbeitung und zum Funktionsverhalten von thermisch gespritzten Verschleißschichten. *FBK Produktionstechnische Berichte*; Bd. 23. Hrsg.: Warnicke, G., Dissertation, Universität Kaiserslautern 1997.
- ERC12 Erck, R.; Ajayi, O. O.; Lorenzo-Martin, C.; Fenske, G. R.: Influence of surface texture on micro ehl in boundary regime sliding. In: *Proceedings of the ASME/STLE 2012 International Joint Tribology Conference*. Hrsg.: American Society of Mechanical Engineers. Denver, Colorado, USA, 7.10. - 10.10.2012, S. 1 - 3.

- ERD05 Erdemir, A.: Review of engineered tribological interfaces for improved boundary lubrication. *Tribology International* 38 (2005) 3, S. 249 - 256. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.triboint.2004.08.008> (Zugriff: 2014-10-31).
- ESC96 Escher, C.: Simulation und Optimierung der Erzeugung von Zahnflankenmodifikationen an Zylinderrädern. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 1996.
- ETS04 Etsion, I.: Improving Tribological Performance of Mechanical Components by Laser Surface Texturing. *Tribology Letters* 17 (2004) 4, S. 733 - 737. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11249-004-8081-1> (Zugriff: 2014-10-31).
- EVA99 Evans, C. J.; Bryan, J. B.: Structured, textured or engineered surfaces. *CIRP Annals* 48 (1999) 2, S. 541 - 556. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)63233-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)63233-8) (Zugriff: 2014-11-03).
- FEPA42-1 FEPA 42-1, (2006) Grains of fused aluminium oxide, silicon carbide and other abrasive materials for bonded abrasives and for general industrial applications Microgrits F4 to F220. Paris: FEPA.
- FEPA61-2009 FEPA 61-2009, (2009) Standard for Superabrasive grain sizes. Paris: FEPA.
- FER12 Fernandez, A.: Tribologische Untersuchungen an mikrostrukturierten Oberflächen. Erlangen, Universität Erlangen-Nürnberg, Diss, 2012.
- FIS08 Fischer, J.; Mitton, D. B.; Hoiland, B.; Rindt, J. R.; Todorovic, R.; Wilmot, D.; Schell, J. M.; Niskanen, P.: An overview of the engineered surfaces for weapon systems. *AMMTIAC Quarterly* 3 (2008) 2, S. 3 - 8.
- FLO92a Flores, G.: Grundlagen und Anwendungen des Honens. Essen: Vulkan, 1992.
- FLO92b Flores, G.: Qualitätsverbesserung von Bohrungen durch Hochfrequenz-Honen. *VDI-Z* (1992) 5, S. 94 - 134.
- FRA09 Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES: Getriebe für Windkraftanlagen müssen hohen Belastungen standhalten. *MM - Maschinenmarkt. Das Industrie Magazin* (2009).
- FRA99 Fraunhofer-Institut für Solare Energiesysteme ISE: Kleine Strukturen auf großen Flächen. Mikrostrukturierung von Oberflächen. *Schweizer Maschinenmarkt* (1999) 8, S. 94 - 95.
- FRI91 Fritsch, P.: Oberflächenfeingestalt einsatzgehärteter Zahnräder – Einfluss auf Bauteilbeanspruchung, Zahnflankentragfähigkeit und Geräuschverhalten. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 1991.

- GEH07 Gehring Technologies GmbH: Laserstrukturierung - Verbesserung der tribologischen Eigenschaften von Oberflächen. Ostfildern, Firmenschrift. 2007.
- GEH14 Gehring Technologies GmbH: Laser-Honen, das Verfahren. Ostfildern, Firmenschrift. 2014.
- GEI03 Geiser, H.: Erstmals Teilwälz- und Profilschleifen kombiniert. WB Werkstatt und Betrieb (2003) 10, S. 64 - 70.
- GER11 Gerlach, M.; Gröger, S.: Strukturorientierte 3D-Bewertung geometrischer Eigenschaften für tribologische Systeme. In: In: Tribologie Fachtagung. Hrsg.: Gesellschaft für Tribologie e.V., Göttingen, 30.09. - 02.10.2011, S. 1 - 14.
- GES02a Gesellschaft für Tribologie e. V.: GfT-Arbeitsblatt 5: Zahnradschmierung. Aachen, Firmenschrift. 2002.
- GES02b Gesellschaft für Tribologie e. V.: GfT-Arbeitsblatt 7: Tribologie - Verschleiß, Reibung, Definitionen, Begriffe, Prüfung. Aachen, Firmenschrift. 2002.
- GIW03 Giwerzew, A.: Spanbildungsmechanismen und tribologisches Prozessverhalten beim Schleifen mit niedrigen Schnittgeschwindigkeiten. Forschungsberichte aus der Stiftung Institut für Werkstofftechnik Bremen. Hrsg.: Brinksmeier, E., Dissertation, Universität Bremen. Aachen: Shaker, 2003.
- GOE15 Goeke, S.; Biermann, D.; Stickel, D.; Stemmer, P.; Fischer, A.: Verbesserung der Verschleißbeständigkeit tribologisch beanspruchter Oberflächen durch gezielte Oberflächenstrukturierung. Werkstoffe in der Fertigung (2015) 2, S. 18 - 21.
- GOR11 Gorgels, C.: Entstehung und Vermeidung von Schleifbrand beim diskontinuierlichen Zahnflankenprofilschleifen. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Klocke, F. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2011.
- GRI06 Grinko, S.: Thermo-mechanisches Schädigungsmodell für das (Zahnflanken-) Profilschleifen. Berichte aus dem Institut für Fertigungstechnik und Qualitätssicherung Magdeburg. Hrsg.: Karpuschewski, B., Dissertation, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg. Aachen: Shaker, 2006.
- GUO15 Guo, B.; Zhao, Q.: On-machine dry electric discharge truing of diamond wheels for micro-structured surfaces grinding. International Journal of Machine Tools and Manufacture 88 (2015), S. 62 - 70. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.09.011> (Zugriff: 2014-12-17).

- HAA99 Haasis, G.; Weigmann, U. P.: Neues Honverfahren für umweltfreundliche Verbrennungsmotoren. WB Werkstatt und Betrieb 132 (1999) 3, S. 29 - 35.
- HAE01 Haefke, H.; Gerbig, Y.; Dumitru, G.; Romano, V.: Microtexturing of Functional Surfaces for Improving Their Tribological Performance. 5th International Tribology Conference. Nagasaki, 2001, S. 217 - 222.
- HAN07 Handschuh R.; Kilmain, C.; Ehinger, R.: Operational Condition and Superfinishing Effect on High-Speed Helical Gearing System Performance. NASA/TM ARL-TR-4099 (2007) 214696, S. 58 - 63.
- HEG00 Hegeman, J. B. J.-W.: Fundamentals of Grinding - Surface Conditions of Ground Materials. Groningen, Niederlanden, Rijksuniversiteit Groningen, Diss, 2000.
- HEI13 Heinzl, C.; Wagner, A.: Fine finishing of gears with high shape accuracy. CIRP Annals 62 (2013) 1, S. 359 - 362. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.03.070> (Zugriff: 2014-05-22).
- HER09 Herzenstiel, P.: Hochleistungsplanschleifen mit einer definiert gesetzten CBN-Schleifscheibe. Produktionstechnische Berichte aus dem FBK; Bd. 6. Hrsg.: Aurich, J. C., Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern. Kaiserslautern: Technische Universität Kaiserslautern, 2009.
- HER81 Hertz, H.: Über die Berührung fester elastischer Körper. Journal für die reine und angewandte Mathematik 92 (1981), S. 156 - 171.
- HES05 Hesselbach, J.; Hoffmeister, H.-W.; Hlavac, M.: Micro-grinding - Efficient technique for microstructuring hardened steels. Production Engineering. Research and Development 12 (2005) 1, S. 1 - 4.
- HIN83 Hintze, W.; Mushardt, H.: Teilwälzschleifen auf MAAG-Maschinen bei verändertem Herstellungseingriffswinkel. Forschungsheft; Bd. 155. Hrsg.: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. Frankfurt, 1983.
- HIR12 Hirsch, A.: Werkzeugmaschinen: Grundlagen, Auslegung, Ausführungsbeispiele. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg, 2012.
- HIY13 Hirai, Y.; Sato, T.; Fukui, T.; Yamada, K.; Tanizawa, K.; Usami, H.: Effect of Surface Groove and Graphite Penetration on Friction Properties of Sulfide Containing Copper Alloy Journal Bearing in Dry Condition. In: MITC, Malaysian International Tribology Conference, Kota Kinabalu, 18.11 - 20.11.2013, S. 37 - 42.
- HNI96 Hnilica; J.: Modellgestützte Simulation des Teilwälzschleifens von Stirnrädern im Einflankenschliff. Magdeburg, Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg, Diss, 1996.

- HOF12 Hoffmeister, H. W.; Hlavac, M.; Gatzel, H. H.; Morsbach, C.: Mikrostrukturierung durch Schleifen. Mikromechanische Produktion, Abschlusskolloquium DFG Schwerpunktprogramm 1012. Aachen: Shaker, 2012, S. 39 - 54.
- HOH02 Hohle, A. C.: Auswirkungen von Rauheit, Oberflächenstruktur und Fertigungsabweichung auf das Lauf- und Geräuschverhalten hartfeinbearbeiteter hochüberdeckender Zylinderräder. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 2002.
- HÖH06 Höhn, B.-R.: Testmethods for Lubricant Related Influences on the Gear Load Capacity - FZG-Test Procedures with the standard FZG back to back test rig, Vortrag anlässlich der 2nd international conference „Lubricants Russia 2006“, Moskau, 23.11.2006.
- HÖH11 Höhn, B.-R.; Michaelis, K.; Otto, H.-P.: Flank Load Carrying Capacity and Power Loss Reduction by Minimized Lubrication. GearTechnology 28 (2011) 3, S. 53 - 62.
- HOL12 Holtermann, R.; Schumann, S.; Menzel, A.; Biermann, D.: Ansätze zur Modellierung und Simulation des Innenrundschälenschleifens. Diamond Business 40 (2012) 1, S. 30 - 41.
- HOL15 Holtermann, R.; Menzel, A.; Schumann, S.; Biermann, D.; Siebrecht, T.; Kersting, P.: Modelling and simulation of Internal Traverse Grinding: bridging meso- and macro-scale simulations. Production Engineering. Research and Development (2015) 9, S. 451 - 463. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-015-0613-z> (Zugriff: 2015-10-16).
- HOM15 Hommel-Etamic GmbH: Hommel Map - Handbuch. Schwenningen, Firmenschrift 2015.
- HÜB09 Hübert, C.; Mauren, F.; van der Meer, M.; Hahmann, D.; Rickens, K.; Mutlugünes, Y.; Hahmann, W.-C.; Pekárek, M.: Charakterisierung von Schleifscheibentopographien aus fertigungstechnischer Sicht. dihw 1 (2009) 4, S. 40 - 47.
- HÜB12 Hübert, C.: Schleifen von Hartmetall- und Vollkeramik-Schafffräsern. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E., Dissertation, Technische Universität Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2012.
- ISL16 Islam, M. M.; Kim, H.; Ko, T.: Formulating CAMparameters for surface patterning by grinding process based on unit pattern geometry. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 83 (2016) 1, S. 595 - 609.
- ISO10825 ISO 10825, (08.1995) Gears - Wear and damage to gear teeth - Terminology. Switzerland: International Organization for Standardization.

- JAM96 Jamanaka, M.; Nakamura, H.; Emura, T.; Sugita, K.: Simulation of precision grinding process, Part 1: generation of the grinding wheel surface. *International Journal of Japan Society Precision Engineering* 30 (1996) 3, S. 229 - 234.
- JEN96 Jeng, Y.-R.: Impact of Plateaued Surfaces on Tribological Performance. *Tribology Transactions* 39 (1996) 2, S. 391 - 398.
- JIA13 Jiang, J.; Ge, P.; Hong, J.: Study on micro-interacting mechanism modeling in grinding process and ground surface roughness prediction. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 67 (2013) 5 - 8, S. 1035 - 1052.
- JOL14 Jolivet S., Mezghani S., El Mansori M., Jourdain B.: Dependence of Tooth Flank Finishing on Powertrain Gear Noise. *Proceedings of NAMRI/SME* (2014) 42.
- KAG91 Kagerer, E.: Messung von elastohydrodynamischen Parametern im hochbelasteten Scheiben- und Zahnkontakt. München, Technische Universität München, Diss, 1991.
- KAM16 Kampka, M.; Klocke, F.; Löpenhaus, C.: Feinstprofilschleifen von Verzahnungen mit unterschiedlichen Werkzeugkonzepten. In: *Ta-gungsband zum 1. Schweizer Schleif-Symposium, Zürich, 19.-20.01.2016*
- KAN15 Kansteiner, M.; Biermann, D.: Ritzversuche auf mehrphasigen Werkstoffen mit unterschiedlicher Kornausrichtung. *Diamond Business* 52 (2015) 1, S. 50 - 60.
- KAP10 Kapp, M.: Hartfeinbearbeitete Antriebskomponenten zur Steigerung der Energieeffizienz in Antrieben. In: *Proceedings PTK 2010 - XIII Internationales Produktionstechnisches Kolloquium: Produktionstechnik • Motor aus der Krise*. Hrsg.: Seliger, G.; Uhlmann, E., Berlin, 4.10-5.10.2010, S. 213 - 227.
- KAP15a KAPP Gruppe: Feinschleifen in der Serienfertigung von Getrieben. Coburg, Firmenschrift. 2015.
- KAP15b KAPP Gruppe: Topologischen Schleifen - Wälz- und Profilschleifen. Coburg, Firmenschrift. 2015.
- KAP99 Kappmeyer, G.: Hochfrequenzhonen. Beitrag zum ultraschallunterstützten Dornhonen. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig, Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan, 1999.
- KAR08 Karpuschewski, B.; Knoche, H. J.; Hipke, M.: Gear finishing by abrasive processes. *CIRP Annals* 57 (2008) 2, S. 621 - 640. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2008.09.002> (Zugriff: 2012-04-13).

- KAS69 Kassen, G.: Beschreibung der elementaren Kinematik des Schleifvorganges. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 1969.
- KEM00 Kempa, B.: Zahnflankenprofilschleifen mit galvanisch-gebundenem CBN. Berichte aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2000.
- KHE07 Khellouki, A.; Rech, J.; Zahouani, H.: Influence of the belt-finishing process on the surface texture obtained by hard turning. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B (Journal of Engineering Manufacture Impact Factor & Information) 221 (2007) 7, S. 1129 - 1137. URL: <http://dx.doi.org/10.1243/09544054JEM776> (Zugriff: 2015-07-09).
- KIR14 Kirsch, B.; Aurich, J. C.: Herstellung von mikrostrukturierten Oberflächen mittels Schleifen. Eine neue Methode. ZWF Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb 109 (2014) 4, S. 242 - 246.
- KLE12 Klein, M. M.: Zur Fresstragfähigkeit von Kegelrad- und Hypoidgetrieben. München, Technische Universität München, Diss, 2012.
- KLM03 Kleiner, M.; Weinert, K.; Krux, R.; Kalveram, M.: Oberflächenstrukturen für Blechumformwerkzeuge. wt Werkstattstechnik online 93 (2003) 10, S. 665 - 670. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2012-10-22).
- KLO05 Klocke, F.; König, W.: Fertigungsverfahren 2 - Schleifen, Honen, Läppen. 4., neu bearbeitete Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2005.
- KLO06 Klocke, F.; Zeppenfeld, C.; Gröning, H.: Schleifen von gamma-Titanaluminiden. Untersuchung der Leistungsfähigkeit unterschiedlicher Kornwerkstoffe. wt Werkstattstechnik online 96 (2006) 6, S. 384 - 390. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2014-11-24).
- KLO09 Klocke, F.; Gorgels, C.; Reimann, J.: Kontinuierliches Wälzschleifen von Verzahnungen - Softwareunterstützte Prozessoptimierung. WB Werkstatt und Betrieb 142 (2009) 5, S. 62 - 63.
- KLO12 Klocke, F.; Brumm, M.; Reimann, J.: Continuous Generating Gear Grinding. Gear Solutions (2012) May, S. 30 - 44.
- KLO13a Klocke, F.; Brumm, M.; Reimann, J.: Aufbau und Validierung eines Prozesskraftmodells für das kontinuierliche Wälzschleifen von Stirnradverzahnungen. Forschung im Ingenieurwesen - Engineering Research 77 (2013) 3 - 4, S. 81 - 94. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s10010-013-0165-3> (Zugriff: 2015-04-22).

- KLO13b Klocke, F.; Brumm, M.; Reimann, J.; Finkenwirth, K.; Mehr, A.: Dressable Vitrified Bond cBN in Generating Gear Grinding - Technological Potential and Influence on Manufacturing Related Properties. In: International Conference on Gears; Band 2199/1. Hrsg.: VDI Wissensforum GmbH. Düsseldorf: VDI-Verlag, 2013, S. 305 - 316.
- KLO13c Klocke, F.; Brumm, M.; Reimann, J.: Modeling of Surface Zone Influences in Generating Gear Grinding. CIRP CMMO, CIRP Conference on Modeling of Machining Operations, 14; Bd. 8. Red Hook: Curran Associates, 2013, S. 21 - 26.
- KLO15 Klocke, F.; Arntz, K.; Mescheder, H.; Winands, K.: Reproduzierbare Designoberflächen im Werkzeugbau. wt Werkstattstechnik online 99 (2015) 11/12, S. 844 - 850. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2015-06-30).
- KÖL00 Köllner, T.: Verzahnungshonen - Verfahrenscharakteristik und Prozessanalyse. Berichte aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2000.
- KOL10 Koller, P.: Optimierung Flankentragfähigkeit. Abschlussbericht; Bd. 957. Hrsg.: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. Frankfurt, 2010.
- KOL13 Koller, P.: Steigerung der Zahnflankentragfähigkeit durch Optimierung von Eigenspannungs- und Oberflächenzustand. München, Technische Universität München, Diss, 2013.
- KON11 Kong, L. B.; Cheung, C. F.: Design, fabrication and measurement of ultra-precision micro-structured freeform surfaces. Computers & Industrial Engineering 61 (2011) 1, S. 216 - 225. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360835211000908> (Zugriff: 2014-08-05).
- KÖN87 König, W.; Ludewig, T.: Geringerer Schleifkornverschleiss bei geeigneter Wärmebehandlung. Schleifbarkeit von Kohlenstoffstählen. Industrie Anzeiger 109 (1987) 61/62, S. 12 - 15.
- KOS97 Koshy, P.; Jain, V. K.; Lal, G. K.: Stochastic simulation approach to modelling diamond wheel topography. International Journal of Machine Tools and Manufacture 37 (1997) 6, S. 751 - 761. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695596000867> (Zugriff: 2014-11-03).
- KOV05 Kovalchenko, A.; Oyelayo, A.; Erdemir, A.; Fenske, G.; Etsion, I.: The effect of laser surface texturing on transitions in lubrication regimes during unidirectional sliding contact. Tribology International 38 (2005) 3, S. 219 - 225. URL: <http://dx.doi:10.1016/j.triboint.2004.08.004> (Zugriff: 2016-03-23).

- KRA01a Krantz, T. L.; Alanou, M. P.; Evans, H. P.; Snidle, R. W.: Surface fatigue lives of case-carburized gears with an improved surface finish. Transactions of the ASME, Journal of Tribology 123 (2001) 4, S. 709 - 716. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1387036>.
- KRA01b Krantz, T. L.; Alanou, M. P.; Evans, H. P.; Snidle, R. W.: Surface fatigue lives of case-carburized gears with an improved surface finish. Transactions of the ASME, Journal of Tribology 123 (2001) 4, S. 709 - 716. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1387036> (Zugriff: 2013-08-27).
- KRA02 Krantz, T. L.: Gear Durability Shown To Be Improved by Superfinishing. NASA Research Center Glenn (04/2002).
- KRA05 Krantz, T. L.: The Influence of Roughness on Gear Surface Fatigue. NASA/TM ARL-TR-3134 (2005) 213958.
- KRE08 Kreil, O.: Einfluss der Oberflächenstruktur auf Druckverteilung und Schmierfilmdicke im EHD-Kontakt. München, Technische Universität München, Diss, 2008.
- KRI03 Krieger, H.: Alterung von Schmierstoffen im Zahnradprüfstand und in Praxisgetrieben. München, Technische Universität München, Diss, 2003.
- KWE89 Kweh, C. C.; Evans, H. P.; Snidle, R. W.: Micro-Elastohydrodynamic Lubrication of an Elliptical Contact with Transverse and Three-Dimensional Sinusoidal Roughness. Transactions of the ASME, Journal of Tribology 111 (1989) 4, S. 557 - 584. URL: <http://dx.doi:10.1115/1.3261980> (Zugriff: 2015-07-21).
- LAN07 Landenberger, D.: Flexible Feinbearbeitung für die Refabrikation von Automobilkomponenten. Fortschritte in Konstruktion und Produktion. Hrsg.: Rieg, F.; Steinhilper, R., Dissertation, Universität Bayreuth. Aachen: Shaker, 2007.
- LAW73 Law, S. S.; Wu, S. M.: Simulation Study of the Grinding Process. Journal of Engineering for Industry 95 (1973) 4, S. 972 - 978.
- LEI04 Leifhelm, B.: Grossflächiges Strukturieren von Siliziumwafern in der Solarzellenproduktion. Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 2004. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2004.
- LEM03 Lemke, H. W.; Seewig, J.; Bodschwinn, H.; Brinkmann, S.: Kenngrößen der Abbott-Kurve zur integralen Beurteilung dreidimensional gemessener Zylinderlaufbahn-Oberflächen. Motortechnische Zeitschrift 64 (2003) 5, S. 438 - 444. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/BF03226709> (Zugriff: 2014-05-12).

- LEN12 Lenk, A.; Zimmermann, W.; Holdik, K.; Happek, B.; Tillmann, A.; Schreiber, L.; Weber, M.; Weckenmann, A.; Hartmann, W.; Schmidt, H.; Schulze, V.; Pabst, R.; Chlipala, M.; Stockey, S.; Hopp, B.; Wiedenhöfer, T.: Merkmalbasiert geregelte Fertigungsprozesse für die beherrschte Herstellung funktionaler Produkteigenschaften von mikrostrukturierten Bauteilen. In: Ergebnisbericht des BMBF Verbundprojektes FunkProMikro. Hrsg.: Wiedenhöfer, T., Aachen: Apprimus, 2012, S. 1 - 81.
- LI15a Li, H.; Yu, T.; Zhu, L.; Wang, W.: Analysis of loads on grinding wheel binder in grinding process: Insights from discontinuum-hypothesis-based grinding simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 78 (2015) 9-12, S. 1943 - 1960.
- LI15b Li, H.; Yu, T.; Zhu, L.; Wang, W.: Modeling and simulation of grinding wheel by discrete element method and experimental validation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 81 (2015) 9, S. 1921 - 1938.
- LIE01 Lierse, T.; Kaiser, M.: Abrichten von Schleifwerkzeugen für die Verzahnung. *Industrie Diamanten Rundschau* 35 (2001) 4, S. 297 - 310.
- LIE14 Lierse, T.; Kaul, T. R.: Abrichten mit CVD-Diamant-Formrollen. *wt-online* 104 (2014) 6, S. 388 - 393. URL: <http://www.technikwissen.de/wt/> (Zugriff: 2014-09-17).
- LIH10 Linke, H.: *Stirnradverzahnung; Berechnung, Werkstoffe, Fertigung*. 2. Auflage. München, Wien: Carl Hanser, 2010.
- LIU03 Liu, W.: Einfluss verschiedener Fertigungsverfahren auf die Graufleckentragfähigkeit von Zahnradgetrieben. München, Technische Universität München, Diss, 2003.
- LOO96 Looman, J.: *Zahnradgetriebe; Grundlagen, Konstruktionen, Anwendungen in Fahrzeugen*. 3. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 1996.
- LOR75 Lortz, W.: *Schleifscheibentopographie und Spanbildungsmechanismen beim Schleifen*. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 1975.
- LUB88 Lubrecht, A. A.; Ten Napel, A. A.; Bosma, R.: The Influence of Longitudinal and Transverse Roughness on the Elastohydrodynamic Lubrication of Circular contacts. *Transactions of the ASME, Journal of Tribology* 110 (1988) 3, S. 421 - 426. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.3261645> (Zugriff: 2015-07-15).
- LUD94 Ludewig, T.: *Auswahlkriterien für SiC- und Korundschleifkorntypen beim Schleifen von Stählen*. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 1994.
- LÜT07 Lützig, G.: *Großgetriebe-Graufleckigkeit: Einfluss von Flankenmodifikation und Oberflächenrauheit*. Bochum, Ruhr-Universität Bochum, Diss, 2007.

- MAL13 Malshe, A.; Rajurkar, K.; Samant, A.; Hannsen, H. N.; Bapat, S.; Jiang, W.: Bio-inspired functional surfaces for advanced applications. CIRP Annals 62 (2013) 2, S. 607 - 628. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2013.05.008> (Zugriff: 2014-08-05).
- MAM11 Mann, M.; Wöppermann, M.; Zum Gahr, K. H.; Schneider, J.: Keramische Komponenten mit mikrotexturierten Funktionsflächen für medien-geschmierte Gleitsysteme. Hochbeanspruchte Gleit- und Friktions-systeme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe, Abschlusskollo-quium Sonderforschungsbereich 483; Bd. 6808. Karlsruhe: KIT Sci-entific Publishing, 2011, S. 67 - 77.
- MAN95 Mann, U.: Schmierfilmbildung in elasto-hydrodynamischen Kontakten. München, Technische Universität München, Diss, 1995.
- MAR01 Marzenell, C.: Verzahnungshonen mit Diamantwerkzeugen. Fort-schritt-Berichte VDI; Bd. 568, Reihe 2. Hrsg.: VDI, Dissertation, Uni-versität Hannover. Düsseldorf: VDI, 2002.
- MAS00 Masuzawa, T.: State of the Art of Micromachining. CIRP Annals - Manufacturing Technology 49 (2000) 2, S. 473 - 488. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607634519> (Zugriff: 2014-11-04).
- MEI79a Meijboom, L.: Erhöhung der Wirtschaftlichkeit beim Wälzschleifen durch Verbesserung des Zerspanvorganges. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 1979.
- MEI79b Meijboom, L.; Bausch, T.: Leistungssteigerung der Zahnflanken-schleifverfahren unter Praxisbedingungen. Forschungsheft; Bd. 74. Hrsg.: Forschungsvereinigung Antriebstechnik e.V. Frankfurt, 1979.
- MIL99 Miller, F.: Kleine Strukturen - grosse Wirkung. Schweizer Maschi-nenmarkt (1999) 35, S. 40 - 42.
- MIN99 Minke, E. (Hrsg.): Handbuch zur Abrichttechnik. Eislingen: E. Dischner, 1999.
- MMA05 Masuko, M.; Aoki, S.; Suzuki, A.: Influence of Lubricant Additive and Surface Texture on the Sliding Friction Characteristics of Steel under Varying Speeds Ranging from Ultralow to Moderate. Tribology Transactions 48 (2005) 3, S. 289 - 298.
- MOH17 Mohamed, A.-M. O.; Warkentin, A.; Bauer, R.: Prediction of work-piece surface texture using circumferentially grooved grinding wheels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 1-4 (2017) 89, S. 1149 - 1160.
- MOH84 Mohrenstein-Ertel, A.: Die Berechnung der hydrodynamischen Schmierung gekrümmter Oberflächen unter hoher Belastung und Re-lativbewegung. Fortschritt-Berichte VDI; Bd. 115, Reihe 8. Hrsg.: VDI. Düsseldorf: VDI, 1984.

- MÜL02 Müller, N.: Ermittlung des Einsatzverhaltens von Sol-Gel-Korund-Schleifscheiben. Berichte aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2002.
- MUR17 Murzin, S. P.; Balyakin, V. B.: Microstructuring the surface of silicon carbide ceramic by laser action for reducing friction losses in rolling bearings. Optics & Laser Technology 88 (2017), S. 96 - 98. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2016.09.007>.
- MUS07 Musial, W.; Butterfield, S.; McNiff, B.: Improving Wind Turbine Gearbox Reliability. In: European Wind Energy Conference. Hrsg.: European Wind Energy Association. Mailand, 2007, S. 1 - 10.
- MUS86 Mushardt, H.: Modellbetrachtungen und Grundlagen zum Innenrundhonen. Berichte aus dem Institut für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik; Bd. 117, Reihe 2. Hrsg.: VDI, Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Düsseldorf: VDI, 1986.
- NAG14 Nagel, Y.: Rundtischmaschine mit Bürsten reduziert Nebenzeit beim Finishen. MM - Maschinenmarkt. Das IndustrieMagazin (2014) 46, S. 48 - 51.
- NAR14 Narten, M.: Abdichtung von fließfettgeschmierten Getrieben mit Radialwellendichtungen - Reibungsminderung durch Makrostrukturierung der Dichtungsgegenläufigkeit. Stuttgart, Diss, 2014.
- NGU05 Nguyen, T. A.; Butler, D. L.: Simulation of precision grinding process, Part 1: generation of the grinding wheel surface. International Journal of Machine Tools and Manufacture 45 (2005) 11, S. 1321 - 1328. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S089069550500009X> (Zugriff: 2014-08-05).
- NIE10 Niemann, G., Winter, H.: Maschinenelemente Band 2. 2. Auflage. Berlin: Springer-Verlag, 2010.
- NIL11 Niles Werkzeugmaschinen GmbH: Zahnrad-Profil schleifmaschine ZE 800. Berlin, Firmenschrift. 2011.
- NIL14 Niles Werkzeugmaschinen GmbH: Mess- und Kalibriertaster. Berlin, Firmenschrift. 2014.
- NIL15 Niles Werkzeugmaschinen GmbH: Unveröffentlichte Informationen aus Fachgesprächen mit Mitarbeitern der Firma Niles Werkzeugmaschinen GmbH. Berlin, Fachgespräch. 2015.
- NIS03 Niskanen, P.; Raymond, M.: Reducing Wear with Superfinishing Technology. AMPTIAC Quarterly 1 (2003) 7, S. 3 - 9.
- OKA14 Okamoto Machine Tool Europe GmbH: Glatte Oberflächen für reibungslose Funktionalität. mav (2014) 6, S. 40 - 41.

- OLI10 Oliveira, J. F. G.; Bottene, A. C.; Franca, T. V.: A novel dressing technique for texturing of ground surfaces. *CIRP Annals* 59 (2010) 1, S. 361 - 364. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2010.03.119> (Zugriff: 2014-08-05).
- OPH15a Opey, M.; Löpenhaus, C.; Klocke, F.: Influence of Tool Specification and Machining Parameters on the Wear Behaviour at Generating Gear Grinding. In: *WGP Kongress 2015 - Progress in Production Engineering*. Hrsg.: Wulfsberg, J. P.; Röhlig, B.; Montag, T., Hamburg, 7.9-8.9.2015, S. 231 - 238.
- OPH15b Opey, M.; Reimann, J.: Prediction of Surface Zone Changes in Generating Gear Grinding. *Gear Technology* (2015) March/April, S. 52 - 59.
- OTM05 Otmar, A.; Tröbst, S.: Untersuchungen von Zahnradgeräuschen an schweren Nutzfahrzeugdieselmotoren mittels MAN-Geräuschindex. *Motor- und Aggregat-Akustik* 2 (2005) 5, S. 181 - 189.
- PAT14 Patzer, J.: Anforderungen an die Zahnflanke – heute und morgen. *Getriebe aktuell* 2 (2014), S. 13 - 19.
- PEL08 Pellejero, I.; Urbiztondo, M.; Villarroya, M.; Sesé, J.; Pina, M. P.; Santamaría, J.: Development of etching processes for the micropatterning of silicalite films. *Microporous and Mesoporous Materials* 114 (2008) 1-3, S. 110 - 120. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1387181107007445>.
- PER17 Perveen, A.; Liu, F.: Effect of Texturing on the Friction Characteristic of Carbide and Steel Material by Grinding Process. *Materials Science Forum* 887 (2017), S. 83 - 88. URL: [10.4028/www.scientific.net/MSF.887.83](http://www.scientific.net/MSF.887.83).
- PIS11a Piske, M.; Wahl, R.; Zum Gahr, K. H.; Schneider, J.: Mikrotexturierte Keramik/Metall-Tribokontakte in ölgeschmierten Friktionspaarungen. *Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe*, Abschlusskolloquium Sonderforschungsbereich 483, 2011; Bd. 6808. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2011, S. 115 - 125.
- PIS11b Piske, M.; Zum Gahr, K.-H.: Überrollbeständige Dünnschichten unter geschmierter Wälzreibung bis 3500 MPa. *Reibung, Schmierung und Verschleiß. Forschung und praktische Anwendungen, Tribologie-Fachtagung*, 52. Aachen: Gesellschaft für Tribologie (GfT), 2011, S. 7/1.

- POH14 Pohrt, R.; Bäcker, C.; Popov, V. L.: Optimierung von Zahnflankenoberflächen durch kinematisch moduliertes Verzahnungsschleifen. Reibung, Schmierung und Verschleiß: Forschung und praktische Anwendungen, Tribologie-Fachtagung, 55 : Paper-Nr. 21. Aachen: GfT, 2014, S. 21/1.
- PRE04 Predki, W.; Lützig, G.: Großgetriebeprüfstand im Einsatz für die Schadensprognose: "Karies-Prophylaxe" für Zahnrad-Schwergewichte. maschinenbau RUBIN (2004), S. 68 - 73.
- PRE90 Prexler, F.: Einfluß der Wälzflächenrauheit auf die Grübchenbildung vergüteter Scheiben im EHD-Kontakt. München, Technische Universität München, Diss, 1990.
- RAD05 Radev, T.: Einfluss des Schmierstoffes auf die Grübchentragefähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. München, Technische Universität München, Diss, 2005.
- RAM07 Ramsden, J. J.; Allen, D. M.; Stephanson, D. J.; Alcock, J. R.; Peggs, G. N.; Fuller, G.; Goch, G.: The design and manufacture of biomedical surfaces. CIRP Annals 56 (2007) 2, S. 687 - 711. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cirp.2007.10.001> (Zugriff: 2014-08-05).
- RAP08 Rapoport, L.; Moshkovich, A.; Perfilyev, V.; Lapsker, I.; Halperin, G.; Itovich, Y.; Etsion, I.: Friction and wear of MoS<sub>2</sub> films on laser textured steel surfaces. Surface and Coatings Technology 202 (2008) 14, S. 3332 - 3340. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S025789720701242X> (Zugriff: 2014-10-31).
- REI07 Reichel, F.: Verfahrensauswahl beim Schleifen von Großverzahnungen, Vortrag anlässlich des Seminars: Feinbearbeitung von Zahnrädern, WZL der RWTH Aachen, Aachen, 21.11.2007.
- REJ13 Reimann, J.; Klocke, F.; Brumm, M.; Mehr, A.; Finkenwirth, K.: Performance and Technological Potential of Gears Ground by Dressable cBN Tools. In: AGMA Fall Technical Meeting. Hrsg.: American Gear Manufacturers Association. Indianapolis, Indiana, USA, 15.09. - 17.09.2013, S. 19 - 30.
- REJ14 Reimann, J.: Randzonenbeeinflussung beim kontinuierlichen Wälzschleifen von Stirnradverzahnungen. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Klocke, F. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2014.
- REM13 REM Surface Engineering Inc.: Gear Finish. Southington, Firmenschrift. 2013.
- ROH14 Rohrig, K. (Hrsg.): Windenergie Report Deutschland 2014. Fraunhofer-Institut für Windenergie und Energiesystemtechnik IWES. Stuttgart: Fraunhofer, 2014.

- RÖS08 Rösler Oberflächentechnik GmbH: Die Spitzen glätten - Gleitschliffanlage für Superfinishing. JOT Journal für Oberflächentechnik (2008) 1, S. 48 - 49.
- RÜT00 Rütli, R.: Beitrag zur Prozessmodellierung am Beispiel des Zahnradhonens. Zürich, Schweiz, ETH Zürich, Diss, 2000.
- SAL01a Salisbury, E. J.; Domala, K. Vinod; Moon, K. S.; Miller, M. H.; Sutherland, J. W.: A Three-Dimensional Model for the Surface Texture in Surface Grinding, Part 1: Surface Generation Model. Journal of Manufacturing Science and Engineering 123 (2001) 4, S. 576 - 581. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1391427> (Zugriff: 2014-12-14).
- SAL01b Salisbury, E. J.; Domala, K. Vinod; Moon, K. S.; Miller, M. H.; Sutherland, J. W.: A Three-Dimensional Model for the Surface Texture in Surface Grinding, Part 2: Grinding Wheel Surface Texture Model. Journal of Manufacturing Science and Engineering 123 (2001) 4, S. 582 - 590. URL: <http://dx.doi.org/10.1115/1.1391428> (Zugriff: 2014-10-31).
- SAL91 Saljé, E. (Hrsg.): Begriffe der Schleif- und Konditioniertechnik. Essen: Vulkan, 1991.
- SAM10 Sammler, C.: Ultraschallunterstützte Bearbeitung, Vortrag anlässlich des Seminars "Advancer", Fraunhofer IPK Berlin, Berlin, 05.05.2010.
- SAM16 Sammler, C.: Prozessauslegung zum Schnellhubschleifen von Hochleistungskeramik. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E., Dissertation, Technische Universität Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2016.
- SAN82 Santochi, M.; Vignale, M.: A Study on the Functional Properties of a Honed Surface. Annals of the CIRP 31 (1982) 1, S. 431 - 434. URL: [http://dx.doi:10.1016/S0007-8506\(07\)63342-3](http://dx.doi:10.1016/S0007-8506(07)63342-3) (Zugriff: 2015-07-01).
- SAW00 Sawada, K.; Kawai, T.; Takeuchi, Y.; Sata, T.: Development of ultraprecision micro grooving (Manufacture of V-shaped groove). JSME International Journal, Series C (Mechanical Systems, Machine Elements and Manufacturing) 43 (2000) 1, S. 170 - 176.
- SCA11 Schubert, A.; Neugebauer, R.; Sylla, D.; Avila, M.; Hackert, M.: Manufacturing of surface microstructures for improved tribological efficiency of powertrain components and forming tools. Energy-Efficient Product and Process Innovations in Production Engineering 4 (2011) 2, S. 200 - 207. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1755581711000186> (Zugriff: 2014-08-05).
- SCB10 Schlecht, B.: Maschinenelemente 2 - Getriebe, Verzahnungen und Lagerungen. München: Pearson Studium, 2010.

- SCH04 Schlattmeier, H.: Diskontinuierliches Zahnflankenprofilschleifen mit Korund. Berichte aus der Produktionstechnik; Bd. 2004. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2004.
- SCH68 Schmitt, R.: Abrichten von Schleifscheiben mit diamantbestückten Rollen. Braunschweig, Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Diss, 1968.
- SCP03 Schäcke, P.: Gear Grinding and Gear Functions, Vortrag anlässlich der Internationalen Tagung Antriebstechnik, 2003.
- SCS05 Schreck, S.; Zum Gahr, K. -H.: Laser-assisted structuring of ceramic and steel surfaces for improving tribological properties. Applied Surface Science 247 (2005) 1 - 4, S. 616 - 622. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169433205001583> (Zugriff: 2014-10-31).
- SCT13 Schenk, T.: Verzahnungsschleifen mit abrichtbaren keramisch gebundenen CBN Schleifwerkzeugen. Schleiftechnik im Wettbewerb - Grinding Technology in Competition; Bd. 6. Hrsg.: European Conference on Grinding. Aachen, 2013, S. 1 - 17.
- SCT14 Schenk, T.: Verzahnungsschleifen mit abrichtbaren keramisch gebundenen CBN Werkzeugen, Vortrag anlässlich der "GrindTec", AFAG Messen und Ausstellungen GmbH, Augsburg, 19.03.2014.
- SEE11 Seewig, J.; Wiehr, C.; Gröger, S.: Charakterisierung technischer Bauteiloberflächen. Stand der Oberflächenmesstechnik heute. In: Messprinzipien - Messgeräte - Anwendungen, Fachtagung Metrologie in der Mikro- und Nanotechnik, 4. Hrsg.: VDI/VDE-Gesellschaft Mess- und Automatisierungstechnik (GMA). Düsseldorf: VDI-Verlag, 2011, S. 159 - 171.
- SHE05 Shell Deutschland Oil GmbH: Shell Marcon® Oil 2425 S-14, High performance grinding oil, Firmenschrift. 2005.
- SHW08 Schwienbacher, S.: Einfluss von Schleifbrand auf die Flankentragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. München, Technische Universität München, Diss, 2008.
- SIE03 Siemens AG: SIMATIK, Mehrachsbaugruppe FM 357-2 für Servo- bzw. Schrittantrieb, Handbuch 6ES7 357-4AH00-8AG0. München, Firmenschrift. 2003.
- SIE06 Siemens AG: Sinumerik, SINUMERIK 840D sl/840Di sl/840D/840Di/810, Programmierhandbuch, Steuerung SINUMERIK 840D sl/840DE sl, Software Version, NCU Systemsoftware für 840D sl/840DE sl 1.5/2.5. München, Firmenschrift. 2006.

- SIE08 Siemens AG: Grundlagen, SINUMERIK 840D sl, Programmierhandbuch, Steuerung SINUMERIK 840D sl/840DE sl, Software Version, NCU Systemsoftware für 840D sl/840DE sl 1.5/2.5. München, Firmenschrift. 2008.
- SIE12 Siemens AG: Sinumerik, SINUMERIK 840D sl / 82D, Grundfunktionen, Funktionshandbuch. München, Firmenschrift. 2012.
- SIF06 Siegel, F.; Ostendorf, A.; Stute, U.: Laser-based surface modification - micro structures on macro areas. In: Proceedings of the 6th International Conference: European Society for Precision Engineering and Nanotechnology; Band 2. Hrsg.: Zervos, H., Baden, 28.05. - 01.06.2006, S. 272 - 275.
- SIL17 Silva, E. J.; Kirsch, B.; Bottene, A. C.; Simon, A.; Aurich, J. C.; Oliveira, J. F. G.: Manufacturing of structured surfaces via grinding. Journal of Materials Processing Technology 243 (2017), S. 170 - 183. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.12.009> (Zugriff: 2017-07-02).
- SIN05 Singh, R.; Melkote, S. N.; Hashimoto, F.: Frictional response of precision finished surfaces in pure sliding. Wear 258 (2005) 10, S. 1500 - 1509. URL: <http://dx.doi:10.1016/j.wear.2004.03.071> (Zugriff: 2015-07-15).
- SIT14 Siebrecht, T.; Biermann, D.; Ludwig, H.; Rausch, S.; Kersting, P.; Blum, H.; Rademacher, A.: Simulation of grinding processes using finite element analysis and geometric simulation of individual grains. Production Engineering. Research and Development 8 (2014) 3, S. 345 - 353. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-013-0524-9> (Zugriff: 2014-05-14).
- SLH82 Schleich, H.: Schärpen von Bornitridschleifscheiben. Berichte aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 1982.
- SON14 Song, X.; Chaudhari, R.; Hashimoto, F.: Experimental Investigation of Vibratory Finishing Process. In: Proceedings of the ASME 2014 International Manufacturing Science and Engineering Conference; Band 2. Hrsg.: American Society of Mechanical Engineers. Detroit, Michigan, USA, 9.6. - 13.6.2014, S. 1 - 7.
- SPE11 Spencer, A.; Almqvist, A.; Larsson, R.: A numerical model to investigate the effect of honing angle on the hydrodynamic lubrication between a combustion engine piston ring and cylinder liner. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J (Journal of Engineering Tribology) 225 (2011) 7, S. 683 - 689. URL: <http://dx.doi.org/10.1177/1350650111403867> (Zugriff: 2014-06-02).

- SPU14 Spur, G. (Hrsg.): Handbuch der Fertigungstechnik. München: Hanser, 2014.
- SRO03 Sroka, G.; Winkelmann, L.: Superfinishing Gears - The State of the Art. Gear Technology 6 (2003) 20, S. 22 - 33.
- SRO05a Sroka, F.: Konditionieren von Diamantschleifscheiben. Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin. Hrsg.: Uhlmann, E., Dissertation, Technische Universität Berlin. Stuttgart: Fraunhofer IRB, 2005.
- SRO05b Sroka, G.; Winkelmann, L.: Superfinishing Gears - The State of the Art, Part II. Gear Technology (2005) July/August, S. 30 - 32.
- STA13 Statistisches Bundesamt: Produzierendes Gewerbe - Produktion im produzierenden Gewerbe. Berlin, Firmenschrift. 2013.
- STB12 Steinbacher, M.; Surm, H.; Clausen, B.; Lübber, T.; Hoffmann, F.: Methodical investigation of distortion biasing parameters during case hardening of spur wheels. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. Hrsg.: Zoch, H.-W. , Weinheim: Wiley-Vch, 2012, S. 91 - 98.
- STE07 Steinberger, G.: Optimale Grübchentragfähigkeit von Schrägverzahnungen. München, Technische Universität München, Diss, 2007.
- STI09 Stimpel, F.: Technologische Kenngrößen für das kontinuierliche Wälzschleifen von Evolventenverzahnungen. Berichte aus dem IFW; Bd. 2. Hrsg.: Denkena, B., Dissertation, Leibnitz Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2009.
- STM12 Steffes, M.; Aurich, J. C.: Einfluss der Kornform auf das plastische Materialverhalten beim Einkornritzen. Diamond Business 11 (2012) 2, S. 44 - 50.
- STW08 Schriefer, H., Thyssen, W., Wirz, W., Scacchi, G., Gretler, M. (Hrsg.): Kontinuierliches Wälzschleifen von Verzahnungen. Wallisellen: Reishauer AG, 2008.
- STW12 Steinhilper, W.; Sauer, B.: Konstruktionselemente des Maschinenbaus 1 - Grundlagen der Berechnung und Gestaltung von Maschinenelementen. 8. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer, 2012.
- SUL89 Sulzer, G.: Wälzschleifen gehärteter Zahnräder - Nicht nur für Grossserien. Schweizer Maschinenmarkt (1989) 16, S. 22 - 27.
- SUL93 Schutzrecht EP0280046, Europäische Patentschrift. Liebherr Verzahnentechnik, Kempten. Sulzer, G.: Werkzeugmaschinen zum Feinbearbeiten der Zahnradflanken von vorverzahnten Zahnrädern.
- SUP13 Supfina Grieshaber GmbH & Co. KG: Wunschgerechte Oberflächen. Das Strukturfinishen erweitert den bewährten Superfinish-Prozess um eine innovative Komponente. WB Werkstatt und Betrieb 146 (2013) 6, S. 41.

- THE07           Theißen, J.: Graufleckenbildung an Zahnrädern - Ursachen, Prüfverfahren, Berechnung, Praxiserfahrungen, Vortrag anlässlich des BWE-Arbeitskreises Graufleckigkeit, Bundesverband für Windenergie, Hamburg, 09.07.2007.
- THI00           Thiel, S.; Lehnice, S.; Zimmer, O.; Grimme, D.; Doll, U.; Piltz, S.: Abformung von Mikrostrukturen in Glas. Herstellung der Abformwerkzeuge bestimmt Qualität und Standzeit. VDI-Zeitschrift Special (2000) VII Werkzeug- und Formenbau, S. 26 - 30.
- TOB01           Tobie, T.: Zur Grübchen- und Zahnfußtragfähigkeit einsatzgehärteter Zahnräder. München, Technische Universität München, Diss, München: Hieronymus , 2001.
- TÖN92           Tönshoff, H. K.; Peters, J.; Inasaki, I.; Paul, T.: Modelling and Simulation of Grinding Processes. Annals of the CIRP 41 (1992) 2, S. 677 - 688.
- TÖN00a          Tönshoff, H. K.; Marzenell, C.: Effects of Gear Honing on Flank Characteristics and Pitting Life. Production Engineering. Research and Development 7 (2000) 1, S. 5 - 8.
- TÖN00b          Tönshoff, H. K.; Friemuth, T.; Marzenell, C.: Properties of honed gears during lifetime. CIRP Annals 49 (2000) 1, S. 431 - 434. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62982-5](http://dx.doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62982-5) (Zugriff: 2013-08-28).
- TÜR02           Türich, A.: Werkzeug-Profilierzeugung für das Verzahnungsschleifen. Fortschritt-Berichte VDI; Bd. 610, Reihe 2. Hrsg.: VDI, Dissertation, Universität Hannover. Düsseldorf: VDI, 2002.
- TÜR06           Türich, A.: Abrichtpotenziale genutzt beim Zahnrad-Wälzschleifen, Abrichten mit Diamanträdern. WB Werkstatt und Betrieb 139 (2006) 3, S. 54 - 57.
- TÜR15a          Türich, A.: Abstract: Schleifen von Verzahnungen im Automobilbereich - Herausforderungen und Lösungsansätze. In: Tagungsband zur Schleiftagung, Fellbach, 10.2. - 11.2.2015
- TÜR15b          Türich, A.: Schleifen von Verzahnungen im Automobilbereich - Herausforderungen und Lösungsansätze. In: Tagungsband zur Schleiftagung, Fellbach, 10.2. - 11.2.2015
- UHL94           Uhlmann, E.: Tiefschleifen hochfester keramischer Werkstoffe. Berlin, Technische Universität Berlin, Diss, 1994.
- UHL11           Uhlmann, E.; Borsoi Klein, T.; Hochschild, L.; Bäcker, C.: Influence of structuring by abrasive machining on the tribological properties of workpiece surfaces. Procedia Engineering 19 (2011), S. 363 - 370.

- UHL14a Uhlmann, E.; Lypovka, P.; Sommerfeld, C.; Bäcker, C.; Dethlefs, A.; Hochschild, L.: Abrasives Bürsten. Funktionsflächen flexibel finishen. WB Werkstatt und Betrieb 147 (2014) 4, S. 70 - 72.
- UHL14b Uhlmann, E.; Borsoi Klein, T.; Koprowski, S.: Tilt angle effects in surface grinding with mounted points. Production Engineering. Research and Development 8 (2014) 4, S. 431 - 442. URL: <http://dx.doi.org/10.1007/s11740-014-0540-4> (Zugriff: 2013-10-17).
- UHL16 Uhlmann, E.; Sommerfeld, C.: Nachbearbeitung von keramischen Bauteilen mit flexiblen Werkzeugen. dihw 8 (2016) 1, S. 18 - 21.
- UTS12 Utsch, P.: Flexibles Bandfinishwerkzeug zur Kurbelwellenbearbeitung. VDI-Z 154 (2012) 6, S. 28 - 30.
- VAN95 van Leeuwen, H. J.; Schouten, M.: Die Elastohydrodynamik: Geschichte und Neuentwicklungen. VDI Berichte 4 - 5 (1995) 1207, S. 1 - 47.
- VAT09 Vath, A.; Janousch, H. P.: Große Windenergieanlagen profitieren von innovativer Getriebetechnik. MM - Maschinenmarkt. Das Industrie-Magazin (2009) 14, S. 76 - 77.
- VAT12 Vath, A.: Antriebskonzepte für Offshore Windenergieanlagen. Konstruktion, special Antriebstechnik (2012) 1, S. 22 - 24.
- VDA2006 VDA 2006 Teil 1, (07.2003) Geometrische Produktspezifikation; Oberflächenbeschaffenheit; Regeln und Verfahren zur Beurteilung der Oberflächenbeschaffenheit. Berlin: Beuth.
- VDI/VDE2607 VDI/VDE 2607, (02.2000) Rechnerunterstützte Auswertung von Profil- und Flankenlinienmessungen an Zylinderrädern mit Evolventenprofil. Berlin: Beuth.
- VDI/VDE2612 VDI/VDE 2612, (05.2000) Profil- und Flankenlinienprüfung an Zylinderrädern mit Evolventenprofil. Berlin: Beuth.
- VDI/VDE2613 VDI/VDE 2613, (12.2003) Teilungs- und Rundlaufprüfung an Verzahnungen - Zylinderräder, Schneckenräder, Kegelhäder. Berlin: Beuth.
- VDI/VDE2615 VDI/VDE 2615, (08.2006) Rauheitsprüfung an Zylinder und Kegelhädern mit Tastschnittgeräten. Berlin: Beuth.
- VDI3822 VDI 3822, (07.2015) Schadensanalyse Schäden an Metallprodukten durch tribologische Beanspruchungen. Berlin: Beuth.
- VEN00 Venner, C. H.; Lubrecht, A. A.: Multilevel methods in lubrication. 1st ed. Amsterdam: Elsevier, 2000.
- VUC08a Vucetic, D.: Zerspan- und Verschleißmechanismen beim Verzahnungshonen. Ergebnisse aus der Produktionstechnik. Hrsg.: Klocke, F.; Bouzakis, K. D., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Apprimus, 2008.

- VUC08b Vucetic, D.; Sander, B.: Große Moduln produktiver schleifen. Verfahrensbedingte Prozessgrenzen beim Profilschleifen aushebeln. *WB Werkstatt und Betrieb* 141 (2008) 5, S. 58 - 61.
- WAB10 Wang, B.: Herstellung funktionaler Riblet-Strukturen durch Profilschleifen. *Berichte aus dem IFW*; Bd. 7. Hrsg.: Denkena, B., Dissertation, Leibniz Universität Hannover. Garbsen: PZH Produktionstechnisches Zentrum GmbH, 2010.
- WAG13 Wagner, A.: Superfinishing beim Verzahnungsschleifen. *Diamond Business* (2013) 4, S. 42 - 49.
- WAH10 Wahl, R.: Untersuchung des Einflusses von Mikrotexturierungen auf den einsinnigen, ölgeschmierten Gleitkontakt von Stahl/Saphir-Paarungen. Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, Diss, 2010.
- WAK03 Wakuda, M.; Yamauchi, Y.; Kanzaki, S.; Yasuda, Y.: Effect of surface texturing on friction reduction between ceramic and steel materials under lubricated sliding contact. *Wear - An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear* 254 (2003) 3/4, S. 356 - 363. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648\(03\)00004-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0043-1648(03)00004-8) (Zugriff: 2014-11-07).
- WAN08 Wan, Y.; Xiong, D.-S.: The effect of laser surface texturing on frictional performance of face seal. *Journal of Materials Processing Technology* 197 (2008) 1-3, S. 96 - 100. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924013607005948> (Zugriff: 2014-11-07).
- WAR98 Warnecke, G.; Zitt, U. R.: Kinematic Simulation for Analyzing and Predicting High-Performance Grinding Processes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 47 (1998) 1, S. 265 - 270. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0007850607628315> .
- WAX03 Wang, X.; Kato, K.; Adachi, K.; Aizawa, K.: Loads carrying capacity map for the surface texture design of SiC thrust bearing sliding in water. *Tribology International* 36 (2003) 3, S. 189 - 197. URL: [http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X\(02\)00145-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0301-679X(02)00145-7) (Zugriff: 2014-10-31).
- WEN02 Wenda, A.: Schleifen von Mikrostrukturen in sprödharten Werkstoffen. Schriftenreihe des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik (IWF) der TU Braunschweig, Dissertation, Technische Universität Braunschweig. Essen: Vulkan, 2002.
- WEN16 Wendt, L.: Aktuelle Entwicklungen beim Verzahnungswälzschleifen. In: Tagungsband zum 1. Schweizer Schleif-Symposium, Zürich, 19.-20.01.2016

- WER94 Werner, F.: Hochgeschwindigkeitstriangulation zur Verschleissdiagnose an Schleifwerkzeugen. Fortschritt-Berichte VDI; Bd. 429, Reihe 8. Hrsg.: VDI, Dissertation, Universität Hannover. Düsseldorf: VDI, 1994.
- WGY91 Winergy: Verzahnungen in Windgetrieben: Optimierung durch Superfinishing. Windkraft Journal & Natürliche Energien - unabhängige Fachzeitschrift. (1991), S. 1 - 4.
- WIE10 Wiehr, C.; Seewig, J.: 3D-Kenngrößen nach ISO 25178, Vortrag anlässlich des Arbeitskreis "3D-Rauheitsmesstechnik", Lehrstuhl für Messtechnik und Sensorik, Kaiserslautern, 2010.
- WIH14 Wittel, H.; Muhs, D.; Jannasch, D.; Voßiek, J.; Roloff, H.; Matek, W.: Maschinenelemente. 19., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: Vieweg und Teubner, 2014.
- WIN04 Winkelmann, L.; Holland, J.; Nanning, R.: Superfinishing Motor Vehicle Ring and Pinion Gears. Fall Technical Meeting Papers by Topic 2 (American Gear Manufacturers Association), (2004) 04FTM13. URL: <http://nebula.wsimg.com/c527b878764ef08603d113ee86d1232c?AccessKeyId=BB849AE24543AB0A9C6C&disposition=0&alloworigin=1> (Zugriff: 2013-10-24).
- WIN09 Winkelmann, L.; El-Saeed, O.; Bell, M.: The Effect of Superfinishing on Micropitting. GearTechnology (2009) March/April, S. 60 - 65.
- WIŚ00 Wiśniewski, M.: Elastohydrodynamische Schmierung - Grundlagen und Anwendungen. Renningen-Malmsheim: Expert, 2000.
- WIT11 Witt, T.: 2D- und 3D Bewertung von tribologischen Wirkflächen - erzeugt per modifiziertem GBQ®-Microfinish. In: Tribologie-Fachtagung: Reibung, Schmierung und Verschleiß; Bd. 2. Aachen: GfT, 2011, S. 1 - 14.
- WÖP07 Wöppermann, M.; Zum Gahr, K. H.: Mikrostrukturierung keramischer Funktionsflächen für mediengeschmierte Gleitsysteme. Hochbeanspruchte Gleit- und Friktionssysteme auf Basis ingenieurkeramischer Werkstoffe, Statuskolloquium Sonderforschungsbereich 483; Bd. 3. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, 2007, S. 71 - 80.
- XIA04 Xiao, L.; Rosen, B.-G.; Amini, N.: Surface lay effect on rough friction in roller contact. Wear 257 (2004) 12, S. 1301 - 1307.
- XIE11 Xie, J.; Zhuo, Y. W.; Tan, T. W.: Experimental study on fabrication and evaluation of micro pyramid-structured silicon surface using a V-tip of diamond grinding wheel. Precision Engineering 35 (2011) 1, S. 173 - 182. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2010.09.002> (Zugriff: 2014-08-05).

- YAN11 Yan, L.; Rong, Y. M.; Jiang, F.; Zhou, Z. X.: Three-dimension surface characterization of grinding wheel using white light interferometer. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 55 (2011), S. 133 - 141.
- YEG86 Yegenoglu, K.: Berechnung von Topographiekenngößen zur Auslegung von CBN-Schleifprozessen. Aachen, RWTH Aachen, Diss, 1986.
- ZAH15 Zahnradwerk Pritzwalk GmbH: Zahnradgeometrien. Pritzwalk, Firmenschrift. 2015.
- ZEP05 Zeppenfeld, C.: Schnellhubschleifen von  $\gamma$ -Titanaluminiden. *Berichte aus der Produktionstechnik*. Hrsg.: Eversheim, W. et al., Dissertation, RWTH Aachen. Aachen: Shaker, 2005.
- ZHO02 Zhou, X.; Xi, F.: Modeling and predicting surface roughness of the grinding process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 42 (2002) 8, S. 969 - 977. URL: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0890695502000111> (Zugriff: 2014-11-04).
- ZHU01 Zhu, D.; Hu, Y.-Z.: Effects of Rough Surface Topography and Orientation on the Characteristics of EHD and Mixed Lubrication in Both Circular and Elliptical Contacts. *Tribology Transactions* 44 (2001) 3, S. 391 - 398. URL: <http://dx.doi.org/10.1080/10402000108982472> (Zugriff: 2014-11-15).
- ZIT99 Zitt, U. R.: Modellierung und Simulation von Hochleistungsschleifprozessen. *FBK Produktionstechnische Berichte*; Bd. 34. Hrsg.: Warn-ecke, G., Dissertation, Universität Kaiserslautern 1999.
- ZUM07 Zum Gahr, K. H.; Mathieu, M.; Brylka, B.: Friction control by surface engineering of ceramic sliding pairs in water. *Wear - An International Journal on the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear* 263 (2007) 7-12, S. 920 - 929. URL: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2006.11.024> (Zugriff: 2014-10-31).
- ZUM83 Zum Gahr, K.-H.; Mewes, D.: Werkstoffabtrag beim Furchungsver-schleiß. *Metall - Internationale Zeitschrift für Technik und Wirtschaft* 37 (1983) 12, S. 1212 - 1217.

# **Berichte aus dem Produktionstechnischen Zentrum Berlin**

---

**Wissensbasierte Diagnose technischer Systeme mit konnektionistischen Modellen**  
Hartwig Weber. 201 Seiten, 46 Abb., 7 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4496-6

**Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten industrieller Qualitätstechniken im Dienstleistungsbereich**  
Alexander Gogoll. 173 Seiten, 71 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4498-2

**Perforierschneiden mit Nd:YAG-Festkörper hoher Impulsenergien**  
Jürgen Betz. 167 Seiten, 97 Abb., 5 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4499-0

**Analyse der Werkstückhaltekräfte am Dreibackenfutter im Rahmen einer Maschinen- und Prozeßüberwachung**  
Rolf Thiel. 130 Seiten, 69 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4495-8

**Gestaltung von Entscheidungsstrukturen zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen**  
Florian Golm. 173 Seiten, 83 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4497-4

**Fehlersensitive Produktgestaltung in integrierten Systemarchitekturen**  
Michael Stephan. 164 Seiten, 58 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4512-1

**Wirtschaftliche Einführung der rechnerintegrierten Produktion in kleinen Unternehmen mit komplexer Produktionsstruktur**  
Wolfgang Bilger. 174 Seiten, 42 Abb., 1 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4511-3

**Beitrag zur Organisation von Demontagesystemen**  
Claudia Hentschel. 160 Seiten, 54 Abb., 16 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4513-X

**Entwicklung eines Modells für eine rechnerunterstützte Qualitätswissensbasis**  
Jörg-Peter Brauer. 150 Seiten, 40 Abb., 2 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4520-2

**Kühlschmierung beim Schleifen keramischer Werkstoffe**  
Thomas Brücher. 330 Seiten, 124 Abb., 17 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4523-7

**Einführen und Umsetzen von Total Quality Management**  
Christian Malorny. 310 Seiten, 68 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4524-5

**Qualitätsmanagement für die Einführung bestandsarmer Produktionskonzepte**  
Torsten Walter. 143 Seiten, 37 Abb., 13 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4525-3

**Virtuelle Tonmodellierung zur skizzierenden Formgestaltung im Industriedesign**  
Jörg Lüddemann. 166 Seiten, 76 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4519-9

**Konzept zur Steigerung der Effektivität von Produktionsanlagen**  
Mehdi Al-Radhi, 165 Seiten, 45 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4528-8

**Produktionsstrukturierung auf der Basis strategischer Eigenfertigungskomponenten**  
Olaf Sauer, 144 Seiten, 62 Abb. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4532-6

**Auswahl und Konditionierung von Werkzeugen für das Außenrund-Profil schleifen technischer Keramiken**  
Ingo Liebe, 170 Seiten, 79 Abb., 16 Tab. 1996. Kartonierte. ISBN 3-8167-4509-1

### **Automatisiertes Nähen von Zuschnitten ungleicher Kontur**

Thomas Gottschalk, 140 Seiten, 70 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4531-8

### **Featureintegrierte Fertigungsplanung**

Armin Ulbrich, 209 Seiten, 93 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4529-6

### **Aufgabenbezogene Anordnung und Programmierung von Laserscannern für die 2D-Geometrieinspektion**

Heinrich Schuler, 148 Seiten, 81 Abb. 1996. Kartoniert. ISBN 3-8167-4530-X

### **Arbeitsgestaltung zur Fehlervermeidung bei der SMD-Elektronikmontage**

Stephan Krüger, 173 Seiten, 51 Abb., 22 Tab. 1996. Kartoniert.  
ISBN 3-8167-4540-7

### **Modell der zyklischen Prozeßrestrukturierung als Teil des Total Quality Managements**

Timo Füermann, 176 Seiten, 79 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4545-8

### **Analyse der Rentabilität von Qualitätstechniken**

Philipp Theden, 158 Seiten, 50 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4544-X

### **Thermisch beschichtete CFK-Wellen im Maschinenbau**

Andreas Kranz, 148 Seiten, 76 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4547-4

### **Integrativer Produktentwicklungsarbeitsplatz mit Multimedia- und Breitbandkommunikationstechnik**

Thomas Kieseewetter, 169 Seiten, 60 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4548-2

### **Verbesserung der Planung von Produktionsprozessen im Werkzeugbau durch Qualitätsplanung mittels Quality Function Deployment (QFD)**

Manfred Zoschke, 140 Seiten, 14 Abb., 7 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4546-6

### **Flexibel anpaßbare Softwaresysteme zur rechnerunterstützten Fertigungssteuerung**

Harald Krause, 148 Seiten, 89 Abb., 27 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4551-2

### **Anpassung des Qualitätswesens bei Total Quality Management**

Frank Krämer, 262 Seiten, 75 Abb., 40 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4558-X

### **Integration von Qualitäts- und Umweltmanagementsystemen und ihre betriebliche Umsetzung**

Detlev Butterbrodt, 240 Seiten, 60 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4559-8

### **Die Entwicklung des deutschen Werkzeugmaschinenbaus in der Zeit von 1930 bis 1960**

René Haak, 225 Seiten, 30 Abb., 9 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4556-3

### **Fertigungsintegrierte Instandhaltung**

Ralf Jagodejkin, 195 Seiten, 55 Abb., 21 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4557-1

### **Analyse der Prozeßkette Pulverspritzgießen**

Peter Merz, 165 Seiten, 78 Abbildungen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4629-2

### **Bearbeitung von metallischen Gasturbinenwerkstoffen durch Tiefschleifen und Drahterodieren**

Achim Meier, 220 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4627-6

### **Drehzahlsynchronisation der Wirkpartner beim Abrichten und Schleifen**

Holger Eichhorn, 200 Seiten, 86 Abb., 13 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4630-6

### **Läppen von einkristallinem Silicium**

Hendrik Engel, 200 Seiten, 85 Abbildungen, 13 Tabellen. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4631-4

### **Verschleißverhalten von polykristallinem Diamant bei instationärer Beanspruchung**

Uwe Lachmund, 210 Seiten, 100 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4632-2

### **Feature-basierte Meßplanung für Koordinatenmeßmaschinen**

Michael Ciesla, 162 Seiten, 79 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4613-6

### **Informationssystem für heterogen verteilte Qualitätsinformationen**

Volker Kleinhans, 150 Seiten, 67 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4612-8

### **Untersuchung und Interpretation der beim Schleifen der Nickelbasislegierung IN 738 LC induzierten Gefügeänderungen in der Randzone**

Pengxi Li, 147 Seiten, 135 Abb., 19 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4634-9

### **Thermische Stabilisierung von Werkzeugmaschinen-Spindelkästen durch Carbonfaserverbundkunststoffe**

Matthias Liebetau, 200 Seiten, 122 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4638-1

### **Kooperationsentwicklung mit Zulieferern in der Automobilindustrie Indonesien**

Ida-Bagus Kesawa Narayana, 214 Seiten, 95 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4642-X

### **Flexible On-line-Prozeßoptimierung mit integrierten adaptiven Modellen**

Martin Bauer, 160 Seiten, 55 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4622-5

### **Einsatz eines Mobilrobotersystems in der Endmontage des Schiffsstahlkörperbaus**

Henning Müller, 170 Seiten, 62 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4552-0

### **Prozeßmodell für die Kraftübertragung durch neue Wirkflächen zur Entwicklung geometrietoleranter Demontagewerkzeuge**

Martin Wagner, 170 Seiten, 100 Abb., 12 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5130-X

### **Honen keramischer Werkstoffe**

Uwe-Peter Weigmann, 250 Seiten, 103 Abb., 15 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4639-X

### **Modellierung und Vermessung linearer Gelenkbewegungen bei Industrierobotern**

Michael Grethlein, 154 Seiten, 56 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4644-6

### **Globalisierungspotentiale im Maschinenbau**

Jens Nackmayr, 174 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5132-6

### **Entwicklung und praktische Erprobung eines Kennzahlensystems für das Total Quality Management**

Olaf Wolter, 190 Seiten, 52 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5136-9

### **Prozeßorientierte Techniken zur systematischen Verbesserung des betrieblichen Umweltschutzes**

Ulrich Tammler, 185 Seiten, 72 Abb., 25 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5134-2

### **Eine Methode zur automatischen Strukturinterpretation in digitalisierten technischen Zeichnungen**

Nailja Luth, 150 Seiten, 76 Abb., 10 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4646-2

### **Ganzheitliches Modell zur Umsetzung von Total Quality Management**

Philipp Radtke, 180 Seiten, 50 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5148-2

**Ein methodischer Ansatz zum Strukturvergleich technischer Objekte**

Matthias Müller, 245 Seiten, 54 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5160-1

**Prozeßparameter beim Scherschneiden von Karosserieblechteilen**

Andreas Pöllmann, 154 Seiten, 80 Abb., 11 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5150-4

**Biologisch basierte Verfahren zur Objekterkennung und Texturanalyse**

Javier Ruiz-del-Solar, 145 Seiten, 98 Abb., 8 Tab. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-4647-0

**Methodisches Konstruieren als Mittel zur systematischen Gestaltung von Dienstleistungen**

Wolfgang Schwarz, 130 Seiten, 80 Abb. 1997. Kartoniert. ISBN 3-8167-5140-7

**Techniken zur Entwicklung von Führungsqualität im Total Quality Management**

Claudia Kostka, 200 Seiten, 30 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5165-2

**Metamodellierung als Instrument der Verknüpfung von Unternehmensmodellen**

Wolfgang Müller, 170 Seiten, 61 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5164-4

**Entwicklung und Realisierung einer Methode für die flexible Auswertung von Profillinien**

Lorenz Voit, 145 Seiten, 75 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5174-1

**Gewichts- und Lärminderung von Laufrädern für Schienenfahrzeuge durch Einsatz von Faserverbundwerkstoffen**

Frank Warmuth, 130 Seiten, 110 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5173-3

**Prozeß-Benchmarking – Methode zum branchenunabhängigen Vergleich von Prozessen**

Gunnar Siebert, 130 Seiten, 45 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5182-2

**Modellierungsvorgehen zur Planung von Geschäftsprozessen**

Martin Schwermer, 160 Seiten, 54 Abb., 6 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5163-6

**Bewertung und Verkürzung von Anlaufprozessen für Betriebsmittel**

Ronald Fritsche, 135 Seiten, 71 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5169-5

**Analyse des Drehens duktiler Werkstoffe mit der Finite-Elemente-Methode**

Steffen Gerloff, 272 Seiten, 116 Abb., 7 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5161-X

**Prozeßorientierte Auswahl von PPS-Systemen**

Georg Neubauer, 146 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5184-9

**Featurebasiertes Gestalten von Produkten mit Freiformgeometrien**

Christiane Stiel, 153 Seiten, 50 Abb., 1 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5170-9

**Entwicklung und Verifizierung eines Prozeßmodells für das Einzelpunktlöten in der Elektronikfertigung**

Jörg Niemeier, 120 Seiten, 75 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5177-6

**Beschleunigte Evolutionsstrategie zur Optimierung von Fertigungsprozessen**

Jürgen H. Bremer, 125 Seiten, 38 Abb., 23 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5183-0

**Konfigurierbares, multimediales Fernbetreuungssystem für rechnergesteuerte Fertigungseinrichtungen**

Zaharya Menevidis, 155 Seiten, 51 Abb., 9 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5171-7

**Funkenerosive Bearbeitung von polykristallinem Diamant**

Steffen Appel, 150 Seiten, 62 Abb., 10 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5162-8

**Analyse und Simulation des Laserstrahlschneidens von Faserverbundkunststoffen**  
Stefan Liebelt, 180 Seiten, 70 Abb., 12 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5190-3

**Flexible Spannbacken für die Drehbearbeitung**  
Udo Bahrke, 168 Seiten, 120 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5193-8

**Controlling des Fabrikbetriebes auf der Basis des Total Quality Managements (TQM)**  
Dirk Wilmes, 195 Seiten, 51 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5194-6

**Ein Modell zur Reduzierung der Variantenvielfalt in Produktionsunternehmen**  
Sven-Norman Gembrys, 120 Seiten, 48 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5199-7

**Konzept eines Modells zur Produktentwicklung**  
Hanno Weber, 160 Seiten, 85 Abb. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5205-5

**Entwicklung einer handlungsorientierten Interaktionsmethode zur Benutzung  
produktionstechnischer Datenbanken**  
Regine Gernert, 168 Seiten, 40 Abb., 15 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5213-6

**Modell zur Gestaltung und Auswahl von CAQ-Lösungen**  
Thomas Konert, 172 Seiten, 68 Abb., 5 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5207-1

**Globales Produktdatenmanagement zur Verbesserung der Produktentwicklung**  
Matthias Doblies, 139 Seiten, 49 Abb., 21 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5224-1

**Designintegrierte Produktplanung und Produktkonzeption**  
Timm Kehler, 158 Seiten, 78 Abb.. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5237-3

**Verkürzung der Produktentwicklungszeit durch Parallelverarbeitung**  
Haygazun Hayka, 175 Seiten, 46 Abb., 13 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5228-4

**Analyse der Schnitt- und Kerbgeometrie sowie des Strahls beim  
Abrasive Wasserstrahlschneiden**  
Bernhard Axmann, 199 Seiten, 100 Abb., 20 Tab. 1998. Kartoniert. ISBN 3-8167-5236-5

**Anwendung neuronaler Netze zur Werkzeugverschleißerkennung beim Fräsen**  
Edgar Fries, 200 Seiten, 106 Abb., 14 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5244-6

**Konzept zur lebenszyklusorientierten Verbesserung der Effektivität von  
Produktionseinrichtungen**  
Ulf Perlewitz, 162 Seiten, 75 Abb., 6 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5260-8

**Methoden zur Verbesserung der Fehlererkennung an Antriebsstrecken**  
Jörg Krüger, 170 Seiten, 101 Abb., 21 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5268-3

**Beitrag zur Entwicklung eines modularen TQM-Modells für das Krankenhauswesen**  
Bettina Hahne, 180 Seiten, 50 Abb., 5 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5290-X

**Steuerungsintegriertes Prozeßüberwachungssystem für Drehmaschinen**  
Ireneus Suwalski, 167 Seiten, 106 Abb., 13 Tab. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5286-1

**Montagesystemplanung und -steuerung für die variantenreiche Serienmontage**  
Kuo-Wen Chang, 148 Seiten, 59 Abb. 1999. Kartoniert. ISBN 3-8167-5294-2

**Werkstückspannsysteme aus faserverstärkten Kunststoffen für die Hochgeschwindigkeitsdrehbearbeitung**

Uwe Mette, 227 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5271-3

**Bildanalysesystem zur robusten Erkennung von Kennzeichen an Fahrzeugen**

Lutz Lohmann, 184 Seiten, 81 Abb., 18 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5534-8

**Planung und marktorientierter Betrieb von Demontagefabriken**

Holger Perlewitz, 180 Seiten, 72 Abb., 53 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5538-0

**Simulation von Produktentwicklungsprozessen**

Hans-Christoph Raupach, 150 Seiten, 60 Abb., 4 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5544-5

**Induktive Wegsensoren zur Überwachung und Regelung des Blecheinzugs beim Tiefziehen**

Ute Forstmann, 110 Seiten, 59 Abb., 2 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5547-X

**Konstruktive Berechnungsmodelle auf Basis Neuronaler Netze**

Alexander Carl, 135 Seiten, 53 Abb., 2 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5568-2

**Konzeption eines webbasierten Beratungs-Unterstützungs-Systems am Fallbeispiel einer PDM-Systemauswahl**

Toralf Kahlert, 140 Seiten, 50 Abb., 4 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5569-0

**Ein Ansatz zum Konstruieren mit Lösungsräumen**

Petrik Ziebeil, 155 Seiten, 44 Abb., 6 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5577-1

**Rapid Styling Validation - Berechnung und Simulation in der Konzeptphase der Produktentwicklung**

Yasmina Bock, 150 Seiten, 57 Abb., 5 Tab. 2000. Kartoniert. ISBN 3-8167-5592-5

**Einfluss der Relativbewegung auf den Prozess und das Arbeitsergebnis beim Planschleifen mit Planetenkinematik**

Thomas Ardel, 200 Seiten, 102 Abb., 19 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5609-3

**Beitrag zum Greifen von Textilien**

Jörg Stephan, 140 Seiten, 100 Abb., 20 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5622-0

**Integrierte Unternehmensplanung auf der Basis von Unternehmensmodellen**

Roland Jochem, 170 Seiten, 77 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5623-9

**Wege zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen**

Katrin Müller, 177 Seiten, 45 Abb., 46 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5884-3

**Business-Exzellenz als qualitätsorientierter Entwicklungsansatz für Gründungsaktivitäten**

Gunter Busch. 199 Seiten, 46 Abb., 4 Tab., 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6045-7

**Nutzung von Felddaten in der qualitätsgetriebenen Produktentwicklung und im Service**

Andreas Edler. 131 Seiten, 64 Abb., 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5902-5

**Package-Features für die Kommunikation in den frühen Phasen der Automobilentwicklung**

Karsten Gessner. 154 Seiten, 39 Abb., 6 Tab., 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5636-0

**System zur sicherheitsgerechten Konstruktion von Werkzeugmaschinen**

Michael Ising, 200 Seiten, 101 Abb., 5 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5890-8

**Verteilte Simulation des Materialversorgungsprozesses in Produktionsverbänden**  
Dirk Krützfeld, 141 Seiten, 78 Abb., 13 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6035-X

**Integration eines visuellen Lageregelungssystems für sechs Freiheitsgrade in Industrieroboter**  
Yong-Uk Kwon, 161 Seiten, 63 Abb., 9 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6044-9

**Magnetische Flüssigkeiten als Schmierstoff in hydrodynamischen Gleitlagern**  
Reiner Patzwald, 176 Seiten, 148 Abb., 27 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5892-4

**Beitrag zum flexiblen Greifen in der Demontage**  
Alexander Stenzel, 129 Seiten, 66 Abb., 6 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5885-1

**Strategische Unternehmensprozessgestaltung mit der Methode des Target Processing**  
Florian Weymar. 170 Seiten, 59 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-5898-3

**Beitrag zur Innovationsentwicklung in indonesischen Unternehmen durch kompetenzorientierte Netzwerkbildung**  
Agung Budi Utomo Halim. 206 Seiten, 73 Abb., 53 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6065-1

**Fehlerbeseitigungsmanagement unter Berücksichtigung der Plattformstrategie am Beispiel der Automobilindustrie**  
Daniel Schukraft. 137 Seiten, 87 Abb. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6079-1

**Auslegung magnetumgeformter Verbindungen durch Simulation**  
Stefan Mehnert. 141 Seiten, 118 Abb., 17 Tab. 2001. Kartoniert. ISBN 3-8167-6086-4

**Statistische Prozessregelung bei administrativen Prozessen im Rahmen eines ganzheitlichen Prozesscontrollings**  
Thomas Gerboth. 123 Seiten, 46 Abb., 12 Tab., 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6080-5

**Sichere synchrone Telekooperation zur Optimierung der verteilten Produktentstehung**  
Ralf Schultz. 150 Seiten, 61 Abb., 4 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6088-0

**Verbesserte Anpassungsfähigkeit des Änderungsmanagements durch komplementäre Selbstorganisation**  
Ralf Brunken. 134 Seiten, 52 Abb., 2 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6144-5

**Durchlaufzeitreduzierung durch Harmonisierung von Belegungszeiten und Einführung flexibler Prozeßteams**  
Reiner Friedland. 170 Seiten, 47 Abb., 13 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6139-9

**Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch eine Life Cycle Unit**  
Waldemar Grudzien. 170 Seiten, 75 Abb., 33 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6174-7

**Beitrag zum Variantenmanagement und zur Prozessoptimierung im Wagenkastenbau von Schienenfahrzeugen**  
Holger Schmidt. 170 Seiten, 84 Abb., 10 Tab. 2002. Kartoniert. ISBN 3-8167-6178-X

**Modellierung von Layout und Steuerungsregeln für die Materialfluss-Simulation**  
Markus Rabe. 222 Seiten, 135 Abb. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6262-X

**CVD-Diamant als Schneidstoff**  
Marcus Brücher. 187 Seiten, 87 Abb., 18 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6280-8

**Berechnungsmodell zur Ermittlung von Spannkraften bei Backenfuttern**  
Pingfa Feng. 213 Seiten, 203 Abb., 17 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6371-5

**Beitrag zur Entwicklung modularer Demontagewerkzeuge**  
Uwe Rebařka. 138 Seiten, 78 Abb., 28 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6381-2

**Beitrag zur voxelbasierten Simulation des fünfachsigen NC-Fräsens**  
Zengxuan Hou. 160 Seiten, 80 Abb., 3 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6401-0

**Aufbau hierarchiearmer Produktionsnetzwerke – Technologiestrategische Option und organisatorische Gestaltungsaufgabe**  
Carsten S. Schröder, 210 Seiten, 59 Abb., 1 Tab. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6398-7

**Sprache zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen**  
Roland Heimann, 158 Seiten, 55 Abb., 6 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6456-8

**Beitrag zur dynamischen Prozessplanung und Generierung von Steuerungssequenzen für flexible Demontagesysteme**  
Hyung-Ju Kim. 164 Seiten, 75 Abb., 19 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6559-9

**Öko-Effizienz durch Nutzenverkauf am Beispiel der Automobilindustrie**  
Gitta Vischer. 193 Seiten, 62 Abb., 42 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6561-0

**Applications of Subdivision Techniques in Product Development**  
Nele Gross. 136 Seiten, 51 Abb. 2003. Kartoniert. ISBN 3-8167-6576-9

**Werkzeuge zum impuls magnetischen Warmfügen von Profilen aus Aluminium- und Magnesiumlegierungen**  
Robert Hahn. 209 Seiten, 95 Abb., 18 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6642-0

**Ultraschallunterstütztes Quer-Seiten-Schleifen**  
Nikolai-Alexander Daus. 145 Seiten, 78 Abb., 5 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6657-9

**Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität von Ressourcen durch Anpassen von Mobiltelefonen**  
Bahadır Basdere. 208 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6662-5

**Informationstechnische Integration hybrider Demontagesysteme**  
Thomas Keil. 183 Seiten, 79 Abb., 15 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6688-9

**Soft Data Fusion for Computer Vision**  
Aureli Soria-Frisch. 242 Seiten, 118 Abb., 7 Tab. 2004. Kartoniert. ISBN 3-8167-6689-7

**Trennende Schutzeinrichtungen für Werkzeugmaschinen zur Hochgeschwindigkeitsbearbeitung**  
Jörg Bold. 220 Seiten, 99 Abb., 39 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6697-8

**Auslegung dünner Hartstoffschichten für Zerspanwerkzeuge**  
Karsten Klein. 172 Seiten, 88 Abb., 17 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6700-1

**Methode zur Komplexitätsreduzierung der Auftragssteuerung in der Elektronikmontage**  
Dietrich Fischer. 202 Seiten, 97 Abb., 6 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6729-X

**Sicherheitszentrierte Architektur für Internet-basierte Dienste im Maschinen- und Anlagenbau**  
Ralf Berger. 120 Seiten, 70 Abb., 16 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6777-X

**Methodische Entwicklung von modularen IT-Dienstleistungen**

Klaus Herbst. 219 Seiten, 63 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6778-8

**Flexible Integration von Rapid Prototyping Prozessketten in die Produktentwicklung**

Stefan Dreher. 139 Seiten, 54 Abb., 10 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6843-1

**Risikominimierung bei der Beschaffung investiver Dienstleistungen durch den Einsatz von Methoden des Qualitätsmanagements**

Marc Bockschecker. 195 Seiten, 36 Abb., 6 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6900-4

**Verfahren zum Einzelpunktlöten von elektrischen Anschlusskontakten mit getrennter Erwärmung von Lötstelle und Lot**

Andreas Frenzke. 140 Seiten, 69 Abb., 17 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6919-5

**Adaptive Modellierung und Simulation von Produktentwicklungsprozessen**

Johannes Voigtsberger. 174 Seiten, 58 Abb. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6929-2

**Konditionieren von Diamantschleifscheiben**

Frank Sroka. 229 Seiten, 111 Abb., 7 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6937-3

**Zustandsorientierte Instandhaltung von Standardkomponenten mit Life Cycle Units**

Alexander Buchholz. 200 Seiten, 99 Abb., 9 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6938-1

**Beitrag zur Gestaltung horizontaler Innovationskooperationen in Klein- und Mittelbetrieben am Beispiel Schienengüterverkehr**

Ulrich Kroß. 166 Seiten, 56 Abb., 11 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6962-4

**Verfahren und Systeme zur Demontage komplexer technischer Gebrauchsgüter**

Jens-Peter Härtwig. 242 Seiten, 108 Abb., 19 Tab. 2005. Kartoniert. ISBN 3-8167-6963-2

**Neue Einsatzmöglichkeiten von Ferrofluiden in technischen Systemen mit relativ zueinander bewegten Komponenten**

Nayim Bayat. 175 Seiten, 113 Abb., 19 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7014-2

**Wissensbilanzen für mittelständische Organisationen**

Kay Alwert. 181 Seiten, 65 Abb., 25 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7033-9

**Entwicklung eines lernfähigen Bildverarbeitungssystems unter Einsatz von Verfahren des Soft Computing**

Mario Köppen. 158 Seiten, 56 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7056-8

**Hochleistungsfräsen von Superlegierungen**

Eric Wiemann. 239 Seiten, 124 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7082-7

**Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Anpassungsprogrammplanung**

Carsten Franke. 220 Seiten, 82 Abb., 34 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7095-9

**Beitrag zur simulationsgestützten Planung von Demontagefabriken für Elektro- und Elektronikaltgeräte**

Markus Ciupek. 179 Seiten, 77 Abb., 26 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7112-2

**Management von Ingenieurkompetenzen im Spannungsfeld beruflicher Arbeitsteilung**

Matthias Patrick Meyer. 180 Seiten, 31 Abb., 7 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7127-0

**Approach of Integrated Order Scheduling and Flexible Resource Planning for Mass Customization**

Ingo Lümekemann. 193 Seiten, 38 Abb., 10 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7223-4

**Entwicklung von Hartmetallwerkzeugen für die Mikrozerspannung mit definierter Schneide**

Kai Schauer. 178 Seiten, 107 Abb., 15 Tab. 2006. Kartoniert. ISBN 3-8167-7245-5

**Informationssystemische Prozessorganisation mit sozioorientierter Transformation**

Dieter Schacher. 163 Seiten, 65 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7285-9

**Eigenschaften und Einsatzverhalten CVD-diamantbeschichteter Hartmetallwerkzeuge**

Rouven Kott. 166 Seiten, 84 Abb., 7 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7323-8

**Grundlagen und Prozessstrategien der Mikrofunkenerosion für die Bearbeitung von Rotationsbauteilen**

Sascha Piltz. 266 Seiten, 139 Abb., 27 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7345-0

**Verfahrensgrundlagen und Technologie des Hubschleifens mit viskosen Schleifmedien**

Hubert Szulczynski. 175 Seiten, 87 Abb., 13 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7379-5

**Modellierung und Analyse verteilter Entwicklungsprozesse für mechatronische Systeme**

Chris Biantoro. 174 Seiten, 102 Abb. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7406-8

**Beitrag zum Vereinzeln flächiger biegeschlaffer Bauteile**

Frank Szimmat. 177 Seiten, 106 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7424-2

**Kompetenzabhängiges Simulationsverfahren zur Optimierung von Produktentwicklungsprozessen**

Matthias Strebel. 132 Seiten, 33 Abb., 1 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7432-7

**Integriertes Benchmarking für kleine und mittlere Unternehmen**

Holger Kohl. 166 Seiten, 41 Abb., 19 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7439-6

**Informationsmanagement zur Planung und Verfolgung von Produktlebenszyklen**

Holger Jungk. 147 Seiten, 72 Abb., 5 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7461-7

**Beitrag zum wirtschaftlichen Betrieb von Recyclingnetzwerken**

Monica Vanegas. 174 Seiten, 65 Abb., 41 Tab. 2007. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7558-4

**Eine Ontologie-basierte Methode zur Entscheidungsunterstützung in der Produktentwicklung**

Hauke Arndt. 193 Seiten, 59 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7641-3

**Analyse der Effekte beim Trockeneisstrahlen**

Mark Claudius Krieg. 144 Seiten, 60 Abb., 27 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7625-3

**Optimierte Zulieferintegration in der Produktentwicklung durch Ad-hoc-Kooperationswerkzeuge**

Hendrik Gärtner. 166 Seiten, 61 Abb. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7655-0

**Zerspannsimulationslösungen für die Werkzeugkonstruktion und Prozessauslegung beim Fräsen**

Alexander Marc Mattes. 169 Seiten, 79 Abb., 20 Tab. 2008. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7847-9

**Aerodynamische Trenn- und Förderprozesse zur Steigerung der Demontageflexibilität bei Automobilkomponenten**

Stefano Consiglio. 154 Seiten, 71 Abb., 13 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

**Planung der Wiederverwendung von Elektro(nik)altgeräten**

Sebastian Kernbaum. 236 Seiten, 87 Abb., 19 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7966-7

**Verfahren zur ad hoc-Modellierung und -Simulation räumlicher Feder-Masse-Systeme für den Einsatz in Virtual Reality-basierten Handhabungssimulationen**

Jens Neumann. 226 Seiten, 106 Abb., 27 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7955-1

**Beeinflussung des Vorbehandlungszustandes der Substratrandzone durch Trockeneisstrahlen am Beispiel von Klebverbindungen**

Adil El Mernissi. 157 Seiten, 72 Abb., 21 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7980-3

**Beitrag zur Steigerung der Nutzenproduktivität durch Modularisierung von Produkten**

Marco Zettl. 236 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8167-7986-5

**Herstellung und Einsatz CVD-diamantbeschichteter Bohrgewindefräser**

Jens König. 188 Seiten, 65 Abb., 18 Tab. 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0025-2

**Akzeptanzförderung bei der Einführung von Wissensmanagement - Ein Methodenbaukasten für kleine und mittlere Unternehmen**

Ina Kohl. 178 Seiten, 30 Abb., 13 Tab., 2009. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0050-4

**Technisch-wirtschaftliche Bewertung von Flexibilität in Rohbauebenenlinien**

Arne Lambertz. 240 Seiten, 164 Abb., 10 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0117-4

**Charakterisierung und Auslegung der Grenzschicht PVD-beschichteter Schneidkeramiken.**

Tom Hühns. 179 Seiten, 72 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0132-7

**Virtuelle Rekonstruktion von Innenräumen basierend auf Messdaten von Tiefenkameras**

Alexander Sabov. 174 Seiten, 86 Abb., 10 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0144-0

**Ermittlung, Berechnung und Optimierung des strukturmechanischen Verhaltens am Beispiel von Fräsmaschinen**

Carsten Mense. 169 Seiten, 58 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0156-3

**Beitrag zur nachhaltigen industriellen Wertschöpfung durch multiattributive Bewertung von Montageanlagen**

Timo Fleschutz. 193 Seiten, 62 Abb., 8 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0171-6

**Vorgehensweise für Planung und Betrieb energieeffizienter Produktionssysteme**

Nils Weinert. 174 Seiten, 52 Abb., 16 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0173-0

**Semantic-Web-Wissensbank für Planungsprozesse bei der Wiederverwendung von Produktionsanlagen**

Robert Harms. 210 Seiten, 93 Abb., 11 Tab. 2010. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0180-8

**Einsatzverhalten genuteter CBN-Schleifscheiben mit keramischer Bindung beim Außenrund-Einsteichschleifen**

Mathias Kirchgatter. 173 Seiten, 85 Abb., 19 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0211-9

**Planung ingenieurwissenschaftlicher Qualifizierung mit Semantik-Web-Wissensbanken**

Carsten Reise. 178 Seiten, 61 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0217-1

**Development of an Intellectual Capital-Based Management System for Science Parks**  
Hamad Al Hashemi. 154 Seiten, 54 Abb., 7 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0218-8

**Adaptive physikbasierte Modelle für die interaktive Deformationssimulation in der Virtuellen Realität**

Ulrike Völlinger. 222 Seiten, 109 Abb., 25 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0273-7

**Beitrag zu verteilten technischen Innovationsprozessen unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitskriterien**

Semih Severengiz. 208 Seiten, 35 Abb., 15 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0232-4

**Hybride Interaktionstechniken des immersiven Skizzierens in frühen Phasen der Produktentwicklung**

Johann Habakuk Israel. 389 Seiten, 120 Abb., 26 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0330-7

**Depth Data based Determination of Gait Parameters of Subjects after Stroke for the Use in Clinical Gait Rehabilitation**

Jochen Radmer. 152 Seiten, 84 Abb., 14 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0332-1

**Integration von Modellkonzeption und Management der Unternehmensmodellierung**

Thomas Knothe. 190 Seiten, 48 Abb., 32 Tab. 2011. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0355-0

**Wissensgenerierung in hybriden Leistungsbündeln durch die Virtual Life Cycle Unit**

René Gegusch. 184 Seiten, 81 Abb. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0371-0

**Strategische Unternehmensentwicklung auf Basis immaterieller Werte in KMU**

Markus Will, 219 Seiten, 56 Abb., 31 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0376-5

**Modellbasierte Prozessauslegung des Druckfließlappens am Beispiel keramischer Werkstoffe**

Vanja Mihotovic, 166 Seiten, 65 Abb., 5 Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0390-1

**Schleifen von Hartmetall- und Vollkeramik-Schaftfräsern**

Christoph Hübert, 154 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0393-2

**A haptic control framework for end-effector based gait simulation interfaces and its application in patient-adaptive rehabilitation training**

Sami Hussein, 160 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0464-9

**Auditierung von Wissensbilanzen. Eine Methode zur Qualitätssicherung von Bilanzen des Intellektuellen Kapitals**

Wen-Huan Wang, 200 Seiten, viele Abb. und Tab. 2012. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0490-8

**Einsatzverhalten von PKD und Bor-dotiertem CVD-Diamant bei der Mikrofunkenerosion**

Markus Röhner, 224 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0497-7

**Effective Motion Design Applied to Energy-Efficient Handling Processes**

Tobias Brett, 205 Seiten, 84 Abb. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0511-0

**Fortschrittsbewertung von Fabrikplanungsprojekten**

Sven Glinitzki, 230 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0520-2

**Kompensation der Verlagerung an nachgiebigen Werkzeugmaschinengestellen am Beispiel von Fräsmaschinen für die Mikrobearbeitung**

Jörg EBmann, 164 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0565-3

**Approach for Integrating Predictive-Reactive Job Shop Scheduling with PLC-Controlled Material Flow**

Azrul Azwan Abdul Rahman, 168 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0622-3

**Product-Service Systems Enabling for Sustainable City Mobility**

Jialiang Hu, 167 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0632-2

**Integration optischer Messtechnik in Ultrapräzisionsmaschinen für die Korrekturbearbeitung beim Drehen mit Slow-Slide-Servo**

Martin Kurz, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0630-8

**Contribution to efficient water use and reducing environmental impact of wastewater in industry**

Chenqing Wang, 213 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0637-7

**Patientengerechte Gestaltung computerbasierter Anwendungen in der gerätegestützten, motorischen Therapie nach Schlaganfall**

Simone Schmid, 182 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0634-6

**Einfluss der Oberflächenstrukturierung und -texturierung eines Kunststoffsubstrats auf die Anhaftung von Zellen**

Quang Ut Huynh, 193 Seiten, viele Abb. und Tab. 2013. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0631-5

**Modellierung und Simulation des thermischen Verhaltens einer Werkzeugmaschine mit der Finite-Elemente-Methode**

Jiangmin Hu, 191 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0660-5

**Möglichkeiten und Grenzen des Strahlspanens mittels CO<sub>2</sub> Hochdruckstrahlen**

Martin Bilz, 170 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0661-2

**Nachhaltige Technologiepfade für unterschiedliche Entwicklungsniveaus**

Pia Gausemeier, 247 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0670-4

**Enabling sustainable value creation by engineering capacity building**

Sadiq Ahmad Muhammad Abd Elall, 161 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0687-2

**Verwendung von Traceability-Modellen zur Unterstützung der Entwicklung technischer Systeme.**

Grischa Beier, 378 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0681-0

**Effiziente Erfassung und Pflege von Traceability-Modellen zur Entwicklung technischer Systeme**

Asmus Figge, 311 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0705-3

**Steigerung der Wirtschaftlichkeit beim Mikrofräsen durch Schneidkantenpräparation mittels Tauchgleitlappen.**

Armin Löwenstein, 222 Seiten, viele Abb. und Tab. 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

**Integrated Engineering of Products and Services**

Patrick Müller, 366 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0549-3

**Konzeption und Realisierung einer Methode zur templategestützten Systementwicklung**

Simon Frederick Königs, 258 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0652-0

**Community-Based Design of Process Chains for Manufacturing and Recycling**  
Steffen Heyer, 189 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0731-2

**Werker-Assistenz und -Qualifizierung für manuelle (De-)Montage durch bild- und schriftgestützte Visualisierung am Arbeitsplatz**  
Aleksandra Barbara Postawa, 206 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert.  
ISBN 978-3-8396-0733-6

**Vereinfachung der Systemmontage von metalloptischen IR-Spiegelteleskopen**  
Sebastian Scheiding, 163 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0774-9

**Geschäftsmodelle der Wiederaufbereitung für Hersteller von Originalteilen**  
Henry Widera, 218 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0820-3

**Verfahren zur mechanischen Erzeugung periodischer nanooptischer Strukturen mit monokristallinen Diamantwerkzeugen am Beispiel von Blazegittern**  
Kurt Haskic, 196 Seiten, viele Abb. und Tab., 2014. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0859-3

**Absicherung des Innovationserfolgs unter Berücksichtigung des Open-Innovation-Ansatzes**  
Manuel Rothe, 184 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0861-6

**Steigerung der Nutzungspotenziale von CVD-diamantbeschichteten Werkzeugen**  
Fiona Sammler, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0906-4

**Prozessstrategien beim NC-Formschleifen mit Schleifstiften**  
Tiago Borsoi Klein, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0943-9

**Netzfreie Zerspanungssimulation mit der Finite-Pointset-Methode**  
Robert Gerstenberger, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0946-0

**Untersuchung des Einflusses von Dreh-, Drehfräs-, Glattwalz- sowie Schleifprozessen auf das tribologische Einsatzverhalten von Stahl am Beispiel des Rad-Schiene-Kontakts**  
Stefan Gebhard, 164 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0955-2

**Keramische Schafffräswerkzeuge für die Hochgeschwindigkeitsbearbeitung von Nickelbasis-Legierungen**  
Manuel Wacinski, 148 Seiten, viele Abb. und Tab., 2015. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0965-1

**Additive Fertigung von Nickelbasis-Superlegierungen mittels Laserstrahlschmelzens am Beispiel von Diamalloy 4004NS**  
Kamilla König-Urban, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0978-1

**Modellbasierte Prozessoptimierung für das Mikrofräsen**  
Frederik Felix Mahr, 234 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0986-6

**Quantitative Betriebsmittelbedarfsplanung für die getaktete Fließfertigung**  
Jakob Dinse, 158 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0951-4

**Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen Qualitätsmanagementsystems**  
Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0998-9

**Entscheidungsmethodik zur kompetenzbasierten Team-Organisation bei der Implementierung von Energiemanagementsystemen**  
Phillip Karcher, 240 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartoniert. ISBN 978-3-8396-0991-0

**Nutzenoptimierter Einsatz präventiver Qualitätsmethoden im Produktentstehungsprozess der Automobilindustrie**

Markus Heintzmann, 238 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-0993-4

**Entwicklung eines Vorgehensmodells zur Einführung eines globalen Qualitätsmanagementsystems**

Felix Meentken, 208 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartonierte. ISBN 978-3-8396-0998-9

**Qualitätsreferenzmodell für die Produktion von Unikaten und Kleinserien**

Dominik Rößle, 281 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016 Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1035-0

**Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlergebnis.**

Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1014-5

**Niedrigdimensionale Modelle zur Simulation des dynamischen Verhaltens von Werkzeugmaschinen unter Berücksichtigung der Pose.**

Jens Hermann Wintering, 207 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte.

ISBN 978-3-8396-0999-6

**Einfluss von Herstellungs- und Lagerungsfaktoren auf die Eigenschaften von Trockeneispellets und das Strahlergebnis.**

Simon Motschmann, 190 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1014-5

**Trockenfunkenerosives Feinbohren von Hochleistungswerkstoffen**

Tassilo-Maria Schimmelpfennig, 149 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte.

ISBN 978-3-8396-1060-2

**Nachhaltige Unternehmensentwicklung aus ressourcenorientierter Perspektive**

Ronald Orth, 388 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1062-6

**Verfahren zur schnellen, digitalen Modellbildung für Inspektions- und Reengineeringprozesse**

Hendrik Grosser, 385 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1077-0

**Prozessauslegung zum Schnellhubschleifen von Hochleistungskeramik**

Christoph Sammler, 205 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1064-0

**CO<sub>2</sub>-Schneeentstehung und deren Wirkung auf die Effekte beim CO<sub>2</sub>-Schneestrahlen**

Michael Kretzschmar, 171 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1065-7

**Einsatzverhalten nanocomposite-beschichteter PcBN-Werkzeuge für die Hartdrehbearbeitung**

Javier Alejandro Oyanedel Fuentes, 162 Seiten, viele Abb. und Tab., 2016. Kartonierte.

ISBN 978-3-8396-1081-7

**Kubisch-kristallines Bornitrid ohne Bindephase als Schneidstoff in der Ultrapräzisions-Zerspanung**

Julian Polte, 187 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1137-1

**Herstellung und Einsatz von PKD-Mikrofräswerkzeugen**

Mitchel Polte, 173 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1138-8

**Trockeneisstrahlen als Vorbehandlungsverfahren vor dem Galvanisieren**

El Mustapha Baira, 171 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartonierte. ISBN 978-3-8396-1157-9

**Umweltbewertung und Ökoeffizienz beim Metall-Schutzgasschweißen von  
Dickblechverbindungen**

Gunther Sproesser, 179 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1175-3

**Einflussfaktoren der Reinigung mit flüssigem Kohlendioxid auf fertigungsrelevante  
Materialeigenschaften medizintechnischer Kunststoffe**

Johannes Mankiewicz, 166 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1180-7

**Simulationsmodell als Basis zur Ableitung von Zerspanstrategien zur Reduzierung von  
thermischen Bearbeitungseinflüssen beim Hartdrehen**

Ivan Mitkov Ivanov, 166 Seiten, viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1201-9

**Adaptives Entwicklungstool zur intelligenten Konfigurierung von Condition-Monitoring-  
Algorithmen**

Abdelhakim Laghmouchi, 176 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1222-4

**Die-Sinking EDM of High Aspect Ratio Cavities in Nickel-Base Alloy**

David Carlos Domingos, 249 S., viele Abb. und Tab., 2017. Kartoniert. ISBN 978-3-8396-1163-0

Eine gezielte Strukturierung von tribologisch beanspruchten Oberflächen kann zu einer Verbesserung der Kontaktbedingungen und somit zu einer Steigerung ihrer Lebensdauer führen. Komplexe Funktionsflächen wie die Zahnflanke werden nach der Wärmebehandlung mittels Schleifprozessen nachbearbeitet und im Anschluss häufig einer Endbearbeitung unterzogen, um den Verschleiß der Zahnräder im Einsatz zu reduzieren. Als zentrale Fragestellung dieser Arbeit wurde untersucht, in welcher Weise sich durch Schleifverfahren die Oberflächenstruktur von unterschiedlichen Funktionsflächen beeinflussen lässt. In simulationsbasierten und experimentellen Untersuchungen konnte ein umfangreiches Wissen über die Zusammenhänge zwischen dem Konditionierprozess, den Stellgrößen des kinematisch modulierten Schleifprozesses und den Arbeitsergebnissen sowie dem Einsatzverhalten der strukturierten Oberflächen erarbeitet werden. Die Analyse der durchgeführten Versuche dokumentiert eindrucksvoll, wie sich sowohl die Oberflächenkennwerte als auch die -struktur unter Einsatz geeigneter Stellgrößen der kinematischen Modulation verbessern lassen, die in vorteilhaften Kontaktbedingungen beim Einsatz resultieren können.

ISBN 978-3-8396-1235-4



9

783839

612354

**FRAUNHOFER VERLAG**